

Tagungsband

Aqua Urbanica

2022 | 14./15. November 2022
Glattfelden, Schweiz

«Grün statt grau.»

Mit Blau-Grünen Infrastrukturen gemeinsam
die Siedlungsentwässerung der Zukunft planen.



V S A

www.aqua-urbanica.org

eawag
aquatic research

Impressum

Der vorliegende Tagungsband beinhaltet die Beiträge der D-A-CH Veranstaltungsreihe Aqua Urbanica im Jahr 2022, welche gemeinsam mit dem VSA von der Abteilung für Siedlungswasserwirtschaft der Eawag vom 14.11.-15.11.2022 im Seminarhotel Riverside veranstaltet wurde. Der Inhalt der Beiträge unterliegt der Eigenverantwortung der Autorinnen und Autoren. Die redaktionelle Bearbeitung erfolgte durch Andy Disch und Jörg Rieckermann.

PROGRAMMKOMITEE

Eawag/ETH Zürich: Max Maurer und Jörg Rieckermann, TU Graz: Dirk Muschalla und Günter Gruber, TU Kaiserslautern: Ulrich Dittmer und Christian Scheid, Universität Innsbruck: Wolfgang Rauch und Manfred Kleidorfer, OST Ostschweizer Fachhochschule Rapperswil: Michael Burkhardt und Christian Graf, TU München: Brigitte Helmreich und Philipp Stinshoff

ORGANISATIONSKOMITEE

Selita Telli (VSA), Noemi Probst und Max Maurer (ETH Zürich), Andy Disch und Jörg Rieckermann (Eawag)

Urheberrecht und Lizenzierung

Für alle Artikel, die in dem Tagungsband der Aqua Urbanica veröffentlicht werden, liegt das Urheberrecht bei den Autor:innen. Die Artikel sind unter einer **Open Access Creative Commons CC BY 4.0-Lizenz** lizenziert, was bedeutet, dass jeder den Artikel kostenlos herunterladen und lesen kann. Darüber hinaus darf der Artikel wiederverwendet und zitiert werden, sofern die veröffentlichte Originalversion zitiert wird. Diese Bedingungen ermöglichen eine maximale Nutzung und Veröffentlichung der Arbeit und stellen gleichzeitig sicher, dass die Autor:innen eine angemessene Anerkennung erhalten.



Eine Beispiel-Zitierung könnte sein:

Buss, R., Gresch, M., Flury, R., Meier, A.G. und Muff N. (2022) Bewertung der hydraulischen Leistungsfähigkeit von Kanalnetzen - die neue VSA Empfehlung. In Disch, Andy & Rieckermann, Jörg (Eds.), "Grün statt grau" Tagungsband der Aqua Urbanica 2022 Konferenz, Glattfelden 14.-15. November 2022, Eawag, Abteilung für Siedlungswasserwirtschaft.

Titelbild

Bild [«skyscraper-building-complex-1697170»](https://www.pexels.com/photo/skyscraper-building-complex-1697170/) von [Alexa](https://www.pexels.com/user/1234567890/) from [Pixabay](https://www.pexels.com/).

Sponsoren



Ihr Partner für Stadt-
und Siedlungsentwässerung
seit über 30 Jahren

Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie GmbH

itwh GmbH
Engelbosteler Damm 22
30167 Hannover
www.itwh.de



«Call for Abstracts»

Aqua Urbanica: 14./15. November 2022

Grün statt Grau

Mit Blau-Grünen Infrastrukturen gemeinsam die Siedlungsentwässerung der Zukunft planen

"Schwammstadt", "Grüne Infrastruktur", "WSUD", "LIDs", etc.. Es existieren viele Begriffe für das selbe Konzept: den Wasserhaushalt in der Stadt naturnaher zu gestalten. Aber auch um urbane Hitzeinseln zu reduzieren sind diese Konzepte wichtig. Allerdings wissen wir oft nicht, wie wir sie am besten in bestehende Planungen integrieren können. **An der Aqua Urbanica 2022 wollen wir deshalb schwerpunktmässig diskutieren, wie die Siedlungsentwässerung der Zukunft entworfen und realisiert werden kann.**

Wir möchten an konkreten Beispielen zeigen, wie Blau-Grüne Infrastrukturen sich in die aktuellen und langfristigen Planungsprozesse integrieren lassen. Damit soll eine Brücke geschaffen werden zwischen den vielfältigen Bedürfnissen und Randbedingungen des Siedlungsraumes und dem aktuellen Wissensstand zum guten und sicheren Umgang mit Regenwasser im deutschsprachigen Raum. Weitere wichtige Themen sind das Ausloten von Wissenslücken, Minimierung der Folgen von extremen Niederschlägen und Hitzewellen, die Multifunktionalität Blau-Grüner Infrastrukturen, digitale Lösungen, die ganzheitliche Leistungsbeurteilung der Siedlungsentwässerung, sowie die Übertragung von wissenschaftlichen Erkenntnissen in neue Vollzugshilfen und den praktischen Umgang mit existierenden Regelwerken.

Es werden sowohl Beiträge aus dem planerischen und dem betrieblichen Umfeld, als auch von Aufsichtsbehörden, Ausrüster- und Herstellerfirmen und aus der Wissenschaft angestrebt. Ergebnisse von praktischen Fallstudien werden sehr begrüsst. Ziel ist ein breiter Meinungs- und Erfahrungsaustausch.

Einreichung von Abstracts und Kurzbeiträgen

Abstracts können in deutscher Sprache für Plattform- oder Posterpräsentationen eingereicht werden. Sie sollten auf zwei DIN A4-Seiten begrenzt sein und Abbildungen, Tabellen und einige wichtige Referenzen enthalten. Die Abstracts werden von den Mitgliedern des Scientific Board und externen Fachleuten begutachtet und zur Plattform- oder Poster-Präsentation empfohlen. Die Einreichung erfolgt per email an aqua-urbanica.2022@eawag.ch mit ABSTRACT in der Betreffzeile. Alle Autoren der akzeptierten Abstracts (sowohl für Vorträge und Poster) werden anschliessend gebeten, einen Kurzbeitrag (ca. 5 Seiten) einzureichen. Eine Auswahl der Originalarbeiten wird in einer Sonderausgabe der Fachzeitschrift «Aqua und Gas» veröffentlicht.

Wichtige Daten:

01. Februar 2022	Call for Abstracts
01. Mai 2022	Einsendeschluss für Abstracts
16. Juni 2022	Benachrichtigung der Autoren
30. Juni 2022	Finales Programm
03. Juli 2022	Start Anmeldung
15. Sept. 2022	Einsendeschluss für Kurzbeiträge
14./15. November 2022	Konferenz

Das Scientific Board der Aqua Urbanica

Eawag-ETH Zürich: Max Maurer, Jörg Rieckermann
TU Kaiserslautern: Ulrich Dittmer, Christian Scheid
Universität Innsbruck: Wolfgang Rauch, Manfred Kleidorfer

TU Graz: Dirk Muschalla, Günter Gruber
OST: Michael Burkhardt, Christian Graf
Universität München: Brigitte Helmreich, Philipp Stinshoff



www.aqua-urbanica.org

Tagungsort: Spinnerei-Lettenstrasse 2, CH-8192 Zweidlen-Glattfelden

Sekretariat: VSA, Europastrasse 3, Postfach, CH-8152 Glattbrugg, Tel. +41 (0)43 343 70 70, Fax +41 (0)43 343 70 71, sekretariat@vsa.ch

Programm

1. Tag, Montag, 14. November 2022

A - BGI Planungsprozess	Moderation: Max Maurer
Projekt Schwammstadt	Silvia Oppliger
Vom Plan zur Tat – Wege und Beispiele wie klimaangepasste Innenentwicklung umgesetzt werden kann	Maren Peter
Konkrete Beispiele aus der Planung von BGI (international)	Tobias Baur
Konkrete Beispiele aus der Planung von BGI (CH), Planungsprozesse, beteiligte Akteur*innen, Zielkonflikte und Synergien	Cordula Weber
Posterflash: Poster 1 - 8	
Stadt Zürich: Planung und Umsetzung von Blau-Grüner Infrastruktur (BGI) im Kontext der Hitzeminderung	Brigitte Kisseleff
Posterflash: Poster 9 - 21	
B - Wasserhaushalt und Klima	Moderation: Günter Gruber
Klimaanpassung im Wohnungsbau: Planung der blau-grünen Infrastruktur unter Beachtung des lokalen Wasserhaushaltes	Lea Rosenberger
Wasserbewusste Entwicklung des Oxford-Quartiers in Münster	Birgitta Hörnschemeyer
Untersuchung der Auswirkungen verringerter Wasserverfügbarkeit auf bioklimatische Bedingungen unter Berücksichtigung verschiedener Klimaszenarien	Yannick Back
C - Bäume und Boden	Moderation: Wolfgang Rauch
Anwendung des Schwammstadtprinzips für Bäume mit dem Dualen Tiefbeet PLUS im öffentlichen Raum	Daniel Zimmermann
Multifunktionale Versickerungsmulden im Siedlungsraum – Optimierung der Bepflanzung durch heimische Arten	Patrizia Eben
Datenbasierte Evaluierung hydrologischer und gesellschaftlicher Potenziale der Schwammstadt für Stadtbäume	Anna Zeiser
D - Gründächer	Moderation: Ulrich Dittmer

Retentions Gründächer als multifunktionale blau-grüne Infrastrukturen – Ergebnisse eines Langzeit-Monitorings in Hamburg	Michael Richter
Gründach ist nicht gleich Gründach – Vergleich der klimatologischen Effekte unterschiedlicher Gründachsysteme	Dominik Gössner
Optimierung des urbanen Wassermanagement durch parametrische Planung eines nachhaltigen Flachdaches	Theresa Fink

2. Tag, Dienstag, 15. November 2022

E - Umgang mit Starkregen	Moderation: Jörg Rieckermann
Bewertung der hydraulischen Leistungsfähigkeit von Kanalnetzen: Die neue Richtlinie DWA-A 118	Klaus Krieger, Lothar Fuchs
VSA Empfehlung «Hydraulische Beurteilung in der Siedlungsentwässerung: Überprüfung von Entwässerungssystemen und Umgang mit Oberflächenabfluss»	Rahel Buss, Anna-Gesa Meier
Bewertung der neuen Regelwerke aus Sicht Österreichs/der Wissenschaft	Dirk Muschalla
Einfluss von Untergrundstrukturen in der 1D/2D Überflutungsmodellierung von urbanen Einzugsgebieten mit Hanglage	Martina Hauser
Verbesserungen und Validierung eines stochastischen Niederschlagsgenerators für städtische hydrologische Anwendungen in der Schweiz	Lauren Cook
F - Digitale Werkzeuge	Moderation: Michael Burkhardt
Optimierungs-Toolkit für Planung und Design von nachhaltigen Stadtentwässerungssystemen	Ralf Habermehl
Einflüsse auf die Kalibrierbarkeit urbanhydrologischer Modelle	Karim Sedki
Ein immissionsbasiertes Bewertungstool zur Berechnung des Potentials und zur konkreten Planung des Anschlusses urbaner Flächen an die Trennkanalisation	Malte Zamzow
"RICHI" - der virtuelle Kanalnetzmitarbeiter zur Verbesserung der Datenqualität, des Unterhalts und des Betriebs	Andy Disch

G - Emissionen und Gewässerbelastung	Modertion: Brigitte Helmreich
Strassenräume entsiegeln und blau-grün gestalten	Michael Burkhardt
Methodische Untersuchungen zur Korngrößenverteilung von verkehrsbürtigen Partikeln in Niederschlagsabflüssen	Eva Heinz
Strategische Planung von blau-grünen Infrastrukturen zur Verringerung der Gewässerbelastung durch Mischwasserüberläufe	Franziska Knoche
Behandlung von Regenwasser im Siedlungsraum - Schadstoffrückhalt unter besonderer Berücksichtigung von organischen Spurenstoffen	Rudolf Töws

Posterpräsentationen

Till Jaworski	Von der gesamtstädtischen Erfassung und Bilanzierung alternativer urbaner Wasserressourcen... bis zur Planung von Betriebswasserspeichern auf Quartiers-ebene
Anna-Gesa Meier	Natürlicher Wasserhaushalt und Umgang mit Oberflächenabfluss im Viererfeld/Mittelfeld, Bern - Vom Masterplan zur Massnahme
Paul Schütz	Bewertung der Wirksamkeit einer realistischen wassersensiblen Planung in einem Stadtumbaugebiet in Berlin
Katharina Kearney	Neue Wege zur Konsensfindung in der Transformation der Siedlungswasser- und Grünflächenbewirtschaftung zur Klimawandelanpassung
Katharina Schulthess	Planungsinstrument "Potenzialstudie Schwammstadt"
Marcel Lüthi	Quartierpark Areal Thurgauerstrasse, Zürich
Katharina Schulthess	Beispielsammlung Guter Umgang mit Regenwasser
Henrike Walther	Mit duktilen Gussrohren und Steinwolle zu einem besseren Stadtklima
Giovan Battista Cavadini	Verminderung des Mischwasserüberlaufs durch Blau-Grüne Infrastruktur: Szenarien in einem zukünftigen Klima
Philipp Stinshoff	Multifunktionale Versickerungsmulden im Siedlungsraum - Optimierung der bewachsenen Bodenzone
Anna Zeiser	Realisierung der Schwammstadt für Stadtbäume mit wissenschaftlicher Begleitung im Leonhardgürtel in Graz
Fabian Funke	Betriebsstörungen bei Anlagen der Siedlungsentwässerung und deren Einfluss auf urbane Überflutungen
Benjamin Burrichter	KI-basierte Vorhersage kanalinduzierter Überflutungen
Adrian Sigrist	Quantifizierung der Auswirkungen von Schwammstadtelementen auf die Abflussganglinie bei Starkregensimulationen
Juliana Koltermann da Silva	Radarbasiertes Kurzzeit-Niederschlagsvorhersagemodell von Starkregen in KIWaSuS
Michael Burkhardt	Simulierter Feldtest zur Leistungsprüfung von technischen Adsorberanlagen
Claus Huwe	Untersuchung des Oberbodens einer mittel- bis hochbelasteten Grünmulde
Pablo Alberto Vega Garcia	Modellierung des Verbleibs von Bioziden und ihren Transformationsprodukten bei der Versickerung der Abflüsse von mit Mörtel und Putz bedeckten Fassaden
Viviane Furrer	Monitoring organischer Mikroverunreinigungen in Mischwasserüberläufen mit einer mobilen HRMS-Plattform

VSA-Projekt Schwammstadt – eine Plattform für die Förderung eines klimaangepassten Regenwassermanagements in der Schweiz

S.Oppliger¹, S.Hasler¹

1 Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute (VSA), Europastrasse 3, 8152 Glattbrugg, Schweiz

Kurzfassung: Bedingt durch den Klimawandel werden ausgeprägte Hitzeperioden und intensive Starkregen in Zukunft häufiger auftreten. Gemeinden und Städte sind aufgefordert, das Wassermanagement und die Infrastruktur anzupassen und neu auszurichten. Der Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute VSA will mit seiner strategischen Initiative «Schwammstadt» konkrete Hilfestellungen und Standards erarbeiten und die Gemeinden und Städte in der klimaangepassten Ausgestaltung der Zukunft unterstützen.

Key-Words: wassersensible Stadtentwicklung, interdisziplinäre Zusammenarbeit, integrierte Planungsprozesse

1 Hintergrund zur strategischen Initiative des VSA

Seit etwa dreißig Jahren steigen die Temperaturen in der Schweiz zweimal so schnell wie im weltweiten Durchschnitt. Weil diese Entwicklung weiterläuft, ist mit ausgeprägteren Hitzeperioden zu rechnen. Zwar wird kein genereller Mangel an Wasser herrschen, aber je nach Region und Jahreszeit kann es knapp werden – umgekehrt führt heftigerer Regen lokal zu mehr Überschwemmungen. Das sind die inzwischen allgemein bekannten Fakten und Prognosen [1].

Mehrere Schweizer Städte gehen bereits neue innovative Wege, um besser mit den Auswirkungen des Klimawandels fertig zu werden. Die kleinen bis mittleren Gemeinden in den breiten Agglomerationsgürteln hingegen wissen häufig noch nicht, wie sie die steigenden Herausforderungen angehen und meistern sollen.

Deshalb hat der Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute VSA gemeinsam mit anderen Partnern die strategische Initiative «Schwammstadt» lanciert, mit dem Ziel konkrete Hilfestellungen und Standards erarbeiten und die Gemeinden und Städte in der klimaangepassten Ausgestaltung der Zukunft zu unterstützen [4]. Diese baut auf die gute Übersicht über vorhandene Grundlagen sowie mögliche Strategien und Maßnahmen zu einer klimaangepassten Siedlungsentwicklung auf, die das Schweizer Bundesamt für Umwelt mit dem 2022 publizierten Bericht «Regenwasser im Siedlungsraum» [2] und dem bereits 2018 erschienenen Bericht «Hitze in Städten» [3] erstellt hat.

2 Organisation

Die wassersensible Siedlungsentwicklung gelingt, wenn von Beginn weg alle an einem Strang ziehen – es ist eine Gemeinschaftsaufgabe schlechthin. Dies betrifft nicht nur die interdisziplinäre Zusammenarbeit aller Ressorts in den Gemeinden, sondern auch die Zusammenarbeit der Planer aller Fachdisziplinen – eine ehrgeizige Anforderung. Der VSA will mit der Schwammstadtstrategie dazu beitragen, dass alle Akteure auf ein gemeinsames Ziel hinarbeiten und einen integrierten Planungsprozess etablieren, bei denen das Wassermanagement von Beginn weg in die Siedlungs- und Freiraumplanung integriert ist.

2.1 Interdisziplinäre Umsetzung

Um dies sicherzustellen wurde das Projekt bewusst nicht als reines VSA-Projekt aufgelegt, sondern fachübergreifend mit dem Einbezug einer breiten Palette an Akteuren. Die Projektoberleitung und Aufsicht wird durch den VSA gemeinsam mit dem Bundesamt für Umwelt BAFU, der Präventionsstiftung der Kantonalen Gebäudeversicherungen PS, dem Verband kommunaler Infrastrukturen SVKI und dem Schweizerischen Ingenieur- und Architektenverein SIA wahrgenommen. Eine breit aufgestellte Begleitgruppe, in der alle Akteure eingebunden sind, definiert, welche Projekte umgesetzt werden, welche Leistungen zu erbringen sind und unterstützt maßgebend die Kommunikation und Verbreitung.



Abbildung 1: Projektorganisation

3 Projektstand

An der Startsituation der Begleitgruppe Mitte März 2022 fand ein erster Austausch zwischen allen Akteuren statt. Es wurden etwa zwanzig unterschiedliche Projektideen diskutiert und priorisiert. Aufgrund dieser Auslegeordnung hat die Projektleitung des VSA im Anschluss die Projektideen nach Themenbereichen zusammengefasst und die prioritärsten Projekte konkreter ausformuliert, welche nun angegangen werden [5]. Nachfolgend werden die drei Themenbereiche vorgestellt.

3.1 Sensibilisierung und Bildung

Dieser Themenbereich umfasst vier Standbeine:

- **Aus- und Weiterbildung:** Die wasserbewusste Siedlungsentwicklung ist eine interdisziplinäre Aufgabe. Damit die Zusammenarbeit gelingt, muss eine gemeinsame Sprache über alle Fachbereiche hinweg gefunden und fächerübergreifende Basiskenntnisse vermittelt werden. Dazu soll einerseits die breite Palette an bestehenden Bildungsangeboten aufgezeigt und andererseits ein gezieltes Ausbildungs- und Weiterbildungsangebot aufgebaut werden, um bestehende Lücken zu füllen. In einem ersten Schritt werden drei Stossrichtungen verfolgt: Fächerübergreifende Inputworkshops in den Grundausbildungen der verschiedenen Akteure (Architekten, Raumplaner, Ingenieure), Aufbau eines modularen Kurses «Fachperson Schwammstadt» sowie eine modulare Workshop-Toolbox für abteilungsübergreifende Weiterbildungen innerhalb einer öffentlichen Verwaltung.
- **Erfahrungsaustausch:** Das Projekt sieht die Schaffung einer Plattform für den Wissensaustausch in Form von ERFAs, Webinaren, Projektbesichtigungen vor. Erste Webinare sollen bereits in der zweiten Hälfte 2022 durchgeführt werden.
- **Bereitstellung von guten Beispielen:** Gute Beispiele werden in attraktiver Form aufbereitet und mit Links zu weiterführenden Dokumenten und Angaben ergänzt. Dabei soll den Erfolgsfaktoren aber auch den Hemmnissen bei der Umsetzung ein besonderes Augenmerk gewidmet

werden. Zudem sollen die Beispiele regelmässig einer Erfolgskontrolle und Aktualisierung unterzogen werden, damit alle von den laufend gewonnenen Erkenntnissen in diesem doch relativ neuen Bereich profitieren können.

- **Öffentlichkeitsarbeit:** Das Bewusstsein in der Bevölkerung für blau-grüne-Infrastrukturen und deren Nutzen für die Anpassung an den Klimawandel soll gestärkt werden. Dazu sollen einerseits innerhalb des Schwammstadt-Netzwerkes erarbeitete Werkzeuge und Unterlagen für die Öffentlichkeitsarbeit von Gemeinden bereitgestellt werden (z.B. interaktive Ausstellungsmo- delle, Merkblätter, Filme u.ä.) und andererseits gezielt etablierte Anlässe zur Sensibilisierung genutzt werden.



Abbildung 2: Die Begleitgruppe Schwammstadt priorisierte die Themen «Sensibilisierung und Bildung», «Grundlagen und Rahmenbedingungen» sowie «Umsetzung und Kontrolle».

3.2 Grundlagen und Rahmenbedingungen

Zur Umsetzung und Förderung eines klimaangepassten Regenwassermanagements existieren zwar etliche wissenschaftliche Grundlagen. Die Übersetzung in praxistaugliche Ansätze und die Anpassung an die schweizerischen Rahmenbedingungen ist hingegen noch verbesserungsfähig. Dabei kann zwischen zwei Ebenen unterschieden werden:

- **Behörden:** Der Bund empfiehlt in seinem Bericht «Regenwasser im Siedlungsraum» die Erarbeitung einer kommunalen Regenwasserstrategie und die frühzeitige Erstellung eines Regenwasserkonzepts bei Sondernutzungsplanungen, sowie die Anpassung der bestehenden Planungswerkzeuge wie z.B. der GEP. Zur Verankerung der Planungsgrundsätze und Ziele in den verschiedenen Planungswerkzeugen will das VSA-Projekt Musterartikel zusammenstellen, die

Thematik in die laufende Aktualisierung des GEP-Musterpflichtenheftes einfließen lassen und zur Klärung des rechtlichen Rahmens bei übergeordneten, parzellenübergreifenden Lösungen beitragen.

- **Planer:** Planer benötigen für die Planung und Umsetzung von Schwammstadt-Massnahmen Werkzeuge, um den Nutzen der verschiedenen Varianten konkret prüfen zu können. Das VSA-Projekt will in Zusammenarbeit mit den Hochschulen und Planern bestehende Werkzeuge prüfen, bei der Aufbereitung der nötigen Grundlagen für die Anwendung in der Schweiz (z.B. Klimadaten) unterstützen und die Werkzeuge den Planern vermitteln.

3.3 Umsetzung und Kontrolle

Beim Bau von blau-grünen Infrastrukturen stellen sich konkrete Fragen zur Materialwahl, dem Unterhalt und der Wirkungskontrolle. In der Schweiz vorhandene Bauelemente (durchlässige Beläge, Baummulden, Baumsubstrate etc.) sollen in einer Liste mit Angaben zu Vor- und Nachteilen bzw. Einsatzmöglichkeiten, Unterhalt usw. zusammengestellt werden. Zudem soll aufgezeigt werden, wie der Unterhalt/Werterhalt der grün-blauen Infrastrukturen auf lange Frist gewährleistet werden kann.

4 Literatur

- [1] Bundesamt für Umwelt (BAFU) (2020): Klimawandel in der Schweiz. Indikatoren zu Ursachen, Auswirkungen, Massnahmen. Umwelt-Zustand Nr. 2013: 105 S.
- [2] Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bundesamt für Raumentwicklung (ARE) (2022): Regenwasser im Siedlungsraum. Starkniederschlag und Regenwasserbewirtschaftung in der klimaangepassten Siedlungsentwicklung. Umwelt-Wissen Nr. 2201: 114 S.
- [3] Bundesamt für Umwelt (BAFU) (2018): Hitze in Städten. Grundlage für eine klimaangepasste Siedlungsentwicklung. Umwelt-Wissen, Nr. 1812: 108 S.
- [4] S. Hasler, P. Sicher (2021): Projekt „Schwammstadt“. Für ein klimaangepasstes Wassermanagement im Siedlungsgebiet. Aqua & Gas N°10, 2021, 14-19.
- [5] S. Oppliger (2022): Projekt Schwammstadt gestartet - Teilprojekte in Umsetzung. Aqua & Gas N°7+8, 2022, 118-119.

Korrespondenz:

Silvia Oppliger
 VSA, Europastrasse 3, 8152 Glattbrugg
 +41 44 500 37 70
 silvia.oppliger@vsa.ch

Konkrete Beispiele aus der Planung von BGI (international)

Prof. Tobias Baur¹

OST – Ostschweizer Fachhochschule, ILF Institut für Landschaft und Freiraum,
 Oberseestrasse 10, 8640 Rapperswil, Schweiz

Kurzfassung: Der Klimawandel mit seinen Auswirkungen zwingt uns zum Umdenken bei der Gestaltung urbaner Freiräume. Wir stehen heute vor grossen Herausforderungen. Zum einen die Klimakrise mit ihren Auswirkungen in Bezug auf Starkregenereignisse und Hitzeinseln in der Stadt und zum anderen die Biodiversitätskrise. Dieser Vortrag stellt internationale Projekte des Büros Henning Larsen (ehemals Ramboll Studio Dreiseitl) vor, welche durch den Einsatz von Blau-Grüner Infrastruktur Lösungen aufzeigen, um in Teilen diesen Veränderungen entgegenzuwirken.

Key-Words: Blau-Grüne Infrastruktur, Klimaanpassung, Hitzeminderung, Starkregen Ereignisse, Landschaftsarchitektur, Biodiversität

1 Gebaute Schwammstadtprojekte

Im Folgenden werden drei gebaute Beispiele von Schwammstadtprojekten in verschiedenen Massstäben gezeigt: Den Cloudburst Masterplan in Kopenhagen, ein Schwammstadtprojekt in Ostfildern sowie Kampung Admiralty, in welchem BGI und Architektur verschmelzen.

1.1 Cloudburst Masterplan Kopenhagen, Dänemark

Nach den sintflutartigen Regenfällen vom 2. Juli 2011, beauftragte die Stadt Kopenhagen Rambøll damit, für acht Regenwassereinzugsgebiete – zusammen 35 Quadratkilometer – einen Hochwasserschutz-Masterplan zu erstellen. Die erste Flutrisikoanalyse berücksichtigte zum einen die Auswirkungen von Starkregen, zum anderen steigende Meeresspiegel. So konnten die am stärksten betroffenen Einzugsgebiete bestimmt werden. Eine Kosten-Nutzen-Analyse half bei der Entscheidung, welche Investitionen die größtmögliche Sicherheit garantieren. So konnte eine maximale Anstauhöhe (das sogenannte Service Level) von 10 cm Wasser auf den Straßen bei einem Jahrhundertregen (ausgelegt für das Jahr 2100, also inklusive 30% Zunahme gegenüber heute) vereinbart werden.

Zwei Masterplan-Varianten wurden entwickelt. Beide basieren auf zentralen städtebaulichen Erkenntnissen: Die Hauptverkehrsadern verlaufen sternförmig zum Kopenhagener Rathaus hin. Diese Boulevards sind durch den Verkehr stark belastet und gleichzeitig wichtige übergeordnete Einkaufsstrassen mit räumlich wenig Spielraum. Topographisch liegen sie auf einer höheren Ebene, sodass sie bei der Überflutung wenig betroffen waren. Zwischen diesen Hauptverkehrsachsen befinden sich zweitran-gige Strassen von eher lokaler Bedeutung (Supermärkte, Schulen, Wohnungen usw.). Diese Nebenstrassen weisen einen entscheidenden Vorteil auf: Sie sind viel breiter als die primären Boulevards und eignen sich bestens für die Umstrukturierung zu sogenannten Wolkenbruch-Boulevards. Das Ziel: Sie sollen das Flutwasser an der Oberfläche ableiten, während die alltäglichen Niederschlagsmengen über neu zu schaffende Grünräume zur dezentralen Bewirtschaftung gebracht werden. Dieser Plan bietet daneben vielfältige Synergie-Effekte durch die Optimierung von ökologischen und sozialen Aspekten: Grünräume sorgen für eine merkliche Verbesserung der Lebensqualität und sind neben der Erholungsfunktion wichtig für Erhalt und Förderung der Biodiversität. Die Strömungsanalyse von Rambøll und die Topographie deuten darauf hin, dass diese im dänischen als "Skybrudsboulevards" bezeichneten Wolkenbruch-Boulevards den Spuren von alten Flusssystemen der Stadt folgen. Sie ziehen sich finger-artig durch das Stadtgebiet und treffen sich an den natürlichen, topographischen Tiefpunkten – sprich

– an den ursprünglich tieferliegenden Stadtseen. Von dort soll das Flutwasser durch einen Tunnel zum Hafen geleitet werden.

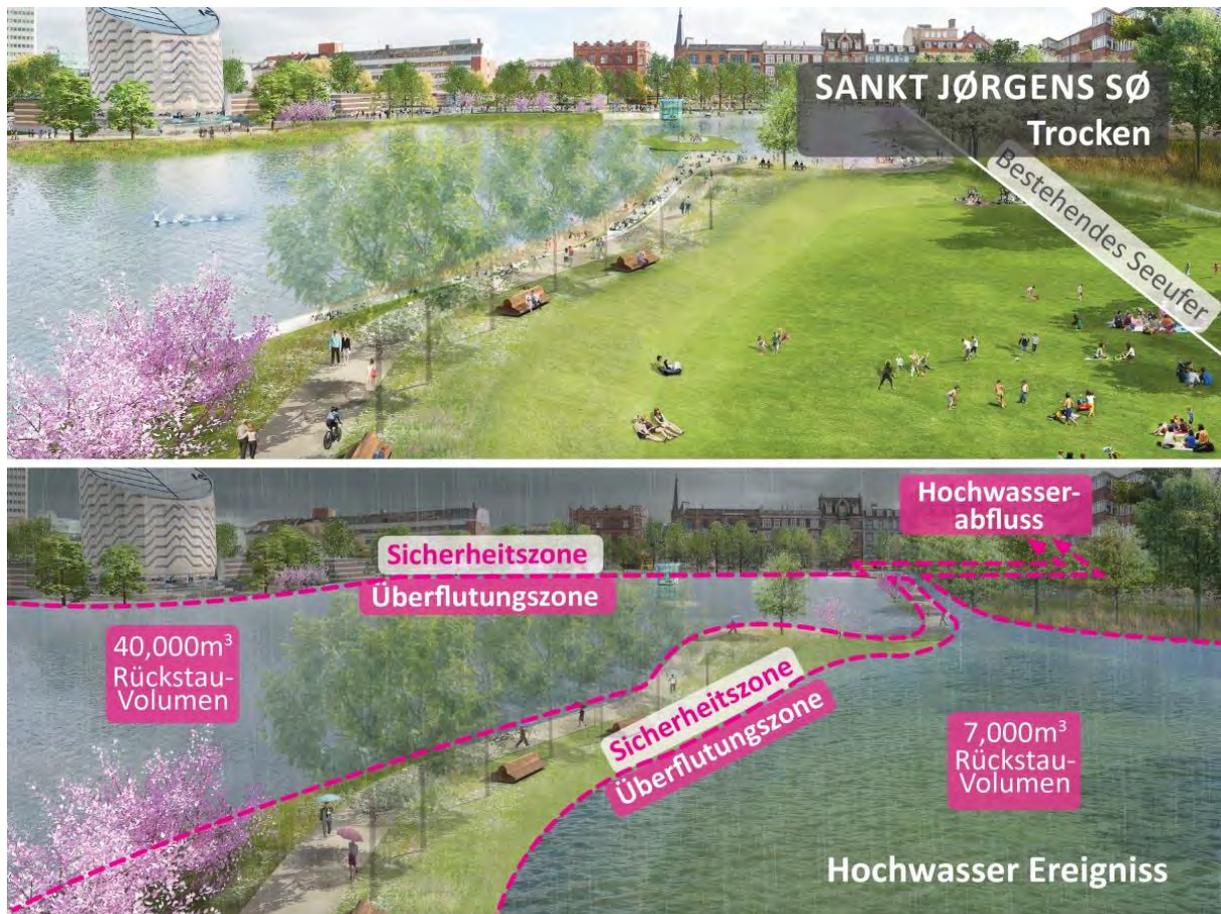


Abbildung 3: Zukunftsvision Sankt Jørgens Sø, Kopenhagen (Foto: Ramboll Studio Dreiseitl)

Die Wolkenbruch-Konkretisierung-Masterplan-Variante 1 beabsichtigt, das Regenwasser über den Å-Boulevard, eine autobahnähnliche Hauptverkehrsstraße, teils oberflächlich und – wo das nicht möglich ist – über Tunnelabschnitte zum Sankt Jørgens Sø, dem südlichsten Stadtsee, abzuleiten. Der Wasserspiegel des Sees liegt heute auf +5,8 m, die Nachbarbebauung befindet sich auf +3,4 m. Der Wolkenbruch-Masterplan sieht vor, den See auf +2,8 m abzusenken, was einerseits ein großes Rückstau-Volumen von 40.000 m³ schafft, andererseits eine städtebauliche Verbindung zur Stadt ermöglicht, insbesondere was die Hauptstraße Gammel Kongsvej (Alte Königsstraße) am Südufer betrifft. Nach dem Vorbild des Sugar Beach in Toronto soll hier ein urbaner Strandpark mit terrassenartig gestuftem Gelände verlauf zur Stadt hin entstehen. Die räumliche Großzügigkeit des Sees wird erhalten. Der westliche Teil soll in einen Bürgerpark mit Spielflächen, einem neu angelegten Deich und belebten Uferzonen umgebaut werden und fungiert gleichzeitig als zusätzliches Speicherbecken. Der Überlauf aus dem See führt in eine Tunnelverbindung mit 2,5 m Durchmesser, die den Tiefpunkt am südlichen Teil des Einzugsgebiets mit dem Hafen verbindet. Der nördliche Bereich des innerstädtischen Einzugsgebiets wird effektiv entkoppelt, indem der Regenwasserabfluss oberflächlich über den neu als Wolkenbruch-Park gestalteten Assistenzfriedhof und den angrenzenden Hans Tavsens Park erfolgt. Dieser Park soll zu einem hochleistungsfähigen Rückstau-Bereich mit einem möglichen Speichervolumen von 10.000 bis 35.000 m³ umgewandelt werden. Die Höhenlage des Hans Tavsens Parks ermöglicht die Entwässerung der kompletten nördlichen Spange im natürlichen Gefälle über die Wohnstraße Korsgade zum Peblinge Sø See als Notüberlauf.

Die Masterplan-Variante 2 lässt den Sankt Jørgens Sø außen vor und zielt mit einer notwendigen Tunnelverbindung von 4 – 5 m Durchmesser auf eine etwas technischere Lösung ab. Insgesamt sind 30 km Wolkenbruch-Boulevards und Straßen mit 500.000 m² Grünflächen als Retentionsspeicher und „Green Streets“ vorgesehen. So wird das Abwasser-System jährlich um 1,5 Millionen m³ entlastet. Die geschätzten Gesamtkosten für Masterplan-Variante 1 belaufen sich auf ca. 300 Millionen Euro, während die technisch aufwendigere Masterplan-Variante 2 mit der Tunnellösung etwa 400 Millionen Euro an Kosten verursachen würde. In beiden Masterplan-Varianten sind 75 km mögliche Green Streets integriert, für die zusätzlich 100 Millionen Euro veranschlagt werden. Die Umsetzungsphase ist für die kommenden 20 bis 30 Jahre geplant. Bei aller Diskussion um die Höhe der Kosten sollte man eines bedenken: Das geschätzte Gesamt-Budget von maximal 500 Millionen Euro ist lediglich die Hälfte der Schadenskosten, die innerhalb von nur 2 Stunden in 2011 verursacht wurden.

1.2 Scharnhäuser Park, Ostfildern - Deutschland

Kasernenarchitektur hat traditionell mit Lebensqualität wenig gemein. Die Gebäude sind nach rein funktionalen Gesichtspunkten arrangiert und gebaut. Solche Gebiete bergen aber auch Potentiale. Sie nehmen einer Stadt den Druck, neue Baugebiete auf der grünen Wiese ausweisen zu müssen. Wie beispielsweise im Scharnhäuser Park bei Ostfildern. Mit seinen 150 Hektar stellte dieses Projekt das größte städtebauliche Entwicklungsvorhaben des beginnenden 21. Jahrhunderts im Raum Stuttgart dar.



Abbildung 2: Schwammstadtelement als multifunktional nutzbarer Raum (Foto: Ramboll Studio Dreiseitl)

Ramboll Studio Dreiseitl gab den Impuls für den nachhaltigen Umgang mit Regenwasser, um die schlichte, moderne Philosophie, die die übrige Planung bestimmte, zu ergänzen.

Um Hochwasser zu vermeiden, setzten die Planer auf eine differenzierte Strategie aus Verdunstung, Abflußreduzierung, Abflußverzögerung.

Ein Netz von straßenbegleitenden Rinnen und Gräben durchzieht als unverkennbares Gestaltungsmerkmal die neue Siedlung.

1.3 Kampung Admiralty, Singapur

Kampung Admiralty ist ein zentrales Projekt, das eine Vielzahl von Programmen unter einem Dach vereint. Auf einem dichten 0,9 Hektar großen Gelände fördert das Konzept die Erkundung der Dynamik zwischen den Gemeinschaften und der städtischen Dichte im landarmen Singapur. Aufgrund des starken Betriebs auf dem Boden in Singapur gilt es neue und kreative Lösungen zu finden um die Flächennutzung zu optimieren.

Das System der Kampung Admiralty baut auf einem mehrschichtigen Sandwich auf, welches aus einem öffentlichen Platz mit geschützten tropischen Gemeinschaftsräumen, einem Einkaufs- und Essenszentrum im Erdgeschoss genauso wie einem Medizinzentrum besteht. Außerdem gibt es in der obersten Etage einen ruhigeren teilprivaten Park mit einer Senioreneinrichtung, Kinderbetreuung, Dachterrasse und Studiowohnungen für Senioren.



Abbildung 3: Blau - Grüne Infrastruktur und Architektur (Foto: Ramboll Studio Dreiseitl)

Die üppige Vegetation dient der Gemeinschaft als idealer Ort zum Entspannen und Zusammenwachsen. Neben Pflanzstrategien, welche von Laubbäumen bis hin zu Obstbäumen reichen und die Artenvielfalt des Geländes unterstreichen, wird den Bewohnern ermöglicht in Gemeinschaftsbeeten und im Kräutergarten ihre eigenen Ess- und Heilpflanzen anzubauen.

2 Literatur und Projekte

Henning Larsen / Ramboll Studio Dreiseitl – www.dreiseitl.com

Korrespondenz:

Name (Hauptautor): Prof. Tobias Baur
Adresse: Oberseestrasse 10, 8640 Rapperswil, Switzerland
Tel: +41 58 257 45 20
E-Mail: tobias.baur@ost.ch

Stadt Zürich: Planung und Umsetzung von Blau-Grüner Infrastruktur (BGI) im Kontext der Hitzeminderung

B. Kisseleff, M. Antener

Stadt Zürich, ERZ Entsorgung + Recycling, Bändlistrasse 108, 8064 Zürich, Schweiz

Kurzfassung: Die Stadt Zürich hat eine Fachplanung Hitzeminderung erarbeitet, um den immer wärmeren und häufigeren Hitzetagen und –nächten insbesondere in den Hot Spots entgegenzuwirken. Neben Massnahmen zur Erhaltung und Förderung von Kaltluftströmen von den umliegenden Hügelketten für die nächtliche Abkühlung der Innenstadt werden auch diverse Massnahmen zur Erhaltung und Ausweitung von Grünflächen und Bäumen gefordert.

Um diese Grünflächen auch in den trockeneren Perioden möglichst lange mit Regenwasser zu versorgen und gleichzeitig auch die Oberflächenabflüsse während Starkregenereignissen möglichst schadlos zu bewältigen, wird in der Stadt Zürich mit dem Fachplan Regenwasser im Siedlungsraum (FP RiS) ein ergänzendes Planungsinstrument erarbeitet. In der Auftragsklärung hat sich die Relevanz der interdisziplinären Zusammenarbeit in der raumwirksamen dezentralen Regenwasserbewirtschaftung gezeigt.

Die Stadt Zürich hat im Kontext der Hitzeminderung bereits diverse BGI Pilotprojekte lanciert. In der Scheuchzerstrasse ist die lehrreiche Projektierung eines Schwammstadtpilots abgeschlossen. Die Umsetzung folgt voraussichtlich in den Jahren 2023/24. An der Giesereistrasse wurden im 2020 Schlammsammler mit Umstellschieber installiert, die im Sommerbetrieb das anfallende Regenwasser der angrenzenden Strassenflächen punktuell in die Grünstreifen mit Baumrigolen einleiten. Im Winter wird das salzbelastete Regenwasser über Strassenabläufe in die Kanalisation eingeleitet. Die Stadt Zürich hat für die Schwammstadtbausteine ein Baumsubstrat entwickelt, das Wasser speichert und filtert. Im Jahr 2022 wurde in der Stadt Zürich in einem Pilotprojekt zudem die Tragfähigkeit des Substrates mit Plattendruckversuchen geprüft. Die Ergebnisse bestätigen genügend Belastungs- und Druckfestigkeit für den Einsatz des Substrates unter befestigten Verkehrsflächen.

Key-Words: Stadt Zürich, Hitzeminderung, Fachplanungen, Pilotprojekte

1 Fachplanung Hitzeminderung

Die Stadt Zürich hat mit der Fachplanung Hitzeminderung und der behördenverbindlichen Umsetzungsagenda im Jahr 2020 eine Planungshilfe mit den folgenden drei übergeordneten Zielen erarbeitet:

- die Überwärmung im gesamten Stadtgebiet vermeiden;
- vulnerable Stadtgebiete gezielt entlasten;
- das bestehende Kaltluftsystem der Stadt Zürich erhalten.

Mit einer Vulnerabilitätsanalyse bestehend aus Analysen zur Exposition und Sensitivität wurde der räumliche und zeitliche Handlungsbedarf in der Stadt Zürich ermittelt (siehe Abbildung 4). Daraus resultieren Massnahmenggebiete und Hotspots.

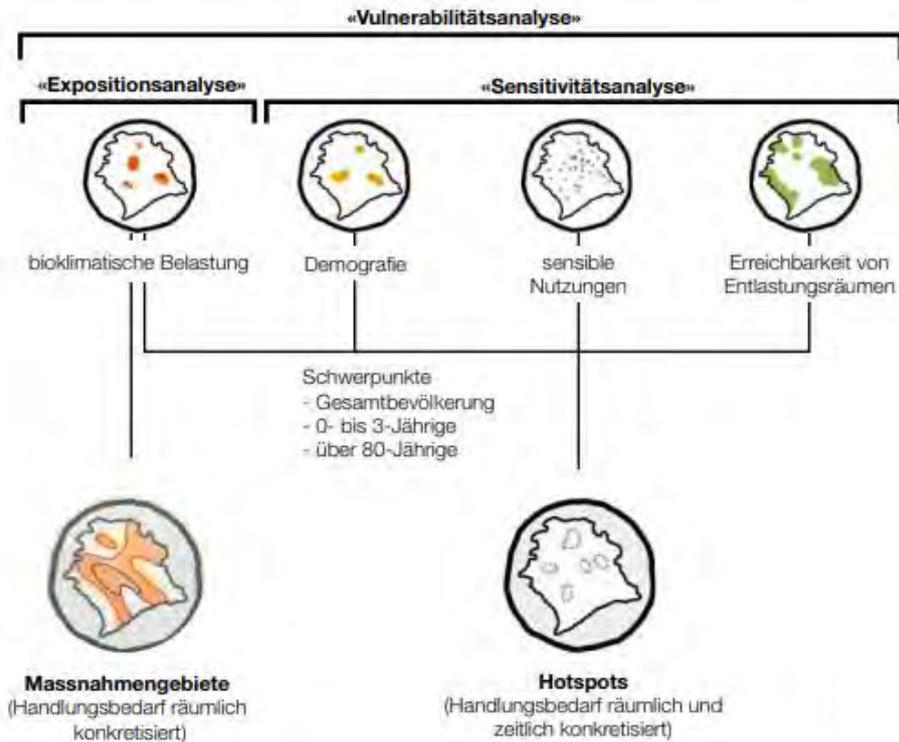


Abbildung 4: Räumlicher und zeitlicher Handlungsbedarf: Massnahmegebiete und Hotspots

Neben Massnahmen zur Erhaltung und Förderung von Kaltluftströmen von den umliegenden Hügelketten für die nächtliche Abkühlung der Innenstadt werden unter anderem auch diverse Massnahmen zur Erhaltung und Ausweitung von Grünflächen und Bäumen postuliert.

2 Fachplanung Regenwasser im Siedlungsraum

Mit der Fachplanung Hitzeminderung respektive der zugehörigen Umsetzungsagenda wird die Stadtverwaltung Zürich angewiesen, begrünte Oberflächen zu fördern und das Regenwassermanagement zu optimieren. Der bisherige Umgang mit dem Regenwasser wird den Anforderungen des Klimawandels sowie dem Ziel, den lokalen natürlichen Wasserhaushalt im urbanen Raum zu erhalten, nicht (mehr) gerecht. Um die genannten Grünflächen insbesondere auch in den trockeneren Perioden möglichst lange mit Regenwasser zu versorgen und gleichzeitig auch die Oberflächenabflüsse während Starkregenereignissen möglichst schadlos bewältigen zu können, hat Entsorgung + Recycling Zürich (ERZ) entschieden, einen Fachplan Regenwasser im Siedlungsraum (FP RiS) als ergänzendes Planungstool zu erarbeiten.

ERZ Entwässerung (Siedlungsentwässerung der Stadt Zürich) hat ursprünglich die Auftragsanalyse für den FP RiS alleine ausgearbeitet und die anderen Departemente der Stadt Zürich sowie weitere Anspruchsgruppen (z.B. Baugenossenschaften) erst anschliessend in Form einer Begleitgruppe ins Projekt einbeziehen wollen. Die Komplexität der Thematik Entwässerung hat jedoch stark zugenommen und es hat sich gezeigt, dass durch die Raumwirksamkeit der Thematik eine intensive interdisziplinäre Zusammenarbeit unter anderem mit der Stadtplanung von Anfang an notwendig ist. BGI und alternative Lösungen für ausserordentliche Regenereignisse können nicht wie die Siedlungsentwässerung bisher im eigenen Silo geplant werden. Demnach hat ERZ Entwässerung die Auftragsklärung für den FP RiS

diesmal interdepartemental aufgelegt. In regem Austausch werden die Fragestellungen nun von Beginn an gemeinsam und mehrschichtig mit dem Amt für Städtebau (AfS), Tiefbauamt (TAZ) und Grün Stadt Zürich (GSZ) erörtert.

Die interdepartementale Auftragsklärung ist gestartet und es konnten bereits einige Erkenntnisse gesammelt werden. Durch die interdisziplinäre Aktivität werden Schnittstellen erkannt und bearbeitet. Im öffentlichen und privaten Raum existieren unterschiedliche rechtliche und planerische Anforderungen. Entsprechend werden Massnahmen je nach Eigentum differieren müssen, für ein optimales Resultat soll aber dennoch eine gemeinsame Betrachtung stattfinden.

Ziel des Fachplans RiS ist es, Grundlagen für die klimaresiliente Regenwasserbewirtschaftung in der Stadt Zürich zu schaffen sowie konkrete Handlungsansätze zu definieren und zu verorten. Regenwasser soll als Ressource verstanden und als eines der zentralen Planungselemente etabliert werden. Lösungsansätze für den Umgang mit ausserordentlichen Regenereignissen werden geschaffen – beispielsweise mit Oberflächenabfluss-Korridoren. Ein weiteres Thema des FP RiS sollen Anpassungen an den städtischen Planungsprozessen und an Rechtsgrundlagen sein. Die Auseinandersetzung mit dem Regenwassermanagement in Hochbauprojekten soll im Bewilligungsprozess frühzeitiger thematisiert und durch verbindliche Rechtssätze gestützt werden.



Abbildung 5: Projektplanung FP RiS

Abbildung 5 zeigt, dass geplant ist, in einer ersten Phase des Projektes Varianten auszuarbeiten und einen Richtungsentscheid zu treffen. In einer zweiten Phase sollen Lösungen vertieft und Massnahmen definiert werden. Bis Ende 2025 soll dann in einer dritten Phase der Fachplan fertiggestellt und mit einem Stadtratsbeschluss (STRB) als behördenverbindliches Tool ergänzend zu den bestehenden Fachplanungen «Hitzeminderung» und «Stadtbäume» festgesetzt werden.

3 BGI-Pilotprojekte des Tiefbau- und Entsorgungsdepartements (TED) der Stadt Zürich

Das Tiefbau- und Entsorgungsdepartement der Stadt Zürich hat bereits mehrere Pilotprojekte im Bereich Schwammstadt als hitzemindernde Massnahmen lanciert und teils abgeschlossen.

3.1 Schwammstadtpilot Scheuchzerstrasse

Die Stadt Zürich hat an der Scheuchzerstrasse ein Schwammstadt-Pilotprojekt gestartet. Im Rahmen eines städtischen Tiefbauprojektes sollen Erfahrungen mit BGI gesammelt werden. Das auf den Strassen- und Gehwegflächen anfallende Niederschlagswasser soll möglichst vor Ort bewirtschaftet werden. Es sind Mulden, Baumrigolen und Retentionsvolumen vorgesehen, je nach Gewässerschutzbereich gegen unten abgedichtet.

Im Rahmen des Projektes wurde klar, dass die gewünschte Funktion der BGI (weniger Abfluss in Kanalisation, Wasser für Bäume zur Hitzeminderung, etc.) und die hydraulische Dimensionierung der Elemente zwar eng zusammenhängen, die Dimensionierung aber aufgrund der unterschiedlichen Zielsetzungen einige Herausforderungen stellt. Die Mischabwasserkanalisation wird auf ein 10-jährliches Regenereignis dimensioniert. Schwammstadtelemente hingegen sollen primär einen möglichst grossen Anteil der Jahresniederschlagsmenge zurückhalten. Damit die Kanalisation spürbar entlastet wird, muss ein grosser Anteil des 10-jährlichen Regenereignisses zurückgehalten werden können. Die Hauptvariablen sind grüne Oberfläche und Tiefe der Schwammstadtelemente. Auf eine Direkteinleitung von Strassenwasser in den Untergrundspeicher muss aus Gründen der Qualität zumindest in den Gewässerschutzbereichen A_u (nutzbare unterirdische Gewässer) verzichtet werden. In der Scheuchzerstrasse kommt erschwerend hinzu, dass der Untergrund zum Teil praktisch undurchlässig ist. Es müssen folglich sowohl für langanhaltende Regenereignisse als auch für kurze Spitzenintensitäten Ableitungsmöglichkeiten in die Mischabwasserkanalisation geschaffen werden. Mit Hilfe einer hydrodynamischen Berechnung mit Regenserien wurden die Baumrigolen und Speicher dimensioniert. Beim massgebenden 10-jährigen Regenereignis fliessen nur noch ca. 13% des anfallenden Regenwassers in die Kanalisation ab. Entsprechend kann die Kanalisation kleiner gebaut werden. Sollen die Schwammstadtelemente auch relevante Unterstützung bei Oberflächenabfluss bieten, wird deren Dimensionierung nochmals komplexer.

Ein weiteres Learning des Projektes ist der frühzeitige Einbezug von Betrieb und Unterhalt in die Planung von BGI. Aufgrund von Geruchsproblemen dürfen BGI nur mit Geruchsverschluss (z.B. Schlamm-sammler mit Tauchbogen) mit der Mischabwasserkanalisation verbunden sein.

Die Umsetzung des Pilotprojektes erfolgt voraussichtlich in den Jahren 2023/24. Es ist ein Monitoring mit Messungen des abfliessenden Wassers in Bezug auf Qualität und Quantität, der Feuchtigkeit des Baumsubstrates und der Temperatur der Umgebungsluft geplant (siehe Abbildung 6).

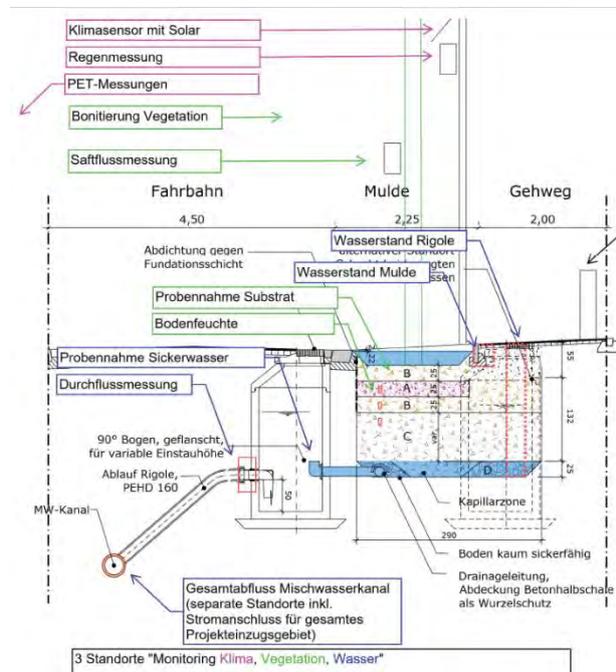


Abbildung 6: Konzept Monitoring Pilotprojekt Scheuchzerstrasse

3.2 Baumrigole mit Sommer- und Winterbetrieb an der Giessereistrasse

Seit dem Jahr 2020 werden an der Giessereistrasse im Industriequartier in Zürich in einem Pilotprojekt Erfahrungen mit einer Baumrigole im klassischen Grünstreifen und saisonalem Entwässerungsregime (sogenannten KerbCell Vorrichtungen) gesammelt. Während den Sommermonaten ist der Einlauf der Strassensammler verschlossen und das Regenwasser gelangt durch punktuelle Öffnungen im Randstein in die Baumgruben (siehe Abbildung 7). Im Winter werden die Zuläufe zu den Baumgruben verschlossen und das mit Streusalz belastete Regenwasser konventionell via die geöffneten Strassensammler in die Kanalisation eingeleitet.

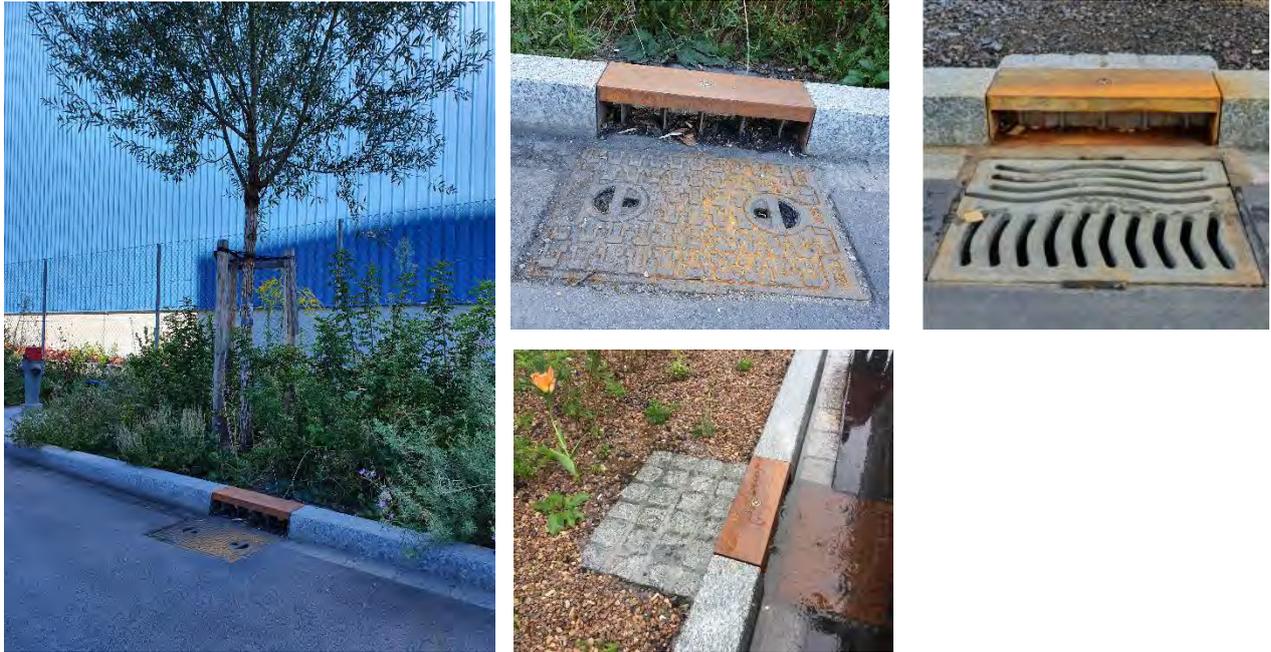


Abbildung 7: Saisonales Entwässerungsregime an der Giessereistrasse: Sommer (links), Winter (rechts)

Der Fokus dieses Schwammstadt-Elementes liegt auf der raschen Wasseraufnahme und Verdunstung durch die Vegetation. Daher wird im Monitoring des Pilotprojektes an der Giessereistrasse unter anderem die Saftflussrate der Bäume gemessen. Diese SAP Flow Messung kann als indirekte Messung der Transpiration betrachtet werden. Aus dieser Verdunstungsleistung kann wiederum der Kühlungseffekt abgeleitet werden. Erste Ergebnisse zur Verdunstungsleistung der Vegetation und auch zur Funktion der Substrate bezüglich Nährstoff- und Wasserrückhalt werden Ende 2022 erwartet.

Eine flächendeckende Umsetzung der KerbCell Vorrichtungen ist nicht angestrebt. Einerseits entsteht zusätzlicher betrieblicher Aufwand für die Umstellung des saisonalen Betriebs und andererseits wird eine flächige Einleitung in die Baumgruben der punktuellen vorgezogen.

3.3 Baumsubstrat

An Baumsubstrate werden Ansprüche verschiedenster Seiten gestellt. Unter anderem soll das Baumsubstrat einen guten Lebensraum für Bäume bereitstellen, eine Reinigungswirkung leisten und tragfähig sein. Für die bisherige Umsetzung von Schwammstadt-Bausteinen in der Stadt Zürich wurde ein Substrat entwickelt, das auf dem Wädenswiler Prinzip (Saluz A. 2017), der Stockholmer Bauweise (Embrén B. 2008) und dem Sandwich-Substrat (Heinrich A., Messer U., 2012) basiert. Der Aufbau entspricht einer Zweischicht-Bauweise mit einer humosen «Speckschicht», als präferierten Wurzelbereich und Filterschicht und dem eigentlichen Substrat (Substrat A und B) bestehend aus Grobschotter bis 63mm, Pflanzkohle, Sand, Blähschiefer und – bei Substrat A - einem geringen Oberbodenanteil.



Abbildung 8: Schwammstadt-Substrat Stadt Zürich – Aufbau (links) und Einbringung (rechts)

Im Kanton Zürich darf gering und mittel belastetes Strassenabwasser im Gewässerschutzbereich ÜB (übrige Bereiche) ohne Bodenpassage über das Substrat versickert werden. Für stärker belastetes Strassenabwasser sowie im Gewässerschutzbereich A_u ist eine Bodenpassage oder Filtermaterial vorzusehen. Die kantonale Behörde (AWEL, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft) anerkennt die Reinigungsleistung des Stadt Zürcher Substrates momentan (noch) nicht. Da ein Grossteil des Siedlungsgebietes in der Stadt Zürich im Bereich A_u liegt, wäre es wünschenswert, dass die notwendigen Nachweise dazu bald erbracht werden können.

In der Seebahnstrasse wurde das Substrat in unter Parkplätzen verbundenen Baumgruben eingesetzt (siehe Abbildung 9). Die Plattendruckversuche auf den Testflächen bestätigen eine hohe Belastungs- und Druckfestigkeit von teils über 100MN/m². Das Substrat ist somit auch gut für den Unterbau von befestigten Verkehrsflächen einsetzbar.

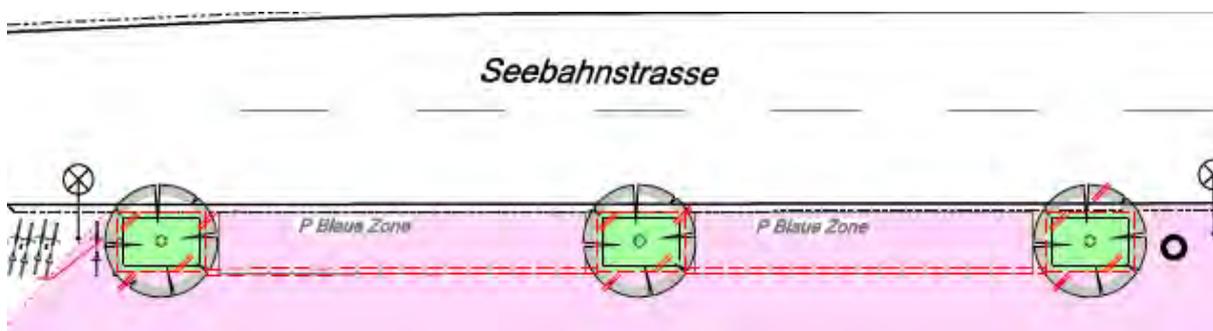


Abbildung 9: Planausschnitt Pilotprojekt Seebahnstrasse – erweiterte Baumgruben unter Parkplatz

4 Gelungene Beispiele von BGI in Arealentwicklungen und Hochbauprojekten

4.1 Labitzke Areal

Das Labitzke Areal in Zürich Altstetten wurde im Jahr 2017 neu überbaut. Das Regenwasser von Platz- und Wegflächen wird in bepflanzten Gräben versickert. Das Regenwasser von den Gebäuden wird auf den begrünten Dächern reteniert und in einem unterirdischen Versickerungsstrang unter einem befestigten Weg versickert.



Abbildung 10: Rückhalt und Versickerung von Regenwasser in bepflanzten Gräben (links), Park mit Bäumen im Innenhof über Tiefgarage (rechts)

Die Versickerungsgräben liegen ausserhalb des unterkellerten Bereichs. Über der Tiefgarage wurden im Labitzkeareal aber auch BGI mit oberflächlicher Versickerung erstellt wie beispielweise der kleine Park im Innenhof in (Abbildung 10).

4.2 Dachgarten Toni-Areal

Im Jahr 2014 wurde auf dem Areal der ehemaligen Toni-Molkerei ein Hochschul-Campus erstellt. Die grosszügige Substratdicke erlaubt Retention und intensive Dachbegrünung mit Bäumen.



Abbildung 11: Dachgarten in der achten Etage

5 Danksagung

Besten Dank an Veronika Sutter (Umwelt- und Gesundheitsschutz Stadt Zürich), Andrea G. Saluz (Grün Stadt Zürich) und Carla Hagen (Tiefbauamt Stadt Zürich) für die Inputs.

6 Literatur

Stadt Zürich (Hrsg) (2020): Fachplanung Hitzeminderung.

Heinrich A., Messer U., (2012): Staudenmischpflanzungen, Praxis, Beispiele, Tendenzen, Ulmer Verlag, Stuttgart

Saluz, A. (2017): Entwicklung eines strukturstabilen Stadtbaumsubstrates mit Pflanzenkohle. Forschungsbereich Urbane Ökosysteme, Forschungsgruppe Pflanzenverwendung der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW

Embrén, B., Bennerscheidt, C. & Stahl, Ö. (2008). Optimierung von Baumstandorten: Stockholmer Lösung: Wurzelräume schaffen und Regenwasser nutzen, Konfliktpotenziale zwischen Baum und Kanal entschärfen. Wasserwirtschaft Wassertechnik, Nr. 7/8, 38–43.

Korrespondenz:

Brigitte Kisseleff

Stadt Zürich, Entsorgung + Recycling Zürich, Bändlistrasse 108, 8064 Zürich

+41 44 417 53 36

brigitte.kisseleff@zuerich.ch

Klimaanpassung im Wohnungsbau: Planung der blau-grünen Infrastruktur unter Beachtung des lokalen Wasserhaushaltes und dem Einfluss von Klimawandel und Saisonalität

L. Rosenberger¹, B. Helmreich¹

1 Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft, Technische Universität München,
Am Coulombwall 3, 85748 Garching, Deutschland

Kurzfassung:

Der langjährige lokale Wasserhaushalt weist auf monatlicher Basis große saisonale Unterschiede auf, die bei der Planung von Quartieren in Bezug auf grün-blaue Infrastruktur zu berücksichtigen sind. Die monatliche klimatische Wasserbilanz sowie die Bodenbeschaffenheit liefern Hinweise auf Besonderheiten des lokalen Wasserhaushalts als Ziel für die Planung. Simulationen mit SWMM inkl. SWMM-UrbanEVA zeigen für ein Modellprojekt in Schweinfurt, dass die Verdunstung eine maßgebliche Rolle spielt und mit Elementen der wasserbewussten Stadtentwicklung gefördert werden muss.

Key-Words: Lokaler Wasserhaushalt, Klimaanpassung, SWMM, Wasserbilanz, Saisonalität

1 Einleitung

Die Folgen des Klimawandels sind auch in Bayern sichtbar und werden in den nächsten Jahrzehnten signifikante Auswirkungen für einige Regionen haben. In einigen Städten verschärft der Klimawandel wasserbezogene Risiken wie Dürren oder Überschwemmungen (IPCC 2021). Entsprechend muss bereits heute bei der städtebaulichen Setzung, Konstruktion und Gestaltung von Gebäuden und Freiräumen auf die sich verändernden äußeren Umstände reagiert und den Herausforderungen begegnet werden.

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Begleitforschung: Klimagerechtes Bauen - Modellvorhaben“, das vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz finanziert wird, werden zehn reale Modellvorhaben in Bayern im Hinblick auf urbane Klimaanpassung (Adaption) und Klimaschutz (Mitigation) im Wohnungsbau wissenschaftlich von einem interdisziplinären Team der Architektur, Landschaftsplanung, Siedlungswasserwirtschaft und Ökonomie begleitet. Die wissenschaftliche Begleitung unter dem Dach des Zentrums für Stadtnatur und Klimaanpassung (ZSK) startet dabei bereits in der Auslobungsphase für Architektur- und städtebauliche Wettbewerbe und reicht in die Planungsphase. Ziel des Projektes ist es, unter Berücksichtigung der langfristigen Wirtschaftlichkeit die Machbarkeit von blau-grün-grauen Klimaanpassungsmaßnahmen im kommunalen Wohnungsbau aufzuzeigen, die sich in Zeiten des Klimawandels und der damit verbundenen zunehmenden Anzahl von Extremwetterereignissen positiv auswirken. Dazu werden im Zuge des Projektes quantitative und qualitative Aspekte aus wasserwirtschaftlicher Sicht untersucht.

Das Regenwassermanagement vor Ort ist ein wichtiger Baustein des klimagerechten Bauens, da der lokale Wasserhaushalt in städtischen Gebieten im Vergleich zu Kulturlandschaften stark verändert ist. Der Oberflächenabfluss wird verglichen zum natürlichen lokalen Wasserhaushalt (Gebietszustand vor einer Bebauung - Referenzzustand) durch einen hohen Anteil undurchlässiger Flächen erhöht, die Verdunstung sowie die Grundwasserneubildung deutlich reduziert. Insbesondere die Verdunstung (Evapotranspiration) senkt durch ihren Energiebedarf die Temperatur und kann, indem z. B. der Anteil an Grünflächen erhöht wird, einen Beitrag zur Verringerung des urbanen Wärmeinseleffektes leisten (z. B. Balany et al. 2020; Rahman et al. 2022). Daher hat eine wasserbewusste Siedlungsentwicklung das Ziel, dem natürlichen lokalen Wasserhaushalt möglichst nahe zu kommen. Der Wasserhaushalt des

Referenzzustandes wird von Steinbrich et al. (2018) und Henrichs et al. (2019) als Wasserhaushalt der Landschaft der zugehörigen Naturraumeinheit bei heutiger Kulturlandnutzung ohne Siedlungsentwicklung vorgeschlagen (vgl. Abbildung 12).

Dieser Referenzzustand wird auch im Merkblatt DWA-M 102-4 (2020) aufgegriffen und als Ziel für die Planung genannt. Grundlage für die Ermittlung der Wasserbilanz für den unbebauten und den bebauten Zustand sind in der oben genannten Literatur langjährige Jahresmittelwerte. Mit der im DWA-M 102-4 erläuterten Methode werden die Anteile der Verdunstung, Grundwasserneubildung und Direktabfluss des korrigierten Jahresniederschlages jeweils in Prozent errechnet. Die klimatische Wasserbilanz, die Differenz aus der korrigierten monatlichen Niederschlagssumme und der Summe der monatlichen potentiellen Verdunstung über Gras, hat jedoch eine hohe saisonale Variabilität (Deutscher Wetterdienst 2022b).

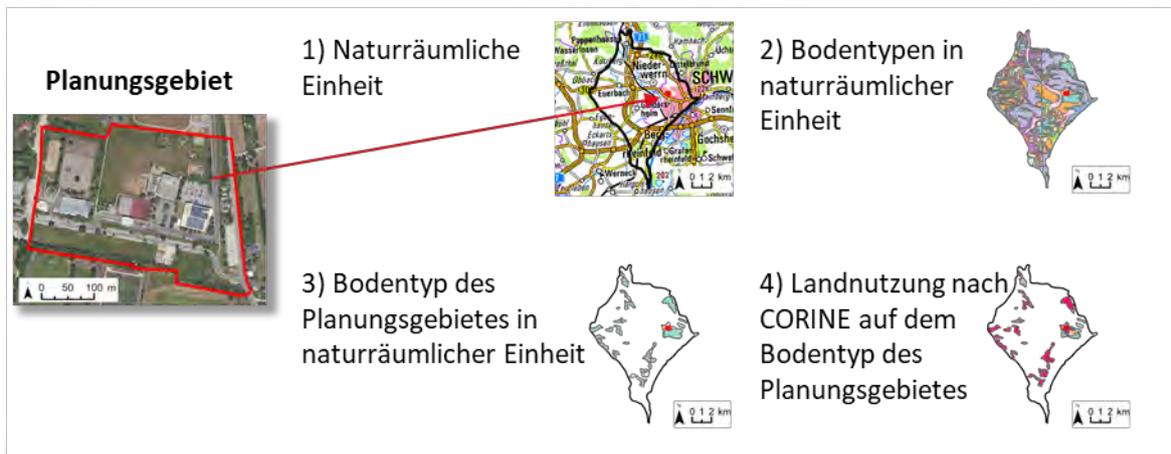


Abbildung 12: Ermittlung des Referenzzustandes für das Modellprojekt Schweinfurt (Eigene Darstellung angelehnt an Henrichs et al. 2019, basierend auf Daten von Bayerische Vermessungsverwaltung 2021; Bayerisches Landesamt für Umwelt 2021b, 2021c)

2 Methoden

Beispielhaft wird das Modellvorhaben in Schweinfurt als eines der zehn Modellvorhaben in Bezug auf den Wasserhaushalt untersucht. Schweinfurt wird in der Zukunft zunehmend von langen Hitzeperioden und damit Dürren betroffen sein (Bundesinstitut für Bau- Stadt- und Raumforschung 2018; Bayerisches Landesamt für Umwelt 2021a). Das Vorhaben umfasst die Entwicklung eines neuen Wohnquartiers auf einer Fläche von ca. 9,3 ha auf einem ehemaligen Militärstandort der US-Streitkräfte, auf dem sich heute größtenteils Erschließungsanlagen und Sportgelände befinden. Das Gebiet befindet sich auf schlecht durchlässigem Untergrund aus Braunerde, teilweise auch Pseudogley-Braunerde aus Normallehm bis Schluff über Lehm bis Ton (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2021c). Im Siegerentwurf für das Planungsgebiet sind begrünte Dächer und Fassaden, oberirdische Retentionsräume zur Versickerung und Verdunstung sowie Zisternen zur Speicherung von Niederschlagswasser geplant.

Von der wasserwirtschaftlichen Seite wird untersucht, ob mit der derzeitigen Planung des neuen Quartiers eine Annäherung an den Referenzzustand durch Tools der wasserbewussten Stadt erreicht wird. Zudem soll untersucht werden, wie sich der Wasserhaushalt auf monatlicher Basis unter dem Einfluss des Klimawandels verändert.

Grundlage für die Betrachtung des lokalen Wasserhaushaltes ist die Analyse der historischen Klimadaten sowie der projizierten Änderung des Klimas für Schweinfurt. Für die Ermittlung des Referenzzustandes wurden die Niederschlagsdaten untersucht sowie die Referenzverdunstung nach Penman

Monteith (potentielle Verdunstung über Gras nach Allen et al. 1998) ermittelt. Dabei wurden die saisonalen Unterschiede deutlich.

Im ersten Schritt wird der langjährige lokale Wasserhaushalt, der als Referenz für die Planung dienen soll, auf einer monatlichen Basis ermittelt. Das Vorgehen für die Ermittlung des Referenzgebietes ist in Abbildung 12 dargestellt. Dazu wird das Referenzgebiet mit SWMM inkl. SWMM-UrbanEVA (vgl. Hörschemeyer et al. 2021) modelliert. Meteorologische Daten in hoher zeitlicher Auflösung liegen ab dem Jahr 2006 für die nächste Klimastation des Deutschen Wetterdienstes in Schonungen Mainberg, ca. 7 km Luftlinie vom Planungsgebiet, vor (Deutscher Wetterdienst 2022a). Der Referenzzustand als langjähriger lokaler Wasserhaushalt wird für die Jahre 2006 bis 2020 in 10-minütiger Auflösung simuliert. Das geplante Quartier wird, wie das Referenzgebiet, ebenfalls mit SWMM inkl. SWMM-UrbanEVA (ebd.) für die Jahre 2006 bis 2020 in 10-minütiger Auflösung modelliert, um den langjährigen lokalen Wasserhaushalt zu bestimmen und mit dem Referenzgebiet zu vergleichen. Bei beiden Simulationen werden alle unversiegelten Flächen als LID-Elemente („Low Impact Development“-Elemente als Abbildung grüner Infrastrukturelemente im Modell) implementiert, um die vegetationspezifische Dynamik der SWMM-UrbanEVA Erweiterung zu integrieren. Die Fassadenbegrünung sowie der Effekt der Bewässerung durch Zisternenwasser wurden nicht integriert.

Außerdem werden einzelne historische Jahre beispielhaft untersucht. Das Jahr 2018 wird gewählt, da es das zweitrockenste (575 mm korrigierter Jahresniederschlag) und das heißeste Jahr der letzten dreißig Jahre war. Im Vergleich dazu wurde das Jahr 2007 gewählt. Es ist mit 886 mm korrigiertem Niederschlag eines der nassesten letzten Jahre und weist eine hohe potenzielle Verdunstung auf (669 mm). Diese Jahre werden als Szenarien für ein besonders heißes, trockenes Jahr sowie ein nasses Jahr in der Zukunft exemplarisch gewählt. Im weiteren Verlauf des Forschungsprojektes sollen Klimaprojektionsdaten des ClimEx Projektes (Ludwig-Maximilians-Universität 2018) genutzt werden, um weitere Zukunftsszenarien zu bilden.

3 Ergebnisse

3.1 Klimatische Wasserbilanz

Für den Zeitraum 2041 bis 2070 zeigen die Auswertungen von Klimaprojektionen des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (2021a) der Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 (vgl. IPCC 2014, S. 8f) im Median eine Zunahme der Temperatur über das ganze Jahr im Vergleich zur Referenzperiode 1971 bis 2000. Eine Erhöhung der Temperatur führt zu einer Erhöhung der Referenzverdunstung (Allen et al. 1998). Zugleich wird im Median zwar eine Zunahme des Jahresniederschlages projiziert, die Verteilung des Niederschlages ändert sich jedoch. Abbildung 13 zeigt die klimatische Wasserbilanz für Schweinfurt. Es zeigt sich, dass das Wasserangebot in den Winter- und Herbstmonaten tendenziell höher ausfallen und sich das Wasserdefizit im Frühjahr und Sommer im Vergleich zum Zeitraum 1971 bis 2000 verschärfen wird. Die Auswertung zeigt die Erforderlichkeit der saisonalen Betrachtung der Wasserbilanz. Bei der Analyse der Klimadaten von 2006 bis 2020 fiel auf, dass es in der nahen Vergangenheit bereits extreme Trockenjahre gab und der Vergleich mit den Klimaprojektionsdaten für diesen Zeitraum keine so deutliche Tendenz aufweist.

Klimatische Wasserbilanz

Schweinfurt

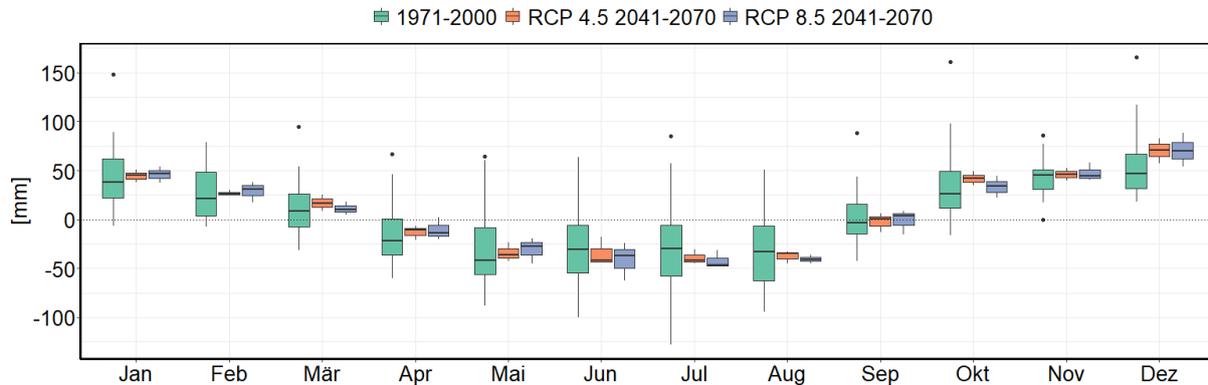


Abbildung 13: Klimatische Wasserbilanz für Schweinfurt: Vergleich historischer Daten (1971-2000) und der projizierten Klimaänderung für 2041-2070 (Eigene Darstellung, basierend auf Daten von Deutscher Wetterdienst 2022c; Bayerisches Landesamt für Umwelt 2021a; Berechnung der Verdunstung nach Allen et al. 1998)

3.2 Langjähriger Wasserhaushalt

Die Ergebnisse des langjährigen lokalen Wasserhaushaltes werden auf monatlicher Ebene betrachtet, um die saisonalen Unterschiede herauszuarbeiten. Im Fokus dabei steht zunächst der jeweilige Anteil der Evapotranspiration, der Versickerung und des Oberflächenabflusses am Niederschlag für das gesamte jeweilige Gebiet. Abbildung 14 zeigt die Ergebnisse für die Simulation der Jahre 2006 bis 2020 für das Referenzgebiet sowie die geplante Bebauung. Beispielhaft sind die Ergebnisse für die Sommermonate (Juni bis August) und die Herbstmonate (September bis Oktober) visualisiert. Es wird deutlich, dass im Referenzgebiet in allen Monaten kaum Oberflächenabfluss entsteht. Insbesondere im Sommer sind sehr hohe Verdunstungswerte vorhanden. Dies ergänzt sich mit den Ergebnissen der klimatischen Wasserbilanz für Schweinfurt (vgl. Abbildung 13), die im Sommer ein Wasserdefizit zeigen. Bei einer höheren potenziellen Verdunstung als Niederschlagsmenge ist auch für das Referenzgebiet eine sehr hohe Verdunstungsrate von fast annähernd 100 % zu erwarten. Für die Herbstmonate liegt die Rate der Versickerung sowohl für das Referenzgebiet als auch für die geplante Bebauung deutlich höher. Es fällt auf, dass bei den Ergebnissen der Simulation des geplanten Quartiers sowohl im Sommer als auch im Herbst geringe Versickerungsraten anfallen. Dies ist auf den schlecht durchlässigen Boden zurückzuführen. Die Verdunstung spielt im Planungsgebiet eine maßgebende Rolle.

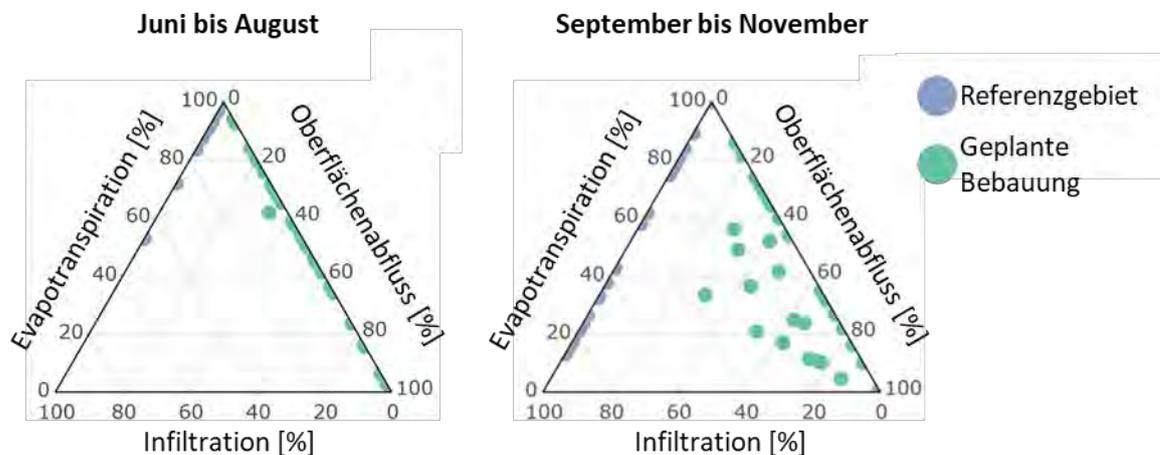


Abbildung 14: Monatliche Wasserbilanz (2006-2020) für die Simulation des Referenzgebietes und der geplanten Bebauung beispielhaft für die Sommermonate (links) und die Herbstmonate (rechts)

3.3 Analyse ausgewählter historischer Jahre

Die Jahre 2018 und 2007 wurden ausgewählt, um Szenarien für sehr trockene und heiße sowie verhältnismäßig nasse Jahre abzubilden. Abbildung 15 zeigt beispielhaft die monatlichen Summen für Verdunstung, Versickerung und Oberflächenabfluss für das Jahr 2018 für die geplante Bebauung. Im Vergleich dazu sind die Ergebnisse für das Referenzgebiet im Jahr 2018 sowie für den Zeitraum von 2006 bis 2020 dargestellt.

Als Ziel für die Planung wird die Annäherung an den langjährigen lokalen Wasserhaushalt genannt. Der Median der langjährigen Simulation (2006 – 2020) ist in Abbildung 15 in den grauen Boxplots dargestellt. Im trockenen, heißen Jahr 2018 kommen die monatlichen Summen für Verdunstung im geplanten Quartier in vielen Monaten, nicht an den angestrebten Median heran. Die Versickerung spielt, wie in Kapitel 3.2 beschrieben, nur eine untergeordnete Rolle im Planungsgebiet.

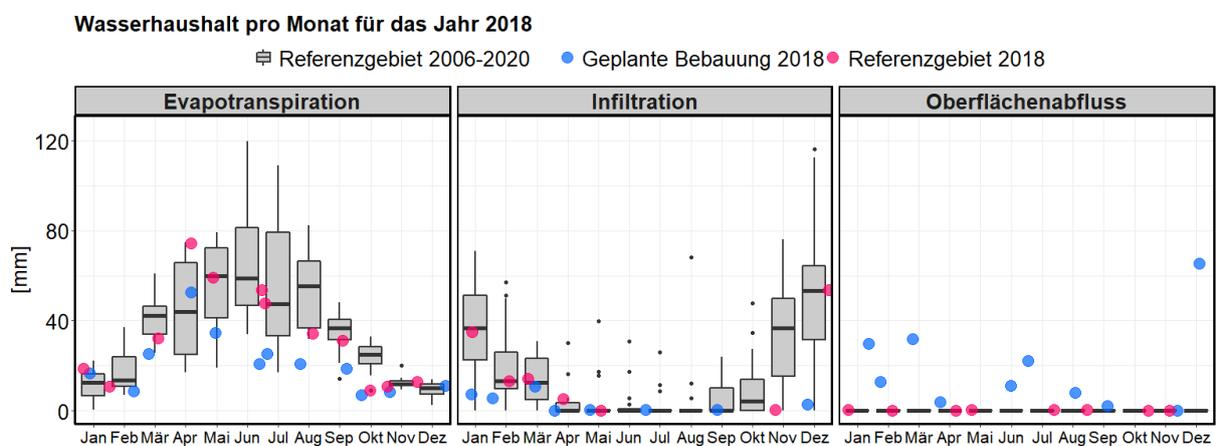


Abbildung 15: Monatlicher Wasserhaushalt für das Jahr 2018

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Untersuchung des langjährigen lokalen Wasserhaushaltes auf monatlicher Basis liefert Einblicke in die saisonalen Unterschiede, die es bei der Planung von neuen Quartieren in Bezug auf grün-blaue Infrastruktur zu beachten gilt. Bereits die erste Analyse der klimatischen Wasserbilanz gibt Aufschlüsse über die lokalen Verhältnisse des Wasserhaushaltes. Hier zeigt sich am Beispiel Schweinfurt, dass in der Sommerhälfte des Jahres meist ein Wasserdefizit vorliegt. In Kombination mit der Betrachtung der lokalen Bodenverhältnisse, die schlecht durchlässig sind, muss ein spezieller Fokus auf die Verdunstung gelegt werden. Gezielte Elemente der wasserbewussten Stadtplanung wie eine bewässerte Fassadenbegrünung, blau-grüne Dächer mit verdunstungsstarker Bepflanzung oder Verdunstungsbeete weisen eine hohe Kühlleistung auf (z.B. Sieker et al. 2019) und sind daher in der Planung empfohlen. Die Speicherung und Nutzung von Regen- und Grauwasser zur Bewässerung ist ein wichtiger Beitrag, um die Verdunstungsleistung der Vegetation durch eine ausreichende Wasserversorgung zu erhöhen und damit das Mikroklima zu verbessern. Zudem kann damit wertvolles Trinkwasser eingespart werden. Die Integration des Effekts der Bewässerung auf die Verdunstungsleistung sowie die Fassadenbegrünung konnten in der Simulation mit SWMM inkl. SWMM-UrbanEVA bisher nicht berücksichtigt werden. Wie die Evapotranspiration der Fassadenbegrünung sowie der Einfluss der Bewässerung auf die Evapotranspiration angemessen in die Modellierung des städtischen Wasserhaushalts integriert werden kann, soll im weiteren Verlauf des Forschungsprojektes analysiert werden.

Der Referenzzustand basiert auf langjährigen historischen Daten, mit denen mit Hilfe einer Langzeitsimulation die jeweiligen Summen für Verdunstung, Versickerung und Oberflächenabfluss berechnet werden können. Nicht beachtet werden in dieser Untersuchung bislang Extremereignisse und deren Einfluss auf den Wasserhaushalt. Die Auswirkungen des Klimawandels sollen im weiteren Projektverlauf mittels Szenarienbildung stärker untersucht werden.

5 Danksagung

Die Autorinnen bedanken sich beim Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz für die Finanzierung des Projektes (Kennzeichen TEW01C02P-76968).

6 Literatur

Allen, Richard G.; Pereira, Luis S.; Raes, Dirk; Smith, Martin (1998): Crop evapotranspiration. Rome (FAO irrigation and drainage paper, 56).

Balany, Fatma; Ng, Anne W.M.; Muttill, Nitin; Muthukumar, Shobha; Wong, Man Sing (2020): Green infrastructure as an urban heat island mitigation strategy—a review. In: *Water (Switzerland)* 12 (12), S. 1–22. DOI: 10.3390/w12123577.

Bayerische Vermessungsverwaltung (2021): Geobasisdaten. Online verfügbar unter www.geodatenonline.bayern.de, zuletzt geprüft am 31.03.2022.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hg.) (2021a): Bayerisches Klimainformationssystem. Online verfügbar unter <https://klimainformationssystem.bayern.de/>, zuletzt geprüft am 09.12.2021.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (2021b): Naturräumliche Gliederung Bayerns. Online verfügbar unter www.lfu.bayern.de/natur/naturraeume, zuletzt geprüft am 30.03.2022.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (2021c): Übersichtsbodenkarte 1:25.000. Online verfügbar unter www.lfu.bayern.de/boden/karten_daten/uebk25, zuletzt geprüft am 31.03.2022.

Bundesinstitut für Bau- Stadt- und Raumforschung (2018): GIS-ImmoRisk Naturgefahren. Hg. v. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR). Bonn. Online verfügbar unter www.gisimmorisknaturgefahren.de, zuletzt geprüft am 09.08.2022.

Deutscher Wetterdienst (Hg.) (2022a): CDC - Climate Data Center. Online verfügbar unter <https://cdc.dwd.de/portal/>, zuletzt geprüft am 25.02.2022.

Deutscher Wetterdienst (Hg.) (2022b): Klimatische Wasserbilanz. Online verfügbar unter www.dwd.de/DE/leistungen/wasserbilanzq/wasserbilanzq.html, zuletzt geprüft am 29.03.2022.

Deutscher Wetterdienst (Hg.) (2022c): Open Data Server. Online verfügbar unter <https://opendata.dwd.de/>, zuletzt geprüft am 07.04.2022.

DWA-M 102-4, 2020: Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer. Teil 4: Wasserhaushaltsbilanz für die Bewirtschaftung des Niederschlagswassers (Entwurf).

Henrichs, Malte; Steinbrich, Andreas; Leistert, Hannes; Scherer, Isabel; Schuetz, Tobias; Uhl, Mathias; Weiler, Markus (2019): Model Based Estimation of a Natural Water Balance as Reference for Planning in Urban Areas. In: Giorgio Mannina (Hg.): *New Trends in Urban Drainage Modelling*, Bd. 2. Cham: Springer International Publishing (Green Energy and Technology), S. 953–957.

- Hörnschemeyer, Birgitta; Henrichs, Malte; Uhl, Mathias (2021): SWMM-UrbanEVA: A Model for the Evapotranspiration of Urban Vegetation. In: *Water* 13 (2), S. 243. DOI: 10.3390/w13020243.
- IPCC (2014): Climate change 2014. Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland, zuletzt geprüft am 31.03.2022.
- IPCC (2021): Climate Change 2022: WGII Sixth Assessment Report. Chapter 4: Water. Unter Mitarbeit von Martina Angela Caretta und Aditi Mukherji.
- Ludwig-Maximilians-Universität (Hg.) (2018): Das ClimEx Projekt, zuletzt aktualisiert am <http://www.climex-project.org/>, zuletzt geprüft am 09.12.2021.
- Rahman, Mohammad A.; Franceschi, Eleonora; Pattnaik, Nayanesh; Moser-Reischl, Astrid; Hartmann, Christian; Paeth, Heiko et al. (2022): Spatial and temporal changes of outdoor thermal stress: influence of urban land cover types. In: *Scientific reports* 12 (1), S. 671. DOI: 10.1038/s41598-021-04669-8.
- Sieker, H.; Steyer, R.; Büter, B.; Leßmann, D.; Tils, R. von; Becker, C.; Hübner, S. (2019): Untersuchung der Potentiale für die Nutzung von Regenwasser zur Verdunstungskühlung in Städten: Abschlussbericht. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-09-16_texte_111-2019_verdunstungskuehlung.pdf.
- Steinbrich, Andreas; Henrichs, Malte; Leistert, Hannes; Scherer, Isabel; Schuetz, Tobias; Uhl, Mathias; Weiler, Markus (2018): Ermittlung eines naturnahen Wasserhaushalts als Planungsziel für Siedlungen. In: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 62, S. 400–409. DOI: 10.5675/HyWa_2018.6.

Korrespondenz:

Lea Rosenberger
Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft
Technische Universität München
Am Coulombwall 3
85748 Garching
+49 89 289 13716
lea.rosenberger@tum.de

Wasserbewusste Entwicklung des Oxford-Quartiers in Münster

M. Uhl¹, B.Hörnschemeyer¹

¹ Institut für Infrastruktur-Wasser-Ressourcen-Umwelt (IWARU), FH Münster,
 Corrensstr. 25, 48149 Münster

Kurzfassung: Auf dem Gelände der ehemaligen Oxford-Kaserne in Münster entsteht ein neues Wohnquartier, das den Maßgaben der neuen Arbeits- und Merkblattreihe DWA-A/M 102/BWK-M3 folgt und unter Verortung blau-grüner Infrastrukturen den naturnahen Wasserhaushalt erhält. Im städtebaulichen Entwurfsprozess erwies sich die Wasserbilanz als sehr hilfreich, um Planungsvarianten zügig bewerten zu können, Lösungsoptionen zu entwerfen und Restriktionen zu begründen. Der interdisziplinäre Entwurfsprozess konnte beschleunigt werden. Das aufgestellte Konzept fand Umsetzung in der verbindlichen Bauleitplanung.

Key-Words: wasserbewusste Stadtentwicklung, Wasserbilanz, blau-grüne Infrastruktur, Regenwasserbewirtschaftung, Bauleitplanung

1 Städtebauliches Konzept

Auf dem 26,9 ha großen Gelände der ehemaligen britischen Oxford-Kaserne Münster entsteht ein neues Wohnquartier. Das städtebauliche Konzept (Abbildung 16) greift denkmalgeschützte und erhaltenswerte Strukturen der alten Kaserne auf und entwickelt sie weiter zu einem verdichteten Wohngebiet mit mannigfaltigen bürgerschaftlichen Qualitäten.

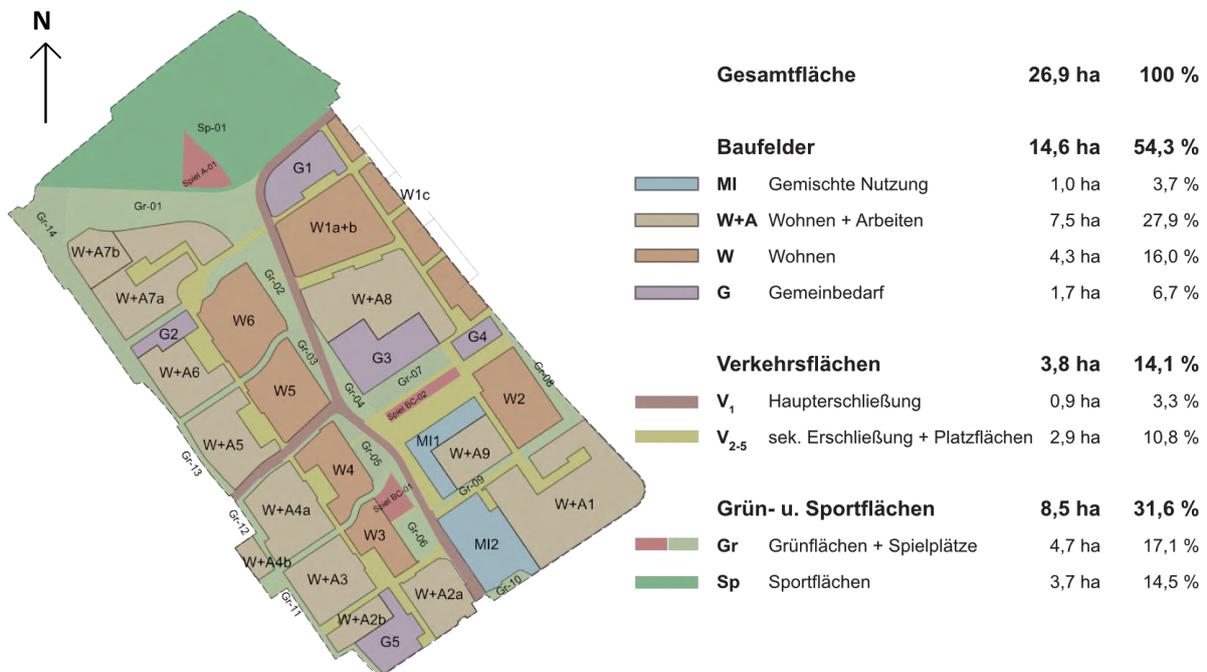


Abbildung 16: Lageplan Oxford-Quartier (ARGE OXF 2017).

Die neue Zentralachse mit Haupterschließung und Grünfläche entwickelt sich längs der ehemaligen Kasernenstraße mit ansehnlichem Basaltpflaster als Teil der Grünflächenachse. Zwei Achsen parallel zur Zentralachse erschließen die Geländeseiten mit verkehrsarmen Straßen. Der ehemalige Exerzierplatz wird rückgebaut und erhält als 0,6 ha großer Paradeplatz eine neue zentrale Bedeutung für das Quartier. Der alte raumbildende Baumbestand wird weitgehend erhalten und ergänzt. Wasser wird eine besondere Rolle spielen. Mit blau-grüner Infrastruktur zur Regenwasserbewirtschaftung wird eine wasserbewusste Stadtentwicklung realisiert, die funktional sichtbar und verständlich ist und gestalterisch das Wasser wieder als Teil des Stadtraumes zeigt.

2 Naturräumliche Situation

Das leicht in Süd-Ost-Richtung geneigte Planungsgebiet gehört zum Einzugsgebiet des Gievenbaches, der parallel zur Nord-Ost-Seite des Gebietes verläuft.

Die heterogenen Untergrundverhältnisse (Abbildung 17) werden durch drei Zonen unterschiedlicher Durchlässigkeit geprägt. Im Nordwesten liegt ein Pseudogley (Infiltrationsrate 14 mm/h) mit hohen Schichtwasserständen vor. Zentral wird das Gebiet mit zunehmender Mächtigkeit durch Braunerde-Pseudogley mittlerer Durchlässigkeit (Infiltrationsrate 54 mm/h) durchzogen. Etwa das halbe Gebiet wird durch „Graubrauner Plaggenesch“ dominiert. Besonders der Südosten des Gebietes weist tiefgründigere Böden mit höheren Durchlässigkeiten (Infiltrationsraten etwa 200 mm/h) auf. Es zeigte sich lokales Schichtenwasser, ohne dass ein freier Grundwasserspiegel angetroffen wurde.

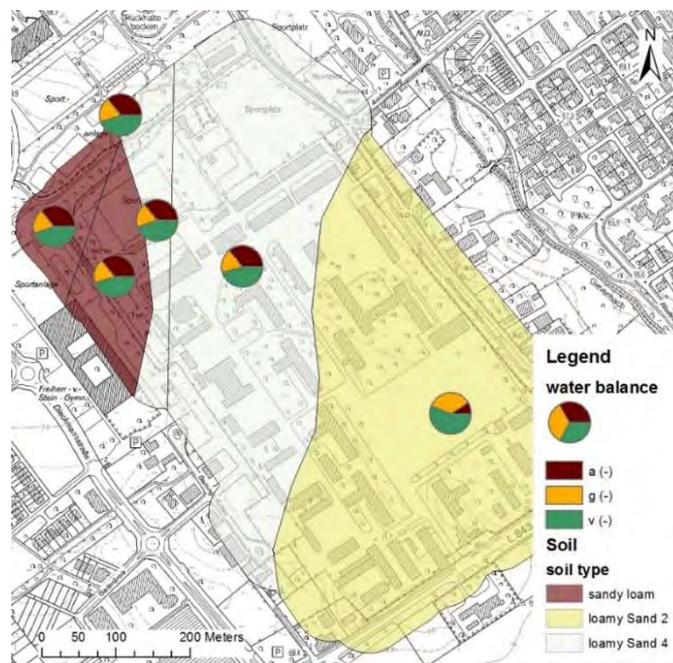


Abbildung 17: Untergrundverhältnisse (Kartengrundlage: Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen 2022).

3 Wasserwirtschaftliche Ziele

Gemäß des Wasserhaushaltsgesetzes WHG § 55(2) soll das Niederschlagswasser „ortsnah versickert, verrieselt oder direkt oder über eine Kanalisation ohne Vermischung mit Schmutzwasser in ein Gewässer eingeleitet werden, soweit dem weder wasserrechtliche noch sonstige öffentlich-rechtliche Vorschriften noch wasserwirtschaftliche Belange entgegenstehen“.

Die Fachverbände DWA und BWK haben mit der neuen Arbeits- und Merkblattreihe DWA-A/M 102/BWK-A/M 3 den Stand der Technik für die Bewirtschaftung und Behandlung von Niederschlagsabflüssen vor Einleitung in Fließgewässer dargelegt. Der Wasserhaushalt des bebauten Gebietes soll demnach einem gleichartigen unbebauten Gebiet mit Kulturlandnutzung nahekommen.

Die Einleitungen in den Gievenbach sind aus Immissionsgründen auf eine Abflusspende von maximal $q_E = 3 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$ für $T = 1a$ beschränkt. Die Überflutungsvorsorge erfolgt gemäß DIN 1986-100 sowie mit baukonstruktiven Vorgaben für Erdgeschoss und Gebäudeöffnungen.

4 Wasserwirtschaftliches Konzept des Oxfordquartiers

4.1 Planungsansatz

Die Planungen folgten dem Ansatz des Water Sensitive Urban Design (WSUD) (Fletcher et al. 2015). Die Wasserbewusste Stadtentwicklung schließt unter Zusammenarbeit von Wasserwirtschaft, Städtebau und Landschaftsarchitektur die Integrale Entwässerungsplanung gemäß DWA-A 100 (2006) sowie die Bewirtschaftung der Niederschlagsabflüsse gemäß der Arbeits- und Merkblattreihe DWA-A/M 102/BWK-A/M 3 mit Nachweisen zum Wasserhaushalt und zur Stoffbilanz ein (DWA 2021). Der Planungsansatz wurde vom Amt für Mobilität und Tiefbau vollumfänglich mitgetragen und hat nunmehr Eingang in die kommunale Praxis in der Stadt Münster gefunden.

Im Folgenden wird das in Abbildung 18 dargestellte Planungskonzept kurz erläutert.

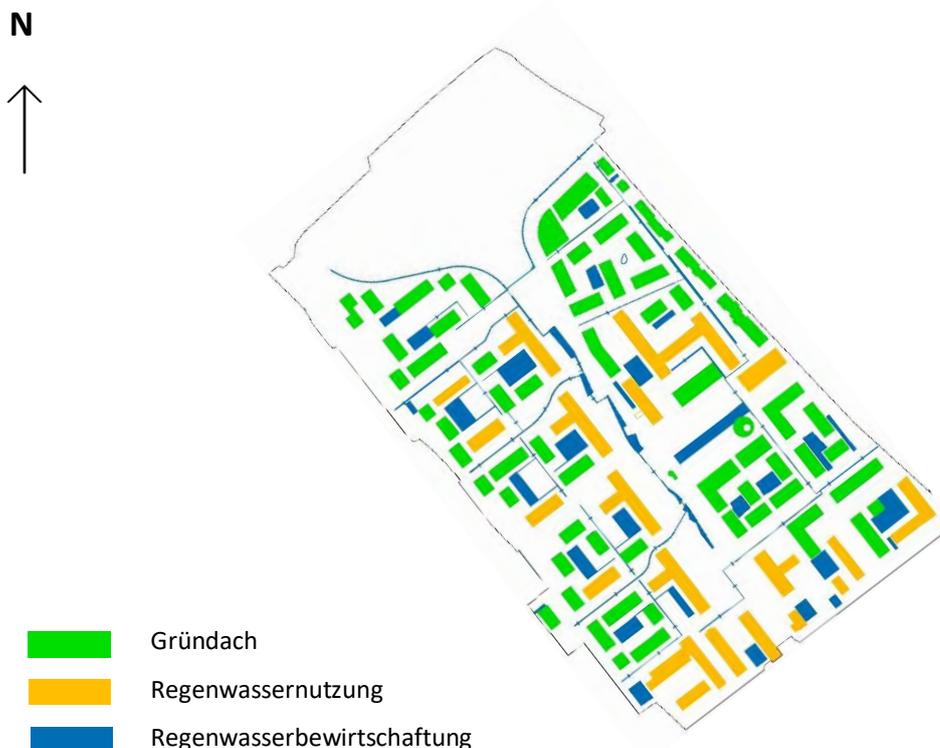


Abbildung 18: Regenwasserbewirtschaftung Oxford-Quartier (ARGE OXF 2016).

4.2 Grundstücksentwässerung

Jedes Cluster erhält wasserwirtschaftlich begründete Vorgaben, die im Rahmen des Bauantrages im Detail nachzuweisen sind:

- naturnaher Wasserhaushalt mit 20% Abfluss, 24% Grundwasserneubildung und 56% Verdunstung bezogen auf den langjährigen Jahresniederschlag von 832 mm;
- Abflussbeschränkung auf $q=3L/(s \cdot ha)$ bei einem Wiederkehrintervall von $T=5$ a;
- Überflutungsnachweis gemäß DIN 1986-100 für $T=30$ a bzw $T=100$ a;
- Oberkante Rohfußboden der Gebäude im Erdgeschoss mindestens 30 cm über der Oberkante der jeweils der Erschließung des Gebäudes dienenden Verkehrsfläche.

Flach- und Pultdächer erhalten zu 75% eine Begrünung mit mindestens 10 cm Substratschicht. Die Ausführung als Solar- oder Retentions Gründach ist möglich. Für die Satteldächer des denkmalgeschützten Gebäudebestandes wurde der Anschluss an eine Regenwassernutzung zur Grünflächenbewässerung und zur Toilettenspülung vorgeschlagen. Die inneren Erschließungsflächen der Grundstücke werden durchlässig befestigt, soweit die Bodenverhältnisse dies zulassen.

Überschusswasser von Dächern und Erschließungsflächen wird im südlichen Gebietsteil Sickermulden zugeführt. Im nördlichen Gebietsteil mit nicht sickerfähigem Untergrund wird das Überschusswasser in Regengärten geleitet und dort versickert, verdunstet oder gedrosselt abgeleitet. Regengärten sind Mulden-Rigolen-Elemente mit landschaftsarchitektonisch qualitätsvoller Gestaltung.

4.3 Öffentliche Verkehrsflächen

Die Abflüsse der öffentlichen Verkehrsflächen werden mit Rinnen und Gräben oberflächennah im Kammsystem der zentralen Erschließungsachse zugeleitet. Im südlichen Gebietsteil werden Stellplätze mit durchlässiger Pflasterung vorgeschlagen. In Gebietsteilen mit geringer Durchlässigkeit wünscht die Stadt Münster voll gepflasterte Stellplätze.

Die stärker verschmutzten Abflüsse der Haupteerschließungsstraßen werden in einem Regenwasserkanal einem Retentionsbodenfilter zur Behandlung zugeleitet und von dort stark gedrosselt in den Gievenbach geführt.

4.4 Zentrale Hauptachsen

Zwei Hauptachsen nehmen Drosselabflüsse oder Abflüsse mit $T > 5$ a aus der Grundstücks- und Verkehrsflächenentwässerung auf. Im grünen Boulevard der Zentralachse werden drei gestalterisch hochwertige und miteinander verbundene Retentionsmulden angelegt. In der östlichen Straßenachse wird aufgrund der beengten Verhältnisse zur oberflächennahen Ableitung ein Kastenrinnensystem in das Verkehrsnetz integriert. Die beiden Hauptachsen führen die Abflüsse durch ein kleines Regenrückhaltebecken gedrosselt in den Gievenbach.

4.5 Grünflächen

Das Oxfordquartier besitzt einen hohen Grünflächenanteil. Der attraktive Baumbestand des Gebietes wird begutachtet und verjüngt. Die blau-grünen Infrastrukturen dienen multifunktional der Wasserwirtschaft, dem Stadtklima und der Freiraumqualität.

5 Wasserhaushalt im Oxfordquartier

5.1 Wasserhaushalt des unbebauten Zustandes

Für den unbebauten Zustand des Planungsgebietes werden die Bodenkenndaten der BK 50 (Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen 2022) ohne Auffüllhorizonte angesetzt. Damit ergeben sich im Gebiet 8,4% Pseudogley, 43,7% Braunerde – Pseudogley, 4,9% Pseudogley – Gley und 43,1% Graubrauner Plaggenesch. Die Flächennutzung wird entsprechend des umgebenden Einzugsgebiets des Gievenbaches zu 62 % Ackerfläche, 25 % Grünland und 13 % Laubwald festgelegt. Als meteorologische Daten werden für den Standort Münster aus dem HAD (BMU 2003) für den Niederschlag $P = 836 \text{ mm/a}$ und für die aktuelle Verdunstung $ET_a = 540 - 580 \text{ mm/a}$ angesetzt.

Die Wasserbilanz des unbebauten Zustandes wird mit dem Verfahren nach Meßer (2013) berechnet. Als Aufteilungswerte ergeben sich $a=0,20$, $g=0,24$ und $v=0,56$.

5.2 Wasserhaushalt des Oxford-Quartiers

Die langjährige Jahreswasserbilanz als Grundlage für den Bebauungsplan wird mit dem vereinfachten Wasserbilanzmodell WABILA (Henrichs et al. 2017) berechnet, das das Nachweisverfahren des neuen DWA-M 102-4/ BWK-M 3-4 (2022) softwaretechnisch umsetzt. Zum Vergleich wird auch eine Variante „konventionelle Ableitung im Trennsystem“ berechnet.

Die Wasserbilanzen (Tabelle 1) des bebauten und des unbebauten Gebietes verdeutlichen, dass das Bewirtschaftungskonzept für den bebauten Zustand eine sehr gute Annäherung an den unbebauten Zustand erreicht. Der Direktabfluss ist mit -1%-Punkten leicht verringert, während die Grundwasserneubildung um 5%-Punkte erhöht ist, zu Lasten der Verdunstung mit -4%-Punkten.

Ein konventionelles Trennsystem würde einen um +19%-Punkten erhöhten Direktabfluss aufweisen, sowie eine um -6%-Punkten verringerte Grundwasserneubildung und eine um -13% -Punkten einer verringerten Verdunstung aufweisen.

Die Defizite der Verdunstung bebauter Gebiete zu kompensieren, stellt die größte Herausforderung dar. Ursache hierfür ist, dass auch durchlässige Befestigungen und Gründächer ein Verdunstungsdefizit in sommerlichen Trockenperioden aufweisen. Versickerungsmulden erhöhen die Verdunstung nur unwesentlich. Die Verdunstung wird bei einer üppigen Begrünung mit Bäumen und Büschen sowie mit einer Bewässerung von Grünflächen im Sommer vorzugsweise mit Regenwasser erhöht.

Tabelle 1: Wasserhaushaltsgrößen und Aufteilungswerte.

	Wasserhaushalt			Aufteilungswerte			Abweichungen vom unbebauten Zustand		
	RD	GWN	ET _a	a	g	v	a	g	v
	(mm/a)			(-)			(-)		
unbebaut	167	201	468	0,20	0,24	0,56			
bebaut mit Regenwasserbewirtschaftung	153	246	437	0,18	0,29	0,52	-0,01	0,05	-0,04
bebaut mit Ableitung im konventionellen Trennsystem	325	149	362	0,39	0,18	0,43	0,19	-0,06	-0,13

6 Umsetzung im Bebauungsplan

Die Anforderungen aus dem städtebaulichen Entwurf wurden in die verbindliche Bauleitplanung überführt. Im Bebauungsplan konnten die folgenden Punkte festgelegt werden:

- Flachdächer zu mindestens 75% mit extensiven Gründächern;
- Abflussbeschränkung auf $q=3L/(s \cdot ha)$ bei einem Wiederkehrintervall von $T=5$ a. Ausnahmen können zugelassen werden, wenn eine vollständige Versickerung auf den Flächen nicht möglich bzw. eine gedrosselte Ableitung in andere Flächen gesichert ist.
- Ausstattung von privaten Zuwegungen, Zufahrten und Plätzen sowie offenen, ebenerdigen Stellplätzen mit wasserdurchlässigen Materialien
- Oberkante Rohfußboden der Gebäude im Erdgeschoss mindestens 30 cm über der Oberkante der zur Erschließung des Gebäudes dienenden Verkehrsfläche;
- Maßgaben zur Begrünung der unbefestigten Flächen

Zur Unterstützung einer zielgerichteten Regenwasserbewirtschaftung spezifizieren Gestaltungsleitlinien qualitative Maßgaben zur stadtgestalterischen Ausprägung der Gebäude sowie der Übergänge zwischen öffentlichen und privaten Freiräumen. Die Umsetzung der Qualitätsziele erfolgt über privatrechtliche oder öffentlich-rechtliche Verträge. Eigens für das Oxford-Quartier entwickelte Merk- und Informationsblätter zur Regenwasserbewirtschaftung und Grundstücksentwässerung geben darüber hinaus Empfehlungen zur technischen Ausgestaltung und stellen Anforderungen für den einzureichenden Entwässerungsantrag (u.a. Überflutungsnachweis gemäß DIN 1986-100, Darstellung Maßnahmenkonzept).

7 Fazit

Das Wasserkonzept des neuen Oxford-Quartiers folgt den Maßgaben der neuen Arbeits- und Merkblattreihe DWA-A/M 102/BWK-M3. Das Ziel, in einem Konversions- und Neubaugebiet einen naturnahen Wasserhaushalt zu erhalten, ist mit den Maßnahmen zur Regenwasserbewirtschaftung gemäß allgemein anerkannter Regeln der Technik erreichbar.

Durch gezielte Kombination verschiedener blau-grüner Infrastrukturen entspricht der Direktabfluss nahezu dem naturnahen Zustand, während die Grundwasserneubildung nur leicht erhöht und die Verdunstung leicht vermindert sind. Die Erhöhung der Verdunstung stellte sich im Entwurfsprozess als größte Herausforderung dar. Ursache ist, dass nahezu alle bebauten Flächen und Anlagen zur Regenwasserbewirtschaftung ein Verdunstungsdefizit gegenüber dem naturnahen Zustand aufweisen. Lösungsoptionen boten Grünflächen und Anlagen mit üppiger Bepflanzung sowie zusätzlicher Bewässerung im Sommer.

Die Wasserbilanz erwies sich im städtebaulichen Entwurfsprozess als sehr hilfreich, um Planungsvarianten zügig bewerten zu können, Lösungsoptionen zu entwerfen und Restriktionen zu begründen. Die Entwurfslösungen können hinsichtlich ihres wasserwirtschaftlichen Erfordernisses nachvollziehbar begründet werden. Die Wasserbilanzrechnung nach DWA-M 102-4/BWK-M3-4 vereinfacht und beschleunigt den gemeinsamen Entwurfsprozess von Städtebau, Landschaftsplanung und Wasserwirtschaft.

8 Literatur

ARGE OXF (2016): Oxford Kaserne. Fortschreibung Städtebauliches Gesamtkonzept & Regenwasserbewirtschaftung Phase 1, Planungsteam Oxford: Kéré-Architecture, Berlin | Schultz-Granberg Städtebau und Architektur, Berlin | bbz Landschaftsarchitekten, Berlin | Prof. Dr. Mathias Uhl. Münster.

ARGE OXF (2017): Oxford Kaserne. Fortschreibung Städtebauliches Gesamtkonzept & Regenwasserbewirtschaftung Phase 2, Planungsteam Oxford: Kéré-Architecture, Berlin | Schultz-Granberg Städtebau und Architektur, Berlin | bbz Landschaftsarchitekten, Berlin | Prof. Dr. Mathias Uhl. Münster.

BMU (2003): Hydrologischer Atlas von Deutschland. Freiburg: Bundesministerium für Umwelt; Naturschutz und Reaktorsicherheit.

DWA, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.) (2021): DWA-Positionen: Wasserbewusste Entwicklung unserer Städte. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (DWA-Positionen).

DWA-A 100 (2006): DWA-Regelwerk: Leitlinien der integralen Siedlungsentwässerung (ISiE). Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA).

DWA-A/M 102/ BWK-A/M 3 (2020): DWA-Regelwerk: Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwasserabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer - Merkblattreihe Teil 1-4. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA).

DWA-M 102-4/ BWK-M 3-4 (2022): Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwasserabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer - Teil 4: Wasserhaushaltsbilanz für die Bewirtschaftung des Niederschlagswassers. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA).

Fletcher, T.D., Shuster, W., Hunt, W.F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., Trowsdale, S., Barraud, S., Semadeni-Davies, A., Bertrand-Krajewski, J.-L., Mikkelsen, P.S., Rivard, G., Uhl, M., Dagenais, D., Viklander, M. (2015): „SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage“. In: Urban Water Journal. 12 (7), S. 525–542, doi: 10.1080/1573062X.2014.916314.

Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen (2022): „BK 50, Geologischer Dienst NRW, lizenziert durch dl-de/by-2-0“. Abgerufen 22.09.2022 von www.govdata.de/dl-de/by-2-0.

Henrichs, M., Langner, J., Uhl, M., Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (Hrsg.) (2017): Wasserbilanz-Expert – Handbuch – Software zum Arbeitsblatt DWA-A 102. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA).

Meißer, J., Lippe Wassertechnik GmbH (Hrsg.) (2013): Ein vereinfachtes Verfahren zur Berechnung der flächendifferenzierten Grundwasserneubildung in Mitteleuropa.

Korrespondenz:

Mathias Uhl
Corrensstraße 25, 48149 Münster, Deutschland
+49 251 83-65201
uhl@fh-muenster.de

Birgitta Hörnschemeyer
Corrensstraße 25, 48149 Münster, Deutschland
+49 251 83-65590
b.hoernschemeyer@fh-muenster.de

Untersuchung der Auswirkungen verringerter Wasserverfügbarkeit auf bioklimatische Bedingungen unter Berücksichtigung verschiedener Klimaszenarien

Yannick Back¹, Peter M. Bach², Alrun Jasper-Tönnies³, Wolfgang Rauch¹, Manfred Kleidorfer¹
1 Universität Innsbruck, Arbeitsbereich für Umweltechnik, Technikerstr. 13, 6020 Innsbruck, Österreich

2 Eidgenössische Forschungsanstalt EAWAG, Überlandstr. 133, 8600 Dübendorf, ZH, Schweiz
3 hydro & meteo GmbH, Lübeck, Deutschland

Kurzfassung: Auf Basis der Kombination eines verbesserten GIS-basierten Modells zur Berechnung der bioklimatischen Bedingungen und einer CFD-Software zur Simulation räumlich verteilte Windgeschwindigkeiten und Lufttemperaturen, analysieren wir die Auswirkungen anhaltender Trockenheit und der Veränderung der Intensität von Hitzetagen auf Basis der Klimaszenarien RCP2.6 und RCP8.5 auf die Kühlwirkung der Vegetation und auf den thermischen Komfort. Um den Auswirkungen gleichzeitig auftretender Trockenperioden und Hitzetagen entgegenzuwirken, sind Maßnahmen erforderlich, die über die jetzigen naturbasierten Lösungen hinausgehen.

Key-Words: Climate Model Ensemble; Land-Atmosphere Interactions; Water Scarcity; Climate Change Impacts; Urban Climate; Evaporative Cooling

1 Einleitung

Im interagierenden System Boden-Atmosphäre beeinflussen die Oberflächeneigenschaften den Energie- und Wasseraustausch zwischen der Hydrosphäre, Atmosphäre und Biosphäre¹. Die Evapotranspiration stellt einen der wichtigsten Prozesse für den Energie- und Wasseraustausch zwischen den einzelnen Sphären dar². Die Hauptfaktoren des Effekts einer überwärmten Stadt liegen daher im Unterschied der Evapotranspirations- und Konvektionseffizienz zwischen den städtischen Gebieten und deren Umland^{3,4}. Aus diesem Grund verstärkt eine zunehmende Oberflächenversiegelung, die mit höheren Abflussraten, verringerter Grundwasserneubildung und in der Folge mit einer verringerten Evapotranspiration einhergeht⁵, die Temperaturunterschiede zwischen der Stadt und dem Umland, was als urbaner Hitzeinseleffekt bekannt ist⁶. Dies führt zu einer Verschlechterung der Lebensqualität, sowie zu einer Erhöhung der Gesundheitsrisiken und hitzebedingter Sterblichkeit⁷. Urbanisierung und die einhergehende Landnutzungsänderung sind in der Lage die Energie- und Wasserbilanz der Oberflächen und dadurch auch das Stadtklima entscheidend zu beeinflussen¹. Andererseits wird durch die Veränderung der Oberflächen hin zu natürlicheren Eigenschaften sowohl die latente Wärme als auch die Evapotranspiration gesteigert und die Energie- und Wasserbilanz wieder einem natürlichen Zustand angenähert. Mittels einfallender Sonnenstrahlung nutzen Vegetationsflächen die Energie zur Photosynthese und tragen, neben der Aufnahme von Kohlendioxid (CO₂) und der Abgabe von Sauerstoff (O₂), durch den Prozess der Evapotranspiration zur Verdunstungskühlung bei. Die hierfür aufgebrauchte Energie kann auch als latente Wärme bezeichnet werden. Dies erfordert jedoch die entsprechende Verfügbarkeit von Wasser. Daher muss die Bodenfeuchtigkeit, als einer der entscheidenden Faktoren dieser Prozesse, berücksichtigt werden. Sie steuert den Wasseraustausch und die Aufteilung der Oberflächenenergieflüsse und damit die Prozesse der Transpiration und Evaporation der Pflanzen respektive des Bodens⁸. Die Wasserversorgung der zumeist pflanzlich geprägten Klimawandelanpassungsmaßnahmen wird vorwiegend als selbstverständlich angesehen, was während anhaltenden Trockenperioden negative Folgen für die Vegetation und in weiterer Folge für das Wohlbefinden des Menschen

haben kann, wird sie nicht ausreichend mit Wasser versorgt. Unter Berücksichtigung durch den Klimawandel stärker ausgeprägter Trockenperioden, wird ersichtlich, dass die Infiltration und die natürliche Speicherung auf und innerhalb innerstädtischer Vegetationsflächen an Grenzen stoßen, um die Vegetation über die Sommermonate hinweg ausreichend mit Wasser zu versorgen. Eine trockene, unter Stress stehende Vegetation ist nicht mehr in der Lage, entscheidend zur Verdunstungskühlung beizutragen. Um die Widerstandsfähigkeit unserer Städte gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels zu erhöhen, ist ein strategisches Wassermanagement erforderlich, das für eine ausreichende Wasserverfügbarkeit, zur Unterstützung der ökologischen Systeme und Aufrechterhaltung des Kühleffekts, sorgt.

2 Methodik

Auf Basis einer Weiterentwicklung des Modells zur Analyse mikroklimatischer Bedingungen in Städten⁹, untersuchen wir die Änderungen der Wasser- und Energieflüsse an der Oberfläche und deren Auswirkungen auf die bioklimatischen Bedingungen innerhalb einer Fallstudie in Innsbruck, Österreich. Die verbesserte Modellversion ermittelt die quantitativen Werte der drei Energieflüsse der Oberflächenenergiebilanz (latente und sensible Wärme sowie Bodenwärmestrom). Dadurch erfolgt eine verbesserte Berechnung des Bowen-Verhältnisses (Verhältnis zwischen sensibler und latenter Wärme). Zusätzlich wird mittels NDVI-basierter Methoden der Wassergehalt der Vegetation und die potentielle Evapotranspiration berechnet. Der NDVI (Normalised Difference Vegetation Index) wird aus den CIR-Falschfarben Infrarot Bildern (CIR = Coloured InfraRed) im August der Jahre 2016 (normal feucht) und 2019 (sehr trocken) berechnet und stellt die Grundlage der Berechnungen. Die zwei Jahre stellen unterschiedliche Ausgangssituationen der Wasserverfügbarkeit dar. Um zusätzlich die Auswirkungen der Erderwärmung berücksichtigen zu können, kombinieren wir das Modell mit einer Computational Fluid Dynamics (CFD) Software der numerischen Strömungsmechanik. Damit simulieren wir räumlich verteilte Windgeschwindigkeiten und Lufttemperaturen und verbessern die Eingangsdaten im GIS-basierten Modell¹⁰. Die Verbesserung des GIS-basierten Modells und die Kombination mit einer CFD-Software ermöglicht uns die Untersuchung der Auswirkungen veränderter Wechselwirkungen zwischen dem Boden und der Atmosphäre (hier auf Basis des Bowen-Verhältnisses) (Abb. 1) auf (1) die Kühlwirkung der Vegetation anhand des berechneten Wassergehalts (Abb. 2 b) und der berechneten potentiellen Evapotranspiration (Abb. 2 b), sowie (2) auf die bioklimatischen Bedingungen anhand veränderter Verteilungen und Intensitäten des Universal Thermal Climate Index (UTCI). Letzteres wird zusätzlich unter Berücksichtigung der Veränderung der Intensität von Hitzetagen auf Basis der Klimaszenarien RCP2.6 und RCP8.5 (Abb. 3) berechnet und untersucht.

3 Veränderte Wechselwirkungen zwischen Boden und Atmosphäre

Die Wechselwirkungen zwischen dem Boden und der Atmosphäre werden in Abb. 1 durch das Bowen-Verhältnis ausgedrückt. Der Vergleich beider Jahre weist große Unterschiede insbesondere auf den Vegetationsflächen auf. Die Trockenheit im Jahr 2019 hat zur Folge, dass das Bowen-Verhältnis auf allen Vegetationsflächen ansteigt. Dies bedeutet, dass weniger einfallende Sonnenstrahlung in die latente Wärme und viel mehr in die sensible Wärme fließt. Somit steht weniger Energie der Verdunstungskühlung zur Verfügung. Zudem führt der Anstieg an sensibler Wärme zu höheren Lufttemperaturen.

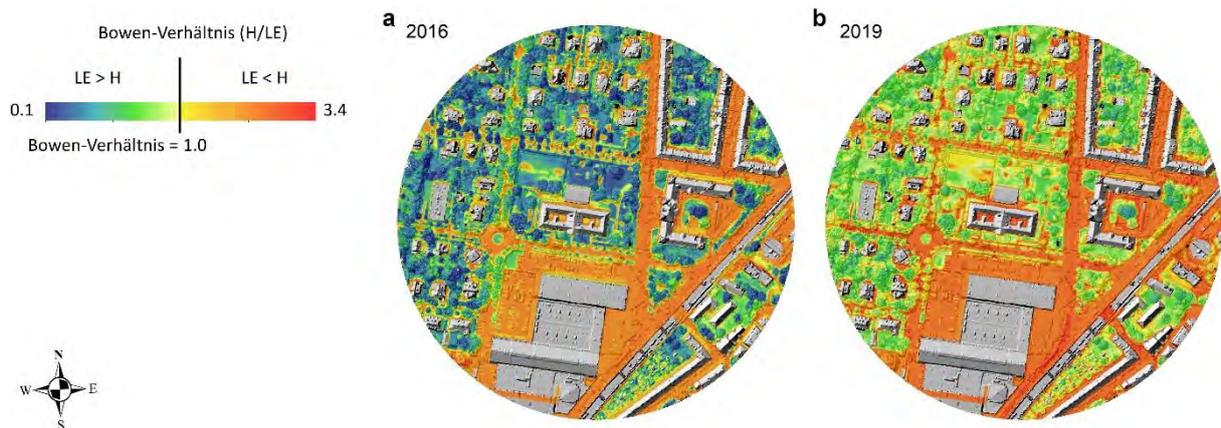


Abbildung 19: Veränderte Wechselwirkungen zwischen dem Boden und der Atmosphäre anhand des Bowen-Verhältnisses für die Jahre 2016 (a) und 2019 (b).

4 Auswirkung auf die Vegetation

Das Defizit an Energie zur Verdunstungskühlung spiegelt sich auch in einer verringerten potentielle Evapotranspiration (Abb. 2 b). Dies bekräftigt nochmals, dass durch die Veränderung der Oberflächeneigenschaften auf Grund der Trockenheit im Jahr 2019 weniger Energie in die latente Wärme floss, wodurch sich das Potential der Evapotranspiration auf Vegetationsflächen verringerte. In Kombination mit der gleichzeitig zu beobachtenden Verringerung des Wassergehalts der Vegetation (Abb. 1 a) wird ersichtlich, dass die Verdunstungsleistung der Vegetationsflächen durch die Trockenheit beeinträchtigt ist.

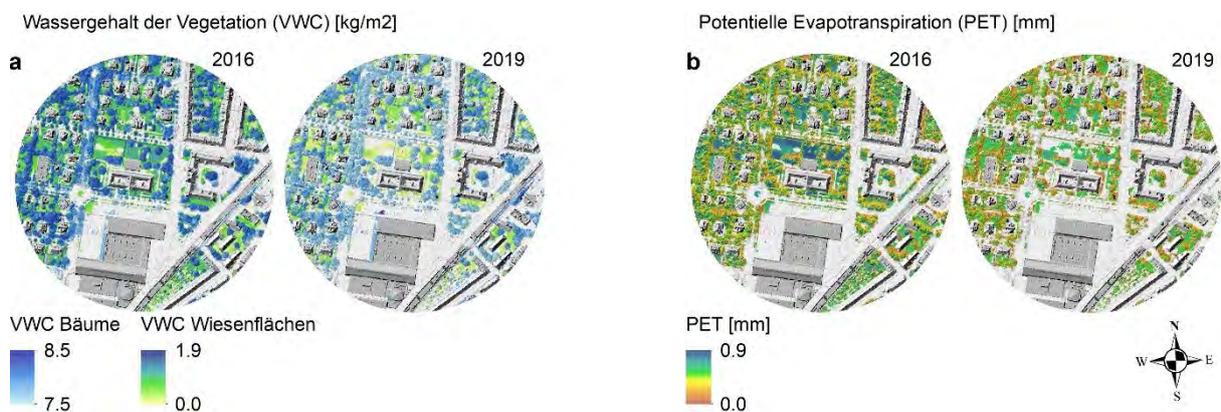


Abbildung 20: Änderung zwischen den beiden Jahren 2016 und 2019 des (a) Wassergehalts und (b) der potentiellen Evapotranspiration der Bäume und Wiesenflächen.

5 Auswirkung auf die bioklimatischen Bedingungen

Die Auswirkungen auf die bioklimatischen Bedingungen werden mittels des UTCI auf Wiesenflächen und versiegelten Flächen ermittelt. Dies wird auf Basis einer Ausgangssituation bei einer Lufttemperatur (T_a) von 30°C (Heißer Tag, per Definition ein Tag an dem die Tageshöchsttemperatur 30°C übersteigt) berechnet. Im Vergleich der Jahre 2016 und 2019 weist der Wassergehalt der Wiesenflächen eine mittlere Änderung um -0.37 Kg/m^2 (von 0.58 im Jahr 2016 zu 0.21 im Jahr 2019) auf. Daraus folgt eine mittlere Änderung des UTCI auf denselben Flächen um 0.77 °C . Die versiegelten Flächen weisen lediglich eine mittlere Änderung von 0.02 °C auf.

Bedingt durch den Klimawandel häufiger vorkommende Hitzetage nehmen auch in ihrer Intensität zu. Auf Basis der Klimaszenarien RCP2.6 und RCP8.5 ermitteln wir die mittlere Änderung des UTCI bei einer Lufttemperatur von 31 °C und 34 °C. Der Vergleich zwischen RCP 8.5 (34 °C) und der Ausgangssituation (30°C) weist eine mittlere Änderung des UTCI von 2.53 °C im gesamten Untersuchungsgebiet auf. In der Ausgangssituation weisen einzig Schattenbereiche einen UTCI unter 32°C auf, was einer moderaten Hitzebelastung entspricht. Unter RCP 8.5 verschwinden auch diese und die Hitzebelastung im Untersuchungsgebiet ist mit einem Mittelwert von über 38 °C als sehr stark einzustufen.

Universal Thermal Climate Index (UTCI) [°C]

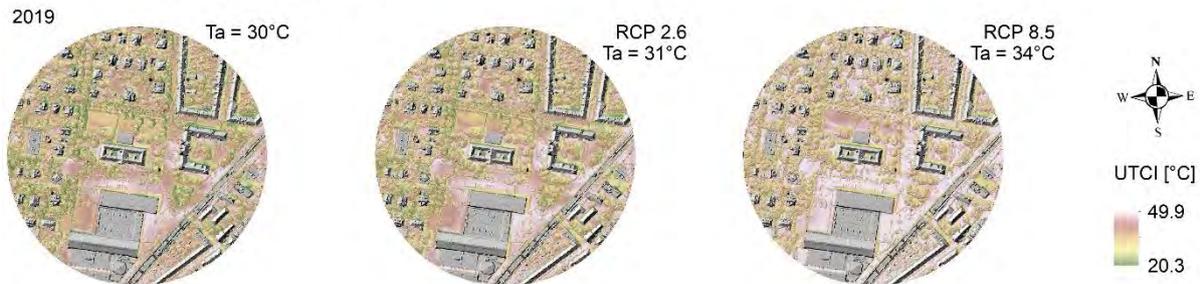


Abbildung 21: Veränderung des Universal Thermal Climate Index (UTCI) unter Berücksichtigung der Klimaszenarien RCP 2.6 und RCP 8.5, respektive der Lufttemperaturen 31 °C und 34°C.

6 Gleichzeitige Trockenheit und zunehmende Hitze

Durch das vermehrte Auftreten an Hitzetagen pro Jahr und deren stärker werdende Intensität steigt die Hitzebelastung in den Städten. Anhaltende Trockenperioden verändern die Wechselwirkungen zwischen dem Boden und der Atmosphäre, wodurch auch die Verdunstungskühlung der Vegetation verringert wird. Die Kombination aus Trockenperiode und zunehmender Hitze lässt die derzeitige Städteplanung an Grenzen stoßen, um während solcher Extremereignisse die Hitzebelastung mindern zu können. Um den Auswirkungen gleichzeitig auftretender Trockenperioden und Hitzetagen entgegenzuwirken, sind Maßnahmen erforderlich, die über die jetzigen naturbasierten Lösungen hinausgehen.

Danksagung

Diese Arbeit ist Teil der Projekte cool-INN (Projekt Nr. KR19SC0F14953), Förderungszeitraum: Februar 2020 bis Januar 2023 und BlueGreenCities (Projekt Nr. KR21KB0K00001), Förderungszeitraum: Oktober 2022 bis September 2025, welche vom Österreichischen Klima- und Energiefonds gefördert werden.

Literatur

- 1 Mahmood, R. *et al.* Land cover changes and their biogeophysical effects on climate. *International Journal of Climatology* **34**, 929-953, doi:10.1002/joc.3736 (2014).
- 2 Seneviratne, S. I. *et al.* in *Earth-Science Reviews* Vol. 99 125-161 (2010).
- 3 Zhao, L., Lee, X., Smith, R. B. & Oleson, K. Strong contributions of local background climate to urban heat islands. *Nature* **511**, 216-219, doi:10.1038/nature13462 (2014).
- 4 Manoli, G. *et al.* Magnitude of urban heat islands largely explained by climate and population. *Nature* **573**, 55-60, doi:10.1038/s41586-019-1512-9 (2019).
- 5 Bonneau, J., Fletcher, T. D., Costelloe, J. F. & Burns, M. J. in *Journal of Hydrology* Vol. 552 141-150 (Elsevier B.V., 2017).
- 6 Oke, T. R. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **108**, 1-24, doi:<https://doi.org/10.1002/qj.49710845502> (1982).

- 7 Rydin, Y. *et al.* The Lancet Commissions Shaping cities for health: complexity and the planning of urban environments in the 21st century. www.thelancet.com **379**, 2079-2108, doi:10.1016/S0140 (2012).
- 8 Schwingshackl, C., Hirschi, M. & Seneviratne, S. I. Quantifying Spatiotemporal Variations of Soil Moisture Control on Surface Energy Balance and Near-Surface Air Temperature. *Journal of Climate*, doi:10.1175/JCLI-D-16-0727.s1 (2017).
- 9 Back, Y., Bach, P. M., Jasper-Tönnies, A., Rauch, W. & Kleidorfer, M. A rapid fine-scale approach to modelling urban bioclimatic conditions. *Science of The Total Environment* **756**, 143732, doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143732> (2021).
- 10 Back, Y., Kumar, P., Bach, P. M., Rauch, W. & Kleidorfer, M. Integrating CFD-GIS modelling to refine urban heat and thermal comfort assessment. *Science of The Total Environment* (under review).

Korrespondenz:

Yannick Back
Technikerstraße 13, 6020 Innsbruck, Österreich
0043 512 507 62120
yannick.back@uibk.ac.at

Anwendung des Schwammstadtprinzips für Bäume mit dem Dualen Tiefbeet PLUS im öffentlichen Raum

D. Zimmermann¹, R. Luger¹ M. Lecko¹

1 3:0 Landschaftsarchitektur, Nestroyplatz 1/1, 1020 Wien, Österreich

Kurzfassung:

Das Duale Tiefbeet mit dem Schwammstadtprinzip für Straßenbäume, entwickelt für das Straßenprojekt „Quartier Am Seebogen“ in der Seestadt Aspern in Wien, reduziert die üblicherweise für vitale Bäume im Straßenraum benötigte Sickerfläche um bis zu siebenzig Prozent. Das gelingt dank zusammenhängender, unterirdischer Speicherbecken („Schwammstadtkörper“), die Niederschläge wochenlang zurückhalten und den Bäumen verfügbar machen. So wird Platz und geeignete Bedingungen für mehr und große Bäume im Straßenraum geschaffen. Im konkreten Projekt werden die ausgewachsenen Bäume ca. 30% des Straßenraums über Baumkronen beschatten.

Key Words: #Schwammstadt #DualesTiefbeet #Klimawandelanpassung #Seestadtaspern #Bäume



Abbildung 22: Schwammstadtstraße mit Dualem Tiefbeet und Baumpflanzungen (Juni 2022)

1 Das Quartier am Seebogen in der Seestadt Aspern-Wien als erstes Schwammstadtquartier Österreichs

Das Quartier „Am Seebogen“ ist der gerade im Bau befindliche Bereich der Seestadt Aspern in Wien, die mit rund 240 Hektar Fläche zu den größten Stadtentwicklungsgebieten Europas gehört. Hier entstehen mehr als 1.200 Wohnungen und 7.500 Flächen Gewerbeflächen. Und diese werden durch besondere Straßen miteinander verbunden: Erstmals in Österreich wird das Schwammstadtprinzip für Bäume hier großflächig - also in ganzen Straßenzügen - umgesetzt. Die Fertigstellung des 1. Bauabschnittes erfolgte im Dezember 2021.

Die Planenden - 3:0 Landschaftsarchitektur und Stoik ZT-GmbH - haben dafür auf einen integrativen Planungsprozess mit den Verantwortlichen der Stadt Wien und der Wien 3420 Aspern Entwicklungsgesellschaft gesetzt. - In enger Zusammenarbeit gelang seit dem Jahr 2017 eine Straßengestaltung, die einerseits genügend Platz für die Funktionen des Alltags (Gehen, Radfahren, Aufenthalt, Barrierefreiheit) bietet sowie befestigte Flächen für Anlieferungen, Feuerwehr etc. und andererseits ausreichend Wurzelraum für vitale große Bäume und das lokale Oberflächenwassermanagement schafft. Dies ge-

lingt mithilfe zusammenhängender, unterirdischer Retentionsbecken, die Niederschläge und Oberflächenwässer, die durch die Weiterentwicklung des „Stockholmsystems“ wochenlang zurückhalten und den Bäumen verfügbar machen können.

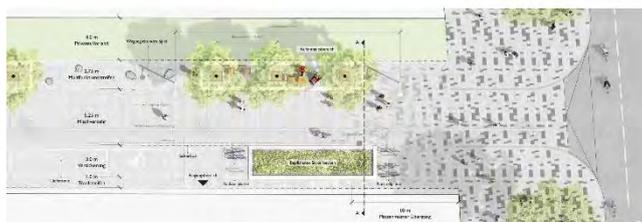


Abbildung 2: Lageplan des Straßentypus „Allee“ mit der Integration von durchgängiger Blau-Grüner Infrastruktur in Form von Dualen Tiefbeeten verbunden mittels Schwammstadtkörper unter den befestigten Flächen

2 Das Planerische Gesamtkonzept

Die Vorgabe aus dem UVP-Bescheid für die Errichtung des neuen Stadtteils im Stadterweiterungsgebiet östliche der Donau, sah eine Mindestüberschirmung des öffentlichen Raums durch Bäume vor. Durch diese Rahmenbedingungen und die sich aus dem städtebaulichen Masterplan des schwedischen Architekten Johannes Tovatt (2007) ergebenden Vorgaben für den Straßenraum, galt es die Integration von Blau-Grüner Infrastruktur in die neu zu errichtenden Straßen zu integrieren. Dazu wurden die insgesamt 69.000m² Straßenoberfläche in verschiedene Straßentypologien eingeteilt. Diese Straßentypen entsprechen auch den verschiedenen Formen der Befahrung und Mobilität und somit auch der Wasserbelastung lt. ÖWAV-Regelblatt 45.

Alle Quartiersstraßen (mit einer Breite von 14m öffentlich + 4m privatem Vorland), Quartierswege (mit einer Breite von 11,9m + 6 m privatem Vorland), Alleen (Breite von 18m) sowie die Alle mit Bus (23m Breite) werden über das Schwammstadtprinzip für Bäume entwässert. Dieses „Schwammstadtprinzip für Bäume“, ist eine Weiterentwicklung und Anpassung des „Stockholmer Modells“ an die geologischen, hydrologischen und rechtlichen Bedingungen in Österreich unter der besonderen Berücksichtigung des Frost-Tauverhaltens und baut auf der Verwendung von möglichst lokalen Materialien aus, die dem Tiefbau in der Verwendung nicht unbekannt sind.

In der Seestadt wurde, als Vorgabe der städtischen Magistratsabteilungen für Straßenbau sowie des Stadtgartenamtes ein Bausystem entwickelt, das jegliche Form von regelmäßiger Betreuung obsolet macht. Bis auf die jährliche Reinigung von Schlamm- und Schmutzfängen funktioniert das Duale Tiefbeet mit seinem Mehrkammersystem selbstständig. Diese Vorgabe des Magistrats der Stadt Wien macht die Grundkonstruktion zwar etwas aufwendiger, löst aber damit auch die Problematik, dass die Wasserzufuhr in den Untergrund – bei Unterlassung des Umlegens eines Reglers, wie bei der Kerb-Cell oder des Ziehens eines Schiebers – immerwährend gewährleistet ist.

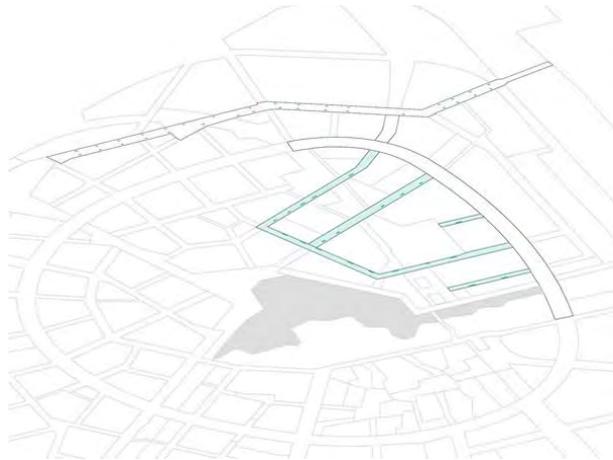


Abbildung 3: Axo der Seestadt Aspern in Wien mit den Straßenräumen, die entsprechend über das Schwammstadtprinzip entwässert werden und in der 1. Bauphase errichtet wurden.



Abbildung 4: Axo mit der Darstellung der 69.000m² Straßenraum samt 330 Baumpflanzungen

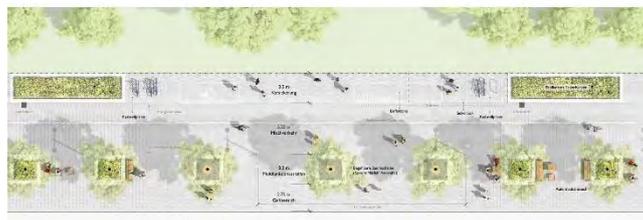


Abbildung 5: Lageplan des Straßentypus „Quartiersstraße“ – Baumstandorte und Duale Tiefbeete liegen auf unterschiedlichen Straßenseiten

3 Das Duale Tiefbeet

Bis zum Dezember 2021 wurden 51 dieser zusammenhängenden, miteinander kommunizierenden Baumgefäße realisiert. Das entspricht einer zu entwässernden Fläche von 39.000m². Jedes Duale Tiefbeet wird im sogenannten Sommerbecken mit einer adaptierten Stauden-Gräsermischung bepflanzt. Das Winterbecken hingegen mit halophytischen – salzverträglichen und streusalzresistenten – Stauden wie Meerkohl (*Crambe maritima*) oder Strand-Aster (*Aster tripolium*). Ein ausgeklügeltes Überlaufsystem aus Sicker-, Filter- und Absetzbecken, in dem Sedimente und Feststoffe aussortiert werden, hält Regen- und Schmelzwasser über mehrere Wochen im Schwammstadtkörper zurück. Optisch sind die Beckeneinfassungen aus Betonfertigteilen von einem klassischen Beet kaum zu unterscheiden. Der Effekt aber ist groß, die «dualen Tiefbeete» reduzieren die sonst im städtischen Straßenraum benötigte Sickerfläche um bis zu 70 Prozent. «Der zweite 'Wasserweg' für all jene Flächen, die nicht im Untergrund entwässert werden können, ist der große Quartiersee. Die Gesamtmodellierung der Topographie des Quartiers nimmt inzwischen entsprechend Rücksicht darauf», erläutert Daniel Zimmermann, zuständiger Partner bei 3:0 Landschaftsarchitektur, der seit 2018 auch im «Arbeitskreis Schwammstadt» der Österreichischen Gesellschaft für Landschaftsarchitektur ÖGLA aktiv ist. Wenn die Bäume ausgewachsen sind, werden ca. 30% des Straßenraums über Baumkronen beschattet sein (es gibt einen gültigen UVP (Umweltverträglichkeitsprüfung)-Bescheid, der eine verpflichtende natürliche Übershirmung des projizierten Schattens durch Bäume in den kommenden Jahren von 20% für die öffentlichen Straßenräume vorsieht, eine sinnvolle Neuerung im Sinne der Klimawandelanpassung).

Der zweite Wasserweg für jene Flächen, die nicht im Untergrund entwässert werden können, ist der große Quartiersee. Die Gesamtmodellierung der Topografie des Quartiers nimmt entsprechend Rücksicht darauf.

Baumgruben werden zu dezentralen Minikläranlagen mit Sickerbecken, bepflanzt teilweise mit salzverträglichen und streusalzresistenten Stauden und Gräsern. Ein ausgeklügeltes Überlaufsystem aus Sicker-, Filter- und Absetzbecken – ohne Drossel, in dem Sedimente und Feststoffe aussortiert werden, hält Regen- und Schmelzwasser lang zurück. Optisch sind die Beckeneinfassungen aus Betonfertigteilen von einem klassischen Beet kaum zu unterscheiden. Bis auf die erste Phase nach der Bepflanzung bzw. nachdem Winterschnitt der Stauden im zeitigen Frühjahr, bei der der wasserbaulich wichtige Niveausprung sichtbar wird. Der Effekt aber ist groß, die Dualen Tiefbeete reduzieren die sonst im städtischen Straßenraum benötigte Sickerfläche um bis zu siebenzig Prozent. So wird Platz für mehr Bäume geschaffen.



Abbildung 6: Schnittperspektive durch Duales Tiefbeet und Schwammstadtkörper

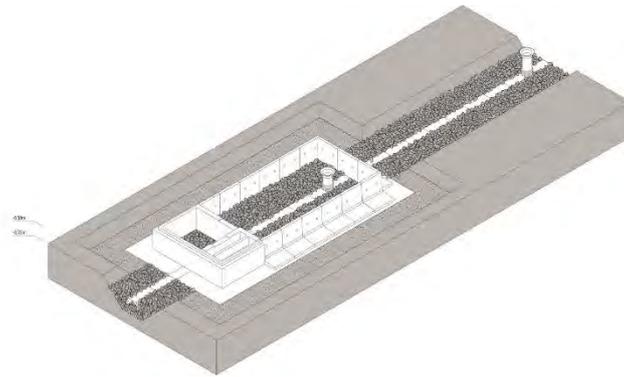


Abbildung 7: Duales Tiefbeet – Grundkonstruktion (Rohbau)

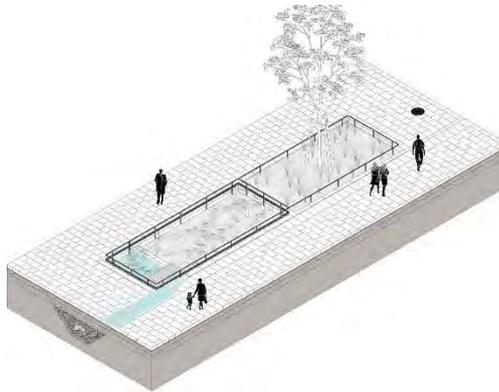


Abbildung 8: Duales Tiefbeet – Winterbetrieb bei geringeren Niederschlagsmengen

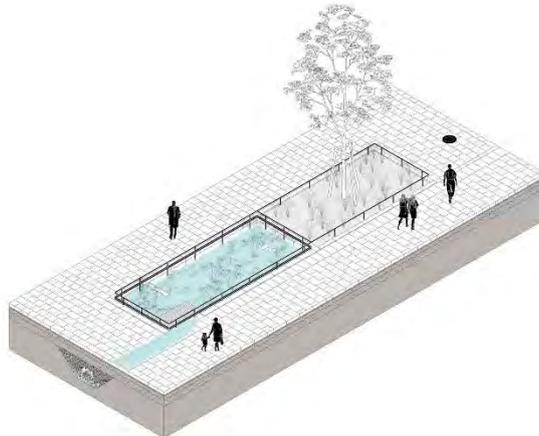


Abbildung 9: Duales Tiefbeet – Sommerbetrieb bei geringeren Niederschlagsmengen



Abbildung 230: Duales Tiefbeet – Rohbau vor Integration des Filtersubstrats und der Bepflanzung (Fj 2022)

4 Das begleitende wissenschaftliche Monitoring

Aufgrund der großen Notwendigkeit an Erkenntnisgewinn und des Bedarfs an fundierten Grundlagen, hat die Wien 3420 **aspersn** Development AG eine wissenschaftliche Begleitung ermöglicht. Das begleitende Monitoring zu Boden, Wasser und Baumwachstum erfolgt durch das erprobte Team rund um den Verein Lands Schafft Wasser/BAW Petzenkirchen sowie der HBLFA für Gartenbau in Wien-Schönbrunn. Analysiert wird Nährstoff- und Humusgehalt des Wiener Baumsubstrats sowie das Matrixpotential über Matrix-Fühler im Schwammstadtkörper. Zusätzlich erfolgen Blattanalysen auf Inhaltsstoffe, parallel dazu 3-mal pro Jahr Chlorophyll-Messung mit einem Gerät an den Blättern. Die Bonitierung erfolgt durch die Ermittlung des Zuwachses, Stammumfang und der Triebe. Da die Entwicklung und der Erfolg für Baumwachstum/Alterungsfähigkeit von Bäumen in unseren Städten, wie auch des lokalen Regenwassermanagements, durch die des Schwammstadt-Prinzips für Bäume stark an die ideale Mischung eines ortsangepassten Substrats unter Verwendung von angereicherter Biokohle geknüpft ist, stellen die Forschungsergebnisse auch wichtige Grundlagen für das Nachziehen der entsprechenden technischen Richtlinien und Normen in Österreich dar.



Abbildung 241: Duales Tiefbeet mit Stauden-Gräserpflanzung (1. Vegetationsjahr)

5 Literatur

Embrén, B.; Alvern, B.-M.; Stål, Ö.; Orvesten, A.; 2009: Planting Beds in the City of Stockholm. A Handbook. Stockholm.

FLL-Richtlinie Empfehlungen für Baumpflanzungen – Teil 2; Standortvorbereitungen für Neupflanzungen; Pflanzgruben und Wurzelraumkerweiterung, Bauweisen und Substrate, 2. Ausgabe, 2010, Bonn.

Grimm, K., Murer, E., Schmidt S.; 2021: Das Schwammstadtprinzip für Stadtbäume in Österreich – Entstehung, Funktionsweise, Herausforderungen, Umsetzungen; in: Tagungsband Aqua Urbanica 2021, Schwammstadt - Versickerung 2.0? Wien.

Zimmermann, D.; 2022: Die Schwammstadt für Bäume – ein Beitrag für mehr Gerechtigkeit im Untergrund, in: ProBaum 01/2022. Berlin-Hannover.

Korrespondenz:

Name (Hauptautor)	DI Daniel Zimmermann / 3:0 Landschaftsarchitektur
Adresse	A 1020 Wien, Nestroyplatz 1/1, Österreich
Tel	+43/1/9690662
E-Mail	dz@3zu0.com

Multifunktionale Versickerungsmulden im Siedlungsraum – Optimierung der Bepflanzung durch heimische Arten

P. Eben¹, S. Duthweiler¹, C. Moning¹

¹ Institut für Ökologie und Landschaft, Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Weihenstephaner Berg 17, 85354 Freising, Deutschland

Kurzfassung: In Zeiten des Klimawandels und Insektensterbens ist es immer wichtiger, artenreiche Bepflanzungen in die Städte zu bringen. Versickerungsmulden, die entsprechend dem technischen Regelwerk meist mit Rasenansaat begrünt sind, bieten Potential in der Optimierung der Bepflanzung. Langanhaltende Trockenheit, temporäre Überstauungen sowie hohe Salz- und Schadstoffeinträge stellen jedoch eine Herausforderung für die Pflanzplanung dar. Daher werden in Freilandversuchen und Pilotierungen verschiedene heimische Arten auf deren Stresstoleranz und Eignung für die Verwendung in urbanen Versickerungsmulden getestet. Bisher zeigten fast alle Versuchspflanzen eine gute Entwicklung.

Key-Words: heimisch, Biodiversität, Salzverträglichkeit, Versickerungsmulden, Überstauung, Trockenheitsverträglichkeit

1 Hintergrund

Wetterextreme wie langanhaltende Hitze und Trockenheit oder Starkregenereignisse verdeutlichen zunehmend den Bedarf einer wassersensiblen Siedlungsgestaltung. Die Integration blau-grüner Infrastrukturen in die Stadtplanung der Zukunft kann diesen Extremen entgegenwirken, da Niederschlagsabflüsse reduziert und zudem wertvolle Ökosystemdienstleistungen bereitgestellt werden, wie beispielsweise ein Kühleffekt durch Verdunstung (Nocco et al. 2016).

Versickerungsmulden sind ein bedeutender Teil der wassersensiblen Siedlungsgestaltung. Um ihre Funktion als Abwasseranlage dauerhaft zu erfüllen, bestehen im technischen Regelwerk Vorgaben, die unter anderem eine Begrünung mit Rasen vorsehen (DWA-A 138). In Verbindung mit dem Entwurf zur Aktualisierung des Regelwerks DWA-A 138-1 ist zu klären, in welchem Umfang diese Vorgaben für eine vielfältige Bepflanzung geöffnet werden können. Durch die Etablierung blütenreicher Bepflanzungen statt mahdintensiver Rasenflächen können die Ökosystemdienstleistungen einer Versickerungsmulde optimiert werden. Neben dem Vorteil der Kosteneinsparungen durch reduzierten Pflegeaufwand zeigten bereits einige Studien, dass artenreiche Pflanzungen verglichen mit Rasenflächen in der Bevölkerung eine höhere ästhetische Wertschätzung und Akzeptanz erlangen und zudem ein positiver Beitrag für die Insektenvielfalt geleistet werden kann (Southon et al. 2017, Hoyle et al. 2018, Garbuzov et al. 2015).

Um artenreiche Bepflanzungen in innerstädtischen Versickerungsmulden etablieren zu können und eine langfristig funktionierende Entwässerungsanlage zu gestalten, ist eine geeignete Auswahl von Pflanzenarten unumgänglich – und zugleich eine große Herausforderung, da die extremen Standortbedingungen nicht selten in hohen Ausfällen resultieren und bisher wenige Forschungen darüber vorliegen (Funai und Kupec 2017, Morash et al. 2019).

An dieser Stelle setzt das Forschungsprojekt „Multifunktionale Versickerungsmulden im Siedlungsraum“ an, dessen Zielsetzung unter anderem die Zusammenstellung einer optimierten Bepflanzung aus heimischen Arten für den Extremstandort der urbanen Versickerungsmulde beinhaltet. Die Bepflanzung soll dabei eine multifunktionale Rolle einnehmen und als dauerhaft attraktive, pflegeexten-

sive Anlage aus stresstoleranten, heimischen Pflanzen überzeugen, die eine gute Infiltration gewährleisten, den Schadstoffrückhalt nicht mindern und als Fortpflanzungs- und Nahrungshabitat für eine Vielfalt von Insekten dienen.

Während an der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (HSWT) der Fokus auf der Bepflanzung liegt, forschen die Projektpartner der Technischen Universität München (TUM) und des Bodeninstituts Johannes Prügl an einer optimierten Zusammensetzung der bewachsenen Bodenzone.

2 Methodik

Die erste Projektphase bestand darin, potentiell geeignete Pflanzenarten für die spätere Verwendung in den halbtechnischen Versuchen auszuwählen. Es wurden unter anderem folgende Anforderungen an die Bepflanzung gestellt:

- Ausschließlich heimische, krautige Pflanzenarten
- Positiver Effekt für diverse Insektenarten
- Toleranz langanhaltender Hitze- und Trockenperioden
- Toleranz temporärer Überstauungen
- Toleranz hoher Einträge von Streusalz sowie Schadstoffen aus Niederschlagsabflüssen

Auf Grundlage einer Datenbank wurden schließlich 73 Arten aus 23 Familien ausgewählt, die in der zweiten Projektphase (halbtechnische Versuche) verwendet werden. Am Forschungsfreigelände der HSWT wurden Probepflanzungen angelegt, um diese Arten unter muldenspezifischen Stresseinflüssen und dadurch auf ihre Eignung für Entwässerungsanlagen zu testen. Die Probepflanzungen bestehen aus 20 Mischungen zu jeweils drei heimischen Staudenarten, die durch Frühlingsgeophyten und zwischengesäte Einjährige und Zweijährige ergänzt wurden. Jede Mischung wurde in vierfacher Replikation in Gefäße mit einer Pflanzfläche von je ca. 1 m² gepflanzt (Abbildung 1).

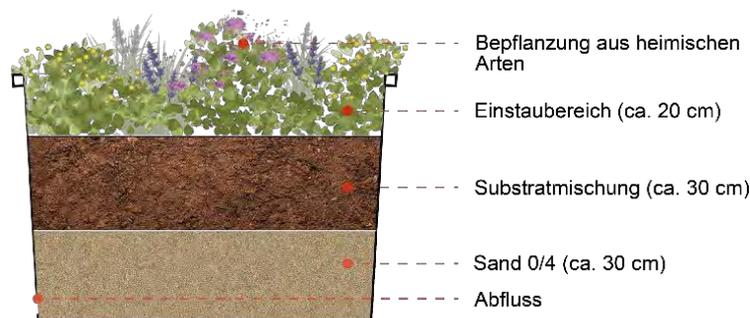


Abbildung 25: Skizze und Aufbau der Pflanzgefäße an der HSWT

Zur Simulation des Extremstandortes werden jeweils drei der vier Pflanzgefäße unterschiedlichen Stresssituationen ausgesetzt, während die vierte Replikation als Kontrollpflanzung dient. So werden diese Module im Winter regelmäßig mit NaCl gesalzen und im Sommer mehrmaligen Überstauungsversuchen unterzogen. Die Dauer des Wassereinstaus beträgt dabei 24 h gemäß DWA-A 138 (DWA 2005) und 84 h gemäß DWA-A 138-1 (DWA 2020). Um die Toleranz von Salzeintrag und temporärer Überstauung sowie Trockenheit untersuchen zu können werden Vitalität, phänologische Entwicklung und Zuwachs / Deckung aller Pflanzenarten regelmäßig erfasst. Da für die Gestaltung einer attraktiven Pflanzfläche das optische Erscheinungsbild der Versuchspflanzen von großer Bedeutung ist wurde zudem ein visuelles Bewertungssystem entwickelt, welches Schädigungen wie zum Beispiel Blattverfärbungen, Chlorosen oder Blattfall dokumentiert. Außerdem messen Sensoren (TEROS 12, METER Group) in 12 Pflanztrögen den volumetrischen Wassergehalt sowie Bodentemperatur und elektrische Leitfähigkeit.

An der TUM erfolgte ein identischer Versuchsaufbau unter Verwendung ausgewählter Pflanzenmischungen, hier werden die Pflanzenarten regelmäßig mit Niederschlagsabflüssen aus unterschiedlichen Schadstoffspektren beschickt.

Ergänzend zu den halbertechnischen Versuchen wurden zudem zwei Pilotprojekte an einer stark frequentierten Straße in München und in einem Wohngebiet in Pfaffenhofen an der Ilm umgesetzt. In München wurden sechs Versickerungsmulden mit zwei unterschiedlichen Artenmischungen bepflanzt, um deren Stresstoleranz unter realen Bedingungen testen zu können. In Pfaffenhofen entstanden Baumrigolen, die ebenfalls mit den heimischen krautigen Arten unterpflanzt wurden. An beiden Standorten wird die Entwicklung der Pflanzen unter den extremen Standortbedingungen dokumentiert und ausgewertet, begleitend dazu findet ab 2023 ein Insektenmonitoring statt.

3 Vorläufige Ergebnisse

Von den 60 Staudenarten, die mehrfach in den Pflanztrögen der halbertechnischen Versuche an der HSWT gepflanzt sind, wurden bisher bei 23 Arten Ausfälle verzeichnet. Es erfolgten insgesamt 827 Pflanzungen (inklusive einiger Nachpflanzungen), wobei bislang bei 10,5 % der Pflanzen ein Absterben dokumentiert wurde. In Relation zur Anzahl der Pflanzungen gesehen wurden mit 10,9 % mehr Ausfälle bei den Pflanzungen unter Stresseinfluss erfasst als bei den Kontrollpflanzungen (9,4 %). Die Hälfte der Ausfälle bei Pflanzungen unter Stresseinfluss wurde allerdings noch vor Versuchsbeginn dokumentiert (Abbildung 2), sodass die Ausfälle dieser Gefäße nicht ausschließlich auf die Salz- und Überstauungsversuche zurückgeführt werden können. Während der winterlichen Salzung beziehungsweise unmittelbar danach, als die Salzeinträge noch im Boden messbar waren, verzeichneten beispielsweise *Teucrium chamaedrys*, *Linum perenne*, *Euphorbia seguieriana* und *Centaurea scabiosa* hohe Ausfälle von 20 % und mehr.

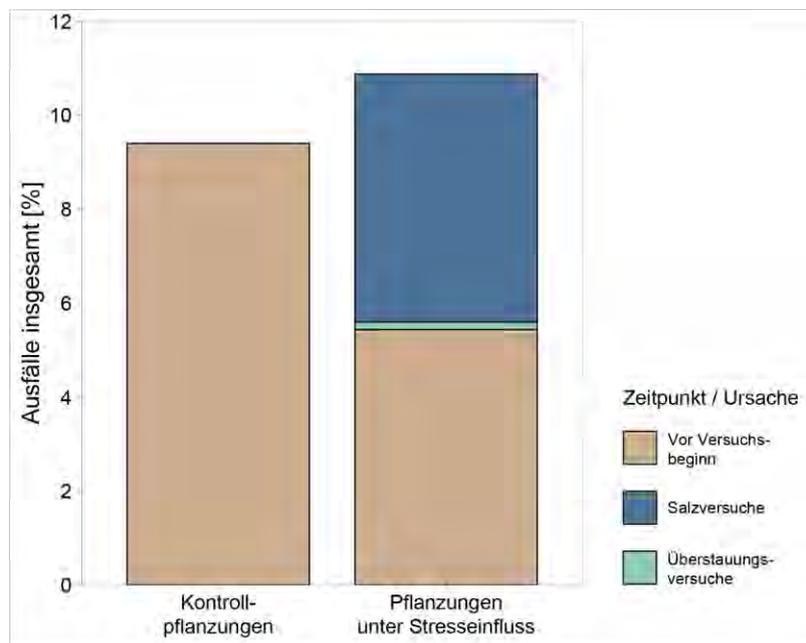


Abbildung 26: Bisherige Pflanzausfälle bei Kontrollpflanzungen und Pflanzungen unter Stresseinfluss je Anzahl der Pflanzungen, unterteilt in mögliche Ursachen aufgrund des Zeitpunkts des Absterbens (unmittelbar nach oder während der Salz- und Überstauungsversuche beziehungsweise noch vor Versuchsbeginn).

Signifikante Unterschiede zwischen den Kontrollpflanzungen und Pflanzungen unter Stresseinfluss zeigten sich teilweise in den Daten der regelmäßigen Qualitätsbewertung. Die Mittelwerte der Bewertungsziffern lagen bei den Kontrollpflanzen stets über den Werten der gestressten Pflanztröge. Von März bis Mitte Mai sowie ab August konnten signifikante Unterschiede nachgewiesen werden, dies deckt sich mit dem Zeitpunkt des Neuaustriebs kurz nach den Salzversuchen und mit einer Phase starker Trockenheit, in welcher ausschließlich Kontrollpflanzungen gewässert wurden. Signifikante Unterschiede zeigten sich bei Arten wie *Dictamnus albus* und *Linum perenne*. *Bupleurum falcatum*, *Stipa pennata* und *Anthericum ramosum* hingegen wiesen zum Beispiel stets sehr gute Qualitäten ohne Schäden auf.

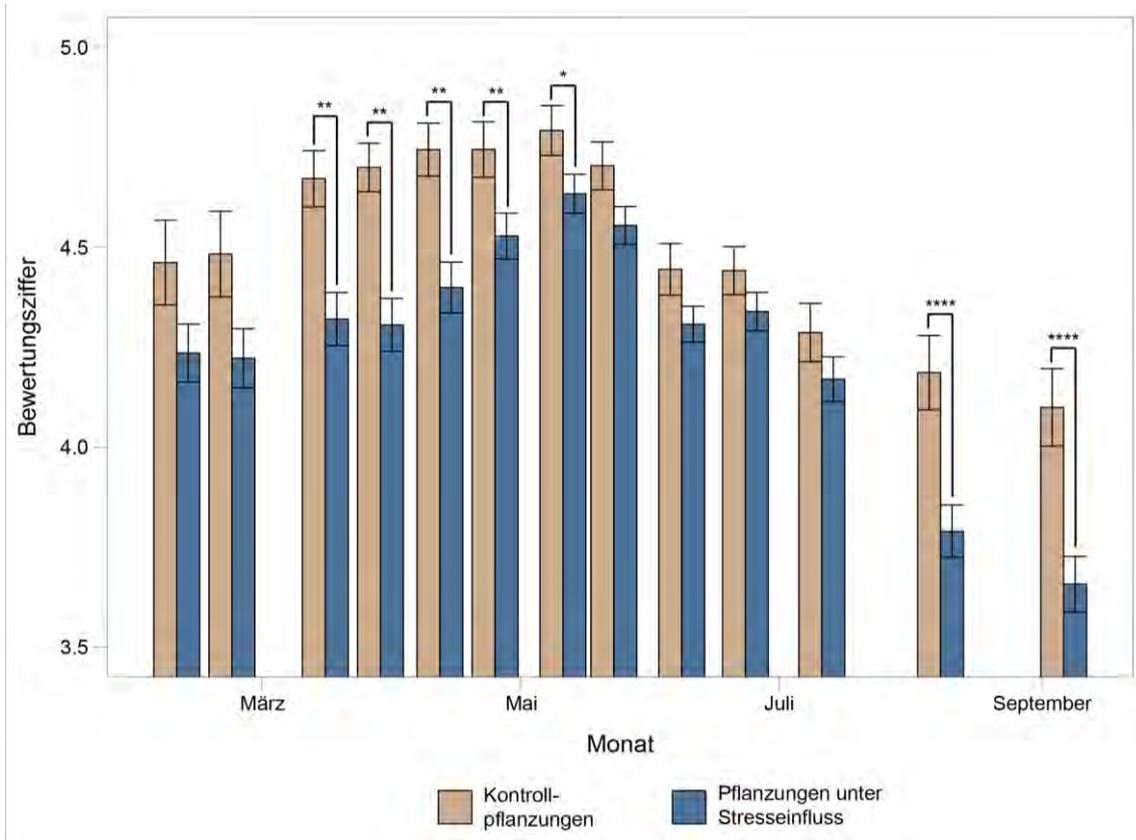


Abbildung 27: Auswertung der visuellen Qualitätskontrolle von Kontrollpflanzungen und Pflanzungen unter Stresseinfluss. Werte geben Mittelwerte \pm Standardfehler (Fehlerbalken) aller Pflanzenarten zu verschiedenen Zeitpunkten an. Bewertungsziffern von 0 (= Pflanze abgestorben) bis 5 (= sehr gute Qualität ohne Schäden). Signifikante Unterschiede (Kruskal-Wallis-Test) sind wie folgt dargestellt: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$, **** $p < 0.0001$.

4 Ausblick

Die bisherigen Versuche an der HSWT zeigten für die meisten Arten eine sehr gute Stresstoleranz. Auch in den Pilotierungen in Pfaffenhofen an der Ilm und München konnte sich ein Großteil der Arten trotz des heißen und trockenen Sommers gut etablieren. Die Dokumentationen werden noch ein weiteres Jahr fortgeführt. Die Effekte der artenreichen Bepflanzungen auf die Insektenvielfalt werden ab 2023 an den beiden Standorten der Pilotierung untersucht. Außerdem sind Analysen der Pflanzen geplant, um die Aufnahme von Schadstoffgehalten in oberirdische Pflanzenteile zu erfassen. Zum Ende des Forschungsprojektes soll ein Leitfaden mit Handlungsempfehlungen entstehen.

5 Danksagung

Die AutorInnen danken dem Bayerischen Landesamt für Umwelt und dem Bayerischen Staatsministerium für Umwelt für Auftrag und Finanzierung des Projektes sowie der Stadt München, der Stadt Pfaffenhofen an der Ilm und dem BayWISS Verbundkolleg „Life Sciences und Grüne Technologien“ für ihre Unterstützung.

6 Literatur

- DWA (2005): Arbeitsblatt DWA-A 138. Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- DWA (2020): Arbeitsblatt DWA-A 138-1. Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser – Teil 1: Planung, Bau, Betrieb. Entwurf. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- Funai J. T. und Kupec P. (2017): Exploring Planting and Filter Media in Stormwater Bioremediating Landscapes: a Review. *Water, Air & Soil Pollution*, 228(9), 1–12. DOI: 10.1007/s11270-017-3524-0.
- Garbuzov M., Fensome K. A. und Ratnieks F. L. W. (2015): Public approval plus more wild-life: twin benefits of reduced mowing of amenity grass in a suburban public park in Saltdean, UK. *Insect Conserv Divers*, 8(2), 107–119. DOI: 10.1111/icad.12085.
- Hoyle H., Norton B., Dunnett N., Richards J. P., Russell J. M. und Warren P. (2018): Plant species or flower colour diversity? Identifying the drivers of public and invertebrate response to designed annual meadows. *Landscape and Urban Planning*, 180, 103–113. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2018.08.017.
- Morash J., Wright A., LeBleu C., Meder A., Kessler R., Brantley E. und Howe J. (2019): Increasing Sustainability of Residential Areas Using Rain Gardens to Improve Pollutant Capture, Biodiversity and Ecosystem Resilience. *Sustainability*, 11(12), 1–18. DOI: 10.3390/su11123269.
- Nocco M. A., Rouse S. E. und Balster N. J. (2016): Vegetation type alters water and nitrogen budgets in a controlled, replicated experiment on residential-sized rain gardens planted with prairie, shrub, and turfgrass. *Urban Ecosystems*, 19(4), 1665–1691. DOI: 10.1007/s11252-016-0568-7.
- Southon G. E., Jorgensen A., Dunnett N., Hoyle H. und Evans K. L. (2017): Biodiverse perennial meadows have aesthetic value and increase residents' perceptions of site quality in urban green-space. *Landscape and Urban Planning*, 158, 105–118. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2016.08.003.

Korrespondenz:

Patrizia Eben
 Institut für Ökologie und Landschaft, Hochschule Weihenstephan-Triesdorf
 Weihenstephaner Berg 17, 85354 Freising, Deutschland
 +49 8161 713315
patrizia.eben@hswt.de

Datenbasierte Evaluierung hydrologischer und gesellschaftlicher Potenziale der Schwammstadt für Stadtbäume

Anna Zeiser^{1, 2}, Thomas Weninger¹, Stefan Schmidt³, Thomas Roth³, Sebastian Rath², Erwin Murer², Peter Strauss¹

1 Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, Bundesamt für Wasserwirtschaft, Pollnbergstraße 1, 3252 Petzenkirchen

2 Verein Land schafft Wasser, Pollnbergstraße 1, 3252 Petzenkirchen

3 Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Gartenbau und Österreichische Bundesgärten, Grünbergstraße 24, 1130 Wien

Kurzfassung: Die Schwammstadt für Stadtbäume, wie sie in Österreich eingesetzt wird, bietet die Möglichkeit, Wurzelraum für Bäume im städtischen Umfeld auch unter versiegelten und verdichteten Oberflächen zu schaffen. Dies ermöglicht bessere Wachstumsbedingungen für Stadtbäume wodurch diese ihre gesellschaftlichen Potenziale besser ausschöpfen können. Dazu zählen das Kühlen der Umgebung oder das Speichern von Kohlenstoff. Zusätzlich bietet das Substrat auf Grund seiner Struktur die Möglichkeit, Oberflächenwasser in größerem Ausmaß einzuleiten und somit Überflutungen bei Starkregereignissen entgegenzuwirken.

Key-Words: Stadtbaum, Schwammstadtsubstrat, Starkregen, Verdunstung, Kühlung

1 Einleitung

Im von zahlreichen Nutzungsinteressen hart umkämpften Siedlungsraum basiert eine begründbare Flächeninanspruchnahme im besten Fall auf einer guten Abwägung ökonomischer und ökologischer Argumente. Während Stadtbäume von den einen als Platzverschwendung empfunden werden, werden sie von anderen als nachhaltige Notwendigkeit forciert. Mit dem alleinigen Fokus auf der Pflanzung von möglichst vielen Bäumen in dem naturfremden Lebensraum Stadt ist die gewünschte Wirkung aber noch nicht gesichert. Während Pflege- und Schnittmaßnahmen nach der Pflanzung wesentlich zum Gedeihen der Bäume in den ersten Jahren beitragen können, ist es vor allem die Gestaltung des umgebenden Untergrundes als erschließbarer Wurzelraum, der den Grundstein für ein langes und vitales Baumleben legt oder ein solches von Vorneherein maßgeblich erschwert. Bei gelungener Etablierung des Stadtbaumes erbringt dieser eine Fülle von Leistungen für die Gesellschaft, deren Quantifikation meist durch grobe Überschlagsrechnungen und Schätzungen passiert. In einer Kombination aus realmaßstäblichen Projekten im Osten Österreichs und Laborversuchen sollen solche Ableitungen auf eine solidere Datenbasis gestellt werden.

1.1 Erklärung Schwammstadt für Stadtbäume

Die in Österreich als «Schwammstadt für Stadtbäume» etablierte Bauweise folgt dem Vorbild der Stadt Stockholm und ist auch unter den Begrifflichkeiten «Stockholmsystem» oder «Struktursubstrat» bekannt, wobei letztere Bezeichnung auch andere Bauweisen mit einer ähnlichen Idee einschließt. Das Ziel der Schwammstadt für Stadtbäume besteht in erster Linie darin den Wurzelraum von Bäumen im urbanen Raum auch unter versiegelte und/oder verdichtete städtische Oberflächen zu erweitern und dadurch ein vitales und langjähriges Baumwachstum zu ermöglichen. Das Kernelement des Systems bildet ein Skelettgerüst aus Grobsplitt, das im Zuge von Baumaßnahmen unter die später versiegelte Oberfläche in einer Tiefe von meist 1,50 m und mehr über eine Höhe von in der Regel 60 bis 90 cm eingebracht und bis zur Tragfähigkeit eingerüttelt und verdichtet wird. In dieses stabile Gerüst mit für

das Wurzelwachstum ausreichend großen Hohlräumen wird anschließend Feinsubstrat mit Wasser und Druck eingeschlämmt, das bedingt durch die Art der Herstellung nicht nachträglich verdichtet werden kann. Dieses Feinsubstrat stellt dem Baum die notwendigen pflanzenverfügbar gespeicherten Nährstoffe und Wasser zur Verfügung. Das Aufbringen einer Verteil- und Belüftungsschicht mit Anschluss an die Oberfläche ermöglicht sowohl die Zufuhr von Niederschlagswasser, als auch den für die Wurzeln wichtigen Gasaustausch.

1.2 Die Potenziale der Schwammstadt für Stadtbäume

Zusätzlich zu langfristiger Baumvitalität bietet das Schwammstadtkonzept wesentliche Potenziale für den städtischen Wasserkreislauf im Hinblick auf die dezentrale Versickerung, Zwischenspeicherung und pflanzliche Nutzung von Niederschlagswasser an Ort und Stelle (Biber, 2017). Dies erhöht in weiterer Folge die im Angesicht der voranschreitenden Erhitzung der Städte immer wichtigere Kühlungs-wirkung (Chen et al., 2019). Der Erfüllungsgrad dieser Potenziale hängt vor allem von der Optimierung des Schwammstadtsubstrats auf die hydrologische Funktionalität und die Eignung als langjähriger Baumstandort ab (Rötzer et al., 2019). Die damit verbundenen Prozesse spielen sich durchwegs im Porenraum der Substrate ab, genauer gesagt in Poren innerhalb bestimmter Durchmesserbereiche. Während die Starkregenaufnahme und -ableitung beispielsweise in sehr großen Poren am besten abläuft, werden für die Speicherung und Abgabe des Wassers an Baumwurzeln wesentlich kleinere Poren benötigt. Durch zielgerichtete Substratentwicklung soll sichergestellt werden, dass die besonders funktionalen Porengrößenklassen in ausreichendem Ausmaß vorhanden sind und auch die hier vorgestellte Evaluierung zielt darauf ab, Informationen über das plangemäße Vorliegen und die Funktion des Porensystems zu erhalten.

2 Methodik

In der Lysimeteranlage für Stadtbäume und Stadtbaumsubstrate in der Jägerhausgasse in Wien werden seit einigen Jahren verschiedene Substrat- und Konstruktionsvarianten im Reallabormaßstab erprobt. Seit 2019 werden neben Baumsubstraten auch Schwammstadtsubstrate als überbaubare Unterbauvarianten getestet (Zeiser et al., 2021). Damit soll durch eine Kombination verschiedener Messmethoden die Eignung dieser Substrataufbauten hinsichtlich Baumwachstum und hydrologischer Funktionen ermittelt werden.

Die drei Schwammstadt-Lysimeter in der Größe von 6 x 3 x 1,30 m wurden mit allen im Straßensetting notwendigen Schichten aufgebaut, haben eine gepflasterte Oberfläche und sind mit jeweils einer *Celtis australis* bepflanzt. Das Hauptaugenmerk liegt auf der Erfassung des Bodenwasserhaushaltes mittels Sensoren zur Messung der Wassergehalte und der Potentialverhältnisse in den Substraten. Durch die Aufzeichnung der Sickerwassermengen, des Niederschlags und des Saftstroms der Bäume wird die Basis für eine Bilanzierung des Wasserhaushalts geschaffen. Dendrometer, die eine kontinuierliche Messung des Baumumfangs ermöglichen, die Messung der stomatären Leitfähigkeit zu ausgewählten Zeitpunkten, Infrarotaufnahmen der Baumkronen, sowie die visuelle Erkundung des Wurzelwachstums in eingebauten Plexiglasrohren und eine fachmännische Bonitierung und Erfassung des Triebzuwachses runden das Messkonzept ab.



Abbildung 28: Schwammstadt-Lysimeter in der Jägerhausgasse in Wien im Oktober 2020

Ergänzend zu dieser Untersuchung im Reallabormaßstab werden Versuche im Labormaßstab durchgeführt um die hydrologische Funktionsweise des Schwammstadtsubstrates detaillierter zu untersuchen. Dazu wurden bodenphysikalische Standardmethoden für die Anwendung am Schwammstadtsubstrat modifiziert, insbesondere mussten Probevolumen und Dimensionen der Gerätschaften so gewählt werden, dass trotz der außergewöhnlichen Korngrößen des Grobsplitts repräsentative Beobachtungen von Flussgrößen möglich waren. Es wurden Zylinder mit Durchmesser und Höhe von jeweils 25 cm verwendet um die gesättigte hydraulische Durchlässigkeit und die Wasserspeicherkapazität nach 2 Stunden freier Entwässerung zu messen. Der verwendete Grobsplitt wurde an diese Probengröße angepasst, es wurde Bruchkorn mit Korngrößen von 32 bis 63 mm verwendet und mit einer Porosität eingebaut, die dem Realzustand entspricht. In dieses Grundgerüst wurden ebenfalls, wie im Realmaßstab, 25% des Gesamtvolumens an Feinsubstrat eingewaschen. Eine Kombination der beiden Betrachtungsebenen Lysimeter und Labor ermöglicht eine datenbasierte Abschätzung der hydrologisch und gesellschaftlich relevanten Potenziale der Schwammstadt für Stadtbäume.

3 Ergebnisse und Diskussion

Ein wesentliches Argument für das System Schwammstadt ist der Rückhalt für Starkregen. In den Laborbestimmungen konnten bereits die dafür wesentlichen Charakteristiken des Grobporensystems an Hand einer für einen Projektstandort in Graz gewählten Substratzusammensetzung quantifiziert werden. Der Volumenanteil an Wasser, der sehr schnell ins Substrat fließen kann, dort verteilt wird und schnell wieder drainiert, ist mit etwa 16% sehr hoch (Tab. 1), bei natürlichen Böden liegt dieser Anteil meist im sehr niedrigen, einstelligen Bereich. Auch die gesättigte Durchlässigkeit ist mit Werten zwischen 165 und 203 cm/h äußerst hoch. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die Wasseraufnahme und -verteilung im Schwammstadtsubstrat für die Funktion des Systems nicht limitierend ist, es muss darauf geachtet werden, das Zuleitungssystem dementsprechend zu dimensionieren (vgl. Szota et al., 2019).

Werden die grundsätzlichen Anteile der Systemkomponenten Grobsplitt – Feinsubstrat – freies Porenvolumen ähnlich gewählt, können diese Werte für eine Abschätzung des Rückhaltepotenzials für Starkregen herangezogen werden. Ein Kubikmeter Schwammstadtsystem entsprechend der untersuchten Zusammensetzung kann somit je nach Vorfeuchte 160 bis 230 Liter Wasser aufnehmen. Verglichen mit den Bemessungswerten für örtliche Starkniederschläge (ehyd.gv.at; Tabelle 2) kann so das Rückhaltepotenzial bzw. das jeweils aufnehmbare Einzugsgebiet bestimmt werden. Eine Anlage in Graz mit 50 m³ Schwammstadtvolumen, also der Standort von zwei Bäumen, kann so beispielsweise bei einem 5-jährlichen, 15-minütigen Ereignis die Niederschlagfracht eines Einzugsgebiets von bis zu 460 m² vollständig aufnehmen, das entspricht etwa der Dachfläche eines mittelgroßen Wohnblocks.

Tabelle 2: Messwerte aus Standard-Labormessungen

Wiederholung	Projektstandort in Graz		
	1	2	3
Wasseranteil gesättigt (cm ³ /cm ³)	25,1	25,9	26,3
Ks (cm/h)	175,7	165,6	203,0
Wasserkapazität 2h (cm ³ /cm ³)	9,9	9,7	9,4
Trockenrohddichte (g/cm ³)	2,01	2,01	2,02
Perm. Welkepunkt (cm ³ /cm ³)	1,9	1,7	1,6

Tabelle 3: Bemessungsniederschläge für Wien und Graz, T steht für Annuität, Werte in mm (ehyd.gv.at)

Dauerstufe	Graz		Wien	
	T = 5	T = 30	T = 5	T = 30
15 min	24,9	36,2	19,7	29,3
60 min	42,2	60,9	27,9	41,6

Diese Werte repräsentieren den Einbauzustand bei Neuanlagen mit der untersuchten Substratzusammensetzung. Durch fortschreitendes Wurzelwachstum wird der Porenraum etwas verringert, wobei berücksichtigt werden muss, dass die Einleitung nicht entlang des Baumes führt, sondern separiert und bei intelligentem Design die weniger stark durchwurzelter Bereiche bei der Wasseraufnahme eine größere Rolle spielen können.

Zusätzlich ist von einer gewissen Heterogenität im Feinsubstratanteil des Schwammstadtaufbaus und somit in der Porenverteilung am realen Projektstandort auszugehen. Ein durchgeführter Flutungsversuch in der Lysimeteranlage Jägerhausgasse zeigte einen ansteigenden Grobporenanteil von unten nach oben entlang des Schwammstadtsubstratprofils. Dies lässt mehr Feinsubstrat in tiefer gelegenen Substratbereichen vermuten.

Der zweite große Potenzialträger ist das geförderte Baumwachstum, das in den beschriebenen Forschungsanlagen genau beobachtet wird. Die Daten aus den ersten zweieinhalb Standjahren zeigen eine stark voranschreitende Durchwurzlung des Schwammstadtsubstrats in allen drei Lysimetern, im zweiten Jahr wesentlich höhere Saftstrommengen, sowie die grundsätzlich vitale Entwicklung der gepflanzten Bäume. Die voranschreitende Ausnutzung des Schwammstadtsubstrats als Wurzelraum führt auch zu einer Ausschöpfung des Bodenwasserspeichers in weiter entfernten Bereichen. Die durch das Wachstum und die Zunahme des Blätterdachs bedingte verstärkte Verdunstung führt zu einer intensiveren Ausschöpfung des Bodenwasserspeichers im Wurzelbereich. In Summe wurde den Lysimetern im Jahr 2021 im Vergleich zum Jahr 2020 wesentlich mehr gespeichertes Wasser durch die gepflanzten Bäume entzogen, was bedeutet, dass im Sommer auch mehr Niederschlagswasser für die Wiederauffüllung des Bodenwasserspeichers verbraucht wurde, bevor es zu Sickerwasseranfall kam.

Während der intensiven Trockenphase im Juni und Juli 2021 zeigte sich eine deutlich reduzierte Verdunstung und stagnierendes Wachstum, was die Relevanz der regelmäßigen und großflächigen Befeuchtung des Schwammstadtsubstrates sowie der Substratoptimierung in Bezug auf dessen Bodenwasserspeicher für die bestmögliche Erfüllung gesellschaftlich relevanter Potenziale verdeutlicht. Auf Grund des großräumigen Wurzelraums, welchen das System bieten kann, und der Möglichkeit/Notwendigkeit der Einleitung von Oberflächenwasser über die Anbindung einer bestimmten urbanen Einzugsgebietsfläche bietet das System Schwammstadt den Stadtbäumen eine bessere Lebensgrundlage für das Überdauern von Hitzewellen.

4 Schlussfolgerung

Optimalerweise besteht die Stadt der (nahen) Zukunft aus einer Vielzahl an Blau-Grünen Infrastrukturmaßnahmen. Dies führt einerseits dazu, dass die Ressource Niederschlagswasser vielseitig nutzbar wird, setzt aber andererseits auch voraus, dass eine optimierte Aufteilung dieser Ressource erfolgt (Li et al., 2019). Im Starkregenfall soll das Schwammstadtsubstrat für die rasche Retention genutzt werden. Bei durchschnittlichen Regenereignissen hingegen ist eine Wassereinleitung primär in dem Ausmaß und der Verteilung sinnvoll, indem sie zur Auffüllung des Bodenwasserspeichers bis zur Feldkapazität notwendig ist, um Wasserverluste durch Tiefenversickerung zu vermeiden. Dies ist besonders relevant, wenn andere Blau-Grüne Infrastrukturmaßnahmen am Standort verfügbar sind. Hier gilt es, je nach Projektstandort und Rahmenbedingungen einen goldenen Weg zu finden und die Wasserführung bestmöglich zu konzipieren. Dafür spielt die Kenntnis der Substrateigenschaften eine wesentliche Rolle.

5 Literatur

- Biber, C. (2017). Advanced Urban Trees - How trees can be part of the solution. An advanced system of urban tree pits to be included in decentralized stormwater management. Hafencity Universität Hamburg.
- Chen, X., Zhao, P., Hu, Y., Ouyang, L., Zhu, L., & Ni, G. (2019). Canopy transpiration and its cooling effect of three urban tree species in a subtropical city- Guangzhou, China. *Urban Forestry and Urban Greening*, 43(Juni), 126368. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126368>
- Grimm, K., Murer, E. & Schmidt, S. (2021). Das Schwammstadtprinzip für Stadtbäume in Österreich – Genese, Stand der Dinge, ausgewählte Beispiele, Herausforderungen. *Aqua Urbanica 2021*, Innsbruck.
- Li, C., Peng, C., Chiang, P. C., Cai, Y., Wang, X., & Yang, Z. (2019). Mechanisms and applications of green infrastructure practices for stormwater control: A review. *Journal of Hydrology*, 568(Oktober 2018), 626–637. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.10.074>
- Rötzer, T., Rahman, M. A., Moser-Reischl, A., Pauleit, S., & Pretzsch, H. (2019). Process based simulation of tree growth and ecosystem services of urban trees under present and future climate conditions. *Science of the Total Environment*, 676(Mai), 651–664. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.235>
- Szota C., Coutts A.M., Thom J.K., Virahsawmy H.K., Fletcher T.D., und Livesley S.J. (2019): Street tree stormwater control measures can reduce runoff but may not benefit established trees. *Landscape and Urban Planning* 182, 144-155.

Zeiser, A., Weninger, T., Murer, E., Schmidt, S., Weisgram, R. & Strauss, P. (2021). Die Schwammstadt als Substrat für Stadtbäume. 75. ALVA-Tagung, LFZ Franzisco Josephineum, Wieselburg. Tagungsbericht 2021, 60-62.

Korrespondenz:

Anna Zeiser
Pollnbergstraße 1, 3252 Petzenkirchen, Österreich
+43 7416 52 108 0
Anna.Zeiser@baw.at

Retentions Gründächer als multifunktionale blau-grüne Infrastrukturen – Ergebnisse eines Langzeit-Monitorings in Hamburg

M. Richter¹, W. Dickhaut¹

¹ Hafencity Universität, Henning-Voscherau-Platz 1, 20457 Hamburg, Deutschland

Kurzfassung: Im Rahmen eines RISA Pilotprojekts wurden zur Abkopplung eines unterschiedliche Retentions Gründächer gebaut und im langjährigen Praxistest untersucht. Es wurden 64 – 79 % der Niederschläge auf den Dächern zurückgehalten und verdunstet. Für einzelne (Stark-)Regenereignisse wurden hohe Retentionsvermögen und Abflussdrosselung nachgewiesen. Wenn das Regenwasser dauerhaft auf dem Dach gespeichert wird, kann die Artenzusammensetzung langfristig verändert, die Verdunstungsleistung und somit die kühlende Wirkung auf die Umgebung erhöht und auch in Trockenperioden aufrechterhalten werden.

Key-Words: Blau-grüne Infrastruktur; Dachbegrünung; Einstaudach; Retentionsdachbegrünung; Schwammstadt;

1 Einführung

1.1 Retentions Gründächer

Retentions Gründächer bzw. Einstaudächer oder blue-green roofs wurden in den letzten Jahren zur zusätzlichen Erhöhung des Rückhalts und der Verzögerung des Regenwasserabflusses von Dachbegrünungen und zur Erhöhung der Verdunstungsleistung entwickelt. Die aktualisierte Auflage der FLL Dachbegrünungsrichtlinie (FLL 2018) geht auch auf diese technische Weiterentwicklung zur Erhöhung der Retentionsleistung von Dachbegrünungen ein: „Bei [...] Retentionsdächern wird das Wasser im Begrünaufbau, ggf. auch in einer zusätzlichen Schicht eingestaut und temporär gespeichert. Der Abfluss erfolgt unter definierten Bedingungen im Volumen gedrosselt und/oder mit zeitlicher Verzögerung“. Eine dementsprechende schematische Zeichnung der einzelnen Schichten ist in Abbildung 29 dargestellt. In weiteren Veröffentlichungen werden blue-green roofs im Gegensatz zu konventionellen Dachbegrünungen beschrieben als Dachbegrünung mit einer zusätzlichen Schicht, in der mehr Wasser gespeichert wird als die (extensive) Vegetation benötigt (Shafique et al., 2016) und als Dachbegrünungen, die explizit als Teil eines Regenwassermanagement-Systems gebaut werden (Andenaes et al., 2018). Letztere Definition würde wohl auch konventionelle Dachbegrünungen einbeziehen, da diese in der Praxis oft Teil der Entwässerungsplanung sind.

Als nützliche Unterscheidung im technischen Sinne erscheint die Zielsetzung, Regenwasser unterhalb der Substratschicht einzustauen bzw. durch einen gedrosselten Abfluss Regenwasser temporär oder langfristig zurückzuhalten, sinnvoll (Abbildung 29). Durch die Ausbildung der Retentionsdächer als gefällelose Dächer werden Abflussbeiwerte für einzelne Regenereignisse verringert (Förster et al., 2021). Durch den zusätzlichen Regenwasserspeicher wird langfristig weniger Wasser abgeleitet, wobei z.T. über 90 % des Regens auf den Dächern verbleiben können (Busker et al., 2022). Je nach Ausgestaltung der Drosselrichtungen können auch bei außergewöhnlichen und extremen Starkregenereignissen Abflussbeiwerte von nahe 0 erreicht werden (Busker et al., 2022; Cristiano et al., 2022). Über Abflussdrosseln lässt sich zusätzlich steuern, wie lange das Regenwasser auf dem Dach gespeichert wird bzw. wie lange es dauert bis das Retentionsdach wieder sein volles Rückhaltepotenzial erreicht hat.

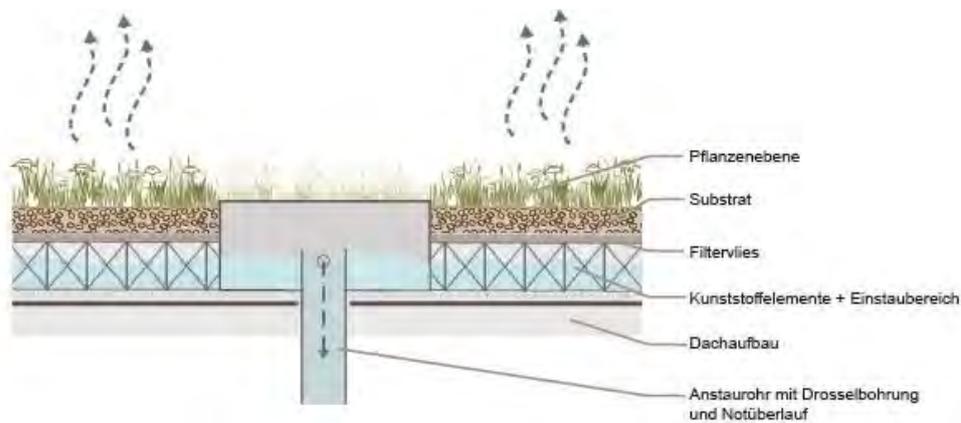


Abbildung 29: Schematische Zeichnung Retentions Gründach.

Durch das vorhandene Wasserdargebot wird die Verdunstungsleistung gegenüber konventionellen Dachbegrünungen erhöht bzw. auch in Trockenzeiten aufrechterhalten (Cirkel et al., 2018; Goessner et al., 2021). Extensivbegrünungen können normalerweise etwa 0,5 – 3,5 mm pro Tag verdunsten (Ebrahimian et al., 2019), bei zusätzlicher (externer) Bewässerung oder Einstau kann die Leistung bis etwa 5 mm pro Tag erhöht werden (Goessner et al., 2021; Kaiser et al., 2019). Wenn das Regenwasser durch mit Regenvorhersagen gekoppelten „smarten Drosseln“, nur unmittelbar vor möglichen Starkregenereignissen abgelassen wird, kann der Regenwasserrückhalt optimiert und die Verdunstungsleistung der Retentionsdächer auch in Trockenperioden noch länger aufrechterhalten werden (Cirkel et al., 2018). Inwieweit sich das vergrößerte Wasserdargebot auf die Vegetationsentwicklung auswirkt scheint bisher nicht abschließend geklärt.

1.2 RISA Pilotprojekt Am Weißenberge

Das RISA-Pilotprojekt Am Weißenberge wurde in Zusammenarbeit mit der Siedlungs-Aktiengesellschaft Hamburg und Gesellschaft für Wohnen und Bauen mbH (SAGA GWG), der damaligen Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt (BSU) Hamburg, der Zinco GmbH, der Optigrün international AG und Hamburg Wasser im Rahmen der Erschließung eines Wohngebietes entwickelt. Die Wasserwirtschaftliche Problematik im Baugebiet war charakterisiert durch stark ausgelastete Mischwassersiele in den umliegenden Straßen, wodurch unterschiedliche Systeme zur dezentralen Entwässerung nötig wurden, um die weitgehende Abkopplung aller bebauten Flächen zu gewährleisten. Neben verschiedenen etablierten dezentralen siedlungswasserwirtschaftlichen Anlagen wie extensive Dachbegrünungen, begrünte Rückhalte- und Versickerungsmulden, offene befestigte Rinnen, Rigolen und Rückhaltebecken wurden unterschiedliche Retentions Gründachtypen realisiert. Ziel war es, diese in einem langjährigen Praxistest zu untersuchen und deren Potenzial zur Starkregenvorsorge und der Annäherung bebauter Gebiete an einen naturnahen Wasserhaushalt zu untersuchen.

2 Dachbegrünungssysteme und wissenschaftliche Untersuchungen

Auf zwei Gebäuden wurden insgesamt 4 Teilflächen (jeweils 220 m², davon ca. 5 % unbegrünt) und auf einem weiteren Gebäude zwei weitere Teilflächen (jeweils 135 m², ca. 8 % unbegrünt) mit unterschiedlichen Dachtypen ausgestattet. Auf den vier größeren Flächen wurden unterschiedliche Typen von Retentionsdächern gebaut und auf den kleineren Flächen ein Extensivgründach sowie ein unbegrüntes Kiesdach zur Vergleichsmessung (Abbildung 30). Ein Gebäude ist mit zwei verschiedenen Typen Zinco-Retentionsgründächern ausgestattet, mit Speicherelementen von 40 (Z40) bzw. 100 mm (Z100) Höhe, und einer Ablaufdrossel, die auf Höhe der Dachabdichtung angebracht ist. Daraus resultiert ein gedrosselter Abfluss, aber kein langfristiger Einstau.

Tabelle 4: Charakteristik der Dachbegrünungssysteme.

Bezeichnung	M60	WRB85	Z40	Z100	Spardach
Dachtyp	Retentionsdach	Retentionsdach	Retentionsdach	Retentionsdach	Extensivdach
Substrathöhe [cm]	7	7	9	6	6
Höhe Speicherelement [cm]	6	8,5	4	10	2 (Drainage)
Langfristiger Einstau [cm]	4	4	-	-	-

Auf dem einem weiteren Dach wurden zwei verschiedene Typen Optigrün Retentionsgründächer (WRB85 und M60) mit einer statischen Drossel realisiert, d.h. es wurde ein langfristiger Anstau von ca. 4 cm generiert. Die Dächer dieser beiden Gebäude wurden als 0°-Dächer ausgeführt, um die Funktionsweise als Retentionsdächer zu gewährleisten. Auf dem dritten Gebäude wurde ein Kiesdach und ein Extensivgründach (Optigrün Systemösung Spardach) zu Vergleichszwecken installiert. Die Typen sind in Tabelle 4 genauer beschrieben. Die hydrologische Messtechnik wurde 2016 eingebaut. Abflussmessungen der Retentionsdächer erfolgen über in Messboxen verbaute 1 l Kippzähler. Die Messboxen, welche die Abflüsse vom Extensiv- und Kiesdach messen, nehmen Durchflussdaten über ein duales System mit Thompson-Wehr und 200 ml Kippzähler auf. Über einen Regenschirm (nach Hellmann) mit integriertem Kippzähler werden minütlich Regenmengen aufgezeichnet.



Abbildung 30: Luftbilder der Gebäude mit Gründachaufbauvarianten (Eigene Abbildung, © Luftbild: Geoportal des LGV Hamburg, © Aufbauvarianten: Optigrün international AG & Zinco GmbH).

Untersuchungen von Käferarten mittels Becherfallen und Vegetationskartierungen wurden ab 2020 bzw. im Jahr 2022 durchgeführt, um Effekte der erhöhten Wasserverfügbarkeit auf die Pflanzen- und Käferartenzusammensetzung zu untersuchen.

In einer Kosten-Nutzen-Analyse wurden die Kosten der Gründachaufbauten innerhalb einer Lebensdauer von 40 Jahren verglichen (Herstellungs- und Instandhaltungskosten). Dabei wurde auch ein Vergleich der Kosten von anderen Lösungsoptionen der Regenwasserbewirtschaftung angestrebt (z.B. „Standard-Gründach“, ohne Gründach, Dimensionierung Mulden-/Rigolensysteme).

3 Ergebnisse

3.1 Hydrologisches Monitoring

Der langfristige Regenwasserrückhalt auf den Retentionsdachbegrünungen ähnelt in den saisonalen Mustern grundsätzlich denen von Extensivgründächern. In den kühleren Monaten, insbesondere Oktober bis Februar, wird weniger Wasser zurückgehalten, wohingegen ab April bis September meist über 80 % des Regens zurückgehalten werden, teilweise kommt es in einigen Monaten zu gar keinem Abfluss (z.B. im Mai). Das bedeutet, dass in diesen Zeiträumen nahezu der gesamte gefallene Regen verdunstet wird. Die saisonalen Muster werden bei Betrachtung der Jahreszeiten deutlich (Abbildung 31).

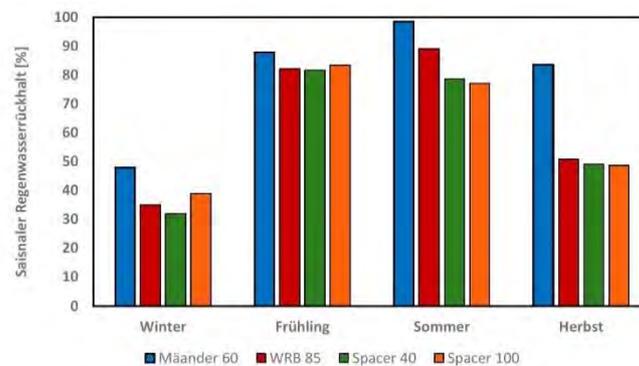


Abbildung 31: Jahreszeitlicher Regenwasserrückhalt [%] der unterschiedlichen Retentionsdachbegrünungen (Winter = Dez, Jan, Feb; Frühling = Mär, Apr, Mai; Sommer = Jun, Jul, Aug; Herbst = Sep, Okt, Nov) (Richter, 2022).

Während des betrachteten Gesamtzeitraums haben die unterschiedlichen Retentionsdachbegrünungstypen 64 – 79 % des Regenwassers zurückgehalten, die im Vergleich zu Extensivdächern (ca. 50%) zusätzliche Retentionsleistung ist wohl auf die gefällelose Ausbildung und die in der Vegetationsperiode erhöhte Verdunstungsleistung der Vegetation zurückzuführen. Die zusätzliche Retentionsleistung scheint vor allem im Frühling und Sommer geleistet zu werden, da die Werte für den Regenwasserrückhalt im Winter mit denen von konventionellen extensiven Dachbegrünungen vergleichbar sind. Auch bei den Einzelregen zeigt sich ein deutlicher saisonaler Unterschied bei den Mittelwerten des Regenwasserrückhalts für einzelne Regenereignisse (Abbildung 32).

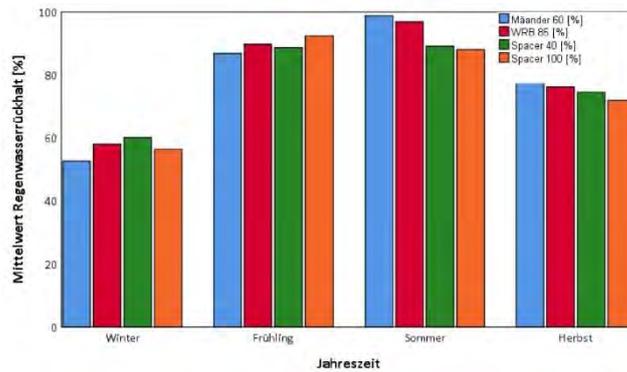


Abbildung 32: Jahreszeitliche Mittelwerte des Regenwasserrückhalts von einzelnen Regenereignissen der unterschiedlichen Retentionsdachbegrünungen (Winter = Dez, Jan, Feb; Frühling = Mär, Apr, Mai; Sommer = Jun, Jul, Aug; Herbst = Sep, Okt, Nov) (Richter, 2022).

Im Sommer und Frühling wurde mehr Wasser pro Regenereignis auf den Retentionsdachbegrünungen zurückgehalten (87 – 99 %) als im Herbst (72 - 83 %) und Winter (53 – 60 %). Alle Retentionsdachtypen haben eine im Vergleich zu konventionellen Extensivbegrünungen erhöhte Wirkung der Abflusssdrosselung und -Verzögerung (Tabelle 5). Die Verzögerungen des nach einem Regen einsetzenden Abflusses von den Dächern beträgt im Mittel zwischen 157 und 442 Minuten (2,5 – 7,5 h).

Tabelle 5: Mittelwert der zeitlichen Verzögerung (min) des Abflusses gegenüber des zugehörigen Regens über den gesamten Messzeitraum und über Sommer (Jun, Jul, Aug) und Winter (Dez, Jan, Feb).

Abflussverzögerung [min]	M60	WRB85	Z40	Z100
Mittelwert	442	295	182	157
Sommer	649	548	267	256
Winter	160	55	73	52

Saisonale Unterschiede sind wiederum deutlich zu erkennen. Diese sind auf die erhöhte Evapotranspiration im Sommer und bei den Dächern mit Daueranstaue (M60 & WRB85) auf die Speicherwirkung, Entleerung des Speichers durch Verdunstung und bei Regen Auffüllen des Speicherraums bis zum einsetzenden Abfluss zurückzuführen. Im Winter sind die Verzögerungszeiten für alle Typen geringer. Die im Winter geringen Unterschiede zwischen Dächern mit und ohne Daueranstaue sind auf die in den kühlen Monaten außerhalb der Vegetationsperiode fehlende Entleerung des Speicherraums durch die Evapotranspiration der Pflanzen zurückzuführen. Die zeitliche Verzögerung der Abflüsse gegenüber dem einsetzenden Regen kann zur Überbrückung der „Stresszeit“ von Kanalisationen (ca. 2 h) unmittelbar nach Starkregenereignissen nützlich sein.

3.2 Pflanzen- und Käferarten

Die Unterschiede im Wasserdargebot werden auch anhand der Vegetationsentwicklung deutlich. Die beiden Dächer mit Dauereinstaue (M60 & WRB85) zeigen üppigeren Bewuchs mit vermehrtem Auftreten von Gräsern, Kräutern und Wildblumenarten und eine deutlich höhere Artenzahl als z.B. die Extensivdachbegrünung (SD) (Tabelle 6). Auf den Retentionsdächern ohne Daueranstaue dominiert eher typische Vegetation für Extensivbegrünungen wie Sedum-Arten (Z100) oder im Falle von Z40 herrscht eine ähnliche Artenvielfalt vor wie bei den Retentionsgründächern mit Dauereinstaue. In dem Fall liegt dies vermutlich an der artenreicheren Ansaatmischung („Hamburger Naturdach“).

Tabelle 6: Auf den Dachbegrünungen vorkommende Pflanzenarten (x), kartiert im April – Juni 2022.

Dachtyp	WR	M6	Z40	Z10	SD
Artenzahl	28	24	25	16	14
<i>Achillea millefolium</i>	x	x			
<i>Anthemis tinctoria</i>	x	x			
<i>Bromus hordeaceus</i>	x		x	x	
<i>Campanula spec.</i>			x		
<i>Cirsium vulgare</i>	x	x			
<i>Clinopodium vulgare</i>			x	x	
<i>Crepis spec.</i>			x	x	x
<i>Dianthus deltoides</i>	x	x	x	x	
<i>Epilobium spec.</i>	x	x		x	
<i>Erodium cicutarium</i>			x		
<i>Festuca ovina</i>			x	x	
<i>Hieracium pilosella</i>			x	x	
<i>Hieracium piloselloides</i>	x	x			x
<i>Holcus lanatus</i>		x	x	x	x
<i>Hypericum perforatum</i>			x		
<i>Leucanthemum vulgare</i>	x	x			
<i>Linaria vulgaris</i>		x			
<i>Melilotus officinalis</i>		x			
<i>Origanum vulgare</i>	x	x			
<i>Petrorhagia saxifraga</i>	x				
<i>Plantago argentea</i>	x	x			
<i>Plantago lanceolata</i>	x				
<i>Poa annua</i>	x				
<i>Potentilla argentea</i>	x	x	x		
<i>Prunella grandiflora</i>	x	x			
<i>Prunella vulgaris</i>	x	x			
<i>Saxifraga granulata</i>			x		
<i>Sedum album</i>	x	x	x	x	x
<i>Sedum hispanicum</i>	x		x	x	x
<i>Sedum kamtschatikum</i>	x	x	x	x	x
<i>Sedum sexangulare</i>	x	x	x	x	x
<i>Sedum spurium</i>	x	x	x	x	x
<i>Senecio inaequidens</i>	x		x		
<i>Senecio vulgaris</i>			x		x
<i>Silene vulgaris</i>	x		x	x	
<i>Stellaria media</i>			x		
<i>Taraxacum officinale</i>	x	x	x	x	x
<i>Tragopogon pratensis</i>					x
<i>Trifolium arvense</i>	x	x			x
<i>Trifolium dubium</i>		x	x	x	x
<i>Trifolium pratense</i>	x	x	x		x
<i>Trifolium repens</i>		x			
<i>Veronica filiformis</i>	x				
<i>Vicia parviflora</i>	x		x		

Ein höherer Artenreichtum der Vegetation kann sich auch auf die Artenzahlen der Insekten auswirken. Auf den Retentionsdächern mit Dauereinstau wurden 74 Käferarten im Jahr 2021 festgestellt (Brenneisen et al., 2021), in der Artenzahl vergleichbar mit ebenfalls in Hamburg untersuchten Intensivbegrünungen und deutlich mehr als auf Extensivbegrünungen. Die Artenzahl kann demnach in der Regel mit der Schichtdicke der Vegetationstragschicht bzw. erhöhten Wasserspeicherkapazität verbunden sein (Brenneisen et al., 2021).

3.3 Kosten-Nutzen Betrachtung

Die Analysen zeigen, dass Retentions-Gründächer je nach verbautem Wasserspeicherelement in den Kosten sehr unterschiedlich ausfallen kann. Je höher die Wasserspeicherelemente, desto größer in der Regel der finanzielle Mehraufwand. Aus diesem Grund kann der Vergleich zu einem Standarddach oder Extensivdach sehr variabel ausfallen. Beispielsweise sind im Vergleich zu einem Extensivgründach die Mehrkosten des Retentionsgründaches mit kleinerem Retentionselement (40mm) und dafür größerer Substratschicht nur geringfügig. Ein Retentionsgründach mit größerem Retentionselement verursacht aber im Vergleich zum Extensivgründach oder Kiesdach große Mehrkosten. Berechnungen belegen, dass z.B. nachgeschaltete Mulden-Rigolen-Systeme bei einem Retentions-Gründach deutlich kleiner dimensioniert werden können und wiederum Kosten eingespart werden. Interviews mit Bauträgern haben außerdem ergeben, dass im Neubau keine Mehrkosten bezüglich erhöhten statischen Mehraufwandes zu erwarten sind.

4 Fazit

Retentionsdachbegrünungen sind eine wirksame Schwammstadt-Komponente und können Abflüsse von Dächern infolge von (Stark-)Regenereignissen erheblich reduzieren und verzögern. Durch die höhere Wasserspeicherfähigkeit kann sich ein vielfältigerer Bewuchs entwickeln, der mehr (Tier-)Arten Nahrung und Unterschlupf bieten kann. Wenn das Regenwasser dauerhaft auf dem Dach gespeichert wird, kann sich die Artenzusammensetzung langfristig verändern, die Verdunstungsleistung und somit die kühlende Wirkung auf die Umgebung erhöht und auch in Trockenperioden aufrechterhalten werden. Neben diesen Ökosystemleistungen können trotz z.T. deutlich höherer Baukosten u.U. ökonomische Vorteile von Retentionsdachbegrünungen, z.B durch Minimierung weiterer siedlungswasserwirtschaftlicher Anlagen auf Grundstücken, zukünftig weitere Anreize für diese Typen von Dachbegrünungen bieten. Vor dem Hintergrund der Klimafolgen in Städten und der Nachverdichtung und den damit einhergehenden Überlastungen der Kanalsysteme sind schon heute einige Kommunen dazu gezwungen, Einleitmengenbegrenzungen bis zu kompletten Abkopplungen von Bau- und Sanierungsgebieten zu fordern. Für Gebiete, die eine hohe Gebäudedichte aufweisen sind solche Retentionsdachbegrünungen demnach eine alternative blau-grüne Infrastruktur mit weitreichenden positiven Wirkungen über die hydrologischen Aspekte hinaus.

5 Quellenverzeichnis

- Andenaes, E., Kvande, T., Muthanna, T. M. & Lohne, J. (2018): Performance of Blue-Green Roofs in Cold Climates: A Scoping Review. BUILDINGS, Vol. 8, No. 4.
- Brenneisen, S., Szallies, A. & Opitz, F. (2021): Wissenschaftliche Erfolgskontrolle Dachbegrünungen Hamburg - Biomonitoring Käfer: Zwischenbericht 2021. Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW. (*unveröffentlicht*)
- Busker, T., Moel, H. de, Haer, T., Schmeits, M., van den Hurk, B., Myers, K., Cirkel, D. G. & Aerts, J. (2022): Blue-green roofs with forecast-based operation to reduce the impact of weather extremes. Journal of Environmental Management, Vol. 301.
- Cirkel, D. G., Voortman, B. R., van Veen, T. & Bartholomeus, R. P. (2018): Evaporation from (Blue-)Green Roofs: Assessing the Benefits of a Storage and Capillary Irrigation System Based on Measurements and Modeling. WATER, Vol. 10, No. 9.
- Cristiano, E., Annis, A., Apollonio, C., Pumo, D., Urru, S., Viola, F., Deidda, R., Pelorosso, R., Petroselli, A., Tauro, F., Grimaldi, S., Francipane, A., Alongi, F., Noto, L. V., Hoes, O., Klapwijk, F., Schmitt, B. & Nardi, F. (2022): Multilayer blue-green roofs as nature-based solutions for water and thermal insulation management. Hydrology Research.

- Ebrahimian, A., Wadzuk, B. & Traver, R. (2019): Evapotranspiration in green stormwater infrastructure systems. *Science of The Total Environment*, Vol. 688, S. 797–810.
- FLL Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. (2018): Dachbegrünungsrichtlinien. Richtlinien für Planung, Bau und Instandhaltung von Dachbegrünungen. Bonn.
- Förster, K., Westerholt, D., Kraft, P. & Lösken, G. (2021): Unprecedented Retention Capabilities of Extensive Green Roofs—New Design Approaches and an Open-Source Model. *Frontiers in water* [Online]. DOI: 10.15488/11768.
- Goessner, D., Mohri, M. & Krespach, J. J. (2021): Evapotranspiration Measurements and Assessment of Driving Factors: A Comparison of Different Green Roof Systems during Summer in Germany. *LAND*, Vol. 10, No. 12.
- Kaiser, D., Köhler, M., Schmidt, M. & Wolff, F. (2019): Increasing Evapotranspiration on Extensive Green Roofs by Changing Substrate Depths, Construction, and Additional Irrigation. *BUILDINGS*, Vol. 9, No. 173.
- Richter, M. (2022): Klimafolgenanpassung durch Dachbegrünung - Quantifizierung des Potenzials durch Vergleich internationaler Studien und Messungen an Hamburger Beispielen. Dissertation, Hamburg, HafenCity Universität.
- Shafique, M., Kim, R. & Lee, D. (2016): The potential of green-blue roof to manage storm water in urban areas. *Nature Environment and Pollution Technology*, Vol. 15, S. 715–718.

Korrespondenz:

Michael Richter
HafenCity Universität, Henning-Voscherau-Platz 1, 20457 Hamburg
+4940-42827-5335
michael.richter@hcu-hamburg.de

Gründach ist nicht gleich Gründach – Vergleich der klimatologischen Effekte unterschiedlicher Gründachsysteme

D. Gößner¹, M. Mohri¹

1 Optigrün international AG, Am Birkenstock 15-19, 72505 Krauchenwies, Deutschland

Kurzfassung: Verschiedene Gründachsysteme unterscheiden sich deutlich hinsichtlich ihrer Substratfeuchte, Verdunstungsleistung und Substrat- und Lufttemperaturen – dies zeigen die Ergebnisse umfangreicher mikroklimatischen Messungen an vier Gründachsystemen. Das Gründach mit dem größten Wasserspeicher erzielte die höchste Bodenfeuchte und Verdunstungsrate, das flachste System hatte die höchste Substrat- und Lufttemperatur auf Vegetationsebene. So erhält die Differenzierung zwischen verschiedenen Gründachsystemen eine neue Relevanz für die Stadtplanung und der Gestaltung klimawandel-resilienter Städte.

Key-Words: Gründach, Blau-Grüne Infrastruktur, Evapotranspiration, Mikroklima, Urbane Hitzeinsel, Starkregen

1 Einleitung

Wetterextreme wie Hitzewellen oder Dürren sowie die Intensität und die Häufigkeit von Starkregeneignissen haben in den letzten Jahrzehnten klimabedingt zugenommen (Masson-Delmotte et al. 2021). Städtische Gebiete sind besonders betroffen, weil sie aufgrund des urbanen Hitzeinsel-Effektes im Schnitt bereits um 1–4 °C höhere Temperaturen (Oke 1982; Santamouris 2015) und um etwa 15 % höhere Niederschläge im Vergleich zur ländlichen Umgebung aufweisen (Liu et al. 2021). Die Folgen sind Überschwemmungen durch überlastete Abwassersysteme und gesundheitliche Folgen für die Bevölkerung durch Hitzestress (Kendrovski 2017; Krug und Mücke 2018).

Der Einsatz von blau-grüner Infrastruktur wie Parks, Gärten, Dach- und Fassadenbegrünungen hat sich als äußerst wirksam für die Verbesserung des Stadtklimas erwiesen. Gründächer eignen sich besonders gut für dicht bebaute Gebieten – sie senken die Umgebungstemperaturen durch Verdunstung im Mittel um 1,34 °C (Manso et al. 2021) und bieten durch Regenwasserrückhalt Schutz vor Überflutungen. Extensiv begrünte Dächer reduzieren den Regenwasserabfluss um etwa 60 %, intensiv begrünte Dächer um 80 % (Manso et al. 2021). Darüber hinaus bieten Gründächer zahlreiche weitere Nutzen für die Umwelt wie die erhöhte Biodiversität (Filazzola et al 2019), Lärmschutz (Manso et al. 2021), Gebäudedämmung (Ran et al 2020), der Verbesserung des Stadtbildes, und der Steigerung des Grundstückswertes (Manso et al. 2021).

Allerdings existiert mittlerweile eine große Bandbreite an Gründachsystemen mit sehr verschiedenen Eigenschaften und Funktionen. Gründächer unterscheiden sich nicht nur in Substrathöhe, sondern hinsichtlich Substrattyp, Bewuchs, Drainage-/Wasserspeicherschicht und Eigenschaften des Dachablaufs. Diese Eigenschaften wirken sich wiederum auf den Wasserhaushalt, die potenzielle Verdunstungskühlung sowie die Regenwasserrückhaltekapazität der Gründächer aus (Cascone 2019). Um auf lokale Gegebenheiten eingehen und passende Lösungen finden zu können, ist eine bessere Kenntnis der unterschiedlichen Gründachsysteme und ihrer Auswirkungen notwendig. Das Ziel bestand daher aus der Erhebung von Daten bezüglich vier verschiedener Gründächer mit Schwerpunkt auf Verdunstungsleistung und Substrat- und Umgebungstemperatur, sowie eine annähernde Bestimmung der Evapotranspiration von häufig für Gründächer verwendeten Pflanzenarten.

2 Methodik

Im Zeitraum von April bis Oktober 2021 wurden an vier verschiedenen Gründachsystemen am Standort Krauchenwies-Göggingen, Deutschland, umfangreiche mikroklimatische Messungen durchgeführt. Jedes Gründachsystem wies eine Fläche von 0,5 m² auf und enthielt insgesamt 7 Sensoren (siehe Abb. 1). Gemessen wurden Gewicht, Abfluss, Substrattemperatur, Substratfeuchte, Wärmefluss, Blatttemperatur und Lufttemperatur auf Vegetationshöhe. Außerdem wurden vor Ort Wetterdaten erhoben (Niederschlag, Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Windrichtung sowie kurz- und langwellige einfallende Strahlung). Die Daten wurden in einem 5-minütigen Intervall aufgezeichnet. Details zur Methodik und den Gründachsystemen finden sich in Gößner et al. (2021).

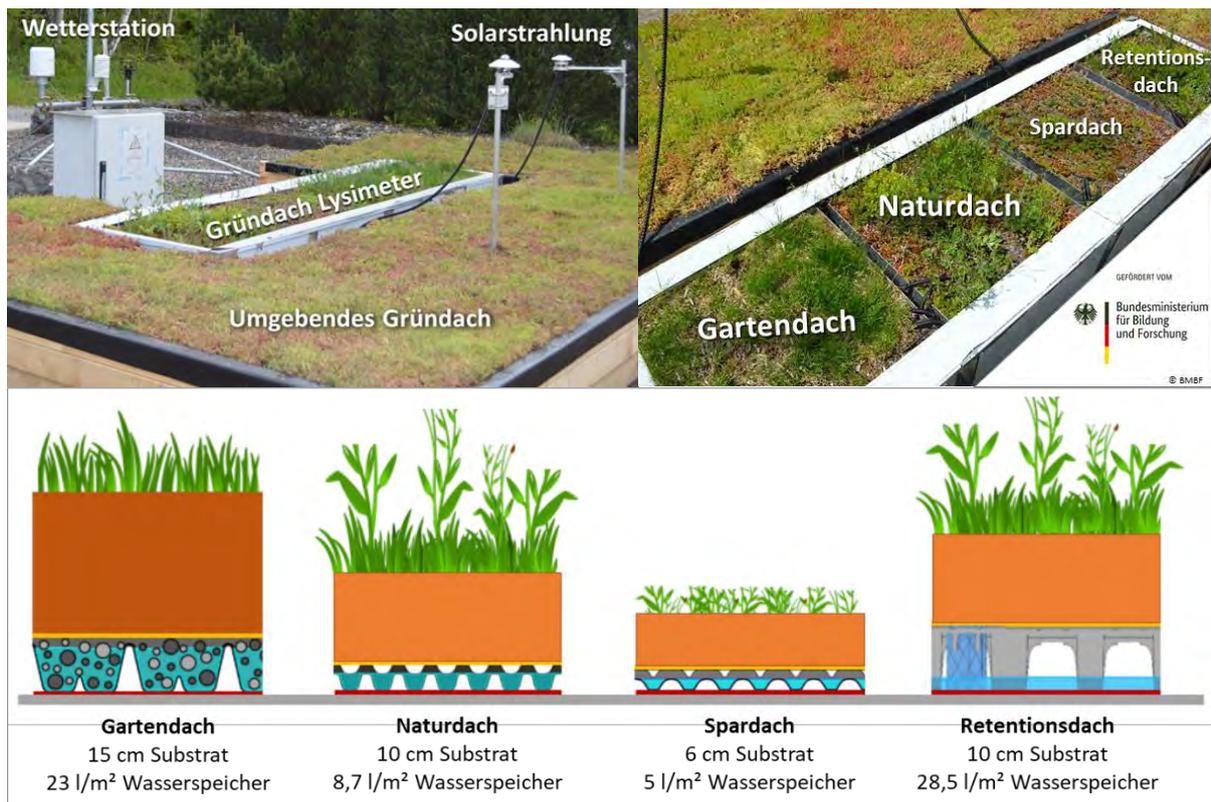


Abbildung 33: Überblick über die vom BMBF geförderte Messstation (oben links) und die vier Gründachsysteme (oben rechts) sowie die einzelnen Systemkomponenten (unten).

Darüber hinaus wurden die Verdunstungsleistung verschiedener Pflanzenarten im Rahmen eines Kurzversuches anhand zweier Parameter annähernd bestimmt: Die stomatäre Leitfähigkeit dient als Indikator der Transpirationsleistung (Askari et al. 2021) und wurde mit Hilfe eines Porometers gemessen (SC-1 Leaf Porometer, METER Group, USA). Des Weiteren wurde die Interzeptionsleistung erhoben, da diese ein wichtiger Einflussfaktor der Verdunstung ist (Sugita 1985). Die Methode der Interzeptionsmessung orientiert sich an Dunkerley und Booth (1999), jedoch wurde hier mit einer Wassermenge von 500 ml in einem Zeitraum von 30 Sekunden gearbeitet. Es wurden je 3 Individuen von 11 verschiedenen Pflanzenarten auf Dachbegrünungssubstrat und Dränagematten kultiviert. Die Messungen der stomatären Leitfähigkeit und anschließend der Interzeption wurden im September 2021 durchgeführt.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Bodenfeuchte

Die Substratfeuchte der vier verschiedenen Gründächer zeigte im Messzeitraum große Schwankungen aufgrund von Niederschlag und Verdunstung und lag meist über 10 % (siehe Abb. 2). Von allen Gründachsystemen wies das Retentionsdach die höchste Substratfeuchte mit Spitzen von über 35 % auf. Abgesehen von den wenigen heißen und trockenen Sommertagen mit niedrigem Feuchtigkeitsgehalt, behielt das Retentionsdach im Schnitt eine ca. 10 % höhere Bodenfeuchte als die anderen Gründachsysteme. Die Substratfeuchte von Garten- und Spardach waren insgesamt sehr ähnlich, das Naturdach lag zwischen Retentions- und Garten- bzw. Spardach.

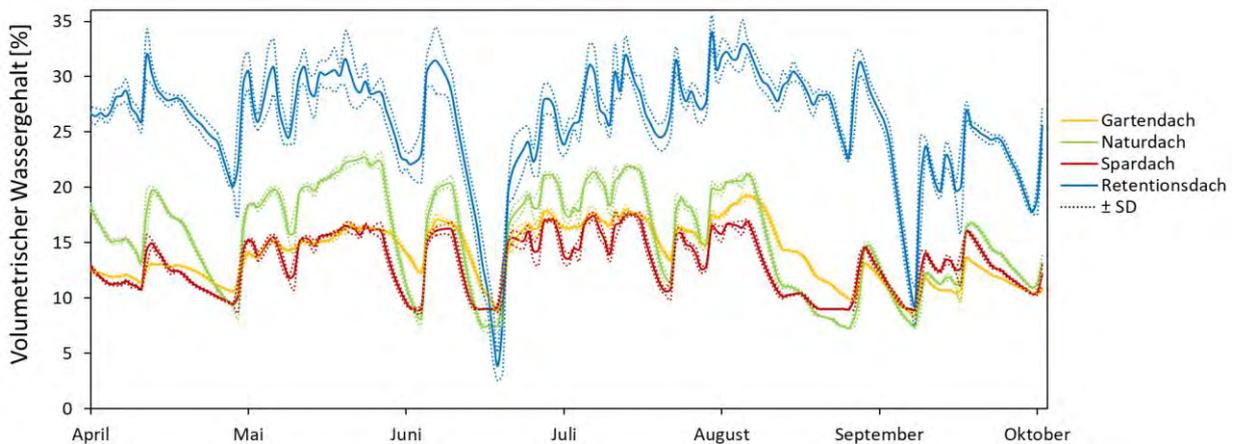


Abbildung 34: Mittlere tägliche Substratfeuchte \pm Standardabweichung ($n \approx 288$) verschiedener Gründachsysteme im Jahresverlauf 2021

Die höhere Bodenfeuchte des Retentionsdaches ist auf das in der Retentionsschicht gespeicherte Wasser zurückzuführen, welches durch das Kapillarlvlies und die Kapillarbrücken in die Substratschicht zurückgeführt wird. Nur wenn der Wasserspeicher wie beispielsweise im Juni vollständig trockenfällt, sinkt auch die Bodenfeuchte. Das Naturdach hat den gleichen Systemaufbau wie das Retentionsdach, jedoch einen deutlich kleineren Wasserspeicher ohne Kapillarbrücken. Daher ist auch die Bodenfeuchte deutlich geringer. Die allgemein niedrigere Bodenfeuchte des Gartendaches lässt sich möglicherweise durch die dickere Substratschicht erklären, in der sich das Wasser besser verteilt. Das Spardach hingegen verfügt nur über einen sehr kleinen Wasserspeicher und eine zu dünne Substratschicht, um die Feuchtigkeit zu halten.

3.2 Evapotranspiration

Die höchsten Evapotranspirationsraten sowie die größten Differenzen zwischen den Gründachsystemen konnten in den Sommermonaten beobachtet werden (siehe Abb. 3). Die Systeme Retentions- und Gartendach erreichten im Juni einen monatlichen Durchschnitt von $4,88 \text{ mm d}^{-1}$ und $4,77 \text{ mm d}^{-1}$, das Naturdach verdunstete im Schnitt $3,34 \text{ mm d}^{-1}$, und das Spardach lediglich $2,67 \text{ mm d}^{-1}$. Während des gesamten Messzeitraums erreichte das Gartendach, welches im April und Mai einmal bewässert wurde, die höchste Gesamtverdunstung von 526 mm , das Retentionsdach lag mit 488 mm dicht dahinter. Das Spardach verdunstete lediglich 370 mm . Über den gesamten Messzeitraum gemittelt war die tägliche mittlere Evapotranspiration am höchsten für das Gartendach mit $2,62 \pm 1,36 \text{ mm d}^{-1}$. Das Retentionsdach erreichte eine Verdunstungsrate von $2,49 \pm 1,19 \text{ mm d}^{-1}$, das Naturdach $2,19 \pm 0,90 \text{ mm d}^{-1}$. Die niedrigste Evapotranspiration wurde für das Spardach mit $1,83 \pm 0,82 \text{ mm d}^{-1}$ gemessen.

Die unterschiedlichen Verdunstungsraten der Gründächer sind vermutlich auf die Systemkomponenten, die Wasserverfügbarkeit und die Vegetation zurückzuführen. Die beiden Systeme mit dem größten Wasserspeicher (Retentionsdach und Gartendach) zeigten die höchsten Evapotranspirationsraten. Die Verdunstungsraten des Naturdaches sind aufgrund des kleineren Wasserspeichers im Vergleich zum Retentionsdach niedriger. Das Spardach hat ebenfalls eine sehr kleine Wasserspeicherschicht, nur 6 cm Substrat und hauptsächlich Sedum-Vegetation.

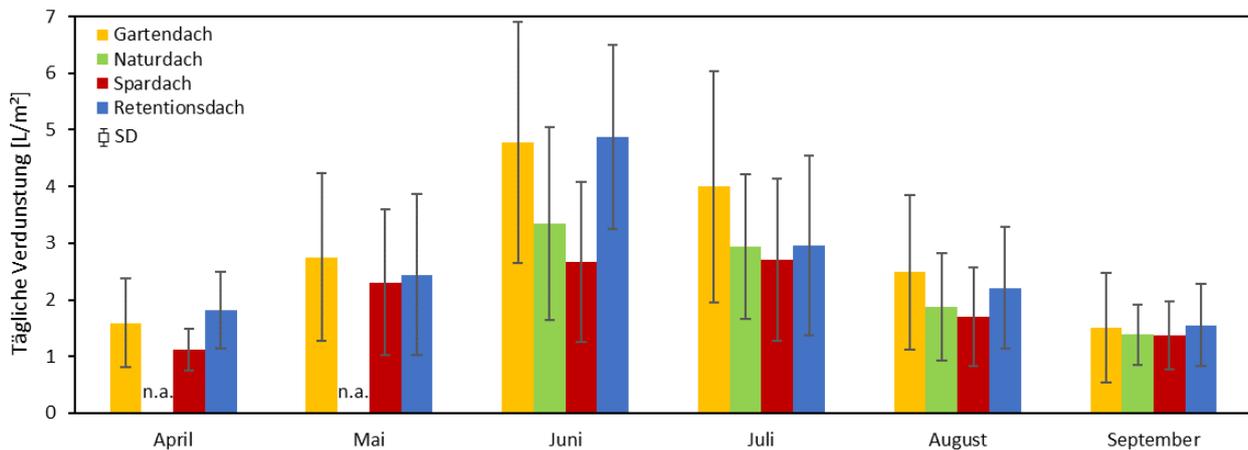


Abbildung 35: Mittlere tägliche Verdunstungsleistung \pm Standardabweichung ($n \approx 20$) verschiedener Gründachsysteme im Jahresverlauf 2021

3.3 Substrattemperaturen und Lufttemperatur auf Vegetationshöhe

Die höchsten Substrattemperaturen aber auch die größten Differenzen zwischen den Gründachsystemen wurden jeweils nachmittags gegen 15 Uhr gemessen: Das Spardach wies mit knapp 30 °C die höchste mittlere Temperatur auf (siehe Abb. 4). Einige Grade darunter liegen das Naturdach und Gartendach mit etwa 26 °C. Das Retentionsdach zeigte im Schnitt die kühlsste Substrattemperatur mit nur 22 °C gegen 15 Uhr, erreichte jedoch das Maximum von 23,5 °C verzögert gegen 18 Uhr. Nachts zeigten das Garten-, Natur- und Retentionsdach sehr ähnliche Temperaturen, diese lagen ungefähr 3 °C über der Substrattemperatur des Spardaches. Die Temperaturamplitude war am größten für das Spardach und am kleinsten für das Retentionsdach.

Die Differenzen der Lufttemperatur auf Vegetationsebene zwischen den verschiedenen Gründachsystemen fallen etwas geringer aus als bei der Substrattemperatur und die Höchstwerte werden etwas früher - zwischen 11 und 14 Uhr - erreicht. Das Spardach misst genau wie im Substrat knapp 30 °C, gefolgt von Naturdach und Gartendach mit durchschnittlich etwa 28 °C. Die Lufttemperatur über dem Retentionsdach erreichte ein Maximum von knapp 27 °C gegen 14 Uhr. Vormittags war das Retentionsdach stets 2-3 °C kühler als die anderen Dächer, am Nachmittag hingegen war das Gartendach im Schnitt bis zu 2,5 °C kühler als das Natur- und Retentionsdach und bis zu 4,5 °C niedriger als das Spardach. Nachts wiesen alle Gründachsysteme sehr ähnliche Temperaturen auf.

Die kleinere Amplitude der Substrattemperatur des Retentionsdaches hängt mit der höheren Bodenfeuchte und der hohen spezifischen Wärmekapazität des Wassers zusammen. Ein wassergesättigtes Substrat benötigt mehr Energie zum Aufwärmen und länger zum Abkühlen als ein trockenes Substrat. Umgekehrt hat das Spardach mit der dünneren und trockeneren Substratschicht die größte Temperaturamplitude. So lässt sich auch der Unterschied zwischen den Lufttemperaturspitzen erklären, denn je höher die spezifische Wärmekapazität, desto länger braucht das Substrat und damit auch die Luft darüber um sich aufzuheizen. Bei der Betrachtung der Lufttemperatur ist zu beachten, dass die Sensoren zum Großteil direkter Sonneneinstrahlung ausgesetzt waren.

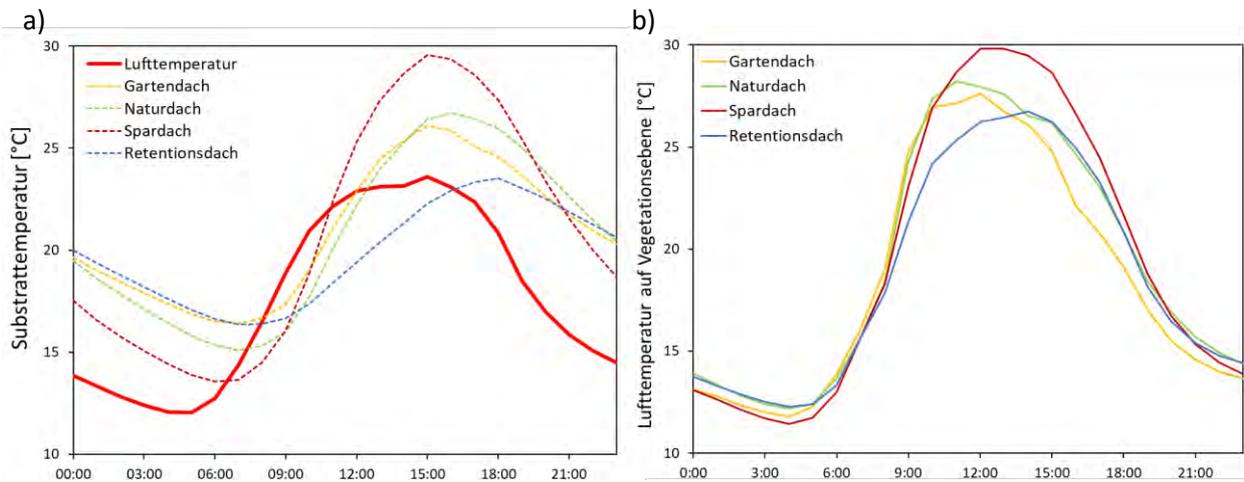


Abbildung 36: Typischer Tagesverlauf der Substrattemperatur a) und Lufttemperatur auf Vegetationsebene b) der verschiedenen Gründachsysteme als Stundenmittelwerte berechnet für einen durchschnittlichen Junitag (12 Einzelwerte gemittelt bilden einen Stundenwert, 30 Stundenwerte gemittelt bilden einen Stundenmittelwert eines typischen Junitages; $n = 30$).

3.4 Stomatäre Leitfähigkeit und Interzeptionsleistung

Bei den 11 untersuchten Pflanzenarten handelt es sich um 6 Kleinsträucher und 5 krautig wachsende Pflanzen. Die Ergebnisse ergaben deutliche Unterschiede der stomatären Leitfähigkeit zwischen einzelnen Arten und tendenziell eine höhere Transpirationsleistung der Halbsträucher im Vergleich zu den krautigen Arten (siehe Abbildung 5a). Die Werte variierten je nach Art zwischen 200 und mehr als $500 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

Auch das an den Pflanzen haftenbleibende Regenwasser trägt maßgeblich zur Verdunstung bei, wenn nach einem Regenereignis wieder die Sonne hervorkommt. Die Pflanzen unterschieden sich untereinander deutlich hinsichtlich ihrer Interzeptionsleistung, denn die Werte lagen zwischen $0,3$ und $1,5 \text{ L/m}^2$ (siehe Abb. 5b).

Zudem hat der Pflanzenflächenindex einen signifikanten Einfluss auf die Interzeption, da der p-Wert der Regressionsanalyse $< 0,05$ ist (siehe Abbildung 5c).

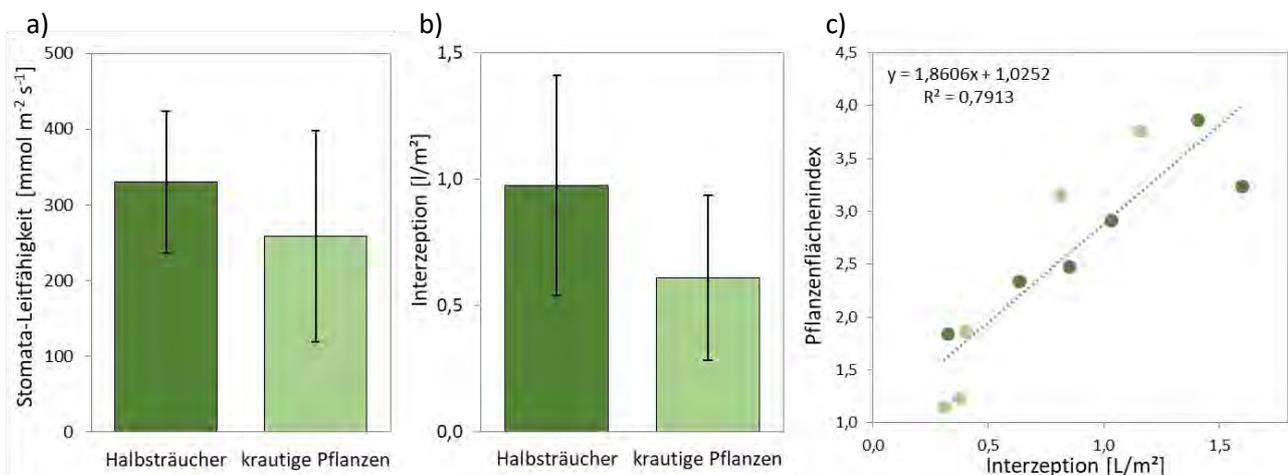


Abbildung 37: a) Mittlere stomatäre Leitfähigkeit \pm Standardabweichung ($n = 6$ bzw. 5), b) mittlere Interzeption \pm Standardabweichung ($n = 6$ bzw. 5), c) Abhängigkeit der Interzeption vom Pflanzenflächenindex ($n = 11$).

4 Wirtschaftlichkeit

Ein hoher Regenwasserrückhalt, eine maximale Verdunstungsleistung und eine möglichst niedrige sommerliche Umgebungstemperatur sind die Zielp Parameter, wenn es um die Verbesserung des Stadtklimas geht. Die Ergebnisse zeigen deutlich die unterschiedlichen Funktionen und Verhaltensweisen der Gründachsysteme. Bestimmte Gründachsysteme eignen sich also besser, um den klimatischen Herausforderungen der Städte zu begegnen. Für eine großflächige Anwendung in der Praxis spielen jedoch auch das Aufbaugewicht und die Kosten eine wichtige Rolle. Diese variieren je nach Gründachaufbau aufgrund ihres Materialbedarfes, sowie der notwendigen Pflege (siehe Tab. 1).

Tabelle 7: Investitions- und Betriebskosten und Gewichte der verschiedenen Gründachsysteme

	Gartendach	Naturdach	Spardach	Retentionsdach
Investitionskosten inkl. Einbau und MwSt. bei einer Dachfläche von 1000 m ²	62,73 €/m ²	41,06 €/m ²	31,83 €/m ²	75,24 €/m ²
Gewicht bezogen auf den wassergesättigten Zustand und „temporär“ mit vorübergehend gespeichertem Wasser	ab 320 kg/m ²	ab 95 kg/m ²	ab 90 kg/m ²	ab 100 kg/m ² bzw. temporär ab 180 kg/m ²
Betriebskosten pro m ² und Jahr inkl. MwSt.	> 4,80 €* * Kosten variieren stark je nach Fremdbewuchs, Art der Rasenpflege, Bewässerungsbedarf und -methode, den benötigten Geräten/Maschinen.	≈ 1,90 €** ** Kosten variieren leicht je nach Stärke des Unkrautwuchses.	≈ 1,40 €**	≈ 1,90 €**

Da sich ein größerer Wasserspeicher aufgrund des effektiven Überflutungsschutzes und der Kühlleistung besonders positiv auf die städtische Umgebung auswirkt, kann anhand des Gewichtvergleiches das Retentionsdach als besonders geeignet bezeichnet werden. Die höheren Investitionskosten für dieses System lassen sich indessen im Kontext von neu gestalteten Stadtquartieren relativieren: Dort ist auf unterirdischen Bauten wie Tiefgaragen in der Regel eine intensive Begrünung vorgesehen und auch für die oberen Dachflächen ist eine Dachbegrünung häufig gewollt oder verpflichtend. Hinzu kommt der bei den Stadtquartieren oftmals geforderte Nachweis des Überflutungsschutzes bei einem 100-jährigen Regenereignisses nach DIN 1986-100 bei Bauvorhaben mit mehr als 70 % versiegelter Fläche. In dieser häufigen Konstellation ist dann zu entscheiden, wo das Überflutungsvolumen platziert wird – im Tiefbau oder auf den Dachflächen. Bezogen auf ein Beispielquartier mit einer Dachfläche von 4.000 m² und einer Tiefgaragendachfläche von 1.500 m² liegen die Kosten für die Gründächer mit Rückhalteraum im Tiefbau bei ca. 311.000 € und für die Gründächer mit Rückhalteraum auf den Dachflächen bei ca. 319.000 €. Dementsprechend ist die Erstellung der Retentionspeicher auf den Dach- und Tiefgaragenflächen unter den skizzierten Umständen i.d.R. kostenneutral realisierbar. Die auf Dachflächen errichtete Retentionsräume bieten jedoch zusätzlich meist noch Platz für einen Dauerwasseranstau und können dadurch naturnahe Wasserbilanzen sowie, durch die flachen Gestaltung, auch sehr geringe Einleitmengen in Richtung Vorfluter oder Kanal bewirken: Im Jahr 2020 wurde in Nürnberg ein 4700 m² großes Stadtquartier mit Retentions Gründächern auf Tiefgaragen und den oberen Dachflächen ausgeführt. Nachgewiesen durch eine Langzeitsimulation versickert 25 % des anfallenden Niederschlags in örtlichen Versickerungsanlagen und 75 % verdunstet. Ein Abfluss vom Quartier findet, auch bei einem 100-jährigen Regenereignis, nicht statt.

Eine allgemeine Bewertung von Gründachsystemen bezüglich der Kosten ist im Hinblick auf die unterschiedlichen Wirkungsweisen der Gründächer ist jedoch dahingehend schwierig, als dass die Ökosystemdienstleistungen wie die Steigerung der Aufenthaltsqualität durch verbessertes Mikroklima und Minderung des urbanen Hitzeinseleffektes (Manso et al. 2021), die Förderung der Biodiversität (Wooster et al. 2022), die thermische und akustische Gebäudeisolierung (Manso et al. 2021) sowie der Rückführung des Regenwassers in den natürlichen Wasserkreislauf über Verdunstung (Cirkel et al. 2018) nur schwer in einen monetären Wert übersetzt werden können. Zudem können das verschönerte Stadtbild (Lee et al. 2014), die erhöhte Produktivität und Innovationskraft durch verbesserte Aufmerksamkeit (Lee et al. 2015) sowie gesteigerte Gebäudewerte (Manso et al. 2021) auch als positive wirtschaftliche Auswirkungen durch Begrünung bezeichnet werden, die jedoch wissenschaftlich kaum zu quantifizieren sind.

Wie viel wir als Gesellschaft für eine kostenintensive, grüne und angenehme Umgebung im Vergleich zu einer günstigeren, grauen und heißeren Umwelt ausgeben möchten, ist eine quantitativ nicht eindeutig zu beantwortende Frage.

5 Schlussfolgerung

Insgesamt eignen sich die im Rahmen der Studie erarbeiteten Daten für eine Überführung in Stadtklimasimulationen und -modelle, welche im Bereich der Stadtplanung eine zunehmend wichtige Rolle spielen und möglicherweise dazu beitragen, die positiven Auswirkungen von Gründächern in einen monetären Wert zu übersetzen. In erster Linie helfen die Daten jedoch dabei, das für den Anwendungsfall am besten geeignete Gründachsystem auszuwählen und so bestmöglich von den Funktionen und Ökosystemdienstleistungen zu profitieren. Die Ergebnisse zeigen zum einen, dass es nennenswerte Unterschiede zwischen verschiedenen Gründachtypen gibt und zum anderen, dass die Art und Größe des Wasserspeichers verantwortlich für die Unterschiede ist: Je mehr Wasser gespeichert wird, desto größer sind die positiven Umwelteffekte wie Kühlung, Überflutungsschutz, Pflanzenwachstum durch höhere Bodenfeuchte und damit auch Biodiversität. Für eine effiziente Nutzung auf Gebäuden eignen sich daher besonders Systeme die möglichst viel Regenwasser speichern können, aber gleichzeitig besonders leicht sind – das heißt einen großen Wasserspeicher bei geringer Substrathöhe aufweisen. Diese Art von Begrünungen erzielen die maximalen positiven Auswirkungen auf die Umwelt und sind für eine breite Anwendung in der Praxis geeignet. Offen bleibt die Frage, wieviel unsere Gesellschaft für diese Ökosystemdienstleistungen und damit für, nach Autorenmeinung, lebenswertere Städte bereit ist auszugeben.

6 Literatur

- Askari S. H., De-Ville S., Hathway E. A. und Stovin V. (2021): Estimating Evapotranspiration from Commonly Occurring Urban Plant Species Using Porometry and Canopy Stomatal Conductance. *Water*, 13(16), 2262.
- Cascone S., Coma J., Gagliano A., Pérez G. (2019): The Evapotranspiration Process in Green Roofs: A Review. *Build. Environ.* 2019.
- Cirkel D. G., Voortman B. R., Van Veen T. und Bartholomeus R. P. (2018): Evaporation from (Blue-) Green Roofs: Assessing the benefits of a storage and capillary irrigation system based on measurements and modeling. *Water*, 10(9), 1253.

- Dunkerley D. L. und Booth T. L. (1999): Plant canopy interception of rainfall and its significance in a banded landscape, arid western New South Wales, Australia. *Water Resources Research*, 35(5), 1581-1586.
- Filazzola A., Shrestha N. und MacIvor J. S. (2019): The contribution of constructed green infrastructure to urban biodiversity: A synthesis and meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*, 56(9), 2131-2143.
- Gößner D., Mohri M. und Krespach J. J. (2021): Evapotranspiration Measurements and Assessment of Driving Factors: A Comparison of Different Green Roof Systems during Summer in Germany. *Land*, 10(12), 1334.
- Kendrovski V., Baccini M., Sanchez Martinez G., Wolf T., Paunovic E. und Menne B. (2017): Quantifying projected heat mortality impacts under 21st-century warming conditions for selected European countries. *International journal of environmental research and public health*, 14(7), 729.
- Krug A. und Mücke H. G. (2018): Auswertung Hitze-Bezogener Indikatoren Als Orientierung Der Gesundheitlichen Belastung. *UMID: Umwelt und Mensch-Informationsdienst*, 2, 67-79.
- Lee K. E., Williams K. J., Sargent L. D., Farrell C. und Williams N. S. (2014): Living roof preference is influenced by plant characteristics and diversity. *Landscape and Urban Planning*, 122, 152-159.
- Lee K. E., Williams K. J., Sargent L. D., Williams N. S. und Johnson K. A. (2015): 40-second green roof views sustain attention: The role of micro-breaks in attention restoration. *Journal of Environmental Psychology*, 42, 182-189.
- Liu W., Engel B. A. und Feng Q. (2021): Modelling the hydrological responses of green roofs under different substrate designs and rainfall characteristics using a simple water balance model. *Journal of Hydrology*, 602, 126786.
- Manso M., Teotónio I., Silva C. M. und Cruz C. O. (2021): Green roof and green wall benefits and costs: A review of the quantitative evidence. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110111.
- Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S. L., Péan C., Berger S., ... und Zhou B. (2021): Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 2.
- Oke T. R. (1982): The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1-24.
- Ran J., Yang Z., Feng Y., Xiong K. und Tang M. (2020): Energy performance assessment and optimization of extensive green roofs in different climate zones of China. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 172, p. 16003). EDP Sciences.
- Santamouris M. (2015): Analyzing the heat island magnitude and characteristics in one hundred Asian and Australian cities and regions. *Science of the Total Environment*, 512, 582-598.
- Sugita M. (1985): Factors affecting evapotranspiration of a forest. *Geographical review of Japan, Series B.*, 58(1), 74-82.
- Wooster E. I. F., Fleck R., Torpy F., Ramp D. und Irga P. J. (2022): Urban green roofs promote metropolitan biodiversity: A comparative case study. *Building and Environment*, 207, 108458.

Korrespondenz:

Dominik Gößner

Am Birkenstock 15-19, 72505 Krauchenwies, Deutschland

+49 7576 772-150

d.goessner@optigruen.de

Optimierung des urbanen Wassermanagement durch parametrische Planung eines nachhaltigen Flachdaches

T. Fink¹, P. Kinner¹, M. Jung¹, I. Haymerle²

1 AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Giefinggasse 4, 1210 Wien, Österreich

2 GRÜNSTATTGRAU, Favoritenstraße 50, 1040 Wien, Österreich

Kurzfassung: Die Anforderungen an unsere Städte werden durch die Auswirkungen des Klimawandels immer höher und komplexer. Es benötigt intelligente Planungswerkzeuge, welche inter- und transdisziplinär die Wirkung von Planungsentscheidungen insbesondere in den frühen Projektphasen bewertbar machen. Mit dem vorgestellten Ansatz eines parametrischen Planungstools, welches auf eine kombinierte Nutzung von Flachdächern abzielt, lassen sich Optimierungspotentiale in Bezug auf Wassermanagement, mikroklimatische Effekte und der Biodiversität, aber auch Fragen des Betriebes und der Wartung aufzeigen und beurteilen.

Key-Words: Flachdach, Regenwassermanagement, Grauwasser, Parametrisches Modell, Bauwerksbegrünung, Key Performance Indikatoren (KPIs)

1 Einleitung und Hintergrund

Unsere Städte und Quartiere werden durch die Auswirkungen des Klimawandels mit immer höheren und komplexeren Anforderungen konfrontiert. Es benötigt intelligente Planungsmaßnahmen, welche inter- und transdisziplinär die Wirkung von Planungsentscheidungen aufzeigen und bewertbar machen. Dies trifft vor allem in den frühen Projektphasen zu, in denen es noch das größte Potential zur Optimierung in Bezug auf Wassermanagement, mikroklimatische Effekte und der Biodiversität, aber auch des Betriebes und der Definition der Wartungsarbeiten gibt. Das verfügbare Retentionspotential am Dach, die Regenwasserspeicherung sowie die Grauwasseraufbereitung, -speicherung und -nutzung von den verschiedenen anfallenden Wässern können einen maßgeblichen Beitrag zur Abminderung der Auswirkungen sowohl von Starkniederschlagsereignissen als auch von Dürreperioden leisten. Das Ziel ist die schnelle Szenarien-/Variantenbewertung entlang der definierten Leistungsindikatoren von nachhaltigen Nutzdachplanungen durch den Einsatz eines parametrischen Modells. Das parametrische Modell ermöglicht die Entwicklung von Kombinationen der unterschiedlichen Systeme (Gründach, Photovoltaik, Grauwasseraufbereitung, Dachterrasse) und die Bewertung von Planungsszenarien.

2 Methodik

2.1 Systemdefinition

Aus den technischen Komponenten Begrünung, Photovoltaik und Grauwasseraufbereitung (constructed wetlands) wurde unter Berücksichtigung von Materialien, Aufbau, etc. ein Funktionskonzept für ein nachhaltiges Flachdach entwickelt. Dieses ermöglicht eine ökonomische Abschätzung (Material-, Wartungs- und Betriebskosten) sowie die Schnittstellen und Zusammenhänge zwischen den Komponenten für eine Erweiterung des Modells. Dieses Konzept beinhaltet die Key Performance Indikatoren (KPIs), welche Wassermanagement, Energiehaushalt, Biodiversität, Mikroklima, Ökologie (z.B. Life Cycle Assessment) und Ökonomie quantitativ und qualitativ bewerten. Die Schnittstellen des Flachdachsystems zur Integration weiterer Komponenten (Fassadenbegrünung, Energie- und Wasserspeicher, Geothermie) wurden berücksichtigt. Ein spezieller Fokus liegt in der Integration des Gebäudes bzw. des Flachdaches in das lokale Wassermanagement.

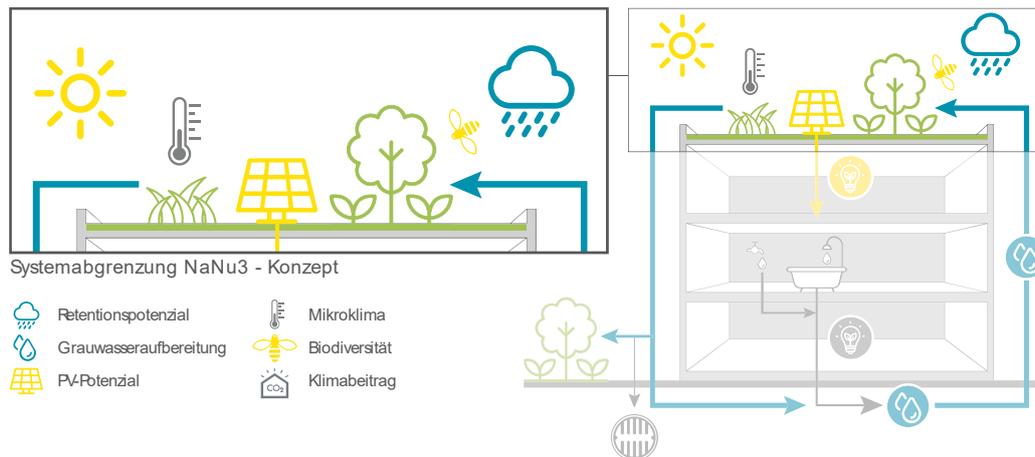


Abbildung 38: Systemabgrenzung Forschungsprojekt - NaNu3

2.2 Rahmenbedingungen und Komponenten

Für die Entwicklung der Szenarien und nachfolgende Bewertung werden die Rahmenbedingungen des jeweiligen Standortes herangezogen. Diese beinhalten spezifische Wetterdaten (Niederschlagsdaten, solare Einstrahlung, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit) als auch die Gebäudedaten des Projektes (Nutzung, Konstruktionsart, Stromverbrauch, Geschossanzahl, Anzahl der Nutzer:innen). Für die definierten Komponenten Dachterrasse, Dachbegrünung, Photovoltaik und Grauwasseraufbereitung wurden Referenzaufbauten entwickelt, welche für die Berechnung im parametrischen Modell kombiniert werden können. Diese umfassen extensive und intensive Dachbegrünung, Kombinationen von Photovoltaik sowie unterschiedliche Systemaufbauten der Grauwasseraufbereitung. Alle Gründachaufbauten erfüllen die Anforderungen der ÖNORM L1131 z.B. Gesamtdicke des Begrünungsaufbaues je nach Begrünungsart.

Tabelle 8: Dachaufbauten nach Komponenten

Dachterrasse	Dachbegrünung	Photovoltaik	Grauwasseraufbereitung
Nutzbare Terrasse	Extensive Begrünung >8cm	Photovoltaik am Dach	Bodenfilter, Sand-Kies
	Extensive Begrünung >12cm	Photovoltaik + extensives Gründach	Bodenfilter, Sand-Kies, reduzierte Aufbauhöhe
	Extensive Begrünung >19cm	Photovoltaik + nutzbare Terrasse	Bodenfilter, Blähton
	Intensive Begrünung >25cm	Photovoltaik + Grauwasseraufbereitung	
	Intensive Begrünung >40cm		
	Intensive Begrünung >80cm		

2.3 Übersetzung der Systematik in ein parametrisches Modell

Das Funktionskonzept des nachhaltigen Flachdaches wurde im weiteren als parametrisches Modell (Fink 2019) in Rhinoceros 3D und dem parametrischen Plug-In Grasshopper entwickelt. Die Grundlage zur Bewertung der Komponenten liegt in einer Datenbank, welche projektspezifisch adaptiert werden kann und über Grasshopper Schnittstellen in das parametrische Tool importiert werden. Diese Datenbank enthält Inputparameter zur Planung sowie Informationen zur Wirkung der einzelnen Aufbauten. Diese können über das User-Interface kombiniert werden können und ermöglichen der Nutzer:in die

laufende Performance Evaluierung über das parametrische Plug-In Grasshopper. Die Rahmenbedingungen des Standortes und Inputparameter können über das User-Interface zur Berechnung eingegeben werden. Die Komponenten können variabel kombiniert und zu einem nachhaltigen Flachdach im Tool entwickelt werden, wobei die Bewertung im Hintergrund während der Planung mitläuft. Das Tool ermöglicht die individuelle Szenarien Entwicklung durch die Nutzer:in oder eine automatisierte Erstellung und Auswertung von Systemkombinationen.

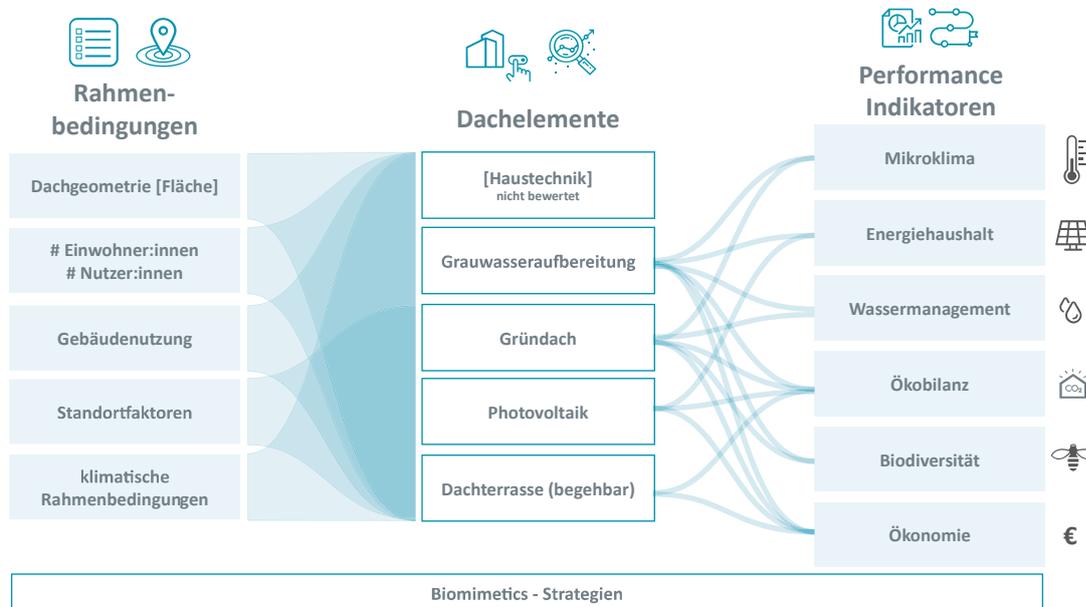


Abbildung 39: Konzept eines nachhaltigen Nutzdaches [Forschungsprojekt - NaNu3]

2.4 Abschätzung der Klima- und Umweltwirkungen (KPIs)

Aufbauend auf den technischen Komponenten und deren Kombinationen, deren Materialien und der erwarteten Lebensdauern (Bewertung auf 50 Jahre) erfolgt eine Abschätzung des Beitrages eines multifunktionalen Flachdaches in Hinblick auf das lokale Wassermanagement und das Mikroklima. Der Fokus liegt dabei auf der (lokalen) Wasserbilanz in Abhängigkeit vom Dachaufbau, der dachbasierten Grauwasseraufbereitung, unter der Berücksichtigung von Nachnutzungsmöglichkeiten (Bewässerungs- und Brauchwasser), der Treibhausgas-Bilanz und weiterer Umweltwirkungen durch Life Cycle Assessment (DIN EN 15804). Die KPI Performance von Ökonomie, Ökologie, Biodiversität und Mikroklima werden ebenfalls im parametrischen Modell berechnet und visualisiert, um als ganzheitliche Entscheidungsgrundlage die Kosten-Nutzenbewertung (z.B. Trinkwassereinsparung, Abwasser) zu unterstützen (siehe Abb. 02).

2.4.1 Mikroklima und Biodiversität

Die Bewertung der mikroklimatischen Wirkung von unterschiedlichen Systemen setzt sich aus drei Teilaspekten zusammen: der Kühlwirkung der Pflanzen (30%), der Strahlungsreflexion der Oberflächen (20%) und der Verschattung (50%). Die gewichtete Bewertung ergibt für die entwickelten Dachsysteme eine Bewertung und auf einer Skala zwischen 0-3. Zur Beurteilung der Biodiversität wurde der Einsatz von diversen Gestaltungs- und die Verwendung vielfältiger Strukturen evaluiert. Dazu zählen insektenfreundlichen Pflanzenarten, geeignete Strukturelemente wie z.B. Totholz, Sand, Wasserflächen, Kies, Lehm, etc. sowie die Oberflächenmodellierung (unterschiedliche Substrathöhen), welche wichtigen Lebensraum für Flora und Fauna sowie Rückzugsorte für gefährdete Spezies schaffen und somit die Biodiversität steigern.

2.4.2 Energiehaushalt

Die Performance des Energiehaushalts wird basierend auf dem Input des Energieverbrauchs im Gebäude und der potentiellen PV Produktion am Dach des Projektes berechnet. Der Energiebedarf im Gebäude kann hier variabel über das User-Interface eingegeben werden und mit dem Potential and geplanten PV-Dachflächen in Relation gesetzt werden. Das Energieproduktionspotential wird jährlich auf Grundlage der Orientierung, Neigung und Belegung der Paneele berechnet – über Schnittstellen könnten in weiterer Folge Simulationen durchgeführt werden. Der Eigennutzungsanteil sowie die Kosten und Erträge je kWh werden für die Berechnung der ökonomischen Wirkung der Photovoltaik Anlagen herangezogen.

2.4.3 Wassermanagement

Das Wassermanagement am NaNu3-Flachdach umfasst die Bereiche Regenwassermanagement und Grauwassermanagement. Die NaNu3-Ziele an das Regenwassermanagement adressieren den Wasserrückhalt im Bereich der Dachflächen, die Verringerung des Trinkwasserverbrauchs für Bewässerung, die Erhöhung der Evapotranspiration (erhöhte Kühlwirkung) durch Begrünungsmaßnahmen, die Entlastung der Kanalisation bei Starkniederschlagsereignissen sowie die Schaffung von lokalen Wasserkreisläufen (erhöhtes Wasserdargebot für Bäume und Sträucher). Grauwassermanagement im Sinne des NaNu3-Flachdachs zielt auf die Substitution von Trinkwasser für die Bewässerung von begrünten Dächern und Grünflächen ab. Aus hygienischen Gründen ist angedacht die aufbereitete Grauwasser zur punktuellen Bewässerung (Unterflurbewässerung, Mikrobewässerung) und nicht durch Beregnung oder durch Stauverfahren zu verwenden. Grauwasseraufbereitung ist technisch, ökologisch und ökonomisch sinnvoll, wenn Regenwasser allein nicht ausreicht den Bedarf für Bewässerung von Dachflächen, grüner Infrastruktur (wie z.B. grüner Fassaden) sowie für die Bewässerung von Grünflächen zu decken.

Regenwasser

Regenwasser ist eine wertvolle Ressource, welche vielerorts nicht gesammelt und genutzt wird, sondern über Regen- und Mischwasserkanäle abgeleitet werden. Bei Starkregenereignissen kann dies zu Überlastungen in der Kanalisation führen. Folgen davon sind entweder lokale Überschwemmungen oder Mischwasser wird über Regenüberläufe ungereinigt in Vorfluter entlastet. Ziel eines modernen (urbanen) Regenwassermanagements ist es lokale Wasserkreisläufe zu schaffen, das heißt Ableitung von Regenwasser zu verlangsamen und lokal zu speichern. Dies kann sowohl durch lokale Versickerung von Regenwasser aber auch durch Sammlung und Speicherung (z.B. Zisternen) geschaffen werden.

Das potentiell speicherbare Regenwasser aus dem Bereich der begrünten Dachflächen errechnet sich im NaNu3-Modell aus der monatlichen Niederschlagsmenge abzüglich der monatlichen Verdunstung. Monatliche Niederschlagsdefizite entsprechen dem monatlichen Bewässerungsbedarf, welcher für die optimale Versorgung der Pflanzen zur Erreichung der maximalen (potentiellen) Evapotranspiration erforderlich ist. Für die Berechnung des Regenwasserspeicherpotentials wird ebenfalls angenommen, dass Grünflächen immer optimal mit Wasser versorgt sind. Unter dieser Annahme entspricht die tatsächliche Evapotranspiration der potentiellen Evapotranspiration. Die Berechnung der potentiellen Evapotranspiration wird im NaNu3-Modell nach Haude durchgeführt. Haude-Faktoren für die Pflanzenart können entsprechend der Bepflanzung ausgewählt werden. Im NaNu3-Modell wurde für Gründach standardmäßig die Bepflanzung für Wiese ausgewählt. Für nicht begrünte Flächen wird angenommen, dass 80 % des Niederschlagswassers als speicherbares Regenwasser zur Verfügung steht.

Die Ergebnisse im NaNu3-Modell erlauben eine Abschätzung welche Menge an Regenwasser auf der Dachfläche gesammelt und gespeichert werden kann, wieviel Trinkwasser für Bewässerung auf der

Dachfläche eingespart werden kann, welche zusätzlichen Flächen - über das begrünte Flachdach hinausgehend - eventuell damit bewässert werden könnten, welches Speichervolumen erforderlich ist und mit welchen Kosten für die Wasserspeicherung zu rechnen ist.

Grauwasser

Grauwasser kann hinsichtlich seiner Entstehungsorte und Belastungsstufen klassifiziert werden. Häusliches Abwasser aus den Sanitärbereich (Duschen, Badewannen, Handwaschbecken) wird als schwach belastetes Grauwasser bezeichnet, Abwasser aus Wasch- und Geschirrspülmaschinen sowie küchenspülen als stark belastetes Grauwasser. Die Zusammensetzung und Menge des Grauwassers sind variabel und hängen stark vom individuellen Nutzer:innenverhalten, der Ausstattung der Haushalte (z.B. Geschirrspülmaschinen, Wasserspararmaturen etc.) den verwendeten Reinigungs- Körperpflegemitteln sowie Haushaltschemikalien (Seifen, Weichspüler, Zahnpasta, etc.), der Qualität der Wasserversorgung und der Art der Wasserverteilung ab. Im NaNu3-Flachdachkonzept ist die Reinigung des belasteten Grauwasseranteils aus dem Sanitärbereich (Duschen, Badewannen, Handwaschbecken) mit bepflanzten Bodenfiltern integriert. Dadurch reduziert sich einerseits die anfallende und zur reinigende Abwassermenge, andererseits auch die Konzentration der organischen Abwasserinhaltsstoffe ca. um den Faktor 4. Betreffend Design und Betrieb entspricht die in NaNu3 gewählte bepflanzte Bodenfilteranlage grundsätzlich einer gemäß ÖNORM B 2505 bemessenen bepflanzte Bodenfilteranlage. Dabei handelt es sich dabei um einen vertikal durchströmten intermittierend beschickten Bodenfilterkörper. Für die Reinigung von leicht verunreinigtem Grauwasser wurde im NaNu3 -Modell eine spezifischer Flächenbedarf von 1m² pro Einwohner angesetzt.

Die Ergebnisse im NaNu3-Modell erlauben eine Abschätzung welche Menge an Grauwasser im Gebäude anfällt und nach Reinigung für Bewässerung zur Verfügung steht, welche Flächen für die bepflanzten Bodenfilter erforderlich sind, welches Behältervolumen für die Vorreinigung erforderlich ist, wieviel Trinkwasser für Bewässerung auf der Dachfläche eingespart werden kann, welche zusätzlichen Flächen - über das begrünte Flachdach hinausgehend - eventuell damit bewässert werden könnten, mit welchen Kosten für die Grauwasserreinigung zu rechnen ist und welches Speichervolumen erforderlich ist.

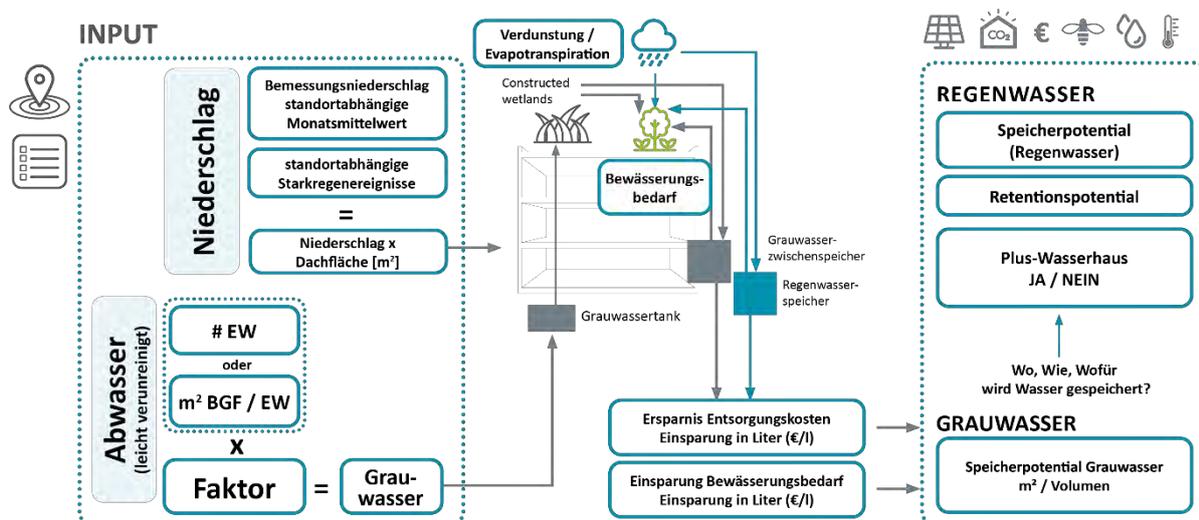


Abbildung 40: Wassermanagement [Niederschlag; Grauwasser]

2.4.4 Ökologie

In der ökologischen Bewertung wurden diverse Umweltindikatoren berücksichtigt. Diese enthalten das totale, fossile, biogene und luluc Treibhauspotenzial, das Versauerungspotential des Bodens bzw. Wassers sowie das CO₂ Bindungspotenzial durch Vegetation. Des Weiteren nicht erneuerbare Primärenergie in Energie und Material wie z.B. der Heizwert von Kunststoffen sowie die erneuerbare Primärenergie in Form von Energie und Material. Letzteres beinhaltet beispielsweise den PV- Energieertrag oder das Konstruktionsholz. Die Nutzungsdauer des Daches wird mit 50 Jahren (BMUB 2011) definiert, wobei einzelne Komponenten (zB. Photovoltaik) mit einer Erneuerung nach 25 Jahren kalkuliert wurden.

2.4.5 Ökonomie

Für die ökonomische Bewertung werden für die einzelnen Dachsysteme die Herstellkosten, Betriebskosten und systemverbundenen Kosten herangezogen. Die Herstellkosten basieren auf Informationen der Hersteller und werden mit Mittelwerten zu den jeweiligen Systemen angenommen, können jedoch projektspezifisch angepasst werden. Zusätzlich werden die Ertragsmöglichkeiten durch die Einsparung von Trinkwasser zur Bewässerung, z.B. durch die Verwendung von gereinigtem Grauwasser oder gespeichertem Regenwasser, im Projekt behandelt. Das Einsparungspotenzial von Energie durch die Produktion durch die PV-Anlagen bzw. der potentielle Ertrag durch die Einspeisung der Energie wird ebenfalls in der ökonomischen Bewertung dargestellt.

3 Ergebnisse

3.1 Sondierung von virtuellen Anwendungsfällen

Abbildung 04 zeigt zwei Szenarien, wobei der Standort [Wien], die verfügbare Dachfläche [350m²] und der Haustechnikflächenanteil [53m²] als fixe Parameter gesetzt sind. Das Szenario 1 (S1) kombiniert intensives Gründach [215m²], Photovoltaik mit extensiver Begrünung [57m²] sowie Grauwasseraufbereitung (bepflanzter Bodenfilter - ÖNORM B 2505 Kläranlagen) [25m²]. Das Szenario 2 (S2) kombiniert ein extensives Gründach [138m²], aufgeständerte PV über Grauwasseraufbereitung [25m²] sowie einer Dachterrasse [134m²]. Die Übersicht der KPIs zeigt eine klare Priorisierung des S1 bezogen auf die Mehrheit der KPIs (numerisch und im Kressegment) mit einer Gesamtpformance von 66.2% im Vergleich zu S2 mit 42.8%. Die im Wassermanagement relevanten Indikatoren verhalten sich wie folgt: Das Retentionspotential bezogen auf den Bemessungsniederschlag 50mm beträgt in S1: 67% und in S2: 20%. Die Evapotranspiration der Dachsysteme im Verhältnis zum Jahresniederschlag [228,8m³] beträgt in S1: 93.01% und S2: 33.02%. Der monatliche Bewässerungsbedarf (Kendzia 2020) wird im User-Interface dargestellt und ist bei S1: 45.3m³ (Jahressumme) und S2: 0m³ (Jahressumme). Das tägliche Grauwasserpotential (DWA-A 272) (Bad: Waschbecken, Dusche) wird mit 60 Liter je Bewohner:in am Tag angenommen und stellt für beide Szenarien eine monatliche Zusatzressource von 45m³ zur Bewässerung dar.

Szenario 1 (S1)



Szenario 2 (S2)



Abbildung 41: Performance Übersicht (S1 links; S2 rechts) im User-Interface des parametrischen Modells

3.2 Sondierung von realen Anwendungsfällen

Die Methodik wurde im Rahmen des Forschungsprojektes NaNu3 an realen Anwendungsfällen in Wien und Kärnten sondiert. Ein ausgewähltes Beispiel, eine Wohnanlage in Velden, wird im Weiteren genauer erläutert. Die Bebauung sieht die Errichtung von 25 Wohneinheiten und einer Tiefgarage vor. Die oberirdische Bebauung ist in zwei Baukörper gegliedert, welche mittels Verbindungsbrücke barrierefrei verbunden sind. Beide Bauteile - Haus 1 im Westen und Haus 2 im Osten - umfassen drei oberirdische Geschosse. Für die Dächer des Wohnbaus wurden drei unterschiedliche Szenarien entwickelt und mit dem parametrischen Modell auf die Performance der KPIs bewertet. Tabelle 2 zeigt die Kombination der Flachdachkomponenten für die definierten Szenarien, Szenario 1 wurde an der aktuellen Planung orientiert und davon Variationen abgeleitet.

Tabelle 9: Szenarien für den Wohnbau in Velden

	Szenario 01	Szenario 02	Szenario 03
Gründach	83m ² Intensives Gründach >25cm	162m ² Intensives Gründach >25cm	175m ² Intensives Gründach >25cm
	83m ² Intensives Gründach >40cm	162m ² Intensives Gründach >40cm	
	83m ² Intensives Gründach >80cm	162m ² Intensives Gründach >80cm	
Photovoltaik	234m ² PV + extensives Gründach	-	175m ² PV + extensives Gründach
Grauwasser-aufbereitung	-	39m ² Bodenfilter, Sand-Kies	-
Dachterrasse	42m ² Nutzbare Terrasse	-	175m ² Nutzbare Terrasse
Haustechnik	132m ² Haustechnik (20%)	132m ² Haustechnik (20%)	132m ² (20%)

Zu den Bewertungsindikatoren werden die Teilaspekte im User-Interface angezeigt, bzw. als Datenbank exportiert. Tabelle 3 zeigt eine Übersicht zum Wassermanagement der Szenarien, wobei Szenario 2 mit 62% Retentionspotential und Grauwasseraufbereitung zur Bewässerung der Vegetation einen Beitrag zu einem nachhaltigen Wassermanagement leistet. Szenario 01 erzielt durch die Kombination von unterschiedlichen Gründachaufbauten ein Retentionspotential von 42%.

Tabelle 10: Performance Ergebnisse: Wassermanagement

Wassermanagement	Szenario 01	Szenario 02	Szenario 03
Retentionsverhältnis Bemessungsniederschlag	42%	62%	25%
Maximalniederschlag	8%	12%	5%
Niederschlag (jährlich)	1.208mm	1.208mm	1.208mm
Bewässerungsbedarf (jährlich)	0	3.355 Liter	0
Potentiell speicherbares Regenwasser	495.667 Liter	335.198 Liter	579.001 Liter
Anfallendes Grauwasser	-	854.100 Liter	-

Retentionspotential am Dach	<u>42%</u>	<u>62%</u>	<u>25%</u>
------------------------------------	-------------------	-------------------	-------------------

Um eine ganzheitliche Bewertung der Szenarien zu ermöglichen, werden in Tabelle 4 die Performance Auswertungen aller Kriterien dargestellt. Aufgrund der steigenden Relevanz der erneuerbaren Energieproduktion wird das Szenario 01 für die Planung empfohlen, da es eine ganzheitlich betrachtet hohe Bewertung erzielt. Diese Szenarien wurden mit dem Immobilienentwickler und Architekten des Projektes diskutiert und die Praxistauglichkeit der Methode getestet.

Tabelle 11: Gesamtperformance Übersicht

Gesamtperformance	Szenario 01	Szenario 02	Szenario 03
Mikroklima Indikator	57%	90%	33%
Biodiversität Indikator	74%	93%	58%
Ökonomie (Herstellkosten)	85%	90%	87%
Ökologie (Primärenergie nicht erneuerbar)	51%	89%	54%
Regenwassermanagement (Retentionspotential am Dach)	42%	62%	25%
Energie (Produktion vs. Stromverbrauch)	87%	-	65%
Gesamtperformance	<u>66%</u>	<u>70,7%</u>	<u>53,7%</u>

4 Diskussion

Der entwickelte Prototyp des parametrischen Modells bildet einen wichtigen Baustein, um multifunktionelle Nutzungskonzepte von Dachlandschaften rasch und kostengünstig auf ihre Umsetzbarkeit zu prüfen und kunden- bzw. bedarfsträgerorientiert auch mit den Stakeholdern zu optimieren. Das Konzept wurde von Expert:innen (aus u.a. Planung, Immobilienentwicklung, Architektur) im Rahmen von Stakeholder-Workshops diskutiert und die Ergebnisse im Konzept berücksichtigt.

Mit den Ergebnissen aus dem parametrischen Modell werden Entwickler:innen, Kund:innen oder Bau-träger:innen auch valide Argumente für klima- und energierelevante Fragestellungen, die zumeist mit höheren Investitionen verbunden sind, geliefert, da ohne fundierte Basis so gut wie immer die günstigste Ausführungsvariante präferiert wird. Auch als Argumentationswerkzeug für die öffentliche Hand kann das Tool bei der Durchsetzung urbanklimatischer Umsetzungsmaßnahmen hilfreich sein (z.B. Regenwassermanagement, Retentionsraumbewirtschaftung), da es eine Bewertung anhand validierter Eingabeparameter erlaubt und somit zu einer objektivierbaren Einschätzung einer Intervention beiträgt.

Auf Grund der offenen Struktur des parametrischen Modells und der bereits vorgesehenen Schnittstellen (modularen Kopplung) können auch andere Teile und Komponenten des Gebäudes wie Fassaden oder auch die umgebenden Frei- und Grünflächen in einer zukünftigen Weiterentwicklung integriert werden. Dies ließe eine verschieden skalierte Bewertung zu – von aggregierten Bewertungen in Quartiers- oder Blockebene (Betrachtung des Gesamtprojektes) bis hin zu einer holistischen Betrachtung eines Gebäudes oder dessen Komponenten. In weiterer Folge können die Modelle über Schnittstellen zur energetischen und mikroklimatischen Detail-Simulation exportiert werden.

Danksagung

Dieses Projekt wurde aus Mitteln der FFG gefördert. www.ffg.at. Der reale Anwendungsfall wurde von PLOV Architekten ZT GmbH sowie Bednarzek & Schnitzer Immobilienprojektentwicklung GmbH zur Verfügung gestellt, wir danken für die Bereitschaft.

5 Literatur

BMUB (2011) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) 2011: Nutzungsdauern von Bauteilen zur Lebenszyklusanalyse nach BNB.

http://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/baustoff_gebauededaten/Erlaeuterung_en_BNB-Tabelle_Nutzungsdauern_2011-07-07.pdf (geöffnet am 11.3.2022)

DIN EN 15804:2022-03 Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products; German version EN 15804:2012+A2:2019 + AC:2021

DWA-A 272: Grundsätze für die Planung und Implementierung Neuartiger Sanitärsysteme (NASS) -2014

Fink, T. and Koenig, R.: 2019, Integrated Parametric Urban Design in Grasshopper / Rhinoceros 3D, eCAADe 2019, Porto, Portugal.

Kenzia, N: Bewässern nach Regeln -Wasserbedarf urbaner Grünflächen, Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau, (2020)

Rhinoceros 3D: rhino3d.com; Grasshopper: <https://www.grasshopper3d.com/>

ÖNORM B 2505 Kläranlagen - Intermittierend beschickte Bodenfilter ("Pflanzenkläranlagen") - Anwendung, Bemessung, Bau, Betrieb, Wartung und Überprüfung (2009)

ÖNORM L 1131:2010 Gartengestaltung und Landschaftsbau – Begrünung von Dächern und Decken auf Bauwerken. Anforderungen an Planung, Ausführung und Erhaltung. Österreichisches Normungsinstitut. Wien.

Korrespondenz:

Name (Hauptautor): Theresa Fink, MSc

Adresse: Giefinggasse 4, 1210 Wien

Tel: +43 664 88335477

E-Mail: theresa.fink@ait.ac.at

Bewertung der hydraulischen Leistungsfähigkeit von Kanalnetzen:

Die neue Richtlinie DWA-A 118

K. Krieger¹, L. Fuchs²

1 Hamburg Wasser, Pinkertweg 5, 22213 Hamburg, Deutschland

2 itwh GmbH, Engelbosteler Damm 22, 30167 Hannover, Deutschland

Kurzfassung: Mit der Neufassung des DWA-Arbeitsblattes A 118 wird das deutsche Regelwerk für die Planung und hydraulische Überprüfung von öffentlichen Entwässerungssystemen an die aktuellen technischen und normativen Rahmenbedingungen angepasst. Dabei wird entsprechend DIN EN 752 eine an den potenziellen Auswirkungen von Systemüberlastungen durch Starkregen ausgerichtete Klassifizierung von Schutzkategorien zugrunde gelegt, welche eine zielgerichtete Festlegung der Anforderungen an Entwässerungssysteme hinsichtlich der Aspekte Überstau- und Überflutungshäufigkeit gewährleistet.

Key-Words: Entwässerungssysteme, Kanalnetze, Belastungsgrößen, hydraulischer Nachweis, Risikomanagement Starkregen

1 Einleitung

Bereits seit Mitte der 1950er Jahre bestehen in Deutschland Richtlinien für die hydraulische Auslegung von Regen- und Mischwasserkanälen (ATV, 1956). Diese wurden seitdem im Arbeitsblatt A 118 „Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen“ der DWA (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.) dokumentiert und laufend aktualisiert (DWA, 2006).

Wesentliche inhaltliche Anpassungen des Arbeitsblattes erfolgten zuletzt 1999. Aufgrund der in den letzten zwei Jahrzehnten erfolgten Weiterentwicklungen des Normen- und Regelwerkes, der technologischen Möglichkeiten sowie der Rahmenbedingungen für die Entwässerungsplanung wurde eine grundlegende Überarbeitung erforderlich. Anpassungsbedarf bestand dabei insbesondere hinsichtlich der hydraulischen Bewertung von Entwässerungssystemen für Regen- und Mischwasser im Kontext eines kommunalen Starkregenrisikomanagements (Schmitt, 2011; Krieger & Schmitt, 2018) unter Berücksichtigung der überarbeiteten Euronorm DIN EN 752 „Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden – Kanalmanagement“ (2017) sowie des DWA-Merkblatts M 119 „Risikomanagement in der kommunalen Überflutungsvorsorge für Entwässerungssysteme bei Starkregen“ (2016).

2 Grundsätze zur hydraulischen Leistungsfähigkeit von Entwässerungssystemen

Die Aufrechterhaltung hygienischer Verhältnisse sowie die weitgehende Vermeidung von Überflutungsschäden sind maßgebliche Zielsetzungen für die Planung und hydraulische Überprüfung von öffentlichen Entwässerungssystemen. Zentrales Anliegen der Neufassung des Arbeitsblattes A 118 war daher die Überarbeitung der Kriterien für einen hinreichenden Schutz vor Überflutungen in Abhängigkeit vom anzustrebenden Schutzniveau anhand von Überstau- und Überflutungshäufigkeiten.

Entwässerungssysteme für Regen- und Mischwasser leisten im Regelfall auch bei Niederschlagsintensitäten oberhalb der vorgegebenen Bemessungsansätze einen wesentlichen Beitrag zur Minderung von starkregenbedingten Überflutungen und damit verbundenen Schäden. Die Anforderungen an den

Überflutungsschutz können bei seltenen und außergewöhnlichen Starkregen jedoch oftmals nicht alleine durch das kanalgebundene Entwässerungssystem, sondern nur unter zusätzlicher Berücksichtigung von Speicher- und Ableitungskapazitäten an der Oberfläche sowie Maßnahmen des Objektschutzes erfüllt werden.

3 Belastungsgrößen

Das Arbeitsblatt A 118 gibt Ansätze für die Ermittlung der relevanten Belastungsgrößen Schmutzwasser-, Fremdwasser- und Regenwasserabfluss vor. Die Niederschlagsintensität als wesentliche Belastungsgröße für die Überstau- und Überflutungsbetrachtung bei Regen- und Mischentwässerungssystemen kann dabei anhand von Modellregen entsprechender Wiederkehrzeiten, anhand von gemessenen oder synthetischen Niederschlagsreihen oder anhand von Radarregendaten angesetzt werden.

Eine pauschale Erweiterung von Kanalkapazitäten zur Berücksichtigung möglicher Veränderungen der Niederschlagsbelastungen aufgrund des Klimawandels wird vor dem Hintergrund der bislang unzureichenden Quantifizierbarkeit der Auswirkungen des Klimawandels auf das Niederschlagsgeschehen weiterhin nicht empfohlen. Jedoch sollen bei Neubemessungen und Maßnahmenplanungen im Rahmen von szenarischen Betrachtungen der Systemempfindlichkeiten berücksichtigt werden. Dabei wird empfohlen, unter Kosten-Nutzen-Abwägung Leistungsreserven bei der Maßnahmenplanung vorzuhalten.

4 Hydraulische Berechnung und Nachweisführung

Die Anforderungen an die hydraulische Leistungsfähigkeit von Entwässerungssystemen für Regen- und Mischwasser werden abhängig vom anzustrebenden Schutzniveau gegenüber starkregenbedingten Überflutungen und deren Auswirkungen auf die Schutzgüter Mensch, Umwelt, Versorgung, Wirtschaft und Kultur in vier Schutzkategorien festgelegt (Tab. 1).

Tabelle 12: Anforderungen an öffentliche Entwässerungssysteme für Regen- und Mischwasser (DWA, 2022)

Schutzkategorie	Auswirkungen auf Flächen und Objekte	Bereichsklassifizierung	Überstauhäufigkeit	Überstauhäufigkeit	Überflutungshäufigkeit
für Mensch, Umwelt, Versorgung, Wirtschaft, Kultur	Zuordnung nach DIN EN 752, Tab. 3	Beispielhafte Nutzung	1-mal in „n“ Jahren Bestand	1-mal in „n“ Jahren Neubau	1-mal in „n“ Jahren
(1) gering	sehr gering	Bereiche, in denen das Wasser überwiegend schadlos und ohne Nutzungseinschränkungen auf der Oberfläche abfließen oder verbleiben kann z.B. ländliche Gebiete / Streusiedlungen, Grün- und Freiflächen, Parks	1	2	10
	gering				
(2) mäßig	gering bis mittel	Bereiche, in denen Überflutungen geringe bis mittlere Schäden oder Nutzungseinschränkungen verursachen können und die Sicherheit und Gesundheit nicht gefährden z.B. Wohn- und Mischgebiete mit Wohnbebauung und/oder Einzelhandel und Kleingewerbe ohne zu Wohn- oder Gewerbebezwecken genutzte Untergeschosse	2	3	20
	mittel				
(3) stark	mittel bis stark	Bereiche in denen Überflutungen lokal zu größeren Schäden oder Nutzungseinschränkungen führen oder die Sicherheit und Gesundheit potenziell gefährden können, z.B. Stadtzentren, Wohngebiete mit zu Wohn- oder Gewerbebezwecken genutzten Untergeschossen, Gewerbe-/ Industriegebiete, Verkehrswege und Flächen von besonderer Bedeutung, Tiefgaragen und verkehrstechnisch untergeordnete Straßenunterführungen	3	5	30
	stark				
(4) sehr stark	sehr stark	Bereiche in denen Überflutungen zu weitreichenden größeren Schäden oder Nutzungseinschränkungen führen oder die Sicherheit und Gesundheit akut gefährden können, z.B. Bereiche mit kritischer Infrastruktur, Tiefbahnhof-Zugänge, oder verkehrstechnisch übergeordnete Infrastrukturen / Tiefgaragen.	5	10	50

Die hydraulische Bewertung der Entwässerungssysteme erfolgt anhand der Kriterien „Überstauhäufigkeit“ und „Überflutungshäufigkeit“. Die Überstauhäufigkeit stellt ein praxisbewährtes und relativ genau zu berechnendes Kriterium zur Bewertung der hydraulischen Leistungsfähigkeit von kanalgebundenen Entwässerungssystemen dar. Aus der Erfüllung des Überstaukriteriums allein kann jedoch noch kein hinreichender Überflutungsschutz abgeleitet werden. Demgegenüber kann die zulässige Überstauhäufigkeit im Einzelfall geringfügig überschritten werden, wenn aufgezeigt wird, dass das geforderte Schutzniveau hinsichtlich des Überflutungsschutzes erreicht wird.

Die Überflutungshäufigkeit bezieht sich auf kanalinduzierte Überflutungen sowie Überflutungen aufgrund oberflächiger Zuflüsse unter Berücksichtigung der hydraulischen Kapazitäten des Entwässerungssystems, der Speicher- und Ableitungskapazitäten an der Oberfläche sowie der Ausprägung des vorhandenen Objektschutzes. Unter Überflutung wird dabei abweichend von der Definition in DIN-EN 752 ein Zustand verstanden, bei dem Abwasser aus einem Entwässerungssystem entweichen oder nicht in dieses eintreten kann und dies zu Schäden oder Nutzungseinschränkungen führen kann.

Die gebräuchlichen Berechnungsverfahren für die Überstau- und Überflutungsprüfungen sind umfassend im DWA-Merkblatt M 165-1 „Anforderungen an Niederschlag-Abfluss- und Schmutzfrachtmodelle in der Siedlungsentwässerung“ beschrieben (DWA, 2021).

Die Überprüfung der hydraulischen Leistungsfähigkeit von Entwässerungssystemen für Regen- und Mischwasser erfolgt nach Abb. 1.

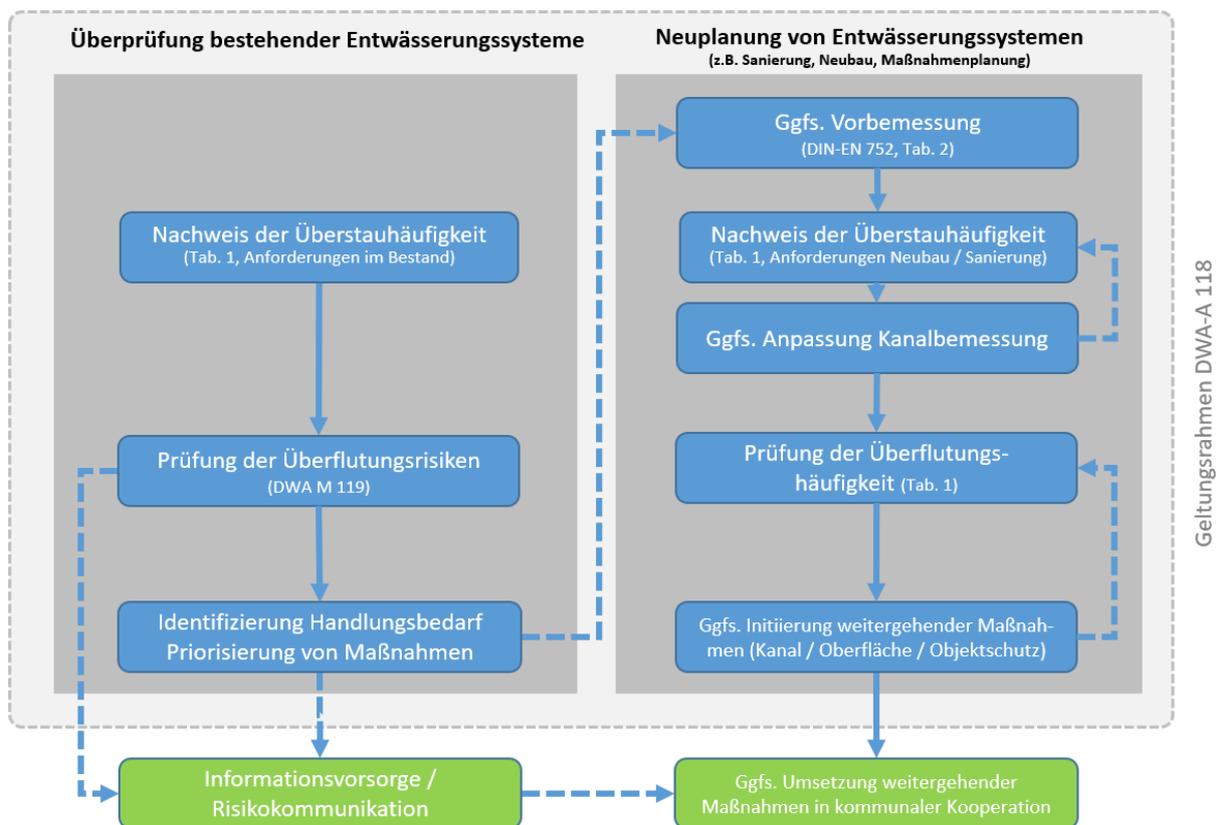


Abbildung 42: Planung und hydraulische Überprüfung von öffentlichen Entwässerungssystemen (DWA, 2022)

Dabei umfasst die Überprüfung bestehender Systeme den Nachweis der Überstauhäufigkeit nach Tab. 1 und eine generelle Prüfung der Überflutungsrisiken entsprechend der Empfehlungen nach DWA-M 119 mit einer Gefährdungsanalyse als zentralem Bestandteil (Abb. 2, linke Säule). Sie bildet die Grundlage für die Identifizierung des aus Sicht des kommunalen Überflutungsschutzes bestehenden Handlungsbedarfes und der Priorisierung abzuleitender Maßnahmen. Die Überprüfung sollte auch systematische Beobachtungen des tatsächlichen Abflussverhaltens und entsprechende betriebliche Erfahrungen einbeziehen.

Die hydraulische Auslegung umzusetzender Maßnahmen erfolgt analog der Sanierungs- und Erschließungsplanung im Rahmen der Neuplanung von Entwässerungssystemen (Abb. 2, rechte Säule). Sie umfasst die Vorbemessung, den Nachweis der Überstauhäufigkeit und die Prüfung der Überflutungshäufigkeit.

Bei der Prüfung der Überflutungshäufigkeiten ist zu berücksichtigen, dass die damit verbundenen Anforderungen nach Tab. 1 oftmals nicht alleine durch das kanalgebundene Entwässerungssystem erfüllt werden können. Daher müssen hierbei zusätzlich Speicher- und Ableitungskapazitäten an der Oberfläche sowie Maßnahmen des Objektschutzes berücksichtigt werden. Hierfür ist eine enge Kooperation der kommunalen Maßnahmenträger (u.a. Entwässerungsbetrieb, Straßenbaulastträger, Stadtplanung, Grünflächenämter und Grundeigentümer) bei der Planung, Finanzierung und Umsetzung geeigneter Maßnahmen von besonderer Relevanz.

5 Literatur

- ATV (1956): Richtlinien für die Berechnung von Regen- und Mischwasserkanälen, ATV-Regelwerk, Hennef, 1956
- DIN (2017): DIN EN 752 Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden - Kanalmanagement, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Juli 2017
- DWA (2006): Arbeitsblatt A 118 „Bemessung und hydraulischer Nachweis von Entwässerungssystemen“, DWA-Regelwerk, Hennef, März 2006
- DWA (2016): Merkblatt DWA-M 119 „Risikomanagement in der kommunalen Überflutungsvorsorge für Entwässerungssysteme bei Starkregen“, DWA-Regelwerk, Hennef, November 2016
- DWA (2021): Merkblatt DWA-M 165 „Anforderungen an Niederschlag-Abfluss- und Schmutzfrachtmodelle in der Siedlungsentwässerung“, DWA-Regelwerk, Hennef, 2020
- DWA (2022): Arbeitsblatt A 118 „Planung und hydraulische Überprüfung von öffentlichen Entwässerungssystemen“, Entwurf zur Stellungnahme, DWA-Regelwerk, Hennef, August 2022
- Krieger, K., Schmitt, T. (2018): Starkregenbezogene Gefährdungs- und Risikoanalysen für Entwässerungssysteme – Erfahrungen mit der Umsetzung und Kommunikation als Beitrag zur Überflutungsvorsorge, Korrespondenz Abwasser, Abfall (65), Nr. 8, 680-685, 2018
- Krieger, K. (2021): Planung und hydraulische Überprüfung von öffentlichen Entwässerungssystemen – Stand der Überarbeitung des Arbeitsblattes DWA-A 118, DWA RegenwasserTag-ge Online, 22.06.2021
- Schmitt, T.G. (2011): Risikomanagement statt Sicherheitsversprechen – Paradigmenwechsel auch im kommunalen Überflutungsschutz?, KA Korrespondenz Abwasser (58) Heft 1, Januar 2011, S. 40-49

Krieger, K. (2021): Planung und hydraulische Überprüfung von öffentlichen Entwässerungssystemen - Werkstattbericht zur Überarbeitung des Arbeitsblattes DWA-A 118, Korrespondenz Abwasser, Abfall (68), Nr. 10, 822-826, 2021

Korrespondenz:

Dipl.-Ing. Klaus Krieger
Hamburg Wasser, Bereich Netze
Pinkertweg 5, 22213 Hamburg
Zweckverband Obere Bille
Poststraße 11, 22946 Trittau
klaus.krieger@hamburgwasser.de

Dr. Ing. Lothar Fuchs
itwh GmbH
Engelbosteler Damm 22
30167 Hannover
l.fuchs@itwh.de

VSA Empfehlung «Hydraulische Beurteilung in der Siedlungsentwässerung:

Überprüfung von Entwässerungssystemen und Umgang mit Oberflächenabfluss»

R. Buss¹, M. Gresch^{1*}, R. Flury², A.G. Meier² und N. Muff²

¹Hunziker Betatech AG, Pflanzschulstrasse 17, CH-8400 Winterthur

²Holinger AG, Kasthoferstrasse 23, CH-3006 Bern

Kurzfassung Mit der neuen VSA Empfehlung wird das integrale Risikomanagement in der Siedlungsentwässerung eingeführt. Dazu werden differenzierte Schutzziele in Abhängigkeit verschiedener Schutzgutklassen (Sachwerte, Nutzungen) definiert. Für die Analyse und Bewertung von Gefahren und Schadenpotenzialen wird eine Methodik zur Überprüfung und Beurteilung der hydraulischen Leistungsfähigkeit von Entwässerungssystemen und zum Umgang mit Oberflächenabfluss beschrieben. Die Abflussprozesse im Kanalisationsnetz und auf der Oberfläche werden gesamthaft betrachtet. Für die Verwendung von Regendaten wird eine schweizweit einheitliche Vorgehensweise festgelegt.

Key-Words: Integrales Risikomanagement, differenzierte Schutzziele, Regendaten, Überprüfung Entwässerungssystem, Oberflächenabfluss

1 Ausgangslage und Ziele

Die technologischen Möglichkeiten sowie die Randbedingungen für die Entwässerungsplanungen haben sich in den letzten Jahren entwickelt. Dadurch entstand ein Anpassungsbedarf für die Methodik zur Überprüfung und Beurteilung der hydraulischen Leistungsfähigkeit von Entwässerungssystemen. Im Zentrum steht dabei die Einführung des integralen Risikomanagements im Umgang mit Starkregenereignissen im Siedlungsraum. Bei dieser Betrachtung werden sowohl die Abflussprozesse im Kanalisationssystem als auch der Oberflächenabfluss beurteilt.

In der Empfehlung des Verbands Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute (VSA) werden die Vorgaben aus der überarbeiteten Europäischen Norm EN 752 aufgenommen und darauf aufbauend eine Methodik zur Überprüfung von Entwässerungssystemen in der Schweiz festgelegt. Das integrale Risikomanagement ist in der Schweiz im Bereich der Naturgefahren bereits etabliert. In der vorliegenden Empfehlung wird aufgezeigt, wie das integrale Risikomanagement auch in der Siedlungsentwässerung zur Anwendung kommen soll. Ausserdem wird mit der Empfehlung schweizweit eine einheitliche Methodik zur Verwendung von Regendaten eingeführt. Damit wird im Vergleich zum Dokument «Regendaten für die Siedlungsentwässerung» aus dem Jahr 1997, welches nur die Messung von Regendaten thematisiert, eine Methodik zur Auswertung und Verwendung von Regendaten für Kanalnetzsimulationen beschrieben.

Die Inhalte der Empfehlung beschreiben die grundlegenden Methodiken für die Erarbeitung des Entwässerungskonzeptes im Rahmen der Generellen Entwässerungsplanung (GEP). Insbesondere die Empfehlungen zum Umgang mit Oberflächenabfluss sollen auch in der Bearbeitung von spezifischen Projekten in Bezug auf die Gefährdung durch Oberflächenabfluss zur Anwendung kommen. Mit der Empfehlung werden die Grundlagen für eine integrale Massnahmenplanung in der Siedlungsentwässerung bereitgestellt.

2 Inhaltliche Neuerungen: Ein Paradigmenwechsel

Die Kanalnetze in der Schweiz wurden bis anhin mit ausgewählten historischen Regen oder mit Modellregen mit einer definierten Jährlichkeit dimensioniert. Dabei wurde davon ausgegangen, dass ein direkter Zusammenhang zwischen Niederschlagsmenge und zu erwartendem Abfluss besteht. Oberflächlich abfließendes Wasser, welches gar nicht erst in die Kanalisation gelangt, wurde als Naturgefahr behandelt und als solche separat beurteilt. Es zeigte sich jedoch, dass die Prozesse der kanalinduzierten Überflutung (=Überlastung des Kanalnetzes mit Austritt von Wasser auf die Oberfläche) und des direkten Oberflächenabflusses eng zusammenhängen.

Die neue Empfehlung führt die Methode des integralen Risikomanagements, welche im Bereich der Naturgefahren etabliert ist, in der Siedlungsentwässerung ein. Diese umfasst die hydraulische Überprüfung der Leistungsfähigkeit des Kanalnetzes sowie den Umgang mit der Gefährdung durch kanalinduzierte Überflutungen und durch Oberflächenabfluss. Die Einführung des integralen Risikomanagements erfordert einen Paradigmenwechsel: Als Grundlage für die gesamthafte Beurteilung des Entwässerungssystems und des Oberflächenabflusses werden differenzierte Schutzziele für verschiedene Schutzgutklassen (Sachwerte, Nutzungen) definiert. Weiter erfolgt die hydraulische Überprüfung von Kanalnetzen basierend auf Langzeitsimulationen mit Regenreihen oder einem repräsentativen Regenereigniskatalog aus historischen Regendaten von für das betrachtete Gebiet repräsentativen Messstationen. Die Beurteilung der hydraulischen Leistungsfähigkeit der Kanalnetze erfolgt schliesslich anhand der Ergebnishäufigkeit (Maximalwasserstände in den Schächten) und nicht anhand eines Dimensionierungsregens.

Dieser Paradigmenwechsel ist möglich, da in den letzten Jahren und Jahrzehnten im Bereich der Simulationsmöglichkeiten und Analysen enorme Fortschritte erzielt wurden und mittlerweile auch längere und hochaufgelöste Aufzeichnungen zu Regenereignissen vorliegen. Ein weiteres Ziel des neuen Ansatzes zur Beurteilung von Entwässerungssystemen ist es, den Einsatz dieser neuen Analysewerkzeuge in der Siedlungsentwässerung zu fördern und aufzuzeigen, wie diese sinnvoll eingesetzt werden können.

3 Methodik und Begriffe

Für die hydraulische Überprüfung des Kanalisationsnetzes ist der Wasserstand das relevante Bezugsniveau. Der Wasserstand, ab welchem Schäden auf einer Liegenschaft verursacht werden können, wird als **Schadenslinie** bezeichnet. Wie häufig der Wasserstand bei Regenereignissen in der Kanalisation diese Schadenslinie überschreiten darf, wird durch die Festlegung von **Schutzzielen** bestimmt. Ein Überschreiten der Schadenslinie wird als **Überstau** bezeichnet. Erreicht der Wasserstand das Niveau des Terrains, tritt Abwasser aus der Kanalisation aus. Dieses Austreten von Abwasser wird als **kanalinduzierte Überflutung** bezeichnet.

Die Überprüfung des Entwässerungssystems erfolgt anhand einer hydrodynamischen Kanalnetzsimulation. Die Überprüfung der Gefahren durch Oberflächenabfluss kann anhand einer **Grobanalyse** qualitativ erfolgen. Unter dem Begriff Oberflächenabfluss werden auch kanalinduzierte Überflutungen eingeschlossen. Für relevante Orte muss eine **Detailanalyse** erfolgen, welche auf einer modellgestützten Analyse basiert und die Grundlagen für eine Risikobetrachtung schafft. In Abbildung 43 wird der Zusammenhang zwischen dem Kanalisationsnetz und dem Oberflächenabfluss aufgezeigt.

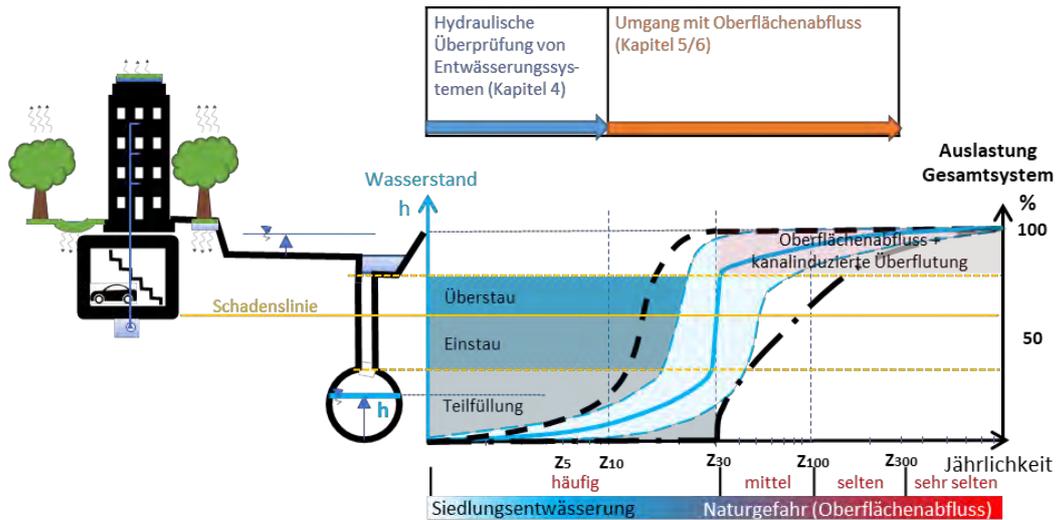


Abbildung 43: Funktionsbeispiel bezüglich der gängigen GEP-Praxis. Linien: blau = Wasserspiegel h, Punkt-Strich = prozentuale Überflutung, Gestrichelt = prozentuale Kanalauslastung

4 Vorgehen

Das generelle Vorgehen und die jeweiligen Schnittstellen zwischen den einzelnen Arbeitsschritten sind in Abbildung 2 dargestellt. Die hydraulische Überprüfung von Entwässerungssystemen inkl. Berücksichtigung des Oberflächenabflusses erfolgt in der Regel im Rahmen der Generellen Entwässerungsplanung. Die GEP-Bearbeitung liefert die Grundlagen für eine Detailanalyse des Oberflächenabflusses sowie die konkrete Massnahmenplanung in anschliessenden, weitergehenden Planungsschritten.

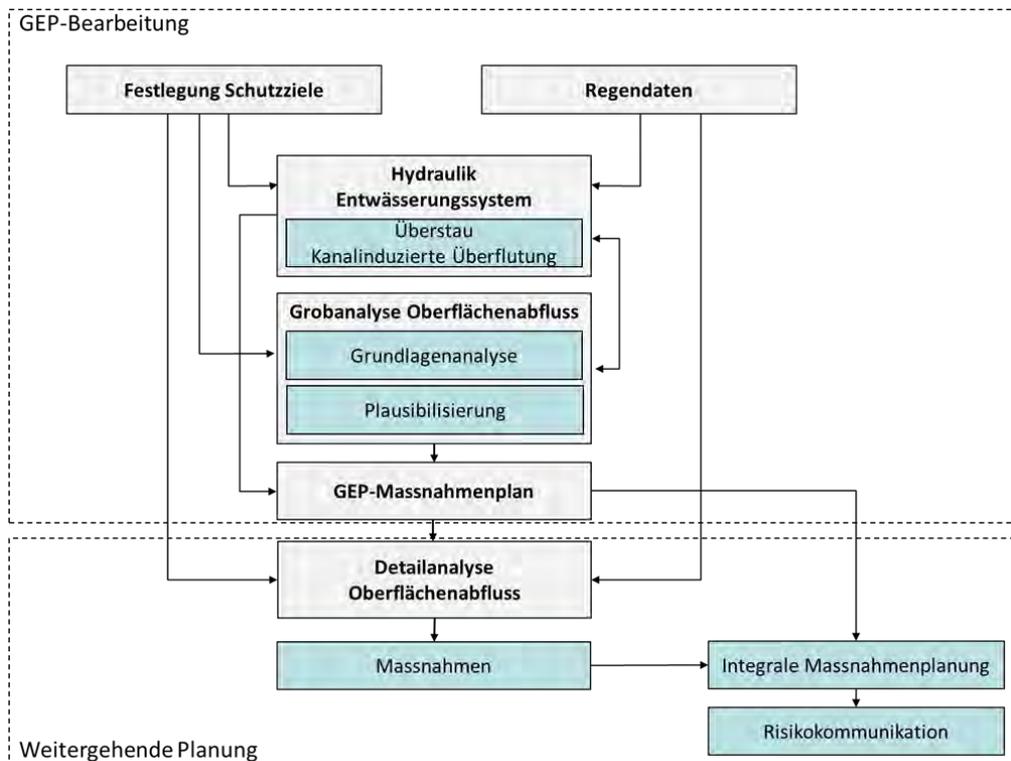


Abbildung 2: Vorgehen zur hydraulischen Überprüfung von Entwässerungssystemen und zum Umgang mit Oberflächenabfluss

Die Grundlage der gesamtheitlichen Beurteilung des Entwässerungssystems inkl. Berücksichtigung des Oberflächenabflusses bildet die **Festlegung der differenzierten Schutzziele**. Diese erfolgt übergeordnet für das Entwässerungssystem und den Oberflächenabfluss.

Die **hydraulische Überprüfung des Entwässerungssystems** wird anhand der festgelegten Schutzziele und mit geeigneten Regendaten durchgeführt. Der neue Ansatz setzt eine Langzeitsimulation mit einer Regenserie oder einem repräsentativen Regenereigniskatalog voraus.

Im Rahmen einer **Grobanalyse Oberflächenabfluss** werden alle relevanten und vorhandenen Grundlagen bezüglich des Oberflächenabflusses zusammengetragen. Der Fokus liegt dabei auf der Identifikation und Definition von Wet-Spots (Orte, welche durch kanalinduzierte Überflutung oder Oberflächenabfluss betroffen bzw. gefährdet sind). Im Rahmen einer Feldbegehung werden die Wet-Spots identifiziert und eine Gebietsauswahl für nachfolgende Untersuchungen getroffen.

In der **Detailanalyse Oberflächenabfluss** erfolgt eine genauere Untersuchung des Oberflächenabflusses in den ausgewählten Wet-Spots. In der Begleitdokumentation zur Empfehlung sind Hinweise zu Methoden für die Modellierung des Oberflächenabflusses oder die gekoppelte Modellierung Oberfläche - Kanalnetz enthalten. Zudem wird eine Methodik vorgeschlagen, mit der der Oberflächenabfluss für kleine, natürliche Einzugsgebiete ($< 1 \text{ km}^2$) abgeschätzt werden kann.

5 Regendaten

In der Empfehlung wird die Methodik zur Bereitstellung der geeigneten Regendaten für die Validierung / Kalibrierung von Kanalnetzmodellen, die Überprüfung von Entwässerungssystemen, die Vordimensionierung von Kanalisationen und für die Modellierung von Oberflächenabfluss beschrieben, vgl. nachfolgende Tabelle.

Tabelle 1: Empfehlung für die Verwendung von Regendaten für unterschiedliche Anwendungen und daraus resultierende Ergebnisse.

	Grundlage	Ergebnisse
Validierung / Kalibrierung von Kanalnetzmodellen	Einzelereignisse von lokalen Messstationen	Durchfluss und Wasserstand für jedes Regenereignis
Überprüfung von Entwässerungssystemen: Hydrodynamische Modelle	(Regenserie) / Regenereigniskatalog	Durchfluss und Wasserstand für jedes Regenereignis (Maximalwerte, Ganglinien)
Oberflächenabflussmodellierung	Modellregen basieren auf Extremwertanalysen	Abflussmengen, Fliesstiefen und -geschwindigkeiten
Vordimensionierung von Kanälen bei Neubau	Dimensionierungsdurchfluss = Durchfluss mit Jährlichkeit z	Durchfluss (Maximalwert)

Für die Überprüfung der Entwässerungssysteme wird anstelle eines Modellregens ein Regenereigniskatalog verwendet, welcher eine Regenserie mit einer Länge von 20 – 40 Jahren repräsentiert. Liegen keine Messdaten ausreichender Qualität und Aufzeichnungsdauer einer lokalen Niederschlagsmessstation vor, wird ein pragmatisches Vorgehen für die Auswahl von Messstationen mit möglichst ähnlicher Regencharakteristik beschrieben. Die Auswahl beruht auf dem Vergleich der Wiederkehrwertdiagramme des 60-minütigen Regens von Messstationen mit ausreichender Datenqualität mit den Werten aus dem Hydrologischen Atlas der Schweiz oder den Daten einer lokalen Messstation.

6 Schutzziele

Die Schutzziele basieren auf einer Einteilung der Schutzgüter anhand ihres Schadenpotenzials. Das Schutzziel wird für die verschiedenen Überprüfungen (hydraulische Überprüfung des Entwässerungssystems, Dimensionierung von Kanalisationen, Umgang mit Oberflächenabfluss) pro Schutzgutklasse festgelegt. Dabei können die Schutzziele für Neubauten und bestehende Bauten unterschiedlich gewählt werden. Die Festlegung der Schutzziele erfolgt im interdisziplinären Team bestehend aus GEP-Ingenieur/GEP-Ingenieurin, Betreibenden, Werkeigentümern und Werkeigentümerinnen, Gemeinde, den zuständigen kantonalen Fachstellen und evtl. regionalen Führungsstäben.

Die Einteilung der Schutzgüter in vier Schutzgutklassen sorgt für eine transparente Priorisierung der zu treffenden Massnahmen. Zusätzlich wird eine qualitative Kosten-/Nutzen-Abwägung, basierend auf Klassen und nicht auf Einzelobjekten, ermöglicht. Es werden die Schutzgutklassen gemäss Tabellen 2 und 3 vorgeschlagen.

7 Hydraulische Überprüfung von Entwässerungssystemen

Basis für die hydraulische Überprüfung von Entwässerungssystemen bildet die **hydrodynamische Kanalnetzsimulation** (=Stand der Technik). Die Überprüfung ermöglicht, die Defizite im Kanalnetz hinsichtlich der Schutzziele zu bestimmen und Massnahmen festzulegen, welche z.B. in den GEP Massnahmenplan einfliessen. Der Planungsablauf für die Überprüfung von bestehenden Systemen wie auch die Dimensionierung von Massnahmen in Entwässerungssystemen ist im Ablaufschema in der Abbildung 3 dargestellt.

Für verlässliche Planungen müssen Berechnungsmodelle von Kanalisationsnetzen mit Beobachtungen bzw. mit Messungen am realen System validiert werden. Dabei ist wichtig festzulegen, für welchen Anwendungsfall das zu validierende Modell eingesetzt wird. Ziel der Validierung ist es, das Vertrauen in die Resultate des Berechnungsmodelles zu stärken, damit dieses über einen längeren Planungszeitraum als sinnvolles Planungsinstrument eingesetzt werden kann. Zur Beurteilung, ob eine Validierung des Berechnungsmodelles mittels einer Messkampagne erforderlich ist, werden in der Empfehlung folgende Richtgrössen vorgeschlagen, die im Einzelfall mit der Auftraggeberschaft zu diskutieren sind:

- Wiederbeschaffungswert des Kanalisationsnetzes grösser als CHF 80 bis 100 Mio. Dies entspricht typischerweise Gemeinden mit 7'000-10'000 Einwohnern und Einwohnerinnen [AfU Kanton SO (2021)].
- Geringe Kosten der Messkampagne im Verhältnis zu den gesamten Planungskosten für den Aufbau und Betrieb des Modells und die Auswertung der Berechnungsergebnisse, d.h. günstiges Kosten- / Nutzenverhältnis der Validierung.

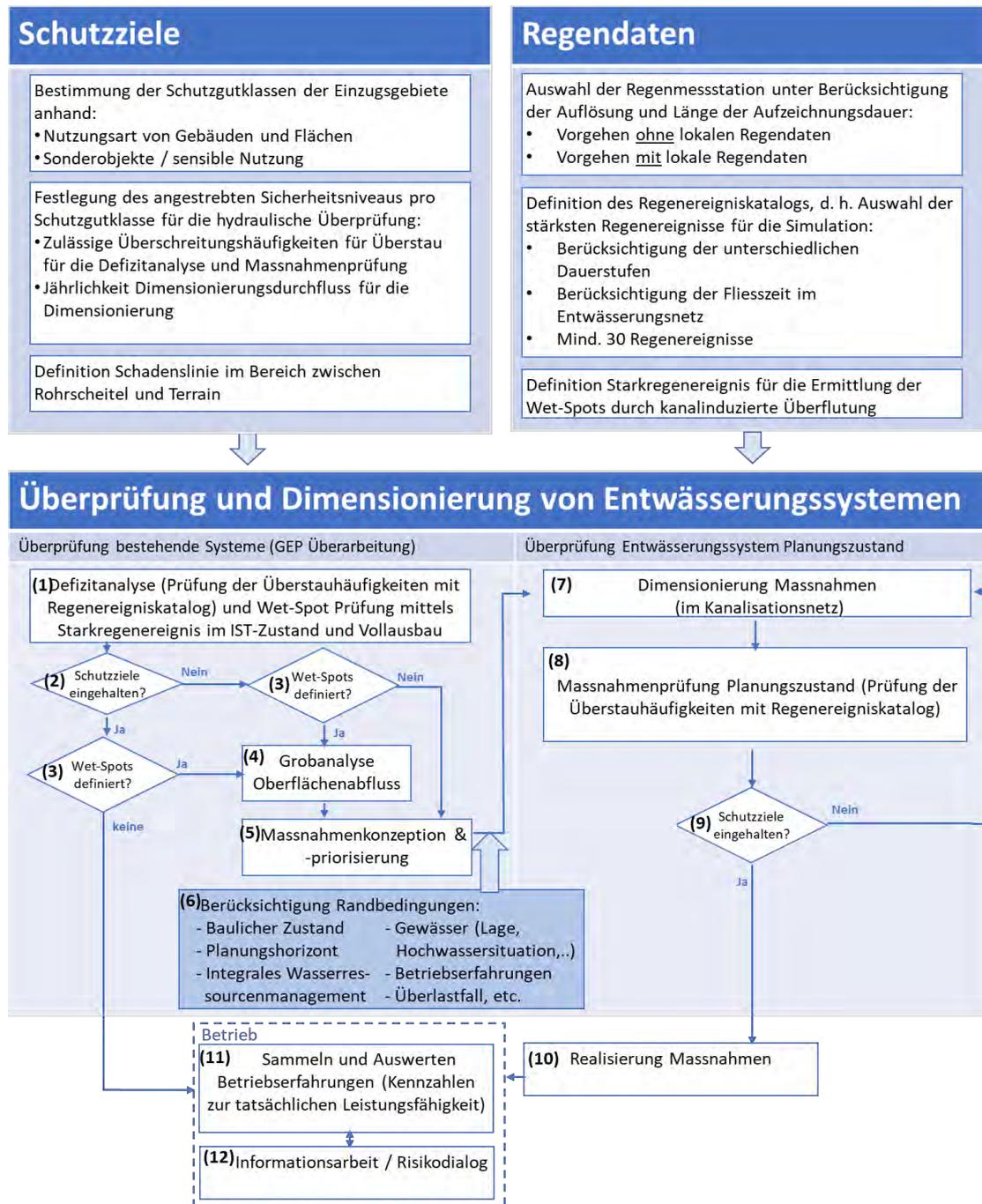


Abbildung 3: Vorgehen zur hydraulischen Überprüfung von Entwässerungssystemen

Die **Festlegung des angestrebten Schutzniveaus** und die **Bereitstellung der Regendaten** sind erforderliche Grundlagen für die Überprüfung von Entwässerungssystemen. Diese Grundlagen sind deswegen zu Beginn der Bearbeitung im interdisziplinären Team festzulegen.

Die **Schadenslinie** wird als rechnerische Prüfgrösse für den Überstau (vgl. Abbildung 1) verwendet. Sie wird für jede GEP-Überarbeitung im Bereich zwischen Rohrscheitel und Terrain bestimmt. Die Festlegung der zulässigen Häufigkeit von Überstau in Schächten (Wasserstand höher als die Schadenslinie) erfolgt zu Beginn der Bearbeitung einer Generellen Entwässerungsplanung. Dafür wird vorgängig je-

dem Schacht / jeder Haltung eine Schutzgutklasse entsprechend der Schutzgutklasse der angeschlossenen Einzugsgebiete zugewiesen. Dabei ist bei mehreren angeschlossenen Einzugsgebieten mit unterschiedlichen Schutzgutklasse das Einzugsgebiet mit der höchsten Klasse massgebend. In der Tabelle 2 ist eine empfohlene Bandbreite für die rechnerisch maximal zulässige Häufigkeit für Überstau in Abhängigkeit der Schutzgutklasse angegeben.

Tabelle 2: Empfohlene Bandbreite der zulässigen Überschreitungshäufigkeiten. Wet-Spots sind u.a. Schächte mit potenziellem Wasseraustritt, die im Rahmen der Grobanalyse im Feld verifiziert werden müssen.

Schutzgutklasse		Überstau	Kanalinduzierte Überflutung
		Häufigkeit [einmal in z Jahren]	
Klasse 1	Freiflächen, Verkehrswege	2-3	Berechnung mit Starkregenereignis zur Definition von Wet-Spots
Klasse 2	Wohngebiete / Kleingewerbe ohne zu Wohn- oder Gewerbebezwecken genutzten Untergeschossen	3-10	
Klasse 3	Stadtzentren, Industrie und Gewerbegebiete, Wohngebiete mit zu Wohn- oder Gewerbebezwecken genutzten Untergeschossen	5-10	
Klasse 4	Sonderobjekte / kritische Infrastruktur / sensible Nutzungen	10-20	

Können nach der Massnahmenprüfung die Schutzziele nicht eingehalten werden und kann nach durchgeführter Risikobetrachtung das verbleibende Restrisiko in Rücksprache mit der Gemeinde und der zuständigen kantonalen Fachstelle getragen werden, ist eine Anpassung der Schutzziele möglich.

Die Dimensionierung von Massnahmen im Kanalisationsnetz erfolgt anhand eines aus der Langzeitsimulation mittels Regenereigniskatalog empirisch berechneten **Dimensionierungsdurchflusses**. Dieser ist abhängig von der definierten Überschreitungshäufigkeit einer Schutzgutklasse. Dabei soll die Kanalisation beim Dimensionierungsdurchfluss in der Regel nicht unter Druck und ohne Rückstau funktionieren [SIA 190 (2017)].

8 Umgang mit Oberflächenabfluss

8.1 Grobanalyse

Die Grobanalyse stellt den Teil der GEP-Bearbeitung dar, der sich mit der Gefährdung durch Oberflächenabfluss befasst. Sie kann aber auch unabhängig vom GEP durchgeführt werden. Unter dem Begriff Oberflächenabfluss werden auch kanalinduzierte Überflutungen verstanden, welche durch die hydrodynamische Kanalnetzsimulation im Rahmen der hydraulischen Überprüfung von Entwässerungssystemen identifiziert werden. Ziel der Grobanalyse ist es, schutzbedürftige Gebiete zu identifizieren und Massnahmen insbesondere im GEP-Massnahmenplan vorzuschlagen.

Für die Grobanalyse wird insbesondere die Verwendung der Gefährdungskarte Oberflächenabfluss des BAFU sowie auch weiterer vorhandener Datengrundlagen (bspw. Ereigniskataster, Naturgefahrenkarte) empfohlen. Anhand der Angaben aus der Gefährdungskarte Oberflächenabfluss bezüglich Fliesstiefe kann die potenzielle Betroffenheit von Schutzgütern festgestellt werden und es können Orte iden-

tifiziert werden, welche tatsächlich oder potenziell von kanalinduzierter Überflutung oder Oberflächenabfluss betroffen sind (Wet-Spots). Die identifizierten Wet-Spots sind vor Ort zu plausibilisieren und bei Bedarf im Rahmen einer Detailanalyse weiter zu untersuchen.

8.2 Detailanalyse

Die Detailanalyse Oberflächenabfluss erfolgt im Anschluss an die GEP-Bearbeitung basierend auf den im GEP-Massnahmenplan definierten Massnahmen und Lösungsansätzen. Ziel der Detailanalyse ist es, die im Rahmen der Grobanalyse festgelegten Schutzziele zu überprüfen und anhand einer qualitativen Risikobewertung weitergehende Massnahmen zu priorisieren.

Analog zur Beurteilung von Naturgefahren werden für die Untersuchung des Oberflächenabflusses drei Regenereignisse mit einer Eintrittshäufigkeit von einmal in 30, 100 und 300 Jahren (häufig, mittel, selten) herangezogen. Diese werden aus der Extremwertstatistik einer geeigneten Niederschlagsmessstation ermittelt. In der Empfehlung werden dazu ebenfalls konkrete Vorgaben für die Wahl und den Einsatz von Regendaten gegeben.

Die Wahl und der Detaillierungsgrad der Methode zur Untersuchung der Auswirkungen von Oberflächenabfluss orientiert sich an der Zielsetzung der Massnahmen und dem im GEP definierten Lösungsvorschlag.

Im Rahmen dieser Empfehlung wird eine Detailanalyse mittels 2D-Simulation empfohlen. Die Berücksichtigung des Siedlungsentwässerungssystems kann dabei entweder über eine gekoppelte Modellierung Kanal-Oberfläche, eine Senke bzw. einen definierten Abfluss oder eine absolute beziehungsweise prozentuale Reduktion des effektiven Regens erfolgen. Die zu Beginn definierten Schutzgutklassen werden mit den Ergebnissen aus der Simulation verglichen. Um Defizite abzuleiten, wird die Beziehung zwischen Schutzgutklasse und Eintretenswahrscheinlichkeit der jeweiligen Intensitätsklasse vorgegeben, vgl. folgende Tabelle.

Tabelle 3: Eintretenshäufigkeiten von Oberflächenabfluss inkl. kanalinduzierter Überflutung in Abhängigkeit der Schutzgutklassen und Intensitätsklassen, ergänzt aus [DWA M 119 (2016)] und in Anlehnung an Schutzzielmatrix Empfehlung Raumplanung und Naturgefahren, [ARE (2005)]. Die Einteilung der Intensitäten bezieht sich analog der Beurteilung von Naturgefahren auf die Fliesstiefe und das Produkt von Fliessgeschwindigkeit x Fliesstiefe der Überflutung.

Schutzgutklasse		Schadenspotenzial	Häufigkeit (einmal je z Jahre)		
			Schwache Intensität	Mittlere Intensität	Starke Intensität
Klasse 1	Kleingärten	Gering	zulässig	>30	>100
	Parks, Grünflächen				
	Verkehrswege				
Klasse 2	Wohngebäude ohne für Wohn- oder Gewerbezwecken genutztes Untergeschoss	Mässig	>30	>100	>300
	Einstellhallen (<500 m ²)				
	Einzelhandel, Kleingewerbe				
Klasse 3	Wohnbebauung mit für Wohn- oder Gewerbezwecke genutztes Untergeschoss	Hoch	>100	>300	Nicht zulässig
	Industrie, Gewerbe				

	Einstellhallen (>500 m ²)				
	Schule, Hochschule, Tages- schule				
Klasse 4	Sonderobjekte	Sehr hoch	Fallweise festlegen		

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt als Wassertiefenkarte je Jährlichkeit oder als Intensitätskarte. Unter Berücksichtigung des Schadenpotenzials bzw. der definierten Schutzgutklassen und der Intensität bzw. der Betroffenheit erfolgt die qualitative Risikobewertung. Diese bildet die Grundlage für den Entscheid, wo Massnahmen notwendig sind.

9 Schlussfolgerungen

Mit der neuen Empfehlung wird in der Schweiz ein risikobasierter Ansatz für die hydraulische Überprüfung von Entwässerungssystemen gemäss EN 752 eingeführt. Zudem wird die Grundlage für eine gesamtheitliche Betrachtung des Kanalnetztes und der Oberflächenabflussproblematik im Rahmen der Generellen Entwässerungsplanung geschaffen. Der Ansatz basiert auf der Verwendung von historischen Regendaten. Sobald für die Schweiz geeignete Werkzeuge für die Generierung von synthetischen Regendaten zur Verfügung stehen, besteht die Möglichkeit mit dem gleichen Ansatz zukünftige Regendaten zu verwenden, welche beispielsweise den zu erwartenden Klimawandel berücksichtigen.

10 Referenzen

- Amt für Umwelt des Kanton Solothurn (2021). Wiederbeschaffungswerte der Abwasserentsorgung. Erhebung per 31.12.201, Stand vom 16.12.2021.
- Bundesamt für Raumentwicklung, Bundesamt für Wasser und Geologie, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (2005). Empfehlung Raumplanung und Naturgefahren, Bern.
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2016). Merkblatt M119: Risikomanagement in der kommunalen Überflutungsvorsorge für Entwässerungssysteme bei Starkregen. DWA-Regelwerk, Hennef.
- Europäisches Komitee für Normung CEN (2017). Europäische Norm EN 752 Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden – Kanalmanagement. Technisches Komitee CEN/TC, Brüssel.
- Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute (2017). SN 533 190 Kanalisationen, SIA, Zürich.
- Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute (1997). Regendaten für die Siedlungsentwässerung. Richtlinie. VSA-Kommission «Regendaten für die Siedlungsentwässerung», Glattbrugg.

Korrespondenz:

Markus Gresch
 Pflanzschulstrasse 17, CH-8400 Winterthur
 markus.gresch@hunziker-betatech.ch

Einfluss von Untergrundstrukturen in der 1D/2D Überflutungsmodellierung von urbanen Einzugsgebieten mit Hanglage

M. Hauser^{1,2}, S. Reinstaller², M. Oberascher¹, D. Muschalla² & M. Kleidorfer¹

1 Universität Innsbruck, Arbeitsbereich Umwelttechnik, Technikerstraße 13, 6020 Innsbruck, AT

2 Technische Universität Graz, Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau, Stremayrgasse 10/1, 8010 Graz, AT

Kurzfassung: Anhand eines existierenden 1D/2D Modells wird der Einfluss von Untergrundstrukturen auf die Ergebnisse der Überflutungsmodellierung untersucht. Dazu wurden Keller und Garagen über 1D Elemente integriert und die Öffnungen an Kontrollbedingungen geknüpft. Die Berechnung erfolgte für drei reale Starkregenereignisse und unterscheidet drei Szenarien. Zusätzlich wurden eine Sensitivitätsanalysen der Kontrollparameter und der Anzahl und Lage der Untergrundstrukturen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen nur geringe Auswirkungen auf die Überflutungsfläche (Reduktion unter drei Prozent).

Key-Words: 1D/2D Modellierung, urbane Überflutung, Untergrundstrukturen, Kellerüberflutung, Sensitivität

1 Einleitung

Extremniederschläge konnten in den vergangenen Jahren vermehrt verzeichnet werden (vergl. Innsbruck 2016 (Kleidorfer et al., 2018), Berlin 2017 (Davies, 2017), Graz 2018 (Kleidorfer & Muschalla, 2021), Kufstein 2021 (Davies, 2021)). Durch die Zunahme von Extremereignissen kommt der urbanen Überflutungsmodellierung eine immer bedeutendere Rolle zu. Vielfach kommen für die Einschätzung der überflutungsgefährdeten Gebiete hydrodynamische 1D/2D Modelle zur Anwendung (Henonin et al., 2013). Gebäude werden in solchen Modellen zumeist als umströmte Hindernisse, lokal erhöhte Rauigkeiten oder lokale Höhenunterschiede berücksichtigt (Bellos, 2012). In der Realität hingegen sind Gebäude mit Öffnungen wie Fenstern oder Türen versehen, die unter bestimmten Umständen den Wassereintritt ins Gebäude ermöglichen. Besonders tiefer liegenden Strukturen wie Kellern und Tiefgaragen wird ein höheres Gefährdungspotential zugeschrieben (DWA (ed.), 2016). Im Zuge dieser Arbeit wird ein bestehendes 1D/2D Modell durch verschiedenste Untergrundstrukturen wie Tiefgaragen, Kellerfenster und Türen durch 1D Elemente erweitert, um so den Einfluss auf die Überflutungssituation zu untersuchen.

2 Methodik

2.1 Untersuchungsgebiet

Für die Integration der Untergrundstrukturen wurde auf ein bestehendes 1D/2D Modell zurückgegriffen (Reinstaller et al., 2021, 2022). Die von Computational Hydraulics International (CHI) entwickelte Software PCSWMM2D zur Regenwasserbewirtschaftung, Abwassermodellierung und hydrologische Modelle (Abdelrahman et al., 2018) aufbauend auf SWMM (Rossman, 2015), ermöglicht die Erstellung und Adaptierung solcher Modelle in dieser Hinsicht. Das Untersuchungsgebiet liegt im Osten von Graz und verfügt sowohl über gemischt besiedelte Flächen mit Kanalsystem, Hanglagen als auch ein urbanes Fließgewässer mit dem Namen Annabach (Abbildung 1). Das gesamte Gebiet umfasst eine Fläche von 132 ha und die durchschnittliche Neigung der Hanglagen beträgt rund 20 Prozent. Die Punkte A und B kennzeichnen zwei kritische Punkte, welche aus dokumentierten Schadensereignissen abgeleitet werden konnten. Diese werden im Zuge der Auswertung detailliert betrachtet.

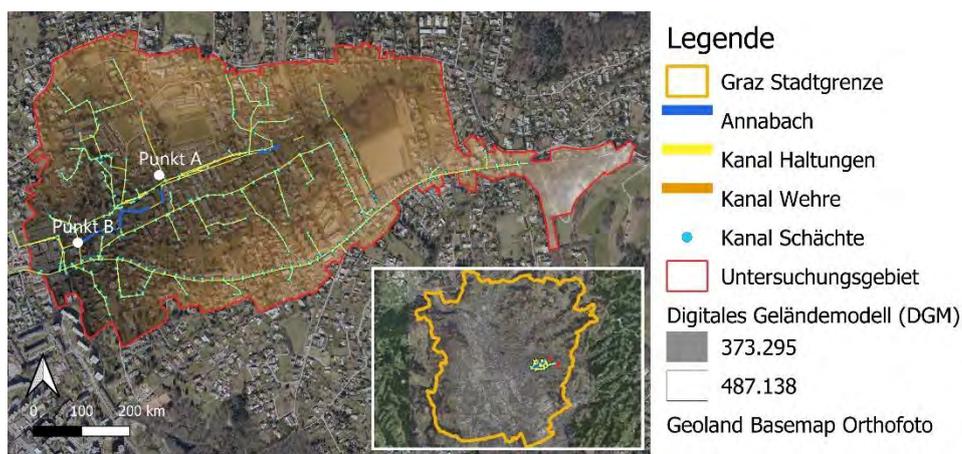


Abbildung 44: Übersichtskarte des Untersuchungsgebiets in Graz mit Kanalsystem (gelb), Annabach (blau) und dem hinterlegten digitalen Geländemodell

2.2 Daten

Im besagten Siedlungsgebiet kam es bereits mehrfach zu extremen Starkregenereignissen, welche auch zu Überflutungen und Schäden führten. Die Untersuchungen werden daher anhand von drei realen Starkregenereignissen der letzten Jahre durchgeführt:

- 30. Juli 2021 (Niederschlagssumme: 104,9mm, Intensität: ca. 23,31 mm/h)
- 13. August 2020 (Niederschlagssumme: 45.3mm, Intensität: ca. 10,97 mm/h)
- 04. August 2020 (Niederschlagssumme: 50.7mm, Intensität: ca. 74,56 mm/h)

Alle drei Ereignisse wiesen bei einer Dauerstufe von 20 Minuten Wiederkehrperioden von knapp unter (13. August 2020) oder mehr als 100 Jahren auf.

2.3 Modellansatz

Um die Untergrundstrukturen in das bestehende Modell zu integrieren, wurden 1D Speicher- und Leitungselemente verwendet. Die Lage der Untergrundstrukturen wurde mit Hilfe von Google Earth, einer Ortsbegehung und Informationen der Stadt Graz (Bau- und Anlagenbehörde) festgelegt. Aufgrund fehlender oder unzureichender Datengrundlage mussten einige Annahmen getroffen werden. Beispielsweise wurde die Grundfläche der Keller und Tiefgaragen mit der Fläche des darüberliegenden Gebäudes gleichgesetzt. Zusätzlich wurden verschiedene Arten von Fenstern und Türen festgelegt. Nachdem solche Öffnungen während eines Regenereignisses im Normalfall geschlossen, teilgeöffnet oder gekippt sind und teils erst durch undichte Stellen einen Wassereintritt ermöglichen, wurden Kontrollbedingungen festgelegt. Diese Bedingungen, basierend auf den Angaben der Kommunal Agentur Nordrhein-Westfalen (2016) und legen fest, ab wann sich eine Öffnung wie weit öffnet. Definiert wurden zwei Bedingungen, die bei Erfüllung zu 20% Querschnittsöffnung führen:

- Wassertiefe an der Tür/Fenster > 5cm (mit Berücksichtigung des Versatzes zur Oberfläche)
- Geschwindigkeit in den zufließenden 2D Netzleitungen > 0,2m/s

Durch die Einführung dieser Kontrollbedingungen ergeben sich drei unterschiedliche Szenarien:

- Szenario A: Referenz Szenario (ohne Untergrundstrukturen)
- Szenario B: alle Öffnungen sind permanent und 100% geöffnet
- Szenario C: alle Öffnungen sind zu Beginn geschlossen und werden über die Kontrollbedingungen 20% geöffnet

Zusätzlich wurde eine Sensitivitätsanalyse zur Bestimmung des Einflusses der Lage und Anzahl der Untergrundstrukturen durchgeführt. Dazu wurde die Anzahl der Gebäude durch einen Prozentsatz (0%-100%, in 10% Schritten) der Gesamtgebäude festgelegt und die Lage für jede Anzahl zufällig festgelegt. Diese zufällige Anordnung erfolgte für jede Anzahl jeweils 50-ig mal. Weiters wurde auch der Einfluss der gewählten Parameter in den Kontrollbedingungen manuell getestet, indem die Grenzwerte der Wassertiefe, der Geschwindigkeit und der Öffnungsgrad variiert wurden. Beide Sensitivitätsuntersuchungen wurden ausschließlich für das Ereignis am 30. Juli 2021 durchgeführt.

3 Ergebnisse

Die Ergebnisse wurden anhand verschiedener Bewertungskriterien ausgewertet. Das gespeicherte Volumen in den Untergrundstrukturen zeigt für alle drei Ereignisse in beiden Szenarien (B und C) nur geringe Volumina im Vergleich zum Gesamtniederschlagsvolumen (zwischen 1,3 und 2,3 Prozent). Die Anzahl der betroffenen Strukturen lässt für alle drei Ereignisse erkennen, dass im Szenario C weniger Keller und Tiefgaragen betroffen sind (Tabelle 1).

Tabelle 13: Anzahl der betroffenen Strukturen für alle drei Ereignisse jeweils für die Szenarien B und C.

Ereignis	Szenario B	Szenario C
30. Juli 2021	56 von 211	48 von 211
13. August 2020	43 von 211	36 von 211
04. August 2020	27 von 211	23 von 211

Der Prozentsatz an überfluteter Fläche in Bezug auf die Gesamtfläche stellt eine weitere Bewertungsgröße dar. Dabei lässt sich erkennen, dass der Unterschied zwischen dem Szenario A/B und dem Szenario A für alle drei Ereignisse geringer als drei Prozent ausfällt und sich die Werte im Fall vom 04. August 2020 sogar um weniger als ein Prozent unterscheiden (Tabelle 2).

Tabelle 14: Prozentsatz an überfluteter Fläche in Bezug zur Gesamtfläche jeweils für alle drei Szenarien

Ereignis	Szenario A	Szenario B	Szenario C
30. Juli 2021	36,11%	33,24%	33,80%
13. August 2020	28,40%	26,81%	27,16%
04. August 2020	16,38%	15,52%	15,68%

Weiters werden beispielhaft zwei Punkte im Detail dargestellt (Lage in Abbildung 1 eingezeichnet):

- PUNKT A: Speichervolumen und Zufluss eines Kellers
- PUNKT B: Abfluss an einer ausgewählten Stelle im Annabach

Die Auswertungen zeigen ein erhöhtes Speichervolumina und einen erhöhten Zufluss zum Keller (Punkt A) für das Szenario B gegenüber dem Szenario C. Weiters verzeichnet der Annabach (Punkt B) mit 1808,10 l/s den höchsten Abfluss im Szenario A (Abbildung 2). Im Szenario C liegt der Spitzenwert bei 1549,66 l/s und im Szenario B bei 1481,74 l/s.

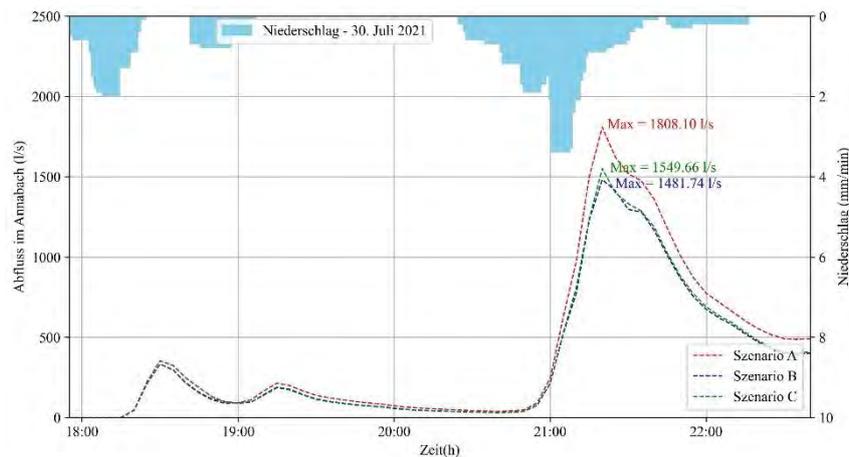


Abbildung 45: Abfluss (l/s) am kritischen Punkt B (Annabach) für das Ereignis am 30. Juli 2021 – jeweils für das Szenario A (rot), das Szenario B (blau) und das Szenario C (grün).

Die manuelle Analyse der Parameter in den Kontrollbedingungen ergab keine Unterschiede in der Anzahl der betroffenen Strukturen für die Variation des Öffnungsgrades. Die Veränderung der Grenzwerte (Wassertiefe und Geschwindigkeit) hingegen ließ bereits bei kleinen Abweichungen eine deutlich erhöhte oder verringerte Anzahl an betroffene Strukturen erkennen. Bei Wassertiefen zwischen 2 und 10 cm variiert die Anzahl an gefährdeten Strukturen zwischen 54 und 39 und bei Geschwindigkeiten zwischen 0,05 und 0,5 m/s ergeben sich 49 bis 13 gefährdete Strukturen. Erste Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der Lage und Anzahl der Untergrundstrukturen zeigen einen deutlichen Anstieg der betroffenen Gebäude (bei 10%: ca. 10 und bei 90%: ca. 69), je mehr Strukturen integriert werden, wobei die Streuungen zwischen den unterschiedlichen Szenarien je Anzahl relativ gering sind.

4 Diskussion und Schlussfolgerungen

Die vorliegenden Untersuchungen haben gezeigt, dass sich Untergrundstrukturen in der beschriebenen Art über 1D-Elemente in ein Modell integrieren lassen. In den Simulationen werden die Untergrundstrukturen geflutet, wobei die gespeicherten Überflutungsvolumen innerhalb der Strukturen allerdings gering ausfallen. Jedoch sind im Szenario C weniger Gebäude gefährdet als im Szenario B. Dieser Umstand kann anhand der Kontrollbedingungen erklärt werden. Aufgrund der geringen Überflutungsvolumina innerhalb der Strukturen finden sich auch nur marginale Unterschiede bei der Betrachtung der je nach Szenario unterschiedlichen Überflutungsflächen an der Oberfläche. Dabei befindet sich im Szenario C tendenziell weniger Wasser in den Strukturen und damit mehr Wasser an der Oberfläche. Die Analyse der kritischen Punkte hat ergeben, dass der Abfluss im Annabach und dementsprechend an der Oberfläche abnimmt, je höher das gespeicherte Volumen in den Untergrundstrukturen ist. Die Variation des Öffnungsgrades in den Kontrollbedingungen verzeichnet keine Auswirkungen auf die Anzahl der betroffenen Strukturen. Es lässt sich daraus schließen, dass die Größe der Öffnung bei den Abflusszuständen vom Ereignis am 30. Juli 2021 keinen Einfluss hat. Jedoch verhalten sich die Grenzwerte der Wassertiefe und Geschwindigkeit äußerst sensibel, was bedeutet, dass die Annahme und Interpretation dieser Grenzwerte eine große Sorgfalt erfordern. Die Sensitivitätsanalyse verdeutlicht den hohen Einfluss der Anzahl an Untergrundstrukturen und die dazu verhältnismäßig geringeren Auswirkungen der Lage. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Einfluss von Untergrundstrukturen im betrachteten Untersuchungsgebiet nur zu geringfügigen Änderungen im Überflutungsgeschehen führt. Die lückenhafte Datengrundlage erzwingt in vielen Bereichen Annahmen, welche die Ergebnisse teils wenig und teils stark beeinflussen können. Die Integration solcher Untergrundstrukturen kann aber speziell im Hinblick auf weiterführende Schadensanalysen hilfreiche

Informationen liefern, da der Wasserstand im Keller oder in der Tiefgarage auch Rückschlüsse auf den Schaden zulässt.

5 Danksagung

Die Autoren danken Computational Hydraulics International (CHI), Kanada, für die Bereitstellung eines Universitätsstipendiums zur Nutzung von PCSWMM für das aktuelle Projekt, sowie der Stadt Graz für die zur Verfügung gestellten Informationen über Keller und Tiefgaragen.

6 Literatur

Abdelrahman, Y. T., Moustafa, A. M. E. & Elfawy, M. (2018). Simulating Flood Urban Drainage Networks through 1D/2D Model Analysis. *Journal of Water Management Modeling*. Computational Hydraulics Int. (CHI). doi:10.14796/JWMM.C454

Bellos, V. (2012). Bellos: Ways for flood hazard mapping in urbanised: a short literature review. *E.W. Publications, Water Utility Journal 4*, 25–31.

Davies, R. (2017). Germany – Berlin Streets Under Water After 150mm of Rain in 24 Hours – FloodList. Zugriff am 20.9.2022. Verfügbar unter: <https://floodlist.com/europe/germany-berlin-flood-june-2017>

Davies, R. (2021). Austria and Germany – More Deadly Flash Floods After Heavy Rain – FloodList. Zugriff am 20.9.2022. Verfügbar unter: <https://floodlist.com/europe/austria-germany-bavaria-floods-july-2021>

DWA (ed.). (2016). *DWA-M 119 - Risikomanagement (11/2016)* (Merkblatt DWA-M 119 - Risikomanagement in der kommunalen Überflutungsvorsorge für Entwässerungssysteme bei Starkregen). Zugriff am 26.8.2021. Verfügbar unter: <https://webshop.dwa.de/de/dwa-m-119-risikomanagement-11-2016.html>

Henonin, J., Russo, B., Mark, O. & Gourbesville, P. (2013). Real-time urban flood forecasting and modelling – a state of the art. *Journal of Hydroinformatics*, 15 (3), 717–736. doi:10.2166/hydro.2013.132

Kleidorfer, M. & Muschalla, D. (2021, Juni). Österreichische Wasserwirtschaftstagung 2021 - Die Resilienz der Siedlungsentwässerung von Starkregenereignissen bis zu Sturzfluten. Zugriff am 10.5.2022. Verfügbar unter: <https://www.oewav.at/Page.aspx?target=424395>

Kleidorfer, M., Tscheikner-Gratl, F., Vonach, T. & Rauch, W. (2018). What can we learn from a 500-year event? Experiences from urban drainage in Austria. *Water Science and Technology*, 77 (8), 2146–2154. doi:10.2166/wst.2018.138

Kommunal Agentur Nordrhein-Westfalen. (2016). Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg. Zugriff am 21.1.2022. Verfügbar unter: <https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/47871>

Reinstaller, S., Krebs, G., Pichler, M. & Muschalla, D. (2022). Identification of High-Impact Uncertainty Sources for Urban Flood Models in Hillside Peri-Urban Catchments. *Water*, 14 (12), 1973. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. doi:10.3390/w14121973

Reinstaller, S., Maier, R., Jöbstl, C., Hornich, R. & Muschalla, D. (2021). Leitfaden Modellbasierte urbane Überflutungsvorsorge (Projekt RAINMAN). *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 73 (3–4), 92–101. doi:10.1007/s00506-021-00746-4

Rossman, L. A. (2015). Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1, 353.

Korrespondenz:

DI Martina Hauser
Arbeitsbereich Umwelttechnik, Technikerstraße 13, 6020 Innsbruck, Austria
+43 512 507 62103
martina.hauser@uibk.ac.at

Verbesserungen und Validierung eines stochastischen Niederschlagsgenerators für städtische hydrologische Anwendungen in der Schweiz

Taiqi Lian¹, Jörg Rieckermann¹ and Lauren Cook¹

¹ Eawag, Ueberlandstrasse 133, 8600 Dübendorf, Schweiz

Kurzfassung: Zeitlich hoch aufgelöste Niederschlagsdaten sind für hydrologische Anwendungen wie Regen-Abfluss-Simulationsmodelle und Hochwasserrisikomanagement unerlässlich. Beobachtete Zeitreihen in Minuten-Auflösung sind jedoch oft zu kurz oder nicht verfügbar. In diesem Fall sind Poisson-Cluster-Regengeneratoren (PC) ein nützliches Instrument zur Erzeugung synthetischer Niederschläge, insbesondere weil sie die gleichen Niederschlagsstatistiken wie beobachtete Regen in einem breiten Spektrum von Zeitskalen und geografischen Standorten abbilden können. Für die praktische Anwendung müssen wir jedoch noch zwei Probleme lösen: Erstens unterschätzen die PC-Generatoren extreme Niederschlagswerte systematisch und die geschätzten Parameter sind noch sehr unsicher. Zweitens wurde die Leistung noch nicht in hydrologischen Modellierungsanwendungen untersucht und es ist unklar, wie sich diese Einschränkungen auf die Ergebnisse der Modellierung der Stadtentwässerung auswirken. In dieser Forschungsarbeit haben wir deshalb untersucht, welche Änderungen an einem bestehenden PC-Regengenerator vorgenommen werden müssen, um die Simulationsergebnisse verschiedener Modellierungsanwendungen für die Stadtentwässerung zu verbessern. Konkret haben wir fünf verschiedene Änderungen vorgenommen, von der Erhöhung des mittleren Niederschlages, über die Schiefe der statistischen Verteilung bis hin zu robusten Optimierungsalgorithmen. Diese Modifikationen wurden an 39 Stationen in der ganzen Schweiz anhand von drei Niederschlags-Abfluss Anwendungen untersucht: Mischabwasserbewirtschaftung, hydraulische Leistungsfähigkeit, und dezentrale Regenabwasserbewirtschaftung mit blau-grünen Infrastrukturen. Die Ergebnisse zeigen, dass die PC-Generatoren sowohl die Charakteristika des Niederschlags als auch der modellierten Abflüsse gut wiedergeben können (absolute Abweichungen: ca. 5-20%). Allerdings wirkt sich jede Änderung unterschiedlich auf die Leistung der Generatoren und wir konnten keinen Generator erstellen, der für alle Zielgrößen der drei Aufgabenbereiche der Stadtentwässerung am besten abschneidet. Eine wichtige Schlussfolgerung ist, dass die Validierung von synthetischen Regenreihen mit Niederschlags-Abfluss-Modellen sehr wichtig ist, um verlässliche Resultate zu bekommen. Ausserdem zeigt sich, wieder einmal, dass kein Modell die Realität perfekt abbildet und Kompromisse in der Genauigkeit gemacht werden müssen, wenn ein Generator verschiedene Anwendungen gleichermaßen abdecken soll.

[In Zukunft soll vor allem die räumliche Verknüpfung der Parameter untersucht werden, um die Übertragbarkeit der Parameter zu verbessern.]

Key-Words: Poisson-Cluster-Regengenerator, hydraulische Modelle, städtische Überschwemmungen, Überläufe der Mischwasserkanalisation, blau-grüne Infrastruktur

1 Einleitung

Hoch aufgelöste und langjährige Niederschlagsdaten über mehrere Jahrzehnte sind für verschiedene Anwendungen der Stadtentwässerung unerlässlich; allerdings sind die beobachteten Zeitreihen in der Praxis oft noch zu kurz oder nicht verfügbar, insbesondere für Zeitreihen in Minuten-Auflösung. Die SYNOPSIS Projekte (REF_Krämer_2016, REF_Bardossy_2020) haben gezeigt, dass das Dilemma mit stochastischen Niederschlagsgeneratoren gelöst werden könnte, welche anhand von kurzen Regenreihen langjährige synthetische Niederschlagsdaten erzeugen, die sehr ähnliche Eigenschaften wie die

beobachteten Regenreihen haben. Poisson-Cluster-Generatoren und insbesondere Bartlett-Lewis-Modelle (Rodriguez-Iturbe I et al., 1988) gehören zu den am häufigsten verwendeten Niederschlagsgeneratoren, da sie in der Lage sind, die Niederschlagsseigenschaften über Zeitskalen von mehreren Minuten bis zu mehreren Tagen zu reproduzieren. Allerdings gibt es auch hier zwei Defizite. Erstens sind die Parametersätze tendenziell instabil, d.h. verschiedene Kalibrierungen desselben Datensatzes können sehr unterschiedliche Parametersätze ergeben (Burton et al., 2008). Zweitens ist bekannt, dass sie extreme Niederschlagswerte systematisch unterschätzen (Cameron et al., 2000). Allerdings wurde noch nicht untersucht, ob sich die synthetischen Regenreihen dieser Niederschlagsgeneratoren für hydrologische Modellierungsanwendungen eignen, d.h. ob die bekannten Einschränkungen sich negativ auf die Ergebnisse der Modellierung der Stadtentwässerung auswirken (Gaume et al., 2007).

In dieser Arbeit untersuchen wir, inwieweit sich die beiden Defizite beheben lassen, indem ein kürzlich entwickelten Regengenerator (Kim & Onof, 2020) zielgerichtet verändert wird. Die Leistung des Generators wird mithilfe von drei Modellierungsanwendungen für die Stadtentwässerung quantifiziert, darunter (1) der Einfluss von Regenvolumen und Nass/Trocken-Perioden auf Mischwasserüberläufe, (2) die Auswirkungen von Starkregen auf Überschwemmungen, und (3) Regenwasserrückhaltung bei der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung. Wir haben die Leistung für 39 Messstationen der Meteoschweiz getestet, für die Zeitreihen mit einer Dauer von 40 Jahren in 10 minütiger Auflösung vorliegen.

2 Methoden

Unser Niederschlagsgenerator ist ein aktuelles Bartlett-Lewis Rectangular Pulse Model (BLRP-Modell), das von (Kim & Onof, 2020) entwickelt wurde und drei Module enthält, die Niederschlagsseigenschaften auf verschiedenen Zeitskalen von Minuten bis zu einem Monat reproduzieren. Das erste Modul simuliert mit fünf bis neun Parametern das Hauptverhalten von Niederschlägen, einschließlich Regenzellen (Ankunftszeit, Intensität, Dauer) und Gewitter innerhalb einer Regenzelle (Ankunftszeit, Dauer). Die übrigen Module ordnen die Gewitter neu an, um tägliche und saisonale Trends zu reproduzieren. Bei der Kalibrierung wird der Parametersatz ausgewählt, der die Diskrepanz zwischen synthetischen und beobachteten Niederschlagsseigenschaften minimiert.

In dieser Studie haben wir das originale BLRP-Modell auf verschiedene Weise modifiziert, um die Modellleistung zu verbessern. Wie in Abbildung 1 dargestellt, werden zunächst drei dem Stand der Technik entsprechende Änderungen vorgenommen: i) eine verbesserte Zielfunktion (Kim et al., 2016), ii) sinusförmige Regenzellen anstatt rechteckiger (Park et al. 2021) und iii) eine Downhill-Simplex-Methode (Vanhaute et al. 2012) anstelle der originalen Particle-Swarm-Optimierung. Zu diesem modifizierten Modell haben wir fünf weitere Verbesserungen eingeführt (Abstimmung einzelner statistischer Eigenschaften), was insgesamt sechs verschiedene Kandidaten von Generatoren ergibt (siehe Tabelle 1). Ähnlich wie im SYNOPSIS Projekt, bewerten wir die Leistung der verschiedenen Generatoren wie ähnlich die Ergebnisse sind in Bezug auf die statistischen Eigenschaften i) des Niederschlags und ii) der simulierten Abflüsse. Als Kennzahlen haben wir für die drei Anwendungen die folgenden Metriken herangezogen: jährliches Entlastungsvolumen

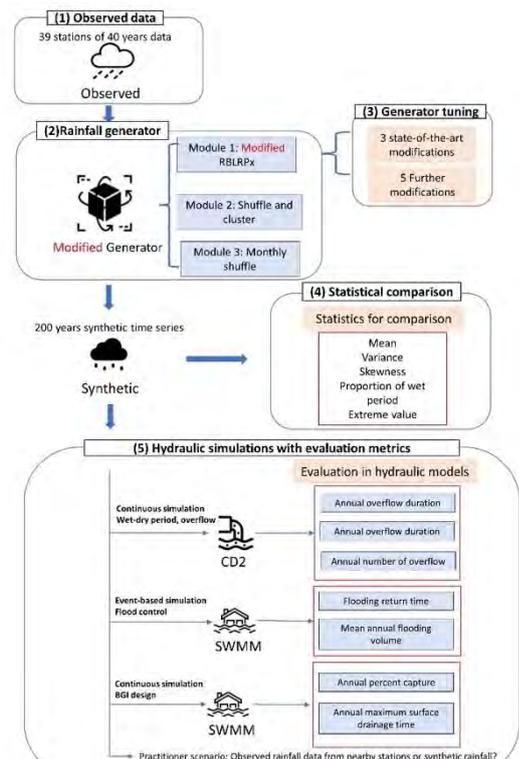


Abbildung 1 Die Studie ist in mehrere Schritte unterteilt: (1) Beobachtungsdaten, (2) Beschreibung des Niederschlagsgenerators, (3) Abstimmung des Niederschlagsgenerators, (4) statistische Bewertung der Leistung und (5) Verwendung in hydrologischen Simulationsmodellen mit Bewertungsmetriken.

von Mischabwasser, die Anzahl von Schächten im Netz mit Überstau pro Jahr und der prozentuale Anteil des jährlich zurückgehaltenen Niederschlagsabflusses in der blau-grünen Infrastruktur. Die Niederschlagsdaten stammen von 39 Stationen in der Schweiz, die über 40 Jahre Beobachtungsdaten verfügen.

Tabelle 1. Beschreibung des Generator-Kandidaten

Origin	Der originale Generator aus (Kim & Onof, 2020).
SOA	Drei in der Literatur vorgeschlagene Verbesserungen, z.B. mit einer realistischeren Regenzellen-Form oder robustere Optimierungsmethode („State of the art“)
Mean10	Erhöhung des mittleren jährlichen Niederschlags um 10%
Skew25	Erhöhung der Schiefe der Verteilung des Niederschlags («coefficient of skewness») um 25%
Select	Anpassung der Schiefe des Niederschlags
P60	Extremwert erhält ein grösseres Gewicht in der Zielfunktion der Kalibrierung
Comb	Kombination von Mean10 und P60

3 Resultate

Grundsätzlich lassen sich die Generatoren gut an vorhandene Niederschlagsdaten anpassen, so dass sie die wesentlichen Eigenschaften von Regen (Abbildung 2a) und auch der simulierten Abflüsse (Abbildung 2b) wiedergeben können. Allerdings sind die Abweichungen für manche spezifischen Kenngrößen noch sehr gross. In Abb. (a) zeigt die x-Achse die Leistung (mittlerer absoluter relativer Fehler) für jede Statistik (Mittelwert, Varianz, Schiefe, Nass-Trocken-Perioden und Extremwerte) sowie einen Gesamtleistungsindikator, der einen Durchschnitt über alle Statistiken für jeden Kandidatengenerator darstellt. In Abb. (b) stellt die x-Achse die Art der Leistungskennzahl dar: kombinierte Kanalisationsüberläufe, Überschwemmungen und Blaue-

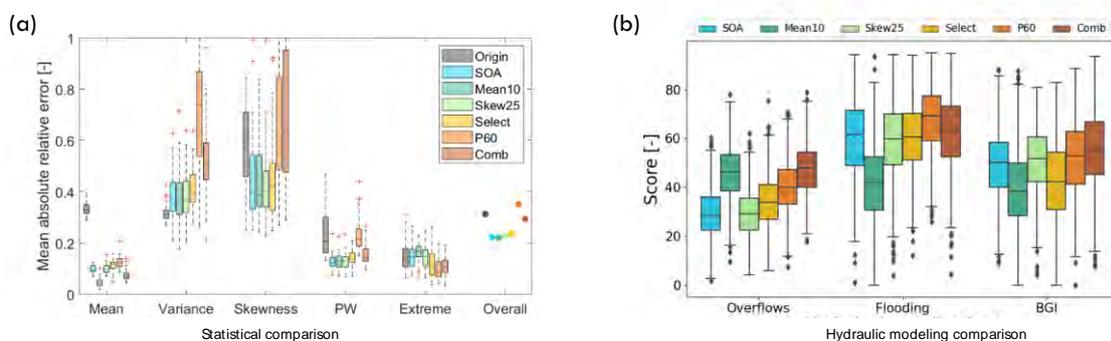


Abbildung 46: (a) Statistischer Vergleich der Generatoren im Hinblick auf die Leistung in einer Gesamtperspektive. (b) Gesamtergebnisse für alle Generatoren bei der Reproduktion von Überläufen und Überschwemmungen sowie die Reproduktion der Leistung von BGI. Der Unsicherheitsbereich wird durch 1000-

faches Bootstrapping erzeugt. Insgesamt lässt sich sagen, dass die Generatoren sich relativ gut an vorhandene Regendaten anpassen lassen. Leider „funktioniert“ kein einzelner Generator gut für alle Zielgrößen von Regenabwasserbewirtschaftung bis Überflutungsprüfung.

Der **Mean10**-Generator kann nicht nur die statistischen Eigenschaften des Niederschlags, wie Mittelwert, Streuung, nasse Perioden, etc., am besten von allen Generatoren abbilden (dunkelgrüne Boxplots in Abbildung 2a), sondern er reproduziert auch die simulierten Mischabwasserüberläufe am besten (Abbildung 2b). Allerdings gelingt es ihm nicht, das Überflutungsverhalten und den jährlichen Regenwasserrückhalt in der dezentralen Bewirtschaftungsanlage gut abzubilden. Für diese Anwendungen schneidet der **P60**-Generator sehr gut ab, welcher aber die statistischen Kenngrößen des Regengeschehens am schlechtesten reproduzieren kann. Vor allem in Bezug auf die Varianz und die Schiefe der beobachteten Regenverteilung sind die Abweichungen beträchtlich.

Der **Comb**-Generator nutzt, wie erwartet, die Vorteile der **Mean10**- und **P60**-Generatoren bei hydraulischen Anwendungen, und hat in Bezug auf die simulierten Niederschlagsabflüsse, die beste Leistung von allen betrachteten Varianten. Allerdings leidet die Leistung in Bezug auf die Eigenschaften des Regens klar unter dem Einfluss des **P60**-Generators, wobei die Ergebnisse vor allem für lange Dauerstufen von Tagen bis Wochen sehr ungenau sind.

Abgesehen von diesen drei Generatoren, schneidet der **SOA**-Generator, mit spezifischen funktionalen Verbesserungen aus der Literatur, bei allen Metriken sowohl für die Regencharakteristik als auch für alle Abfluss-bezogenen Kenngrößen recht gut ab. Vor allem die grosse relative Leistung im Vergleich zu den modifizierten Kandidatengeneratoren zeigt, dass zusätzliche Optimierungen die Leistung in einem Bereich erhöhen, aber in einem anderen Bereich beeinträchtigen können. Unserer Meinung nach bedeutet das vor allem, dass Regengeneratoren nicht alleine danach beurteilt werden sollten, wie gut sie beobachtete Regen beschreiben können. Gerade für Anwendungen in der Siedlungswasserwirtschaft sollte die Eignung für Regenwasserbewirtschaftung oder die Beurteilung der hydraulischen Leistungsfähigkeit überprüft werden.

Ein wichtiger offener Punkt in der Anwendung von Regengeneratoren in der Siedlungsentwässerung ist vor allem die zuverlässige Regionalisierung der Parameter der Generatoren. Gerade weil sie von der Modellstruktur her sehr flexibel sind, werden für ähnliche Regenserien oft sehr unterschiedliche Generator-Parameter geschätzt. In zukünftigen Arbeiten könnte dies durch die gleichzeitige Berücksichtigung von naheliegenden Messstationen verbessert werden [REF_DK paper].

[Say that synthetic time series are not only a research tool, but also relevant for practice and commercially available in Germany (Bardossy, ITWH)]

Da Regengeneratoren, wie unsere Niederschlags-Abflussmodelle auch, die Realität nie perfekt abbilden können, müssen wir ausserdem einen Konsens darüber erzielen, welche Leistungskennzahlen für bestimmte Anwendungen in der Stadtentwässerung am wichtigsten sind.

4 Fazit

Unsere Untersuchungen zu Regengeneratoren haben gezeigt, dass sich verfügbare Poisson-Cluster Generatoren bereits gut an beobachtete Niederschläge anpassen lassen und sowohl die Eigenschaften des Niederschlages, als auch die von simulierten Abflüssen in der Siedlungsentwässerung über Dauerstufen von Minuten bis mehreren Tagen und Wochen oft gut reproduzieren können.

Konkret haben wir untersucht, wie sich verschiedene Modifikationen an einem Bartlett-Lewis-Rechteck-Puls Modell auf die Simulationsergebnisse von drei spezifischen Anwendungen der Stadtentwässerung auswirken: i) Mischwasserüberläufe, ii) die hydraulische Leistungsfähigkeit und iii) die Leistung

von blau-grüner Infrastruktur. Die veränderten Generatoren wurden an 39 Meteoschweiz Messstationen in der Schweiz getestet, für die Zeitreihen von 40 Jahren in 10 minütiger Auflösung zur Verfügung standen. Unsere Ergebnisse zeigen, dass drei in der Literatur vorgeschlagene Verbesserungen („State-of-the-Art“), wie z.B. eine verbesserte Form der Regenzellen oder eine robustere Parameterschätzung, die Niederschlagscharakteristiken der synthetischen Zeitreihen (Mittelwert, Extremwerte usw.) deutlich realistischer machen. Weitere Verbesserungen über den State-of-the-Art hinaus, bringen oft punktuelle Verbesserungen in einer Kenngröße, so dass dann z.B. der mittlere Niederschlag besser reproduziert wird. Allerdings bringt dies auch oft Verschlechterungen in anderen Kenngrößen, so dass mit demselben Generator extreme Intensitäten, und damit die hydraulische Leistungsfähigkeit, nicht gut reproduziert werden. Die Kombination von unterschiedlichen Generatoren könnte ein gangbarer Kompromiss sein, wird aber nicht das Optimum erreichen.

Um diese Zielkonflikte zu verstehen, müssen wir synthetische Niederschläge unbedingt in Simulationsmodellen validieren, die von Praktikern für die spezifischen Fragestellungen angewendet werden. Die vielversprechendste weitere Änderung ist die Berücksichtigung von Extremwerten bei der Anpassung der Generatoren an beobachtete Regenreihen, was die Wiedergabe von Extremereignissen und Überschwemmungen verbessern könnte. Mittelfristig müssen wir jedoch einen Konsens darüber erzielen, welche Leistungskennzahlen für Anwendungen in der Stadtentwässerung am wichtigsten sind.

5 Literatur

- Brunner, M. I., & Gilleland, E. (2020). Stochastic simulation of streamflow and spatial extremes: a continuous, wavelet-based approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(8), 3967–3982. <https://doi.org/10.5194/hess-24-3967-2020>
- Burton, A., Kilsby, C. G., Fowler, H. J., Cowpertwait, P. S. P., & O’Connell, P. E. (2008). RainSim: A spatial-temporal stochastic rainfall modelling system. *Environmental Modelling & Software*, 23(12), 1356–1369. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.04.003>
- Cameron, D., Beven, K., Tawn, J., & Naden, P. (2000). Flood frequency estimation by continuous simulation (with likelihood based uncertainty estimation). *Hydrology and Earth System Sciences*, 4(1), 23–34. <https://doi.org/10.5194/hess-4-23-2000>
- Dao, D. A., Kim, D., Kim, S., & Park, J. (2020). Determination of flood-inducing rainfall and runoff for highly urbanized area based on high-resolution radar-gauge composite rainfall data and flooded area GIS data. *Journal of Hydrology*, 584, 124704. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124704>
- Gaume, E., Mouhous, N., & Andrieu, H. (2007). Rainfall stochastic disaggregation models: Calibration and validation of a multiplicative cascade model. *Advances in Water Resources*, 30(5), 1301–1319. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2006.11.007>
- Kim, D., Kwon, H.-H., Lee, S.-O., & Kim, S. (2016). Regionalization of the Modified Bartlett–Lewis rectangular pulse stochastic rainfall model across the Korean Peninsula. *Journal of Hydro-Environment Research*, 11, 123–137. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2014.10.004>
- Kim, D., & Onof, C. (2020). A stochastic rainfall model that can reproduce important rainfall properties across the timescales from several minutes to a decade. *Journal of Hydrology*, 589, 125150. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125150>
- Marshall, J. D., Shimada, B. W., & Jaffe, P. R. (2000). Effect of temporal variability in infiltration on contaminant transport in the unsaturated zone. *Journal of Contaminant Hydrology*, 46(1–2), 151–161. [https://doi.org/10.1016/S0169-7722\(00\)00112-1](https://doi.org/10.1016/S0169-7722(00)00112-1)

- Oh, M., Lee, D., Kwon, H., & Kim, D. (2016). Development of flood inundation area GIS database for Samsung-1 drainage sector, Seoul, Korea. *Journal of Korea Water Resources Association*, 49(12), 981–993. <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2016.49.12.981>
- Park, J., Cross, D., Onof, C., Chen, Y., & Kim, D. (2021). A simple scheme to adjust Poisson cluster rectangular pulse rainfall models for improved performance at sub-hourly timescales. *Journal of Hydrology*, 598, 126296. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126296>
- Rodriguez-Iturbe I, Cox DR, & Isham V. (1988). A point process model for rainfall: further developments. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 417(1853), 283–298. <https://doi.org/10.1098/rspa.1988.0061>
- Vanhaute, W. J., Vandenberghe, S., Scheerlinck, K., de Baets, B., & Verhoest, N. E. C. (2012). Calibration of the modified Bartlett-Lewis model using global optimization techniques and alternative objective functions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(3), 873–891. <https://doi.org/10.5194/hess-16-873-2012>

Korrespondenz:

Lauren Cook
Überlandstrasse 133, CH-8600 Dübendorf
+41 58 765 5474
Lauren.Cook@eawag.ch

OPTIMIERUNGS-TOOLKIT FÜR PLANUNG UND DESIGN VON NACHHALTIGEN STADTENTWÄSSERUNGSSYSTEMEN

Habermehl, R.; Bakhshipour, A. E.; Dilly, T. C.; Dittmer, U.
Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft, Technische Universität Kaiserslautern,
67663 Kaiserslautern, Germany

Kurzfassung:

Ein eigenständiges Softwaretool zur Automatisierung Optimierung der Planung von nachhaltigen Stadtentwässerungssystemen wurde entwickelt. Es umfasst die automatisierte Erstellung des Netzwerklayouts, die Dimensionierung der Kanalnetzkomponente sowie Positionierung und Dimensionierung von Anlagen zur nachhaltigen Regenwasserbewirtschaftung. Die entwickelte Software verringert den Zeitaufwand für die Planung solcher Systeme maßgeblich.

Key-Words: Kanalnetzplanung, Blau-Grüne-Infrastruktur, Optimierung, Graphentheorie

1 Einleitung

Blau-grüne Infrastrukturen sollen zukünftig konventionelle Entwässerungssysteme ergänzen. Doch die konventionelle Planung ist zeitaufwändig, langwierig und in hohem Maße von Erfahrungen und Einschätzungen abhängig. Diese Problematik wird durch die Forderung nach einem naturnahen, urbanen Wasserhaushalt verstärkt. Die zusätzliche Berücksichtigung der Positionierung und Dimensionierung von Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen führt zu einer signifikanten Steigerung der planerischen Freiheitsgrade. Zudem fehlen oftmals Erfahrungswerte, in welchem Umfang diese Maßnahmen bei der Entwässerungsplanung berücksichtigt werden sollen. Zur Bewältigung dieser Problematik wurde ein Softwarepaket entwickelt, welches die Anwendung fortschrittlicher metaheuristischer Optimierungsalgorithmen zur systematischen Planung kosteneffizienter und nachhaltiger Kanalsysteme unter Berücksichtigung von blau-grünen Infrastrukturen ermöglicht.

2 Material und Methoden

Die entwickelte Software ZIGGURAT basiert auf SWMM-Simulationen und dient der automatischen Generierung und Optimierung von Entwässerungssystemen aus Geobasisdaten. Dabei werden unterschiedliche Module und Algorithmen verwendet (vgl. Abb. 1). Dies sind: (1) Der Base-Graph-Extractor, der die Geodaten in einen ungerichteten, zyklischen Graphen umwandelt; (2) der Loop-Cutting-Algorithmus, der ein zentralisiertes Kanalisationslayout generiert (Haghighi 2013); (3) der Hanging-Garden-Algorithmus, der das generierte zentralisierte Layout in ein dezentralisiertes umwandelt, falls eine Dezentralisierung eine Option ist (Bakhshipour et al. 2019); (4) der Adaptive Sizing Algorithmus, der die Spezifikationen der Systemkomponenten festlegt (Haghighi und Bakhshipour 2012); (5) das Spatial Assignment Modul, welche die räumlichen Daten des Layouts berechnen; (6) SWMMPUT, welches das Kanalnetzsystem in ein SWMM-Model umwandelt, die Simulationsparameter festlegt und die Ergebnisse der Simulationen ausliest; (7) die Optimization Engine, die ein beliebiger metaheuristischer Optimierungsalgorithmus (z. Bsp. ein genetischer Algorithmus) sein kann.

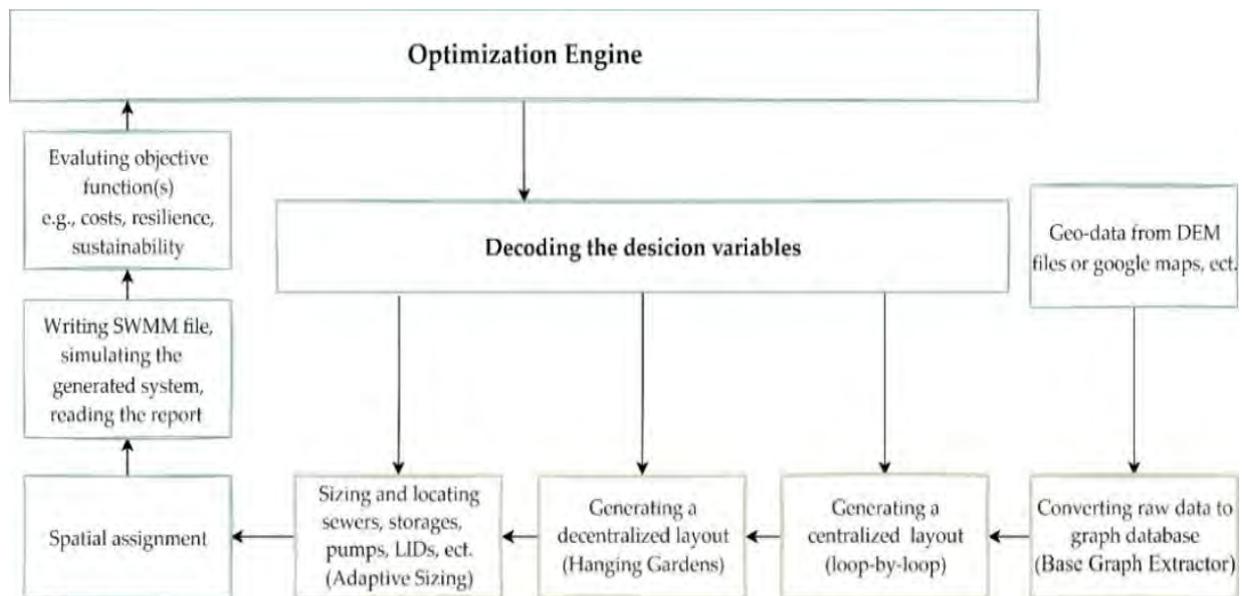


Abbildung 47: Übersicht der Optimierungskomponenten

Die Software wurde in Pilotgebiete mit variierenden Anforderungen und in verschiedenen Ländern (Iran, Indien, China) getestet. Im Folgenden wird auf das Testgebiet in der Stadt Ahvaz eingegangen. Hierbei handelt es sich um ein relatives großes, flaches Gebiet im Südwesten des Irans mit 340 Schächten und 520 Haltungen. In diesem Testcase wurde neben der herkömmlichen Kanalnetzinfrastruktur zusätzlich blau-grüne Infrastrukturen (GBI) berücksichtigt und optimiert. Die entwickelte Software wird verwendet, um ein dezentrales Entwässerungssystem für Regenwasser in einem Teil der Stadt Ahvaz im Iran zu entwerfen. Der Zentralisierungsgrad, die Layoutkonfiguration, der Durchmesser und das Gefälle der Kanalleitungen sowie der Typ, die Position und die Dimensionierung der GBI (in Ahvaz Mulden-Rigolen-Systeme und Zisternen) werden als Entscheidungsvariablen betrachtet. Die Zielfunktion ist individuell wählbar und kann die Minimierung der Baukosten, die Steigerung der Nachhaltigkeit, (z. Bsp. durch die Reduzierung von Schadstoffeinträgen in Fließgewässer) sowie die Steigerung der Resilienz (z. Bsp. durch eine Minimierung der Kanalauslastung) beinhalten.

3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der Optimierung zeigen, dass unter Verwendung aller Teilkomponenten der entwickelten Software ein plausibles und weitestgehend optimiertes System in relativ geringer Zeit generiert werden konnte. Unter Verwendung von handelsüblichen Computern (INTEL i7-10700 8x2.90GHz, 16GB DDR4 RAM) konnte das dargestellte System in unter einem Tag Optimierungszeit berechnet werden. Durch die Verwendung von Computercluster kann dieser Zeitverbrauch weiter reduziert werden. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass im Beispiel unter den zugrunde gelegten Kostenansätzen bei einem zentralen Entwässerungssystem (ein Outlet) eine deutliche Reduzierung der Gesamtkosten erreicht wird. Dies lässt sich überwiegend auf die Einsparung von Baukosten durch die Verringerung der Kanaldurchmesser zurückführen. Bei dezentralisierten Systemen ist die Einsparung durch die Einführung von GBI jedoch geringer. Bei einer starken Dezentralisierung (> 6 Outlets) steigen die Kosten für das Gesamtsystem sogar. GBIs kommen dann "nur" bei einer stärkeren Gewichtung nichtmonetärer Bewertungskriterien (Nachhaltigkeit, Resilienz) zum Zuge. Die Software kann mit geringem Aufwand auf beliebige Planungsgebiete angewandt werden. Die hierfür benötigten Eingangsdaten werden auch bei der konventionellen Planung benötigt. Aus diesem Grund ist ein Einbinden der hier präsentierten Software in den Planungsprozess ohne große Anpassungen möglich.

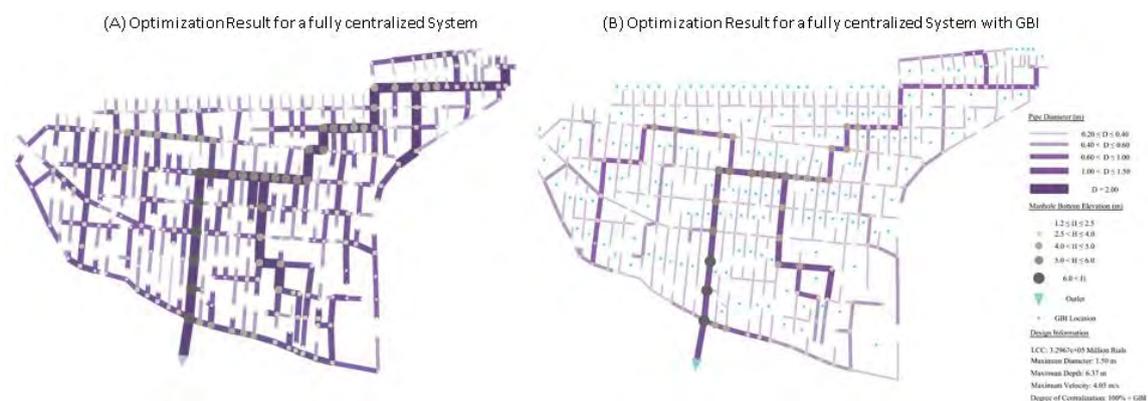


Abbildung 48: Darstellung der Optimierungsergebnisse für ein zentrales Entwässerungssystem ohne und mit blau-grünen Infrastrukturen (Bakhshipour, 2021)

4 Literatur

Bakhshipour, Amin E. (2021): Optimizing hybrid decentralized systems for sustainable urban drainage infrastructures planning. Dissertation. Stuttgart : Eigenverlag des Instituts für Wasser- und Umweltsystemmodellierung der Universität Stuttgart

Bakhshipour, Amin E.; Bakhshizadeh, Milad; Dittmer, Ulrich; Haghighi, Ali; Nowak, Wolfgang (2019): Hanging Gardens Algorithm to Generate Decentralized Layouts for the Optimization of Urban Drainage Systems. In: J. Water Resour. Plann. Manage.

Haghighi, Ali (2013): Loop-by-Loop Cutting Algorithm to Generate Layouts for Urban Drainage Systems. In: J. Water Resour. Plann. Manage. 139 (6), S. 693–703.

Haghighi, Ali; Bakhshipour, Amin E. (2012): Optimization of Sewer Networks Using an Adaptive Genetic Algorithm. In: Water Resour. Manage. 26 (12), S. 3441–3456.

UNICEF & WHO (2019): Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2017. Special focus on inequalities. New York: United Nations Children's Fund (UNICEF) and World Health Organization, 2019.

Korrespondenz:

Ralf Habermehl
 Paul-Ehrlich-Straße 14, 67663 Kaiserslautern
 Gebäude 14, Raum 320
 +49 631 205-4643
 ralf.habermehl@bauing.uni-kl.de

Einflüsse auf die Kalibrierbarkeit urbanhydrologischer Modelle

K. Sedki¹, J. Neumann¹, Ch. Klippstein¹, U. Dittmer¹

¹ TU Kaiserslautern, Paul-Ehrlich-Str. 14, 67663 Kaiserslautern, Deutschland

Kurzfassung: In der hier vorgestellten Studie wurden Methoden und Vorgehensweisen für die Datenerhebung, den Modellaufbau und die Modellkalibrierung vergleichend untersucht. Es wurden die Einflüsse auf den Erfolg der Kalibrierung bewertet. Dazu standen gemessene Zeitreihen (Abfluss und lokaler Niederschlag) aus drei benachbarten Einzugsgebieten über sechs Monate zur Verfügung. Die Kalibrierbarkeit wurde in diesen Gebieten maßgeblich durch die Modellstruktur und Genauigkeit der Flächenerhebung beeinflusst. Mit der Niederschlag-Abfluss-Bilanzierung konnten die Flächenerhebung validiert und der Kalibriererfolg verbessert werden.

Key-Words: Urbanhydrologie, Modellierung, Messdaten, Flächenermittlung

1 Einführung

Die Simulation des Niederschlag-Abfluss-Geschehens mit urbanhydrologischen Modellen unterliegt Unsicherheitseinflüssen, die durch Kalibrierung verringert werden können (Deletic et al., 2012). In dieser Studie wurden unterschiedliche Methoden und Vorgehensweisen für die Datenerhebung, den Modellaufbau (hydrologisches Modell KOSIM) und die Modellkalibrierung (KALIMOD mit Optimierungsalgorithmus AMALGAM; Henrichs, 2015) untersucht. Die Einflüsse auf den Erfolg der Kalibrierung sollten bewertet werden.

Abbildung 49 zeigt schematisch den Zusammenhang möglicher Arbeitsschritte für eine Modellkalibrierung von der Messdatenerhebung über deren Auswertung, den Modellaufbau und die Modellkalibrierung sowie -validierung selbst bis hin zur Übertragung auf die Modellanwendung, z. B. eine Langzeitsimulation.

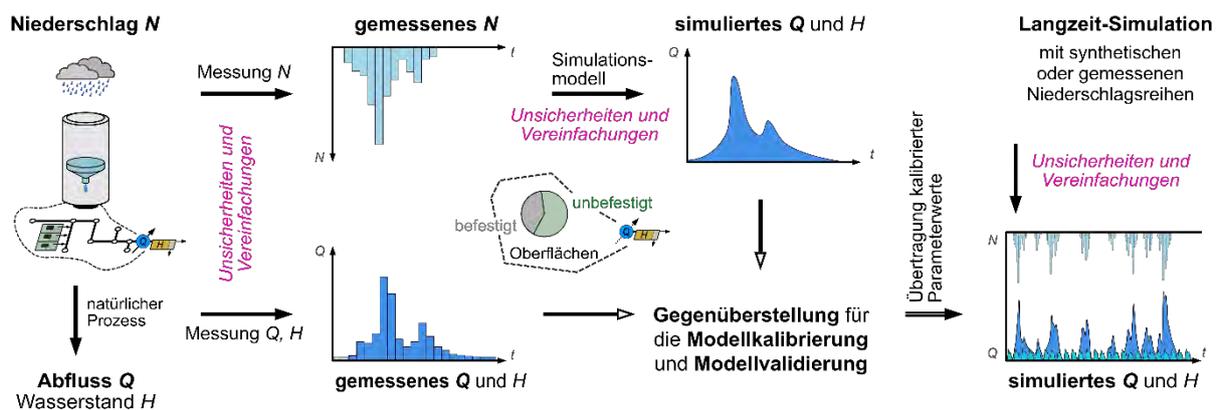


Abbildung 49: Schematische Darstellung der Datenerfassung und -verarbeitung zur Modellierung des Niederschlag-Abfluss-Prozesses mit Angriffspunkten von Unsicherheitseinflüssen (eigene Darstellung nach Kleidorfer, 2009)

2 Material und Methoden

In dieser Studie wurden drei benachbarte Einzugsgebiete untersucht. Sie werden im Mischsystem entwässert und weisen eine ähnliche, ländlich geprägte Siedlungsstruktur sowie Topografie auf. Als Datengrundlage standen Abflusszeitreihen aus den Einzugsgebieten (Zulauf Regenbecken) und lokale Niederschlagszeitreihen über sechs Monate zur Verfügung. Die Untersuchungsgebiete wurden mit dem hydrologischen Modell KOSIM (itwh, 2020) modelliert.

Aus den gemessenen Niederschlagszeitreihen wurden mit der Programmiersprache R (R Core Team, 2017) in der Statistiksoftware RStudio (RStudio Team, 2020) Einzelereignisse gefiltert. Für diese wurden mit R automatisiert Niederschlag-Abfluss-Bilanzen erstellt. In Anlehnung an Schmitt et al. (2008) wurden Schwellenwerte für die Niederschlagshöhe ($h_{N,Ereignis} \geq 5 \text{ mm}$), die maximale Intensität in zwei Stunden ($i_{N,2h,max} = 5 \dots 10 \text{ mm} / 2 \text{ h}$), das Regenabflussvolumen ($V_R \geq 3 \text{ m}^3 \geq 3 \cdot V_{TW}$) und die Abflusstiefe ($h \geq 0,10 \text{ m}$) verwendet, um anschließend fünf für die Kalibrierung geeignete Ereignisse auszuwählen.

Für die Modellierung stellt der Modellaufbau eine wesentliche Unsicherheitsquelle dar (Del Giudice et al., 2015; Salvatore et al., 2015). Die Modellstruktur wurde aus den erhobenen Flächendaten (Eingangsdaten der Modellierung) erstellt. Dabei wurde einerseits die Genauigkeit der Flächenerhebung und -prüfung selbst und andererseits die räumliche Auflösung der Modellstruktur variiert. Wie sich diese beiden Aspekte auf die Kalibrierbarkeit eines Modells auswirken, wurde mit Methoden der Auto-Kalibrierung untersucht. Für die Flächenerhebung aus digitalen Orthofotos wurden drei Detaillierungsstufen unterschieden (Abbildung 50):

- Referenzquadrat für das gesamte Einzugsgebiet; im Modell ein Gebiet je Bauwerk (grob)
- Referenzquadrate je Teil-Einzugsgebiet; im Modell mehrere Gebiete je Bauwerk und ggf. Anbindung der Gebiete durch Transportstrecken (detailliert)
- Detaillierte Ermittlung der befestigten (Einzel-) Flächen für Teil-Einzugsgebiete; im Modell mehrere Gebiete je Bauwerk und ggf. Anbindung der Gebiete durch Transportstrecken (detailliert)

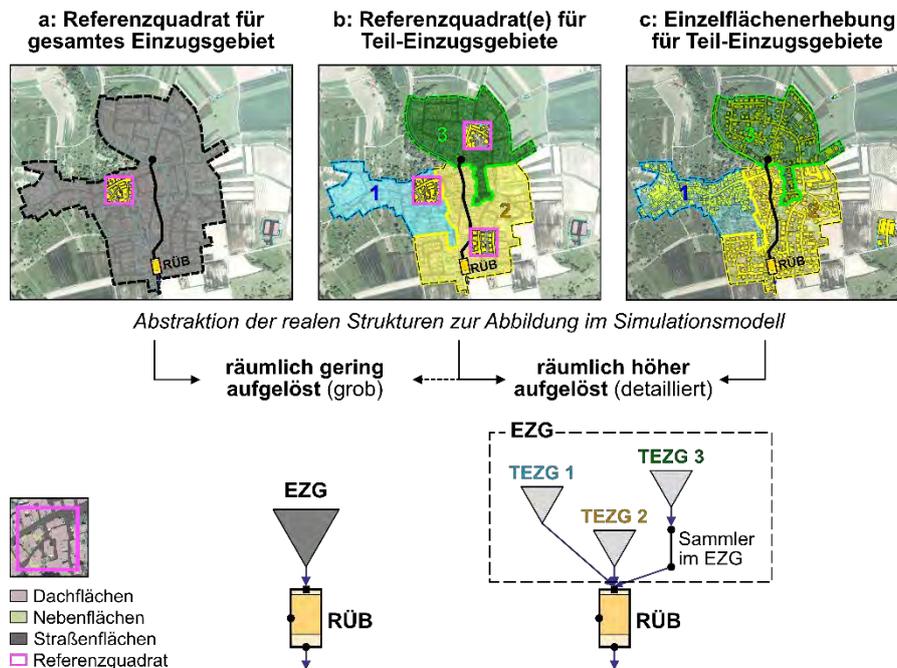


Abbildung 50: Schema für Detaillierungsstufen der Flächenerhebung aus digitalen Orthofotos und Umsetzung der erhobenen Flächen in eine Modellstruktur (eigene Darstellung)

Im Zuge der Auto-Kalibrierung für fünf Modellparameter (Benetzungs- und Muldenverluste, Anfangs- und Endabflussbeiwert und Schwerpunktlaufzeit in KOSIM) mit drei Abweichungsmaßen (Nash-Sutcliffe-Efficiency $E2$, Volumenabweichung VOL , Maximalwertabweichung DY_{max} in KALIMOD) wurden zwei Varianten unterschieden. Dadurch wurde der Unsicherheitseinfluss der Kalibrierung weiterführend untersucht. Für die erste Variante „gemeinsam“ (g) wurde in jedem Optimierungsschritt die gesamte Zeitreihe mit demselben Parameterset simuliert. Dabei wurden die Abweichungsmaße für die Abschnitte der fünf Kalibrierereignisse berechnet, um eine Kompromisslösung für jeden Optimierungsschritt auszuwählen. Für die zweite Variante „einzeln“ (e) wurde jeweils nur der Ereigniszeitraum simuliert, d. h. die fünf ausgewählten N-A-Ereignisse wurden einzeln betrachtet. Aus der zweiten Variante (e) ergeben sich somit je Gebiet fünf Kompromisslösungen (Parametersets). Die resultierenden Parametersätze für kalibrierte Ereignisse wurden verwendet, um Einschränkungen bei der Übertragung von Kalibrierergebnissen auf andere Gebiete und auf andere Zeiträume zu identifizieren.

Für die N-A-Bilanzierung wurde der Kontrollwert x_k für jedes Einzelereignis berechnet. Er ergibt sich aus der Division des Regenabflussvolumens V_R durch das effektive Niederschlagsvolumen $V_{N,eff}$. Der x_k -Wert wurde für alle kalibrierten Ereignisse mit dem Ergebniswert der Auto-Kalibrierung der Varianten „g“ und „e“ für den Endabflussbeiwert $PsiE$ verglichen, um zu testen, ob x_k anstelle einer Kalibrierung als $PsiE$ verwendet werden kann. Erfahrungswerte (Schmitt et al., 2008) zeigen, dass die Anschlussgrade häufig unter dem ermittelten liegen und die tatsächlich an die Kanalisation angeschlossene abflusswirksame Fläche des Einzugsgebiets $A_{b,a}$ kleiner ist als angenommen. Der x_k -Wert nimmt in der Folge Werte kleiner 1,0 an, da durch ein geringeres $A_{b,a}$ auch das direkt proportionale Abflussvolumen geringer wird. Ist der x_k -Wert größer 1,0, wurde $A_{b,a}$ unterschätzt. Für ein genau ermitteltes $A_{b,a}$ nimmt x_k den Wert eins an.

3 Ergebnisse und Diskussion

Für die untersuchten Gebiete zeigte sich aus der Gegenüberstellung der simulierten und gemessenen Abflussganglinien (Abbildung 51 li.), dass die Kalibrierbarkeit und erreichbare Modellgüte maßgeblich durch die Modellstruktur und die damit verbundene Anforderung an die Genauigkeit der Flächenerhebung beeinflusst werden. Hierzu wurden die Abweichungsmaße (Tabelle 15) und ein visueller Vergleich ausgewertet. Mit der Niederschlag-Abfluss-Bilanzierung (Abbildung 51 mi.) konnte die Flächenerhebung validiert und der Kalibriererfolg verbessert werden. Die angenommene Ähnlichkeit von x_k und $PsiE$ wird in Abbildung 51 (re.) bestätigt.

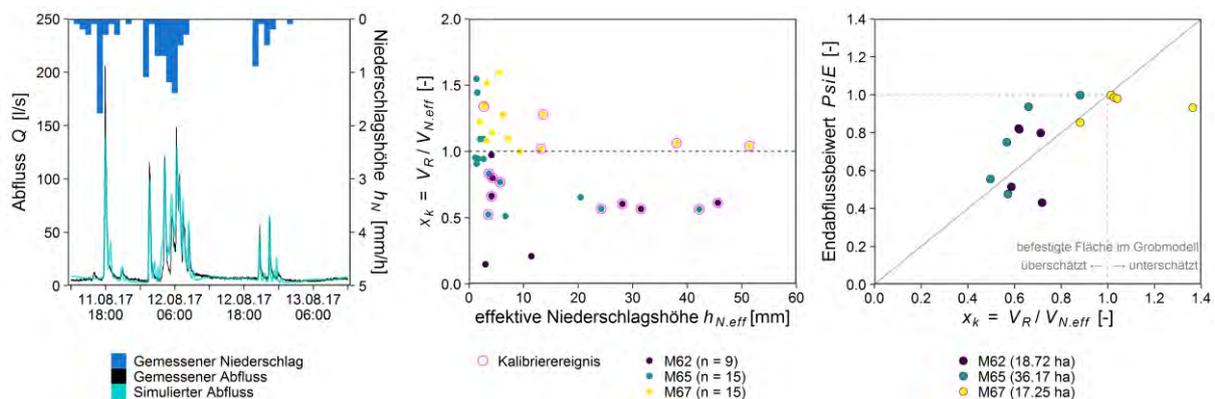


Abbildung 51: Ergebnisse der (li.) Validierung im Untersuchungsgebiet M65 für die Auto-Kalibrierung, (mi.) der N-A-Bilanzierung (resultierende x_k -Werte in Abhängigkeit der effektiven Ereignisvolumina) und (re.) Gegenüberstellung der Ergebnisse aus der Auto-Kalibrierung für den Endabflussbeiwert ($PsiE$ aus der Variante „einzeln“) gegenüber dem x_k -Wert der fünf Kalibrierereignisse je Untersuchungsgebiet

Für die Validierung wurden wie auch für die Kalibrierung die drei Abweichungsmaße $E2$, VOL und $DYmax$ berechnet. Die Kompromisslösung aus der Auto-Kalibrierung enthält die ermittelten Werte für die Modellparameter und Abweichungsmaße jedes Kalibrierereignisses (Tabelle 15). Der Trockenwetterabfluss wurde nicht kalibriert. Aus diesem Grund wurden die Abweichungsmaße nicht für die gesamte Zeitreihe ausgewertet, sondern lediglich für die Zeitabschnitte der ausgewählten Niederschlagsereignisse. In Tabelle 15 sind beispielhaft die Abweichungsmaße für das Kalibrierereignis Nr. 3 für M65 angegeben. Für die übrigen vier Kalibrierereignisse wurden ähnliche Parameterwerte und Abweichungsmaße ermittelt.

Tabelle 15: Ergebniswerte aus der Auto-Kalibrierung für variierte räumliche Modellstrukturen und Abweichungsmaße für das Kalibrierereignis Nr. 3 im Gebiet M65

Modellparameter / Abweichungsmaß	Kalibrierereignis	a (36.2 ha _{bef})	b (33.3 ha _{bef})	c (29.7 ha _{bef})	KOSIM Default
TS [min]	1 bis 5	64	57	93	15
V_{ben} [mm]	1 bis 5	0,28	0,11	0,10	0,50
V_{muld} [mm]	1 bis 5	0,59	2,26	2,25	1,80
$PsiA$ [-]	1 bis 5	0,44	0,49	0,46	0,30
$PsiE$ [-]	1 bis 5	0,58	0,77	0,78	0,85
$E2$ [-]	3	0,637 (o)	0,796 (+)	0,799 (+)	-
VOL [%]	3	+24,8 (-)	+1,4 (+)	+1,6 (+)	-
$DYmax$ [%]	3	-20,5 (o)	+10,4 (+)	+9,2 (+)	-

Für die untersuchten Modellkonfigurationen bestätigen die Parameterwerte und Abweichungsmaße in Tabelle 15 den Einfluss der Modellstruktur auf die Kalibrierbarkeit. Es fällt auf, dass die Varianten (b) und (c) sehr ähnliche Ergebnisse erzielen. Dabei sind die Abweichungen in Variante (c) geringer. Für die hier ausgewerteten Kompromisslösungen der Varianten (b) und (c) gegenüber (a) sind die Ergebnisse von (b) und (c) mit drei von fünf Kalibrierereignissen nach DWA-M 165-1 (DWA, 2021) als „gut“ (+) einzustufen. Für Variante (a) wird nur für zwei der fünf Ereignisse für $E2$ ein „gutes“ Ergebnis erzielt. Der Kalibriererfolg für die übrigen Ereignisse ist als mäßig (o) bis schlecht (-) einzuordnen.

Die geringere erhobene befestigte Summe der Einzelflächen (c) von ca. 29,7 ha stimmt nahezu mit der errechneten Fläche von ca. 29,2 ha aus der N-A-Bilanzierung mit den Niederschlags- und Abflussdaten der Messkampagne überein.

Anders als die Kalibrierereignisse ist das Validierungsereignis (Abbildung 51 li.) moderat und hat keine besonders stark ausgeprägte Niederschlags- und Abflussspitze. Es repräsentiert somit den für hydrologische Langzeitsimulationen relevanten Fall (DWA, 2021). Die Ergebnisse dieser Auswertungen sind in Tabelle 16 aufgeführt. Die Einordnung der Abweichungsmaße folgt den Kategorien aus DWA-M 165-1 (DWA, 2021): (+) gut, (o) mäßig und (-) schlecht. Für die Validierung des Parametersets aus der Auto-Kalibrierung des Modells für M65 spiegeln die Ergebniswerte in Tabelle 16 die Ähnlichkeit der simulierten und gemessenen Abflussganglinie in Abbildung 51 (li.) wider. Die gute Übereinstimmung des Ganglinienverlaufs ($E2 = 0,85$), die damit zusammenhängende geringe Volumenabweichung ($VOL = +2,2\%$) und die starke Unterschätzung der größten Abflussspitze ($DYmax = -31,7\%$) wurden durch den visuellen Vergleich bestätigt.

Tabelle 16: Bewertung der Validierungsergebnisse für das ausgewählte Ereignis in Gebiet M65 durch Einordnung der Abweichungsmaße mit Abstufungen aus DWA-M 165-1 (DWA, 2021)

Parameterset	Übertragung	$E2$ [-]	VOL [%]	DY_{max} [%]
aus der Kalibrierung des räumlich gering aufgelösten Modells für M62 für räumliche Übertragung auf M65		0,842 (+)	+5,7 (+)	-25,3 (-)
aus der Kalibrierung des räumlich gering aufgelösten Modells für M65 (vgl. Abbildung 51, li.) für zeitliche Übertragung	Simulation des räumlich gering aufgelösten Modells für	0,852 (+)	+2,2 (+)	-31,7 (-)
aus der Kalibrierung des räumlich gering aufgelösten Modells für M67 für räumliche Übertragung auf M65	M65 mit den Parametersets	0,447 (o)	+27,1 (-)	-1,5 (+)
$PsiE = x_{k,m,95,M65}$ aus N-A-Bilanzierung für Ereignisse für M65 für zeitliche Übertragung		0,817 (+)	-5,3 (+)	-42,0 (-)
Standardwerte KOSIM		0,734 (+)	+17,3 (o)	-19,5 (o)

Aus Tabelle 16 wird deutlich, dass die Übertragbarkeit für die untersuchten Gebiete räumlich stärker eingeschränkt ist als zeitlich. Die Übertragung der kalibrierten Modellparameterwerte aus den Gebieten M62 und M67 auf das Modell für M65 führen zu größeren Abweichungen als das kalibrierte Parameterset aus dem Modell für M65 selbst. Besonders auffällig ist an dieser Stelle die Ähnlichkeit der Ergebniswerte für M62 und M65, die bereits in der N-A-Bilanzierung aufgefallen ist. Obwohl hier für alle Gebiete dieselbe Detaillierungsstufe der Flächenerhebung verwendet wurde, führt die Auswahl der Referenzquadrate zu verschiedenen ausgeprägten Unter- oder Überschätzungen der befestigten Fläche, die sich in der räumlichen Übertragung der Kalibrierergebnisse widerspiegeln.

Die Gegenüberstellung der auto-kalibrierten Simulationsergebnisse mit dem Ansatz $PsiE = x_k$ und den Standardwerten für KOSIM in Tabelle 16 unterstreicht die Notwendigkeit der Kalibrierung. Auffällig ist an dieser Stelle, dass bereits die Erkenntnisse aus der N-A-Bilanzierung zu einer höheren Modellgüte führen können als die KOSIM-Standardwerte. Diese hingegen führen für M65 zu besseren Ergebnissen als das Parameterset aus der Kalibrierung für M67 (Tabelle 16).

Für alle Abweichungsmaße und Ganglinienvergleiche zwischen simulierten und gemessenen Werten zeichnet sich ab, dass die Erfassung der Einzelflächen (c) gegenüber der Referenzquadratmethode je Teileinzugsgebiet (b) zu keinem Gütegewinn in der Kalibrierung führt. Aus dem Vergleich der groben und detaillierten Modellstruktur wird zudem deutlich, dass die Ganglinienübereinstimmung ($E2$) für M65 und somit auch die Volumentreue (VOL) für das grobe Modell (a) durch die Kalibrierung besser erreicht werden als für das detaillierte Modell (b,c).

4 Schlussfolgerungen

Die ermittelten x_k -Werte aus der N-A-Bilanzierung drücken die Abweichung der erhobenen gegenüber den tatsächlichen befestigten und angeschlossenen Flächen aus. Sie geben so bereits durch die Auswertung der Messdaten an, welche Güte ein hydrologisches N-A-Modell unkalibriert voraussichtlich erreichen kann. Die Güte des Modells wird dabei im Wesentlichen von der abstrahierten Systemstruktur und der Unsicherheit der Eingangsdaten beeinflusst. Sie ist aber auch durch den gegebenen Rahmen des Modellkonzepts und dessen Unsicherheiten beeinflusst. Mit den hier aufgebauten räumlich gering und höher aufgelösten Modellen wurden aus der Auto-Kalibrierung und der manuellen Kalibrierung, gestützt durch die N-A-Bilanzierung, vergleichbare Kalibriererfolge erzielt. Eine Auto-Kalibrierung muss also nicht immer zu besseren Ergebnissen führen als eine manuelle Kalibrierung.

Es ist nicht erforderlich Unsicherheiten aus dem Modellierungsprozess mit Zahlenwerten zu belegen, um diese bei der Ergebnisbewertung adäquat zu berücksichtigen, jedoch sollten alle möglichen Unsicherheitsquellen benannt werden. Diese (selbst-) kritische Darstellung der Ergebnisse durch den Modellanwender ermöglicht es, deren Gültigkeit einzuordnen. In diesem Zusammenhang darf von manuellen und automatischen Kalibriermethoden nicht erwartet werden, dass diese in der Lage sind bestehende Unsicherheiten vollständig zu kompensieren. Für die Validierung der Eingangsdaten, der Modellergebnisse und auch als Unterstützung der Kalibrierung können N-A-Bilanzen verwendet werden.

Je nach Modellkonzept und Auswahl der Kalibrierparameter sowie Zielfunktionen für den Optimierungsalgorithmus zur Auto-Kalibrierung können auch Ergebnisse erzielt werden, die keine eindeutigen Zusammenhänge wiedergeben. Bei der Auswahl von Parametern, mit denen ein Modell kalibriert werden soll, ist nicht nur auf deren (lokale) Sensitivität zu achten, sondern auch auf die gegenseitige Beeinflussung mehrerer Parameter untereinander (global). Im Zuge der Auswertung von Ergebniswerten für ein Parameterset aus einer (Auto-) Kalibrierung sollten äquifinale Lösungen auf ihre Plausibilität hin geprüft werden, insbesondere bei der Kalibrierung mit Einzelereignissen.

Ein zusätzlicher visueller Vergleich der gemessenen und simulierten Abflussganglinien sollte die Bewertung des Kalibriererfolges ergänzen. Obwohl die visuelle Prüfung einen subjektiven und nicht reproduzierbaren Einfluss hat, ist Expertenwissen ein wichtiges zusätzliches Bewertungskriterium. Die verwendeten objektiven Abweichungsmaße konnten insbesondere für moderate Ereignisse nicht alle relevanten Abweichungen erkennen. Es sollte daher für jede Modellanwendung, z. B. Langzeitsimulation oder Einzelereignisbetrachtung, entschieden werden, welche Abweichungen im Fokus der Kalibrierung stehen.

5 Ausblick

Messdaten sind insbesondere für die Validierung und Kalibrierung von Modellen unverzichtbar, da nur sie einen Eindruck des tatsächlichen Systemverhaltens wiedergeben können. Dafür ist es erforderlich, die Messdaten selbst zu plausibilisieren und zu korrigieren, wenn Messfehler oder -abweichungen festgestellt werden. Es sollte daher untersucht werden, welche Möglichkeiten der Messdatenauswertung zu welchen Erkenntnissen über das Systemverhalten führen. Außerdem sollte untersucht werden, wie die Messdatenvalidierung die Qualität einer Modellierung beeinflusst.

Danksagung

Die Autoren danken dem Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg für die Förderung der Arbeit im Rahmen des Forschungsprojekts „Nutzung der gemessenen Entlastungsaktivität von Regenüberlaufbecken zur Erfolgskontrolle und zur verbesserten Systemplanung“ und Herrn Henrichs für die Unterstützung mit der Forschungssoftware KALIMOD sowie Herrn Koschuchow für die Unterstützung bei der Flächenermittlung.

Literatur

- Del Giudice, D., Reichert, P., Bareš, V., Albert, C., Rieckermann, J. (2015): Model bias and complexity – Understanding the effects of structural deficits and input errors on runoff predictions. *Environmental Modelling & Software* 64, 205–214. 10.1016/j.envsoft.2014.11.006.
- Deletic, A., Dotto, C.B.S., McCarthy, D.T., Kleidorfer, M., Freni, G., Mannina, G., Uhl, M., Henrichs, M., Fletcher, T.D., Rauch, W., Bertrand-Krajewski, J.L., Tait, S. (2012): Assessing uncertainties in urban drainage models. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 42-44, 3–10. 10.1016/j.pce.2011.04.007.

- DWA, 2021. Niederschlag-Abfluss- und Schmutzfrachtmodelle in der Siedlungsentwässerung – Teil 1: Anforderungen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef DWA-M 165-1, 100 Seiten.
- Henrichs, M. (2015): Einfluss von Unsicherheiten auf die Kalibrierung urbanhydrologischer Modelle. Dissertation. Technische Universität Dresden, Fakultät für Umweltwissenschaften, Dresden, Münster.
- itwh, 2020. KOSIM: KOntinuierliches-Langzeit-SImulationsModell - Version 7.5.9. Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie GmbH. <https://itwh.de/de/release-notes/hystem-extran-kosim-version-7-5/>.
- Kleidorfer, M. (2009): Uncertain calibration of urban drainage models: A scientific approach to solve practical problems. Dissertation. Leopold Franzens Universität Innsbruck, Arbeitsbereich Umwelttechnik, Innsbruck.
- RStudio Team, 2020. RStudio: Integrated Development for R - Version 1.3. RStudio PBC. <http://www.rstudio.com/>.
- Salvadore, E., Bronders, J., Batelaan, O. (2015): Hydrological modelling of urbanized catchments: A review and future directions. *Journal of Hydrology* 529, 62–81. 10.1016/j.jhydrol.2015.06.028.
- Schmitt, T.G., Becker, M., Flores, C., Pfeiffer Ekkehard, Sitzmann, D., Uhl, M. (2008): Modellkalibrierung zur Qualitätssicherung von Kanalnetzrechnungen. *Korrespondenz Abwasser, Abfall (KA)* 55 (12), 1306–1312.

Korrespondenz:

Karim Sedki, M. Sc.

Technische Universität Kaiserslautern
Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft
Paul-Ehrlich-Str. 14, Raum 14-307

+49 (0) 631 205 3826

karim.sedki@bauing.uni-kl.de

Ein immissionsbasiertes Bewertungstool zur Berechnung des Potentials und zur konkreten Planung des Anschlusses urbaner Flächen an die Trennkanalisation

M. Zamzow¹, W. Seis¹, B. Hörnschemeyer², A. Matzinger¹

1 Kompetenzzentrum Wasser Berlin (KWB)

2 Institut für Infrastruktur·Wasser·Ressourcen·Umwelt (IWARU), FH Münster

Kurzfassung: Regenwassereinleitungen in urbane Fließgewässer können zu einer stofflichen Belastung führen. Um diese potentielle Belastung abzuschätzen und bei Neuplanungen zu berücksichtigen, wurden in der hier vorgestellten Arbeit (i) existierende Messungen zur stofflichen Belastung des Niederschlagsabflusses, (ii) Umweltqualitätsnormen, (iii) Stadtstrukturcharakteristika und (iv) Regendaten verknüpft. Die vereinfachte Auswertung zeigt zum einen, dass einige (geregelt) Schadstoffe bereits bei geringen Einleitmengen zur Überschreitung von Umweltqualitätsnormen führen können. Zum anderen kann der Verzicht auf schadstoffhaltige Baustoffe bei der Neuplanung diese Belastung deutlich reduzieren. Der Bewertungsansatz steht auch als R-Paket frei zur Verfügung.

1 Einleitung

Im Rahmen des BMBF-Verbundvorhabens „RessourcenPlan im Quartier“ (R2Q) wurde ein ganzheitliches Instrument zum effizienten Einsatz von Ressourcen, u.a. Regenwasser, bei der Bewirtschaftung eines Quartiers entwickelt (Hörnschemeyer et al., 2021). Der RessourcenPlan (RP) sieht zwei Schritte vor. Einerseits die „Aufstellung des RP“, bei der für ein Planungsgebiet Problem- und Zielstellungen identifiziert werden. Andererseits die „Anwendung des Ressourcenplans“ die eine (Neu-)Planung unter Berücksichtigung dieser Zielstellungen erlaubt. Ein Teil des RP bezieht sich auf die Vermeidung stofflicher Belastungen durch Regenwasserabfluss, der über die Trennkanalisation in Oberflächengewässer geleitet wird. Der Regenwasserabfluss aus urbanisierten Gebieten kann erhebliche Schadstoffmengen beinhalten (Wicke et al., 2021), die das Ökosystem in den Oberflächengewässern beeinträchtigen können. Das Merkblatt DWA-M 102-3 (DWA, 2021) bewertet deshalb die Gewässerbelastung durch Regenwasserabfluss im Trennsystem, mit der Feinfraktion der abfiltrierbaren Stoffe (AFS63) als Indikatorparameter. Im Rahmen von R2Q wurde ein an das Merkblatt DWA M102-3 angelehnter, um geregelte Schadstoffe erweiterter Ansatz für die Aufstellung und die Anwendung des RP entwickelt. Diese Immissionsabschätzung wurde als Open Source R-Paket umgesetzt und steht auf der Plattform Github zum Download zur Verfügung (<https://github.com/KWB-R/r2q>). Neben der stofflichen Immissionsabschätzung beinhaltet das R-Tool außerdem eine hydraulische Bewertung, die ebenfalls auf dem Merkblatt DWA M102-3 basiert. Es wird in den kommenden Jahren im Rahmen des EU Projekts AD4GD um die Immissionsabschätzung kleiner stehender Gewässer erweitert.

2 Aufbau des Bewertungstools

2.1 Auswahl der betrachteten Stoffe

Ein umfangreicher Berliner Datensatz von Wicke et al. (2021, b) (<https://doi.org/10.5281/zenodo.4631696>) zu Schadstoffkonzentrationen im Regenwasserabfluss fünf unterschiedlicher Stadtstrukturtypen wurde genutzt, um relevante Schadstoffe zu identifizieren, deren Schadstoffquellen zu beschreiben und die Schadstoffkonzentration im Regenwasserabfluss der Flächen abzuschätzen. Um auf Quartiersebene relevante Schadstoffe zu identifizieren, wurden

Schadstoffkonzentrationen im Regenwasserabfluss mit Umweltqualitätsnormen (UQN, v.a. OGewV, 2016) verglichen. Abbildung 1 zeigt das Mischungsverhältnis zwischen unbelastetem Flusswasser und dem Regenwasserabfluss urbaner Einzugsgebiete, bei dem die UQN im Gewässer gerade eingehalten werden. Neben einigen polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffeb (PAK) sind vor allem die gelösten Schwermetalle Zink und Kupfer, sowie Phosphor und das Biozid Mecoprop relevant; AFS63 und das Phthalat DEHP dagegen nur bei sehr ungünstigen Mischungsverhältnissen.

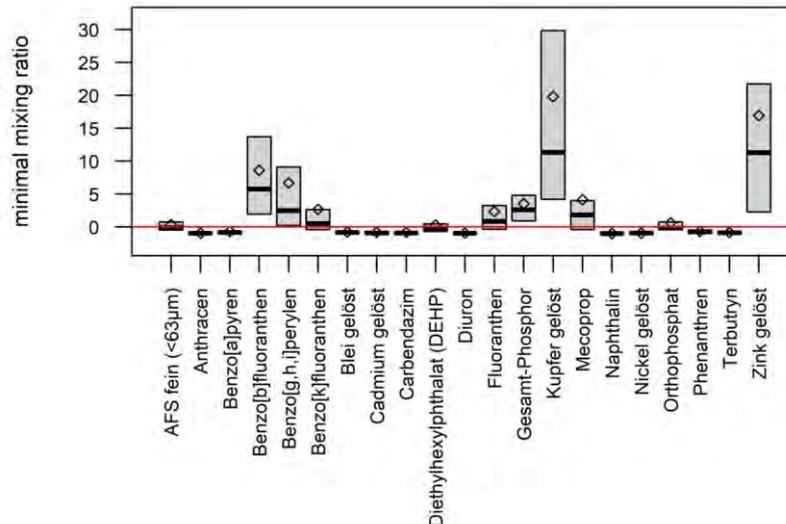


Abbildung 52: Minimales Mischungsverhältnis Flusswasser/Regenwasser zur Einhaltung des Gewässergrenzwerts.

2.2 Zuordnung von Schadstoffen zu Quellen

Die Immissionsabschätzung im RP basiert auf einer Zuordnung von Schadstoffen zu erwarteten Quellen. Eine Fläche wird als Schadstoffquelle definiert, wenn die Schadstoffkonzentration im Regenwasserabfluss oberhalb des angesetzten Grenzwertes liegt.

Für eine erste Einschätzung des Ist-Zustandes im Rahmen der Aufstellung des Ressourcenplans werden nur grobe Stadtstrukturtypen unterschieden, basierend auf den aus dem Berliner Datensatz abgeleiteten Stadtstrukturen (Industrie/Gewerbe, Wohngegend Stadtrand, Wohngegend Innenstadtbereich, Hauptverkehrsstraße). Dabei handelt es sich um typische Stadtstrukturen ohne Unterscheidung nach Gebäuden, Höfen und Straßen (mit Ausnahme von großen Hauptverkehrsachsen). Tabelle 1 zeigt die berechneten Mittelwerte und 90%-Quantile für die wichtigsten Stoffe.

Tabelle 17: Median und 95%-Quantil Konzentrationen einiger relevanter Schadstoffe im Regenwasserabfluss der Stadtstrukturtypen

Substanz	Einheit	Wohngegend Stadtrand		Wohngegend Innenstadtbereich		Gewerbe-/ Industriegebiet		Hauptverkehrsstraße	
		Median	Q95	Median	Q95	Median	Q95	Median	Q95
Benzo(b)fluoranthren	ug/L	0,057	0,16	0,098	0,43	0,16	0,34	0,34	0,61
Benzo(g,h,i)perylen		0,013	0,07	0,025	0,22	0,044	0,15	0,11	0,31
Benzo(k)fluoranthren		0,01	0,057	0,022	0,21	0,032	0,2	0,11	0,46
Fluoranthren	mg/L	0,081	0,32	0,18	1,4	0,34	0,98	0,76	2,9
Gesamt-Phosphor		0,45	1,1	0,36	0,96	0,22	0,76	0,58	1,8
Orthophosphat		0,14	0,43	0,04	0,22	0,03	0,21	0,04	0,084

Mecoprop		0,2	1,3	0,44	2,1	0,16	0,98	0,02	0,02
Kupfer gelöst	ug/L	50	100	14	61	110	150	14	28
Zink gelöst		200	400	270	550	960	2500	100	200

Für die Detailplanung im Rahmen der Anwendung des RP wurde davon ausgegangen, dass deutlich genauere Informationen zum Planungsgebiet vorliegen. Neben der Ableitung von Schadstoffkonzentrationen im Abfluss von Quellen, wurde der Belastungsgrad für die Planung auch in eine semi-quantitative Skala zwischen 1 und 3 übersetzt. Eine Bewertung von 1 bedeutet dabei eine 1 bis 5-fache, eine Bewertung von 2 bedeutet eine 5 bis 10-fache und eine Bewertung von 3 bedeutet eine mehr als 10-fache Schadstoffkonzentration im Regenwasserabfluss verglichen mit dem Gewässergrenzwert. Die Ableitung von Schadstoffquellen und deren Regenwasserabflusskonzentration unter Verwendung des Berliner Datensatzes soll im Folgenden an einigen Beispielen gezeigt werden.

Der Einfluss des Verkehrsaufkommens in einem Gebiet wurde anhand der abflussgewichteten KFZ-Rate (in KFZ/15 min) betrachtet. Da davon auszugehen ist, dass sich bei immer stärkerem Verkehrsaufkommen die Konzentration eines KFZ-spezifischen Schadstoffes einem Maximum annähert, wurde die KFZ-Rate vor der Regressionsanalyse logarithmiert. Abbildung 2 zeigt den Anstieg von Benzo(k)fluoranthen (PAK) mit steigendem Verkehrsaufkommen. Es sind sowohl Einzelmesswerte wie auch die Mittelwerte pro Einzugsgebiet aufgetragen. Obwohl es innerhalb der EZG zu großen Schwankungen kommt, zeigen die Mittelwerte mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,96 einen starken linearen Zusammenhang.

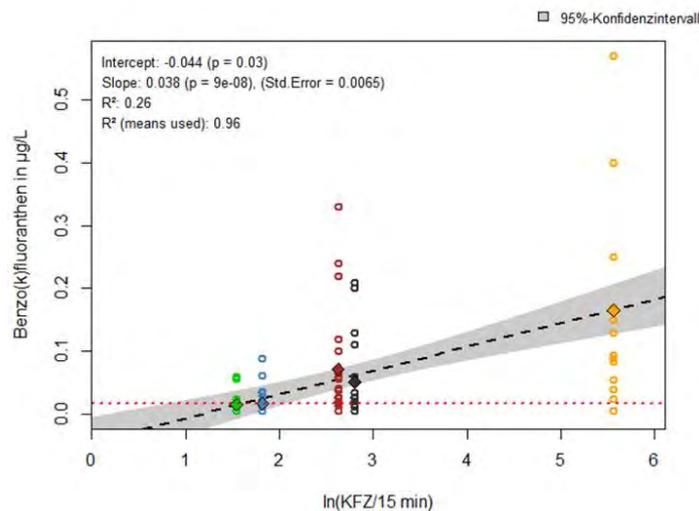


Abbildung 2: Zusammenhang zwischen logarithmierter KFZ-Rate und der Konzentration des PAK Benzo(k)fluoranthen im Regenwasserabfluss unterschiedlicher Einzugsgebiete. Die gefüllten Rauten zeigen den Mittelwert, die Kreise zeigen die Einzelmesswerte.

Im Gegensatz zu PAK konnte zwischen der Phosphorkonzentration und der Verkehrsdichte ein umgekehrt proportionaler Zusammenhang gezeigt werden. Abbildung 3 zeigt dies anhand der Gegenüberstellung mit dem durchflussproportionalen Anteil wenig befahrener Straßen. Eine maximale Konzentration von 1,9 mg/L im Straßenabfluss von wenig befahrenen Straßen wurde auf dieser Grundlage extrapoliert.

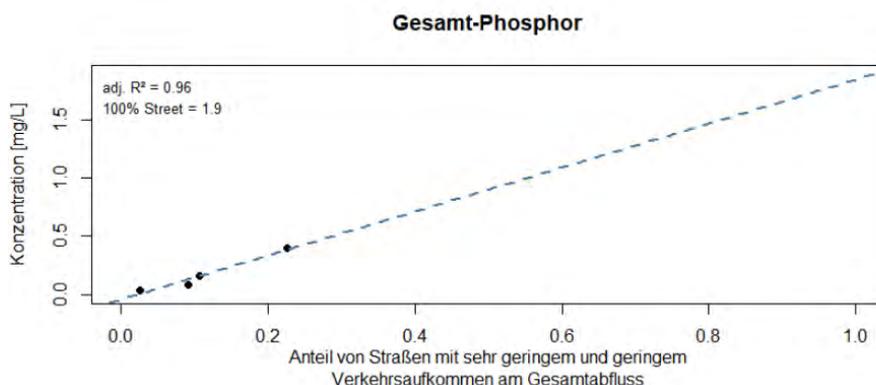


Abbildung. 3: Zusammenhang zwischen dem Anteil verkehrsarmer Straßen in einem EZG und der Phosphorkonzentration im Regenwasserabfluss.

Für Zink konnte ein Zusammenhang zwischen dem Anteil von Zinkdächern und der Abflusskonzentration im Einzugsgebiet hergeleitet werden. Darüber hinaus gibt es an Gebäuden und im Straßenabfluss weitere Zinkquellen, die über eine Bilanzrechnung, bzw. das reine Straßengebiet abgeschätzt wurden. Das gleiche galt für Kupfer. Mecoprop kann als Biozid auf Dächern eingesetzt werden. Ein direkter Zusammenhang zu Dächern mit potentieller Mecopropanwendung konnte nicht hergestellt werden. Stattdessen wurde eine mittlere Konzentration für alle in Frage kommenden Dacharten abgeschätzt.

Tabelle 2 zeigt die semi-quantitative Bewertung aller berücksichtigten Schadstoffgruppen.

Tabelle 2: Schadstoffquellen mit semi-quantitativen Indizes sowie deren Herleitung

Schadstoff	Verkehrsrate < 300 KfZ/d	Verkehrsrate 300 - < 2000 KfZ/d	Verkehrsrate 2000 - < 15 000 KfZ/d	Verkehrsrate > 15 000 KfZ/d	Zinkdach	Kupferdach	Kiesdach	Bitumen, Gründach,	Dach Allgemein	Hofflächen	Gebäude	Quotient aus Schadstoffkonzentration im Regenwasserabfluss der Quelle und Grenzwert im Gewässer: Kleiner als 1 → Bewertung = 0 Zwischen 1 und 5 → Bewertung = 1 Zwischen 5 und 10 → Bewertung = 2 Größer als 10 → Bewertung = 3
AFS (< 63 µm)	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	* Kann auf 0 gesetzt werden, wenn Verwendung ausgeschlossen ** Kann 0 gesetzt werden, wenn nicht in verkehrsreicher Umgebung
PAK	1**	2	3	3	1**	1**	1**	1**	1**	1**	1**	
DEHP	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	
Nährstoffe	3	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
Zink	1	1	1	1	3	0	0	0	0	0	1*	
Kupfer	2	2	2	2	0	3	0	0	0	0	3*	
Mecoprop	0	0	0	0	0	0	3*	0	0	0	0	

Sowohl die vereinfachten (Tabelle 1) wie auch die detaillierten Schadstoffkonzentrationen im Abfluss der Schadstoffquellen (Basisdaten für Tabelle 2) sind im R-Paket als Default-Werte hinterlegt. Sie können aber bei Bedarf manuell angepasst werden.

2.3 Bewertung des Ist-Zustands (Aufstellung des Ressourcenplans)

Bei der Aufstellung des RP wird der Ist-Zustand im Quartier beschrieben. Hierzu werden Daten zur Gewässerqualität, zur Niederschlagscharakteristik und zur bestehenden Stadtstruktur miteinander kombiniert. Die Zuordnung erfolgt nicht Gebäudescharf sondern großflächig, entlang der Stadtstrukturtypen in Tabelle 1. Der ortsspezifische Stadtstrukturmix bestimmt die Schadstoffkonzentration im Regenwasserabfluss. Bei der Bewertung anhand akuter UQN (PAK, DEHP, Schwermetalle und Mecoprop) wird in Anlehnung an das Merkblatt DWA M102-3 ein einjähriges Niederschlagsereignis verwendet, bei dem sich die Niederschlagsdauer an der Fließzeit des Gewässers

durch das betrachtete Stadtgebiet orientiert. Das Fließgewässer wird innerhalb des Stadtgebiets vereinfacht als perfekt durchmischter Reaktor betrachtet. Es wird eine maximal einleitbare Schadstofffracht über die Dauer des Niederschlags berechnet, bei der die UQN im Gewässer nicht überschritten wird. Für die Bewertung mit jährlichen UQN (Phosphor und AFS₆₃) wird der durchschnittliche Jahresniederschlag als Grundlage verwendet und eine maximal jährliche Fracht bestimmt. Aus den Frachten kann pro Schadstoff eine maximal anschließbare Fläche bei definiertem Stadtstrukturmix abgeleitet werden. Der Vergleich mit der aktuell (oder zukünftig) angeschlossenen Fläche erlaubt eine erste Einschätzung, ob Überschreitungen der UQN während Niederschlagsereignissen erwartet werden.

2.4 Bewertung von Planszenarien (Anwendung des Ressourcenplans)

Die Anwendung des RP kann direkt mit den Ergebnissen des Ist-Zustands und der Semi-Quantitativen Bewertung der Schadstoffquellen erfolgen. So können bei der Detailplanung Schadstoffquellen kritischer Stoffe vermieden werden oder es kann auf den Anschluss kritischer Flächen verzichtet werden. Neben einer Verringerung der anschließbaren Flächen kommt eine Behandlung des Regenwasserabflusses zur Senkung der Schadstoffkonzentration bzw. Drosselung zur Reduzierung der Abflussrate als alternative Lösungen in Frage. Im Rahmen der Detailplanung ist es auch möglich mit Hilfe des R-Tools die Schadstofffracht aus dem Planungsgebiet unter verschiedenen Anschlusszenarien zu berechnen und den tolerierbaren Schadstofffrachten des Ist-Zustandes gegenüberzustellen. Die Angabe zur Detailplanung beinhaltet neben den geplanten anzuschließenden Flächen optional die Konzentrationsreduzierung durch Behandlungsanlagen für einzelne Schadstoffgruppen. Jede Fläche wird in die Typen "Gebäude", "Hof" oder "Straße" eingeteilt und anschließend weiter charakterisiert (Abbildung 4, Tabelle 2). Für Wohngebäude ist die Dachart, die Gebäudeart und das umliegende Verkehrsaufkommen maßgeblich. Für Höfe und Straßen ist der KFZ-Verkehr die entscheidende Einflussgröße, wobei die Differenzierung für den Straßenabfluss genauer ist.

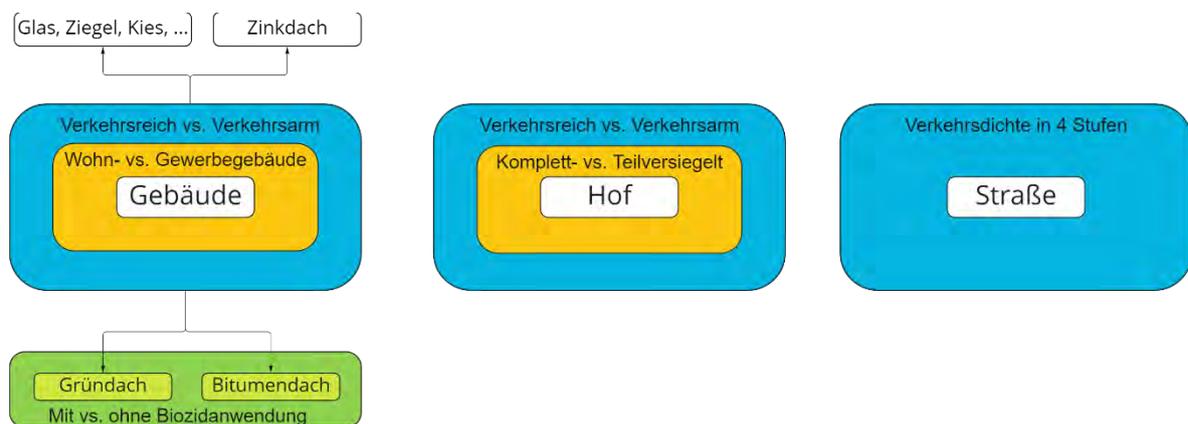


Abb. 4: Flächendefinition im Rahmen der Detailplanung

3 Beispielhafte Anwendung des Bewertungstools

3.1 Aufstellung des Ressourcenplans für Herne Baukau

In Herne wird eine ca. 10 ha große Brachfläche im Stadtteil Baukau neu gestaltet. Durch das Quartier Herne Baukau fließt der Ostbach als potentiell aufnehmendes Gewässer des Regenwasserabflusses. Er entspringt kurz oberhalb des Quartiers, läuft dann ca. 5 km durch das Stadtgebiet und führt durchschnittlich 0,04 m³/s Wasser. Herne Baukau besteht zum Großteil aus Stadtrandwohngegend mit

hohem Grünflächenanteil (40%), besitzt Gewerbe- und Industriegebiete (10%) und Wohngegend mit Innenstadtcharakter (25%). Zwischen den definierten Strukturtypen verlaufen häufig Hauptverkehrsstraßen die insgesamt einen Anteil von 3% ausmachen. Die restlichen 22% sind Flächen ohne Abfluss (z.B. größere Parkanlagen oder Kleingartenkolonien). Bisher sind alle abflusswirksamen Flächen an eine Mischkanalisation angeschlossen. Abbildung 5 zeigt beispielhaft die Zuordnung der Stadtstrukturtypen (Industrie/Gewerbe, Wohngegend Stadtrand, Wohngegend Innenstadtbereich, Hauptverkehrsstraße) in einem Ausschnitt aus Herne Baukau.

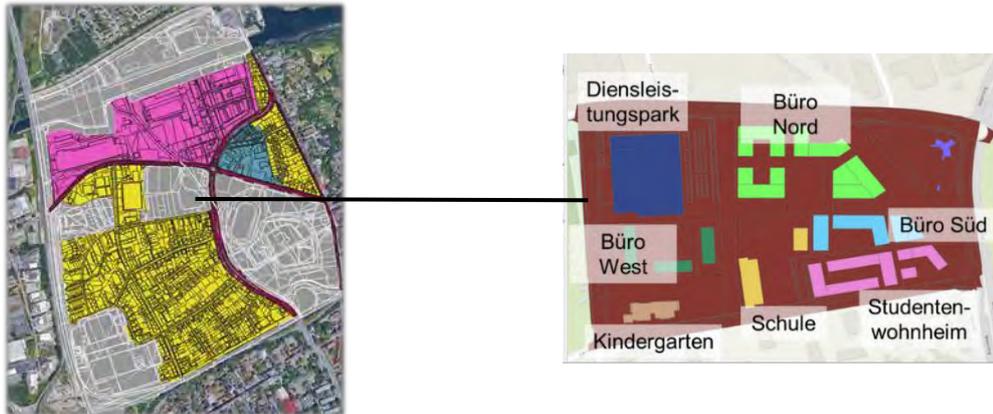


Abbildung 5: Auszug des Quartiers Herne Baukau mit Zuordnung der Stadtstrukturtypen Industrie/Gewerbe (pink), Einfamilienhaus (gelb), Innenstadtbereich (blau), Hauptverkehrsstraße (rot) und Flächen ohne Abfluss (grau) sowie Detailkarte des Planungsgebiets

Die Analyse des Ist-Zustands ergab, dass einige PAK, Mecoprop, Phosphor sowie die gelösten Schwermetalle Zink und Kupfer den Anschluss der Flächen im Stadtgebiet einschränken. Sie würden, ebenso wie die hydraulische Belastung im Falle eines Anschlusses aller versiegelten Flächen zu einer Überlastung des Ostbachs führen. Abbildung 6 zeigt die an eine Trennkanalisation anschließbare Fläche bezogen auf die vorhandene abflusswirksame Fläche im gesamtem Stadtgebiet pro Schadstoff. Da bisher sämtliche Stadtgebietsflächen an eine Mischkanalisation angeschlossen sind, besteht die Möglichkeit im Planungsgebiet, das nur 3% der Stadtfläche ausmacht, einen höheren Anteil der Flächen über eine Trennkanalisation abzuleiten. Wird die anschließbare Fläche ausschließliche auf das Planungsgebiet verteilt, wären dadurch nur noch die gelösten Schwermetalle kritisch. Der Anschluss des gesamten Planungsgebiets würde jedoch zukünftige Planungen in Baukau für alle Stoffe in Abb. 6

einschränken.

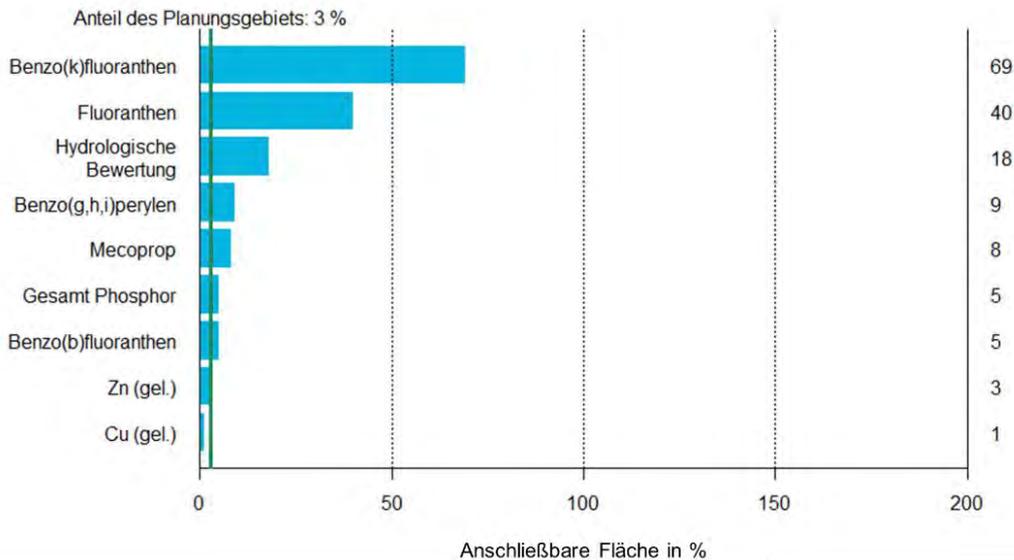


Abbildung. 6: An eine Trennkanalisation anschließbare Fläche, ohne dass die Einleitung des Regenwasserabflusses zu einer Überschreitung der UQN im Gewässer führt (in Prozent bezogen auf die zurzeit an eine Mischkanalisation angeschlossene Fläche).

3.2 Beispielhafte Planszenarien für Herne Baukau

Für die Detailplanung ergeben sich zwei mögliche Zielgrößen: Die tolerierbare Schadstofffracht aus dem Planungsgebiet

1. entspricht der tolerierbaren Schadstofffracht des gesamten Stadtgebiets, da sonst keine weiteren Flächen angeschlossen werden,
2. beträgt maximal 3% der Schadstofffracht aus dem gesamten Stadtgebiet (entsprechend des Flächenanteils des Planungsgebietes) und schränkt somit keine zukünftigen Planungen ein.

Für das Planungsgebiet in Herne Baukau wurden unter Variation der angeschlossenen Flächen sowie der Behandlung des Regenwasserabflusses verschiedene hypothetische Szenarien gerechnet und mit beiden Zielgrößen verglichen. Das Planungsgebiet ist insgesamt ca. 10 ha groß und soll mit mehreren Bürogebäuden, einer Schule, einem Kindergarten, einem Studentenwohnheim und einem Dienstleistungspark bebaut werden (Abbildung 5). Darüber hinaus gibt es Überlegungen auch die angrenzenden Straßen an eine Trennkanalisation anzuschließen. Drei Szenarien, bei denen sämtliche Dächer und teilweise die angrenzenden Straßen des Planungsgebiets angeschlossen werden, werden vorgestellt. In Szenario 1 handelt es sich dabei um Bitumendächer. Außerdem werden alle vier umgebenden Straßen angeschlossen. In Szenario 2 werden anstelle der Bitumendächer Gründächer angelegt und es wird nur die viel befahrene, östlich verlaufende Straße angeschlossen. In beiden Fällen wird von einer vorliegenden oder unbekanntem Herbizidimprägung ausgegangen. Szenario 3 entspricht bezüglich der angeschlossenen Flächen Szenario 2, jedoch wird bei den Gründächern auf eine Biozidanwendung explizit verzichtet, die Gebäude werden zudem weitestgehend ohne außenliegende Kupferbauteile gebaut, und der Straßenabfluss wird mit einem Retentionsbodenfilter behandelt.

Bei den Szenarien 2 und 3 liegen die Frachten für sämtliche Schadstoffe aus dem Planungsgebiet unterhalb der tolerierbaren Frachten aus dem Stadtgebiet. Die Umsetzung wäre damit möglich, sofern keine weiteren Flächen aus dem Stadtgebiet angeschlossen werden sollen (Tabelle 3). Bei Szenario 1

ist die Kupferkonzentration im Regenwasserabfluss so hoch, dass es zu einer Überschreitung der Grenzwert im Gewässer kommen könnte.

Tabelle 3: Anteil der Schadstofffracht aus dem Planungsgebiet an der tolerierbaren Fracht aus dem gesamten Stadtgebiet für die drei Szenarien und ausgewählte Stoffe

Szenario			Benzo(b)-fluoranthen	Fluoranthren	Gesamt Phosphor	Kupfer (gel)	Mecoprop	Zink (gel)
Nr	Dachflächen	Straßen						
1	Bitumen	angeschlossen	65%	11%	30%	141%	65%	13%
2	Begrünt	Nur östliche Straße angeschlossen	7%	2%	2%	62%	36%	4%
3	Begrünt ohne Herbizide und Kupferteile	Nur östliche Straße angeschlossen, über RBF	2%	1%	2%	3%	0%	3%

Im Falle einer auf das Planungsgebiet herunterskalierten Schadstofffracht überschreiten die Schadstoffkonzentrationen beider Szenarien 1 und 2 teilweise deutlich die tolerierbare Fracht (Tabelle 4). Durch die geringere Anzahl angeschlossener Straßen und den Austausch der Bitumendächer mit Gründächern kann die Fracht der PAK bereits deutlich reduziert werden. Jedoch führt erst der zusätzlich eingeplante Retentionsbodenfilter im Straßenabfluss zu einer ausreichenden Abflussqualität. Auch die Mecopropfracht wird bereits durch die Verwendung von Gründächern reduziert, da sie das Gesamt-abflussvolumen verringern. Werden im Planungsgebiet jedoch mehrere Dächer mit Bioziden behandelt führt das trotzdem zu einer deutlichen Überbelastung des Ostbachs. Trotz des weitgehenden Verzichts von Kupferbauteilen, liegt die eingeleitete Kupferfracht aus dem Planungsgebiet höher als 100% bezogen auf die Zielgröße. Ähnlich problematisch ist die Situation bei Zink. Die große Differenz zwischen den Schwermetallen im Regenwasserabfluss (Bsp.: Kupfer 50 µg/L im Regenwasserabfluss des Stadtstrukturtyps "Wohngebiet Stadtrand") und dem angesetzten Grenzwert im Gewässer (Bsp.: Kupfer 2,4 µg/L UQN-Vorschlag von Wenzel et al., 2015) in Kombination mit dem geringen natürlichen Abfluss sowie einer bereits hohen Vorbelastung (Bsp. Kupfer 1,49 µg/L) des Ostbachs in Herne Baukau führt zu dieser sensiblen Situation.

Tabelle 4: Anteil der Schadstofffracht aus dem Planungsgebiet an der herunterskalierten tolerierbaren Schadstofffracht

Szenario			Benzo(b)-fluoranthen	Fluoranthren	Gesamt Phosphor	Kupfer (gel)	Mecoprop	Zink (gel)
Nr	Dachflächen	Straßen						
1	Bitumen	angeschlossen	3198%	551%	1456%	6946%	3205%	658%
2	Begrünt	Nur östliche Straße angeschlossen	354%	89%	117%	3040%	1782%	174%
3	Begrünt ohne Herbizide und Kupferteile	Nur östliche Straße angeschlossen, über RBF	75%	34%	97%	159%	0%	130%

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

- Das R-Tool erlaubt eine rasche Analyse für möglicherweise problematische Schadstoffe aus Regenwasserabfluss im Trenngebiet für lokale urbane Fließgewässer. Es wird aktuell im Projekt AD4GD um stehende Kleingewässer erweitert.
- Eine semi-quantitative Bewertung von Schadstoffquellen im Quartier kann eine Grundlage für die Planung der Regenwasserbewirtschaftung aus stofflicher Sicht bilden und ermöglicht eine Einordnung gegenüber anderer Planungsziele.

- Konkrete Szenarien können für ein Planungsgebiet durchgerechnet und verglichen werden.
- Eine erste Anwendung zeigt, dass einige (geregelt) Schadstoffe bereits bei geringen Einleitmengen zur Überschreitung von UQN führen können. Es ist davon auszugehen, dass dies bei zahlreichen kleinen urbanen Fließgewässern der Fall ist.
- Die Anwendung beschränkt sich auf Stoffe für die UQN in Regelwerken oder konkreten Vorschlägen vorliegen. Dies schließt diverse im Regenwasserabfluss vorliegende Stoffe aus (z.B. Nikotin aus Zigarettenkippen), was nicht bedeutet, dass diese keine Relevanz haben.

5 Danksagung

Ein besonderer Dank gilt dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die finanzielle Förderung des Verbundvorhabens "RessourcenPlan im Quartier" (R2Q) (Förderkennzeichen 033W102) und der EU für die Förderung des Projektes AD4GD (HORIZON-CL6-2021-GOVERNANCE-01-17). Weiter bedanken wir uns bei der Stadt Herne für die sehr gute Zusammenarbeit, sowie Michael Rustler und Hauke Sonnenberg für die Unterstützung der Tool-Entwicklung.

6 Literatur

- DWA (2021) Merkblatt DWA-M 102-3 - Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer - Teil 3: Immissionsbezogene Bewertungen und Regelungen - Oktober 2021.
- Hörnschemeyer, B., Matzinger, A. et. al (2021) Der RessourcenPlan ein Instrument zur ressourceneffizienten, wasserwirtschaftlichen Quartiersentwicklung, p. 5 *In Aqua Urbanica 2021*. Innsbruck, Austria.
- OGewV: Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer vom 20. Juni 2016.
- Wenzel, D.A., Schlich, D.K., Shemotyuk, B.L. (2015). Revision der Umweltqualitätsnormen der Bundes-Oberflächengewässerverordnung nach Ende der Übergangsfrist für Richtlinie 2006/11/EG und Fortschreibung der europäischen Umweltqualitätsziele für prioritäre Stoffe, Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- Wicke, D., Matzinger, A., Sonnenberg, H., et. al (2021) Micropollutants in Urban Stormwater Runoff of Different Land Uses. *Water* 13 (9).
- Wicke, D., Matzinger, A., Sonnenberg, H., et. al. (2021, b). Organic micropollutants and heavy metals in stormwater runoff of five different catchment types in Berlin (Germany). DOI: <https://doi.org/10.3390/w13091312>

Korrespondenz:

Malte Zamzow
 Kompetenzzentrum WasserBerlin (KWB)
 malte.zamzow@kompetenz-wasser.de

RICHI™ - der virtuelle Kanalnetzmitarbeiter zur Verbesserung der Datenqualität, des Unterhalts und des Betriebs

Andy Disch¹, Fabian Bodenlenz², Frank Lükewille³, Claudio Manz⁴, Dilek Akyildiz², David Dürrenmatt², Jörg Rieckermann¹

1 Eawag, Ueberlandstrasse 133, 8600 Dübendorf, Schweiz

2 Rittmeyer AG, Inwilerriedstrasse 57, CH-6341 Baar

3 Abwasserverband Altenrhein, Wiesenstrasse 32, 9423 Thal

4 Hunziker Betatech AG, Pflanzschulstrasse 17, 8400 Winterthur

Kurzfassung: Wir entwickeln den virtuellen Mitarbeiter "RICHI", der in erster Linie das Betriebspersonal unterstützt, indem er i) die Datenqualität, ii) die Infiltration und iii) die Funktionsweise der CSO-Tanks überwacht. Er wird entwickelt, um die mangelnde Datenkompetenz und das mangelnde Systemverständnis zu überwinden, indem er sich wiederholende Aufgaben automatisiert und technisches Fachwissen einbezieht. Für die Kommunikation und Interaktion mit RICHI wird auf eine Bot-Anwendung gesetzt, so dass künstliche Hürden abgebaut oder komplett verhindert werden, womit die RICHI die Effizienz des Personals steigern kann.

Key-Words: Digitalisierung, Cloud-Computing, Messdatenmanagement, Betriebsunterstützung

1 RICHI, der virtuelle Kanalnetzmitarbeiter

“Herr Rohr kommt am Montagmorgen an seinen Arbeitsplatz beim Abwasserverband Saubersee. Er muss für 20 Regenbecken und Pumpwerke von 8 Gemeinden die Funktionsweise sicherstellen, Störfälle beheben und Einsätze planen. Früher hat allein die Fernüberwachung pro Woche 3 Stunden benötigt - eine unbeliebte Arbeit, die schon am Anfang der Woche zu schlechter Stimmung im Team führte. Heute hat der virtuelle Mitarbeiter RICHARD (Rufname: “RICHI”), welcher Tag und Nacht im Einsatz ist, die Analyse der Pumpzyklen, Wasserstände und Leistungsaufnahmen bereits erledigt. Insgesamt fliesst wenig Abwasser, was aber für die Winterferien in Saubersee nicht ungewöhnlich ist. Herr Rohr ist beruhigt. Allerdings hat RICHI auch die 3-monatliche Fremdwasser-Analyse durchgeführt und weist darauf hin, dass von der Gemeinde Sparhausen 20% mehr sauberes Grundwasser ins Netz eindringt als zulässig ist. Das muss Herr Rohr mit seinem Vorgesetzten besprechen. RICHI empfiehlt auch, die Pumpe Nr. 23 mittelfristig zu warten.”

Obwohl Prozessleitsysteme bereits in vielen Kanalnetzen eingesetzt werden um Messdaten zu erfassen, werden solche Daten heute noch nicht automatisiert ausgewertet wie im hypothetischen Abwasserverband Saubersee. Obschon der Wiederbeschaffungswert der Siedlungsentwässerung in der Schweiz mit 65 Mrd. CHF (Peter, 2009) beträchtlich ist. Interessanterweise werden viele Kanalnetze heute bereits detailliert überwacht (Manny et al. 2019). Aber das Potenzial der Daten wird weder für Betriebsoptimierungen noch zur Defizitanalyse ausgeschöpft (Hoppe et al. 2019).

Eine Herausforderung ist vermutlich die geringe Datenkompetenz vieler Mitarbeiter, so dass selbst einfache Analysen als mühsam wahrgenommen werden. Trotz der Empfehlung, dass Betreiber die Daten täglich kontrollieren, werten viele Betreiber Messdaten nicht (13%) oder nur unregelmässig (49%) aus (Manny et al. 2019). Dementsprechend überrascht es nicht, dass nur ca. 1/3 der gesammelten Messdaten plausibel sind (Dittmer et al. 2015; für 300 Anlagen in Baden-Württemberg). Und schlechte

Datenqualität bedeutet mangelnde Betriebskontrolle und fehlende Grundlagen für weitere Planungen (DWA-M 151).

Im RICHARD-Projekt wird aus diesem Grund ein virtueller Mitarbeiter für den Kanalnetzbetrieb entwickelt, der wiederkehrende Auswertungen automatisieren kann, Kennzahlen übersichtlich präsentiert und die Mitarbeiter mit wichtigen Hilfsinformationen unterstützt. Das 2-jährige InnoSuisse-Projekt ist im Sommer 2020 gestartet. In diesem Beitrag möchten wir das Umfeld von RICHI beleuchten.

2 RICHI's Welt

Das häufigste Problem für Betreiber ist, dass sie nicht wissen, wie zuverlässig ihre Messdaten sind. Dies scheint unabhängig davon zu sein, für welchen Zweck die Daten benutzt werden. Ein weiteres Problem, das häufig genannt wird, ist die Fremdwasserbestimmung. Dabei wird unterschieden zwischen den Schwierigkeiten mit temporären Einleitungen und der Infiltration von Regen- oder Oberflächenwasser, welche den Betrieb beeinträchtigen. Mit zunehmendem Alter der Infrastruktur scheinen auch der Aufwand und die Probleme im Betrieb zu steigen. Das Potential ist dabei auf verschiedenen Ebenen vorhanden. Periodische Auswertungen und Berichte würden insbesondere auch den Austausch mit den kantonalen Aufsichtsbehörden erleichtern. Dies soll zum besseren Verständnis des Systemzustandes führen, zum Beispiel durch die systematische Auswertung der Störfallstunden und -häufigkeiten für die Sonderbauwerke.

Aufgrund einer Potentialabschätzung unterstützen die Haupt-Module folgende Aufgaben: i) Kanalnetzbetrieb, z.B. Missstände und Störungen anhand von Daten identifizieren und klassifizieren, die Pumpenwartung unterstützen, erste Einschätzung eines Ereignisses, ii) Fremdwasser, z.B. durch Auswertung von temporären Messungen, Hilfe bei der Bestimmung des Kostenteilers, Unterstützung beim Nachweis von Fremdwasserquellen, iii) Gewässerschutz: Leistung von Regenbecken anhand von verschiedenen Kennzahlen ausweisen. Grundlage für sämtliche Aufgaben bieten dabei von RICHI validierte und verfügbare Daten.

Die präsentierte Digitale Lösung setzt genau da an, wo am meisten Potential für die Erhebung von verlässlichen Betriebsdaten besteht: sie steigert in erste Linie die Effizienz des Betriebspersonal bei der Erhebung der Daten und liefert damit automatisch die nötigen Grundlagen für weiterführende Detailanalysen und Investitionsentscheidungen.

3 Fazit

Wir kommen zu dem Schluss, dass die Lücke bei der Datenkompetenz ernst ist und noch schwieriger zu überwinden sein wird, wenn qualifizierte Arbeitskräfte aufgrund der Überalterung fehlen. Die Automatisierung der sich wiederholenden Aufgaben unterstützt nicht nur hochqualifizierte Mitarbeiter, sondern hilft allen, die nicht programmieren können und nicht vorhaben, ihre Arbeitszeit vor einem Computer zu verbringen. Dazu setzt RICHI auf, anstelle einer klassischen Computerschnittstelle, auf eine flexible Bot-Lösung, die auf Augenhöhe kommuniziert. Wir sind daran die Akzeptanz und Leistung in einem breit angelegten Test mit vielen Bedienern zu validieren.

Das Projekt wurde durch die InnoSuisse gefördert.

4 Literatur

Dittmer, U. et al. (2015) Kenngrößen für die Bewertung des Betriebes von Regenüberlaufbecken, Jahrestagung der Lehrer und Obleute der Kläranlagen- und Kanal-Nachbarschaften des DWA-Landesverbands Baden-Württemberg am 25./26. März 2015

DWA-M 151 - Messdatenmanagementsysteme (MDMS) in Entwässerungssystemen, DWA-M 151 C.F.R. (2014).

- Garbani-Marcantini, L., Cereghetti, G., Muschalla, D., Regneri, M., Schegg, S., Rieckermann, J. (2017). Playing the rain: a chess-based rating algorithm for the performance assessment of real-time control in urban drainage networks (p. (8 pp.)). Presented at the 14th IWA/IAHR International conference on urban drainage (ICUD). Prague: CZWA; CTU.
- Hoppe, H. et al. (2019). Datenbasierte Planungs-, Betriebs- und Vollzugskonzepte zur nachhaltigen Regenwasserbehandlung. In J. Pinnekamp (Ed.), Gewässerschutz - Wasser - Abwasser: Vol. 250. 52.
- Manny, L., Fischer, M., Stauer, P., & Rieckermann, J. (2019). Saubere Gewässer dank Messdatenmanagement. Instrumente für einen guten Umgang mit Messdaten in der Schweizer Siedlungsentwässerung. Aqua & Gas, 99(1), 58-65.
- Peter, M. (2009): Wiederbeschaffungswert der Umweltinfrastruktur. Umfassender Überblick für die Schweiz. Umwelt-Wissen Nr. 0920, Bundesamt für Umwelt (BAFU). Bern.
- Rieckermann, J. et al. (2017): Zukunftsfähige Systeme zur Regenwasserbehandlung brauchen datenbasierte Betriebs-, Planungs- und Vollzugskonzepte, Aqua Urbanica 2017, TU Graz. Graz.

Korrespondenz:

Andy Disch
Überlandstrasse 133, 8600 Dübendorf
+41 79 569 46 87
andy.disch@eawag.ch

Strassenräume entsiegeln und blau-grün gestalten

M. Burkhardt¹, A. Saluz^{2,3}, B. Kulli²

1 OST – Ostschweizer Fachhochschule, Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik (UMTEC),
 Oberseestrasse 10, 8640 Rapperswil, Schweiz

2 ZHAW, Life Sciences und Facility Management, Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen,
 Grüental, 8820 Wädenswil

3 Stadt Zürich, Grün Stadt Zürich, Beatenplatz 2, 8001 Zürich

Kurzfassung: Im Strassenraum bestehen hohe Anforderungen an eine standortgerechte Begrünung und den Rückhalt von Wasser für die Pflanzen, aber auch die genügend schnelle Versickerung und Reinigung von Strassenabwasser. Im Rahmen einer umfassenden Recherche wurden der Wissensstand und die offenen Herausforderungen zusammengetragen, verbunden mit konkreten Handlungsempfehlungen für die Planungspraxis.

Key-Words: Strassenabwasser, Schadstoffe, Bodenfilter, Pflanzgruben, Substrate, Versickerung

1 Hintergrund

Im städtischen Raum nehmen der Strassenverkehr und die versiegelten Verkehrsflächen weiter zu. Nicht nur die oberflächlich abfliessende und versickerbare Menge an Niederschlagsabwasser steigt an, sondern auch die Belastung des Strassenabwassers. Anforderungen an eine multifunktionale Regenwasserbewirtschaftung im verdichteten Siedlungsraum verlangen Lösungen, um beispielsweise Starkniederschläge zu puffern, Trocken- und Salzschäden an Bepflanzungen zu vermeiden, die Aufenthaltsqualität und Biodiversität zu erhöhen, aber auch Stoffeinträge in Grund- und Oberflächengewässer zu vermeiden.

Aufgrund der konkurrierenden Flächenansprüche besteht ein hoher Druck auf Freiflächen, diese sowohl zur Versickerung und Reinigung von Strassenabwasser als auch zur Begrünung zu nutzen und damit die Entwässerung von Verkehrsflächen stärker in eine urbane Regenwasserbewirtschaftung zu integrieren.

Durch die VSA-Richtlinie "Abwasserbewirtschaftung bei Regenwetter", die gesamtschweizerisch anzuwenden ist, sowie kantonale Praxishilfen wird die Versickerung unter Berücksichtigung der Gewässerschutzverordnung ausgelegt. Planer aus Ingenieurbüros, Landschaftsarchitekten und Landschaftsgärtner müssen die Regelwerke bei der Versickerungsplanung beiziehen. Nicht immer ist dies bei Schwammstadt-Projekten zu beobachten.

Der Kanton Zürich verfolgt die blau-grüne Weiterentwicklung des Strassenraums, jedoch entspricht die heutige innerstädtische Strassenentwässerung vielerorts noch nicht diesen Vorstellungen. Zudem sind Anforderungen an den Gewässerschutz bei der Einleitung sowie Versickerung einzuhalten, wobei hierbei auch Wissenslücken zur stofflichen Belastung bestehen.

2 Ziele und Vorgehen

Im Auftrag vom Tiefbauamt (TBA) sowie das Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) des Kantons Zürichs wurden der vorhandene Kenntnisstand im relevanten Forschungsbereich aufgearbeitet und für belastetes Strassen- und Platzabwasser Lösungsvarianten beurteilt. Schwerpunkte bildeten die

Entwässerung und Bepflanzung entlang von Platz- und Strassenverkehrsflächen im innerörtlichen Bereich. Im Fokus standen die stoffliche Belastung von Strassenabwasser, Anforderungen des Gewässerschutzes und grundsätzlichen Eignungskriterien von Böden und Substraten für die Versickerung. Die präferenziellen Fließwege sowie Pflanzenkohle, die Klärung hydraulischer und technischer Eigenschaften bezüglich deren Sicker-, Speicher-, Reinigungsleistung und Tragfähigkeit wurden besonders berücksichtigt. Zusätzlich werden Bepflanzungsvarianten als integrale Elemente einer Regenwasserbewirtschaftung im Strassenraum, insbesondere unter Berücksichtigung von Tausalz, entwickelt sowie Anwendungsmöglichkeiten von blau-grünen Gestaltungselementen für Strassenabwasser, wie sie im Kanton Zürich zur Hitzeminderung empfohlen werden, überprüft.

3 Ergebnisse

In einem umfassenden Bericht, Fachartikel und einer Planungshilfe wurden die Erkenntnisse und Lücken im Bereich blau-grüner Strassenraumgestaltung zusammengetragen und eine erste Handlungsempfehlung für die Praxis formuliert [Burkhardt et al., 2022a, b, c]. Vorgestellt werden hier vor allem Erkenntnisse zu Baumrigolen mit Pflanzsubstraten.

3.1 Schadstoffe und Gewässerschutz

Die Stoffbelastung ist von zentraler Bedeutung für den möglichen Behandlungsbedarf und die Anforderungen an Boden und Substrate. In Platz- und Strassenabwasser wird sie primär durch das Verkehrsaufkommen bestimmt und in drei Belastungsklassen abgebildet (VSA, 2019a). Effektiv gelangen verschiedenste gelöste und partikuläre Stoffe ins Platz- und Strassenabwasser (Abb. 1).

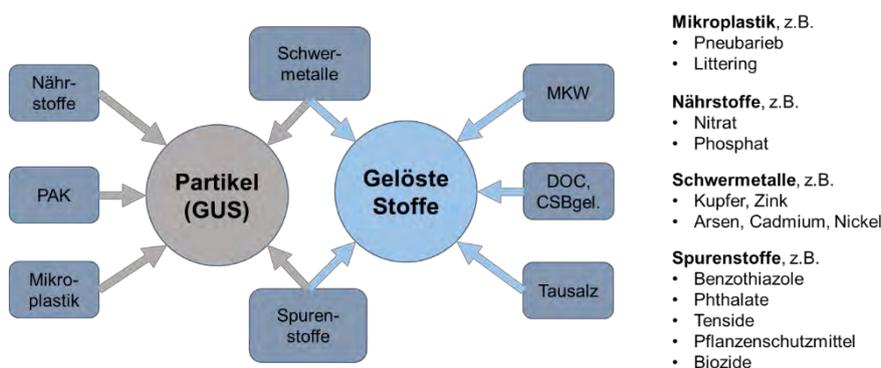


Abbildung 53: Spektrum an Schadstoffen im Strassenabwasser, welche als Partikel, an Partikeln gebunden oder im Wasser gelöst vorliegen können.

Den Partikeln (gesamte ungelöste Stoffe; GUS) kommt eine besondere Bedeutung zu. Die GUS-Fraktion kann Schadstoffe beinhalten und emittieren, wie wasserlösliche Additive im Pneubarieb, oder Schadstoffe adsorbieren, wie Schwermetalle und PAK. GUS wird in der Gewässerschutzverordnung als Schadstoff bewertet, für den Anforderungswerte eingehalten werden müssen.

Pneubarieb, als wesentliche Quelle von Mikroplastik, dominiert die aktuelle Diskussion zur Strassenabwasserbelastung, weil sich der Abrieb auf Schweizer Strassen auf fast 11'000 t pro Jahr beläuft (Sieber et al., 2019). Mit der grossen Menge Pneubarieb gelangen auch Additive in die Umwelt, wie Vulkanisationsbeschleuniger, Antioxidantien, Weichmacher und Stabilisatoren (Björklund et al. 2009, Bensch-Baltrusch et al., 2020). Mercaptobenzothiazol erreicht im Strassenabwasser bis einige Hundert Mikrogramm pro Liter und weist eine Ökotoxizität von 0.8 µg/L (chronisch) auf. Das Antioxidationsmittel 6PPD (N-(1,3-Dimethylbutyl)-N'-Phenyl-P-Phenylenediamin) wird beispielsweise durch Ozon

in 6PPD-Quinon umgewandelt, welches schon bei $0.8 \pm 0.16 \mu\text{g/L}$ eine letale Wirkung (LC50) auf junge Lachse aufweist und im Strassenabwasser zwischen < 0.3 und $19 \mu\text{g/L}$ gefunden wurde (Tian et al., 2021). Taumittel werden flüssig (Salzsole) oder als Tausalz eingesetzt. Zu den unerwünschten Folgen zählen Salzschäden am Strassengrün, städtischer Infrastruktur sowie Belastungen von Böden und Gewässern (Zuber, 2007).

Verschmutztes Platz- und Strassenabwasser zählt gemäss Schweizer Gewässerschutzverordnung zu "anderes verschmutztes Abwasser". Es ist entsprechend seiner Belastungsklasse zu behandeln (VSA, 2019). Zulässig ist die Versickerung von Platz- und Strassenabwasser mit Bodenpassage im Gewässerschutzbereich *Au* (für unterirdische Gewässer) und uneingeschränkt im *üB* (*übrige Bereiche*). Fehlt die Bodenpassage, sind Adsorberanlagen mit nachgewiesenen Wirkungsgraden einzusetzen. Ob Pflanzensubstrate die Bodenpassage ersetzen können, ist bis heute ungenügend erforscht.

3.2 Rückhaltevermögen von Böden und Substraten für Schadstoffe

Partikuläre Stoffe wie GUS und Pneuabrieb werden durch mechanische Filterung an der Oberfläche und in der Matrix von durchströmten Böden sowie Substraten $> 90 \%$ zurückgehalten (ASTRA, 2022). Der hohe physikalische Rückhalt durch Oberflächen- und Raumfiltration ist darauf zurückzuführen, dass (1) eine deckschichtkontrollierte Filtration an der Bodenoberfläche wirkt, (2) die Partikel meistens grösser sind als die Porenradien, und (3) eine Durchgängigkeit des Porenraums fehlt (Konnektivität). Diese Mechanismen gelten sowohl für Böden als auch Pflanzsubstrate, wobei der effektive Wirkungsgrad durch die vorliegenden Partikeleigenschaften und die physikalischen Kenngrössen des jeweiligen Materials beeinflusst ist.

Gelöste Stoffe interagieren mit den Oberflächen der Feinfraktion. Vor allem Tonminerale und organisches Material, aber auch Oxide und Hydroxide, stellen die relevanten Oberflächen für eine Adsorption zur Verfügung. Die generelle Fähigkeit der festen Boden- oder Substratmatrix, geladene Stoffe zu binden, wird mit der Kationen- und Anionenaustauschkapazität beschrieben (KAK, AAK). Für Pflanzsubstrate ist die KAK oft nicht bekannt, aber die eingesetzten Komponenten und Mengenanteile deuten darauf hin, dass diese eher gering sein dürfte. Durch Pflanzenkohle könnte eine Erhöhung auftreten, die es nachzuweisen gilt. Organische Spurenstoffe werden ebenfalls eher schlecht von Versickerungsböden zurückgehalten, weil die notwendigen Bindungsplätze fehlen.

Chlorid, als Bestandteil von Taumitteln bzw. Tausalzen, ist ein inerter Stoff und im Boden sehr mobil. Durch einen Spülstoss, ausgelöst durch Starkregen oder eine grosse Anschlussfläche, wird in Pflanzgruben eingetragenes Tausalz ausgewaschen. Tritt genügend Sickerwasser auf, vor allem im Spätwinter, ist deshalb keine dauerhafte Schädigung der Vitalität, wie Salzschäden an Bäumen, zu erwarten.

Pflanzsubstratrezepturen wurden bisher nicht dafür entwickelt, die eingetragene Schadstoffvielfalt zurückzuhalten. Die Filterfunktion für partikuläre Stoffe ist nur ein zufälliges Resultat der Substratmatrix. Gleiches gilt für gelöste Schadstoffe wie Schwermetalle, die gelegentlich über die Sickerpassage entfernt werden.

3.3 Substrate für Pflanzen und Schadstoffrückhalt

Pflanzsubstrate kommen meist dort zum Einsatz, wo natürliche Böden fehlen oder benötigten Ansprüche nicht erfüllen (z.B. Sicker- oder Tragfähigkeit) (Abb. 2). Sie müssen je nach Einsatzbestimmung unterschiedliche mechanische, hydraulische, chemische und biologische Grundanforderungen erfüllen. Substrate für Vegetationstragschichten sollen daher optimale Wachstumsbedingungen bezüglich Durchlüftung, Wasserhaltevermögen, Nährstoffangebot und Wurzelraum gewährleisten. Für die Strassenentwässerung steht eine hohe Wasserleitfähigkeit und hohe Reinigungsleistung im Vordergrund.

Zu den Zusatzstoffen zählen organische Substanzen und Pflanzenkohle. Pflanzenkohle kann Wasser dank ihrer grossen inneren Oberfläche bis zum 5-fachen Eigengewicht aufnehmen, wodurch die Nährstoffspeicherung und Wasserhaltekapazität (FK) verbessert werden. Sie sollte vor dem Einsatz mit Nährstoffen und evtl. mit Mikroorganismen angereichert werden.



Abbildung 54: Nicht überbaubare Pflanzsubstrate mit Ziegelschrot und roher Pflanzenkohle (links) und mineralisches Substrat mit kompostierter Pflanzenkohle (rechts; INKoh_{soil}). ©Burkhardt, Saluz.

Herausgearbeitet wurde in der vorliegenden Studie, welche hydraulischen und chemischen Parameter die Boden- und Substrateigenschaften gut beschreiben und welche Eigenschaften für die Planung besonders zu empfehlen sind. Dabei stellte sich heraus, dass die zwei verbreiteten FLL-Substratanforderungen (überbaubares und nicht überbaubares Substrat) nicht alle Möglichkeiten ausschöpfen, um einen überbaubaren Standort zu realisieren. Die Stockholm-Substratrezeptur ist für den überbaubaren und nicht überbaubaren Einbau sehr zu empfehlen. Bedingung ist allerdings, dass zertifizierte reine/kompostierte Pflanzenkohle und schadstofffreie Materialien verwendet werden. Diese bietet hohe Tragfähigkeit und Strukturstabilität, sowie hohe Luft- und Wasserleitfähigkeit und Durchwurzelbarkeit.

Adsorbersubstrate sind auf eine hohe hydraulische Durchlässigkeit (hohe Wasserleitfähigkeit) und maximalen Schadstoffrückhalt, auch von Spurenstoffen, ausgerichtet. Diese Fähigkeit bringt auch chemisch aktivierte Pflanzenkohle mit. Ein qualitätskontrolliertes Produkt aus heimischer Pflanzenkohle bietet nur ein Schweizer Hersteller an (INKoh_{Clean}). Als Nachweis für den Schadstoffrückhalt bietet sich der VSA-Labortest für Adsorbermaterialien an (VSA, 2019b).

3.4 Bauliche Umsetzung im Strassenraum

Versickerungen mit einem Verhältnis der Entwässerungs- zur Versickerungsfläche von $A_E/A_V < 5$ sind nicht bewilligungspflichtig, weil das Niederschlagsabwasser am Ort des Anfalls versickert (VSA; 2019a). Dazu gehören Rasenflächen, Wiesen, Strassenböschungen, durchlässige Flächenbeläge wie Rasengittersteine, Sicker-/Verbundsteine, Schotterrasen, nicht befestigte Wege, Ruderalflächen und Pflanzgruben mit kleiner Anschlussfläche. Bei einem Verhältnis von $A_E/A_V \geq 5$ handelt es sich um eine bewilligungspflichtige Anlage, je nach Anlagenfunktion um eine Versickerungs- oder Behandlungsanlage.

Typische Bauweisen von Pflanzgruben (Synonyme: Baumrigole, Baumgrube, Versickerungsbeet etc.) orientieren sich oft an den FLL-Empfehlungen. Sie zeichnen sich durch offene Baumscheiben, tiefe Pflanzgruben mit Substraten, Tiefenbelüftung und überbaufähige Substrate aus (FLL, 2010). Um optimale Standortbedingungen für Bäume in Pflanzgruben bereitzustellen, ist wie folgt zu planen:

- Gesamtvolumen: $> 24 \text{ m}^3$, entspricht 2 - 4 m^3 Wasservorrat
- Direkter Wurzelraum (nicht überbaubares Substrat): $> 3 \text{ m}^3$, lose einzubauen

- Baumscheibe: $> 6 \text{ m}^2$, offen oder teildurchlässig
- Tiefe: $> 1.5 \text{ m}$ Grube

Alle Erkenntnisse weisen darauf hin, dass heutige Baumrigolen-Systeme, meistens $A_E/A_V < 5$, nicht für den Rückhalt von gelösten Spurenstoffen geeignet sind, weil Bindungsplätze für Schadstoffe, wie sie in natürlichen bindigen Böden vorhanden sind, fehlen. Bei mittleren und hohen Belastungen im Strassenabwasser wird daher davon abgeraten, das Wasser in Pflanzsubstraten zu versickern, solange nicht entsprechende Nachweise zur Rückhalteleistung vorliegen.

Mit einer vorgeschalteten Akkumulationszone bestehend aus Adsorbersubstrat kann der Stoffeintrag in die Baumscheibe und die Verlagerung in den wasserdurchlässigen Substraten dennoch bereits heute vermieden werden. GUS und partikelgebundene Schwermetalle dürften hingegen auch in Standardrezepturen gut entfernt werden.

Die Bepflanzung ist ein wesentlicher Faktor für die ästhetische und ökologische Funktion von Pflanzgruben. Die ausgewählten Vegetationsempfehlungen, gegliedert in Kraut-, Strauch- und Baumschicht, sind universell einsetzbar, sofern sich die Feuchte und die Salzbelastung in einem für die Pflanzen passenden Bereich liegen. Vorzusehen sind standortgerechte Arten (bevorzugt Wildformen) und Diversifikation. Dazu können auch Arten aus anderen Regionen, beispielsweise dem Mittelmeerraum, eingesetzt werden. Der Beitrag zur Biodiversität ist dann besonders gross, wenn möglichst viele verschiedene und auch einheimische Arten gepflanzt werden. Im Kanton Zürich sollten bevorzugt Arten des Biodiversitätsindex 3 und höher gewählt werden. Die entwickelte Typologie berücksichtigt den Feuchtebedarf (trocken, feucht) und die Tausalzverträglichkeit (geringe Salzlast $< 100 \text{ mg/kg}$ Chlorid; hohe Salzlast $\geq 100 \text{ mg/kg}$ Chlorid) (Abb. 3):

- $A_E/A_V < 5$: Trocken, salztolerante Pflanzen bei versiegelten Anschlussfläche
- $A_E/A_V \geq 5$: Feucht, Salztoleranz nicht relevant, weil Salz ausgewaschen wird.



Abbildung 55: Bepflanzungen im Strassenbereich mit starker Salzlast ($A_E/A_V \geq 5$). ©Saluz.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Ein hoher Anteil von versickerungsfähigen, begrünten Flächen im urbanen Raum wirkt gegen Oberflächenabfluss, kühlt durch Evapotranspiration, erhöht die Aufenthaltsqualität für die Bevölkerung und

fördert die Biodiversität. Dabei sind die Massnahmen wirtschaftlich, wenn sie „Huckepack“ mit anstehenden Strassenerneuerungen und Instandsetzungsarbeiten durchgeführt werden.

Substrate bieten optimale Standortbedingungen im urbanen Raum für Bäume, Stauden etc., wenn die Grundanforderungen an den Wasserhaushalt (Wasser halten, ableiten) und allenfalls die Tragfähigkeit, erfüllt sind. Bei der richtigen Zusammensetzung sind sie universell einsetzbar. Substrate müssen nicht standortspezifisch entwickelt werden. Das Ausgangssubstrat verändert sich aber über die Zeit unter dem Einfluss der Standortbedingungen. Ausschreibungen sollten für die Substratauswahl und Pflanzgrubenbauweisen wenige einfache, klar kontrollierbare Parameter vorsehen wie Lagerungsdichte spezifische Sickerleistung.

Durch Tausalz und den durch Pflanzenkohlen verursachten leicht alkalischen pH-Wert werden keine wesentlichen Schäden an der Vegetation oder beim Bodengefüge unter den Witterungsbedingungen der Schweiz (hohe Regenintensitäten), insbesondere bei grossen Anschlussflächen, erwartet. Dennoch sind bei der Auswahl der Pflanzenarten die Feuchtigkeit und das Streusalz als limitierende Faktoren beizuziehen.

Solange nicht zusätzliche Erkenntnisse zum Stoffrückhalt vorliegen, wird dem Vorsorgeprinzip folgend empfohlen, neben Massnahmen zur Verringerung der Belastung (z.B. weniger Tausalz, Langsamverkehr), FLL-Substrate nur für gering belastetes Strassenwasser einzusetzen (< 5000 DTV). Bei mittlerer und hoher Belastung müssen klassische Baumrögen mit einem Barrieren-Konzept gekoppelt werden.

Bei der heutigen Planung von Pflanzgruben an Plätzen und Strassen wurde bisher selten die mögliche Belastung berücksichtigt. Auch ist festzuhalten, dass keine Daten zur effektiven stofflichen Belastung durch organische Spurenstoffe im Strassenabwasser vorliegen. Der Fokus lag bisher auf GUS, Kupfer und Zink. Diese Kenntnislücke sollte behoben werden, um die grundsätzlichen Risiken für das Grundwasser zu kennen und Massnahmen zielgerichtet zu treffen. Die Schadstoffe sind aber nicht für die Vegetation relevant.

Die Wissenslücken sollten nicht verhindern, mit der blau-grünen Umgestaltung des Strassenraums rasch vorwärts zu gehen. Aufgrund des Klimawandels und der Dringlichkeit zu handeln, müssen gleichzeitig schnellstmöglich Kenntnisse über die mögliche Schadstoffbeeinträchtigung des Grundwassers beschafft werden.

5 Danksagung

Das Projekt wurde im Auftrag vom Tiefbauamt des Kantons Zürich und vom Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich durchgeführt. Für die gute Unterstützung und Projektbegleitung danken wir Christoph Abegg, Sarah Marthaler, Stefan Schmid und Natascha Torres.

6 Literatur

ASTRA (2021): Strassenabwasserbehandlungsverfahren – Stand-der-Technik. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bern.

Burkhardt, M., Saluz, A., Kulli, B. (2022a): Neue Herausforderungen bei der Strassenentwässerung: Recherche zum Stand des Wissens. Technischer Bericht, TBA und AWEL, Kanton Zürich.

Baensch-Baltruschat, B., Kocher, B., Stock, F., Reifferscheid, G. (2020): Tyre and road wear particles (TRWP) - A review of generation, properties, emissions, human health risk, ecotoxicity, and fate in the environment. Science of the Total Environment 733, 137823.

- Björklund, K., Cousins, A.P., Strömvall, A.-M., Malmqvist, P.-A. (2009): Phthalates and nonylphenols in urban runoff: Occurrence, distribution and area emission factors. *Sci. Total Environ.*, 407(16), 4665-4672.
- Burkhardt, M., Kulli, B., Saluz, A. (2022b): Schwammstadt im Strassenraum – Neue Herausforderungen für blau-grüne Infrastrukturen bei der Strassenentwässerung, *Aqua und Gas*, 10,
- Burkhardt, M., Kulli, B., Saluz, A. (2022c): Schwammstadt im Strassenraum: Planungshilfe zum Umgang mit Platz und Strassenabwasser bei geringer Belastung. OST & ZHAW, Rapperswil & Wädenswil.
- FLL (2010): Empfehlungen für Baumpflanzungen – Teil 2: Standortvorbereitung für Neupflanzungen; Pflanzgruben und Wurzelraumerweiterung, Bauweisen und Substrate. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. (FLL), Bonn.
- Sieber, R., Kawecki, D., Nowack, B. (2019): Dynamic probabilistic material flow analysis of rubber release from tires into the environment. *Environmental Pollution*, 113573.
- Tian, Z. et al (2020): A ubiquitous tire rubber-derived chemical induces acute mortality in coho salmon. *Science* 371, 185-189.
- VSA (2019a): Abwasserbewirtschaftung bei Regenwetter. Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute, Glattbrugg, Schweiz.
- VSA (2019b): Merkblatt - VSA Leistungsprüfung für Behandlungsanlagen. Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute, Glattbrugg, Schweiz.
- Zuber, R. (2007): Streusalz: Auswirkungen auf die Stadtbäume und Gegenmassnahmen - Literaturstudie. Stadt Chur Gartenbauamt.

Korrespondenz:

Michael Burkhardt, Prof. Dr.
OST – Ostschweizer Fachhochschule
Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik (UMTEC)
E-Mail: michael.burkhardt@ost.ch

Methodische Untersuchungen zur Korngrößenverteilung von verkehrsbürtigen Partikeln in Niederschlagsabflüssen – Vergleich von Siebung und digitaler Bildanalyse

Eva Heinz¹, Stefan Krimmler¹, Marc Wichern¹, Martina Dierschke², Antje Welker²

1 Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik, Universitätsstraße 150, 44801 Bochum, Deutschland

2 Frankfurt University of Applied Sciences, Fachgebiet für Siedlungswasserwirtschaft und Hydromechanik, Nibelungenplatz 1, 60318 Frankfurt am Main, Deutschland

Kurzfassung:

Korngrößenanalysen von fraktionierten Proben mittels digitaler Bildanalyse (DIA) liefern andere Ergebnisse als die klassische Siebung. Bei Siebungen tritt infolge der unregelmäßigen Form der Partikel neben Normalkorn auch Fehlgut auf. Aufgrund der verschiedenen Messmethoden weichen statische und dynamische DIA voneinander ab. Die Ergebnisse werden durch die Auswahl apparativer Einstellungen und verwendeter 2D-Deskriptoren signifikant beeinflusst. Für einen Vergleich von DIA und Siebung wird die Verwendung eines Breitenparameters sowie der Maschendiagonale anstatt der Maschenweite empfohlen.

Key-Words: Siebung, statische digitale Bildanalyse, dynamische digitale Bildanalyse, verkehrsbürtige Partikel, Korngrößenverteilungen

1 Einleitung

Die Kenntnis, dass insbesondere die feinen Feststoffe in Niederschlagsabflüssen stark mit Schadstoffen belastet sein können [Baum und Dittmer, 2019; Gelhardt, 2017] führt zu einem gestiegenen Interesse der Massenbestimmung einzelner Kornfraktionen [DWA A-102-2, 2020]. Die Analyse kann einerseits klassisch mittels Siebung und Filtration erfolgen, andererseits kann die Korngrößenverteilung durch Anwendung instrumenteller optischer Analytik bestimmt werden. Unklar ist, inwiefern Ergebnisse der klassischen Siebanalyse und der instrumentellen Partikelanalyse von Niederschlagsabflüssen vergleichbar sind.

Daher wurden Siebergebnisse eines mineralischen Quarzmehls (Millisil W4) sowie realer Straßenstaubproben im Korngrößenbereich zwischen 0 und 250 μm mit den Ergebnissen aus der digitalen Bildanalyse statisch (Ruhr-Universität Bochum - RUB) und dynamisch (Frankfurt University of Applied Sciences - FRA-UAS) gegenübergestellt. Die Randbedingungen der Siebung und der digitalen Bildanalyse wurden vielfältig systematisch variiert und die Auswirkungen auf das jeweilige Ergebnis diskutiert.

2 Theoretische Grundlagen Partikelgrößenverteilung

Es gibt verschiedene Methoden zur Partikelgrößenmessung, von der klassischen Siebanalyse hin zur instrumentellen Analytik, wie die digitale Bildanalyse (DIA), die Laserbeugung (SLS) oder die dynamische Lichtstreuung (DLS). Jede Methode hat charakteristische Größenbereiche und spezielle Anwendungsgebiete. Die Ergebnisse unterscheiden sich teilweise deutlich voneinander, daher ist zur Interpretation der Ergebnisse eine vertiefte Kenntnis der verschiedenen Mess- und Auswertemethoden erforderlich.

2.1 Siebung

Bei der klassischen Siebung [DIN 66165-1, 2016; DIN 66165-2, 2016] werden mehrere Siebe unterschiedlicher Maschenweiten übereinander in einem Siebturm gestapelt und mit Hilfe einer Siebmachine in Schwingung versetzt. Die Partikel werden in Vorzugsrichtung ihrer Größe (eher Partikelbreite) nach entsprechend auf den einzelnen Sieben und somit in Fraktionen unterteilt. Die massebezogene Korngrößenverteilung basiert zumeist auf acht Datenpunkten, je nach Auswahl der Siebe zwischen 20 μm und 125 mm. Die Maschenweiten der Siebe dürfen laut Norm eine Toleranz aufweisen; bei einem 100 μm Sieb muss die mittlere reale Öffnungsweite zwischen 95,5 und 104,5 μm liegen, einzelne Maschen dürfen sogar bis zu 30 μm größer sein [DIN ISO 3310-1, 2017].

2.2 Digitale Bildanalyse (DIA)

Mit der DIA können sowohl trockene Pulver als auch nasse Suspensionen untersucht werden. Eine Kamera nimmt 2D-Bilder der dispergierten Partikeln auf, die hinsichtlich verschiedener Formparameter automatisiert ausgewertet werden. Bei der statischen digitalen Bildanalyse liegen die erfassten Partikel auf einem Objektträger, bei der dynamischen digitalen Bildanalyse werden sie entweder im Kreislauf oder auch nur einmal an der Kamera vorbeigeführt. Die messbaren Korngrößen liegen zwischen 0,5 μm und 8 mm.

3 Material und Methoden

3.1 Feststoffmaterialien

Als Feststoffmaterialien wurden mineralisches Quarzmehl sowie reale Straßenstäube aus dem Stadtgebiet Frankfurt am Main verwendet. Durch ein aufwändiges kombiniertes Trocken-/Nasssiebungsverfahren in Anlehnung an Gelhardt et al. [2017] und Gelhardt [2020] konnten sieben Einzelsiebfraktionen des Quarzmehls und der Straßenstäube (0-40 μm , 40-63 μm , 63-100 μm , 100-125 μm , 125-160 μm , 160-200 μm , 200-250 μm) gewonnen werden. Die beprobten Straßenstäube unterschieden sich im organischen Anteil (S7: Glühverlust (GV) in der 0-250 μm Fraktion: 9,6 %; S8: GV in der 0-250 μm Fraktion: 18,9 %).

3.2 Beschreibung der eingesetzten Geräte zur digitalen Bildanalyse

3.2.1 Statisches DIA (RUB)

Die Partikelmessungen zur statischen DIA wurden mit einem Partikelanalysator der Firma Malvern Panalytical GmbH, Typ Morphologi G3SE-ID durchgeführt. Eine definierte Menge des trockenen Feststoffs (in der Regel 3 mm³) wurde durch einen Druckluftstoß (1 bar, 20 ms Injektionsdauer) mit Hilfe einer Dispergiereinheit auf einen Glasträger aufgetragen. Nach einer Absetzphase von 600 s wurden die Messungen gestartet. Zur besseren Darstellung dreidimensionaler Partikel wurde ein z-stack angewendet. Beim Objektiv mit 50x Vergrößerung wurden zwei Ebenen oberhalb des Fokus in insgesamt 6,1 μm Abstand und eine Ebene unterhalb des Fokus in 3,1 μm Abstand, beim 10x-Objektiv eine Ebene oberhalb und eine Ebene unterhalb des Fokus jeweils im Abstand von 12,2 μm und beim 2,5x-Objektiv eine Ebene oberhalb des Fokus im Abstand von 196 μm gemessen. Als Auswerteparameter wurden die 2D-Deskriptoren flächenäquivalenter Durchmesser (x_A) sowie die Breite verwendet. Die Auswertung mittels Summenverteilungskurven erfolgt durch die Bildung eines Kugeläquivalentsvolumens, welches auf dem x_A basiert.

3.2.2 Dynamisches DIA (FRA-UAS)

Die Untersuchungen im dynamischen DIA wurden mit einem Gerät der Firma Sympatec, bestehend aus den Teilkomponenten Bildanalyzesystem (QICPIC mit einer Küvette 0,5 mm) und einem Nassdispergierer/Nassdosierer (LIXELL/LIQXI), durchgeführt. Der Rührer wird i. d. R. mit 800 U/min und die

Schlauchpumpe mit einer Umpumpgeschwindigkeit von 125 U/min betrieben. Die gerätebedingten Messbereiche sind abhängig vom eingesetzten optischen Modul. Bei Partikelgrößen $< 63 \mu\text{m}$ wird der Messbereich M3, bei allen anderen Anwendungen der Messbereich M5 angewendet. Als Bildrate werden i. d. R. 30 Bilder/min und als Messzeit Bereiche zwischen 30 und 60 sec eingestellt, jeweils mit 3 Wiederholungen (reads). Die Feststoffmaterialien (Einwaage: 100 mg) werden zur Dispergierung mit Pyrophosphat vermischt und dann in das Rührsystem eindosiert. Zur Auswertung werden Summenverteilungskurven der Partikelvolumina (Basis: Berechnung Kugelvolumen aus den gewählten 2D-Deskriptoren) erstellt. Hierbei werden auch die Filterbedingungen der Partikelerfassung festgelegt, um beispielsweise Luftblasen nicht zu erfassen. Als 2D-Deskriptoren werden der flächenäquivalente Kreisdurchmesser (EQPC entspricht x_A) und der minimale Feret-Durchmesser (Feret_{\min}) verwendet.

3.3 Auswertemethoden

3.3.1 Partikelanzahl-, Volumen- und Massenverteilung

Die Siebanalyse liefert Gewichte einzelner Fraktionen, welche in Massenanteile umgerechnet werden. Die digitale Bildanalyse zählt zunächst nur die Partikel einer bestimmten Fraktion, die dann in Volumenanteile umgerechnet werden können. Bei der Anzahlverteilung liegt der D_{n50} immer deutlich unterhalb des D_{v50} der Volumenverteilung, da viele kleine Partikel nur ein geringes Volumen ergeben. Sind die Dichten bekannt, kann aus dem Volumenmodell ein Massenmodell abgeschätzt werden. In den hier beschriebenen Auswertungen der Partikelanalyse wurde mit dem Volumenmodell gearbeitet und für den Vergleich mit den Masseanteilen der Siebung die Dichte als konstant angenommen.

3.3.2 2D- und 3D-Deskriptoren, Volumenberechnung

Der häufigste verwendete 2D-Deskriptor ist der flächenäquivalente Durchmesser in der Norm als x_A [DIN ISO 9276-6 (2012)], bei den Anbietern als CE Diameter (Malvern) oder EQPC (Sympatec) bezeichnet. Er entspricht dem Durchmesser eines Kreises, der der projizierten 2D-Fläche des Partikels entspricht. Weitere häufig verwendete 2D-Deskriptoren sind der minimale und der maximale Feret-Durchmesser ($x_{F\min}$ und $x_{F\max}$) sowie die Länge und die Breite eines Partikels. Der Feret-Durchmesser ist der minimale oder maximale Abstand zweier parallelen Tangenten eines Partikels in einer beliebigen Richtung. Die Breite sowie Länge des Partikels entsprechen den senkrecht aufeinanderliegende Haupt- und Nebenachsen, welche durch das Massezentrum des Partikels gehen, vgl. Abb. 1 rechts.

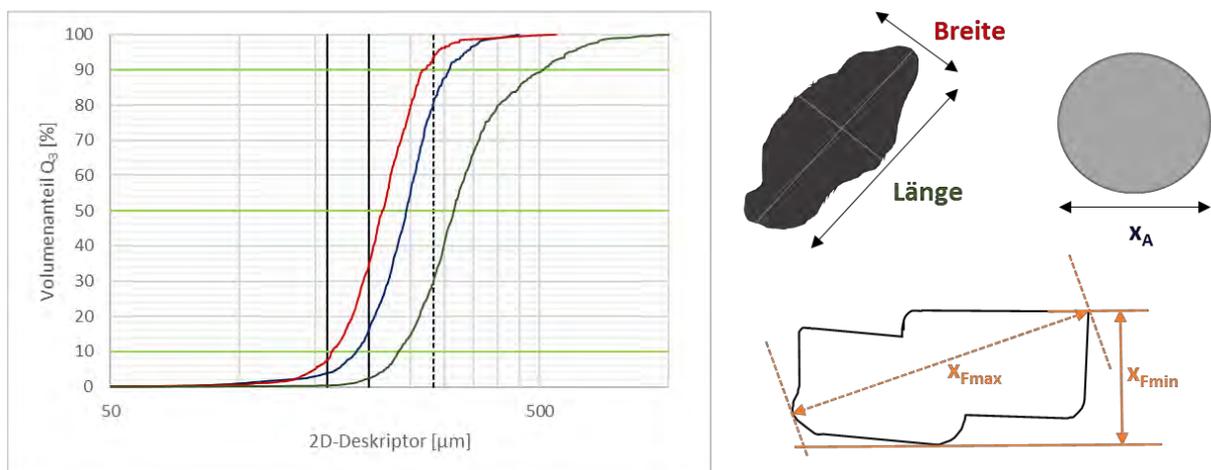


Abbildung 56 links: Volumenanteile einer Probe S8 160-200 μm (statischen DIA), mit den 2D-Deskriptoren „Breite“ (rot), „Länge“ (grün) und „ x_A “ (blau); die vertikalen Linien entsprechend den Maschenweiten der Siebe (durchgängige Linie) sowie der Maschendiagonale des größeren Siebes (gestrichelt); rechts: bildliche Erklärung der 2D-Deskriptoren Breite, Länge, x_A , $x_{F\min}$ und $x_{F\max}$

Aus dem gewählten 2D-Deskriptor lässt sich ein Volumen berechnen. Mit Hilfe des 3D-Deskriptors Kugeläquivalentsvolumen (SE Volumen) wird z.B. das Volumen mit der Formel für das Volumen einer Kugel mit angenommenem Streckenmaß (x_A , x_F , Breite, etc.) berechnet.

In Abhängigkeit von der Form der Partikel und dem ausgewählten Auswerteparameter können sich die volumenbasierten Summenkurven deutlich unterscheiden (Abbildung 56 links). Die Probe eines organikreichen Straßenstaubes S8 weist in der Korngrößenfraktion 160-200 μm einen D_{V50} zwischen 215 μm (Breite) und 316 μm (Länge) auf, der des kreisäquivalenten Durchmessers liegt erwartungsgemäß dazwischen (244 μm).

3.3.3 Maschenweite (MW) und Maschendiagonale (MD)

Wenn das Partikel die Form einer perfekten Kugel hat, kann der Siebdurchgang gut mit dem flächenäquivalenten Durchmesser beschrieben werden. Die meisten Partikel in Niederschlagsabflüssen sind aber nicht kugelförmig, so dass der potentielle Siebdurchgang vom Verhältnis Länge zu Breite zu Höhe abhängig ist. Partikel mit einer Länge bis zur Maschendiagonale und einer geringen Breite können die Maschen passieren (vgl. Abb. 2). Ferner können längliche Partikel (Fasern) leicht durch ein Sieb geringer Maschenweite gelangen, werden aber bei der Bildanalyse aufgrund der großen Länge in eine andere Größenklasse einsortiert.

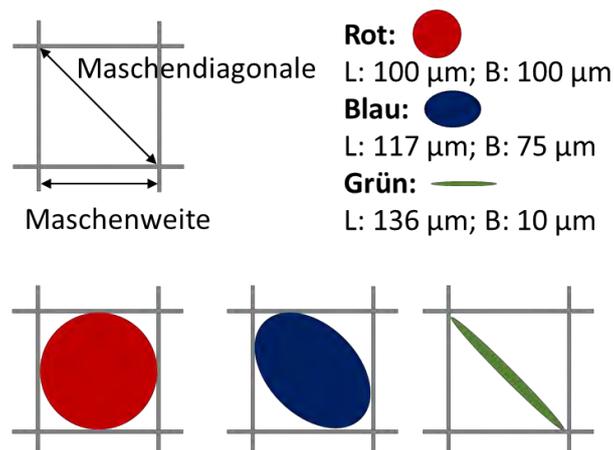


Abbildung 57: Definition von Maschenweite und Maschendiagonale sowie Vergleich der Durchgängigkeit von Partikeln durch eine Siebmasche (beispielhaft für 100 μm Sieb) mit verschiedenen Formen; die Höhe der Partikel wird an dieser Stelle nicht berücksichtigt

3.3.4 Normal-, Über-, Unter- und Pseudounterkorn

Die DIN 66160 (2017) definiert das Fehlgut einer Siebung als Summe aus Über- und Unterkorn. Dies sind die Massenanteile einer Siebprobe, welche oberhalb oder unterhalb einer definierten Trenngrenze vorliegen. Bei einer idealen Trennung tritt kein Fehlgut auf, die gesamte Probe entspricht Normalkorn.

Wird eine Siebung mit Sieben der Maschenweite 63 μm und 100 μm durchgeführt und mittels DIA untersucht, so werden Partikel kleiner 63 μm als Unterkorn (orange) und Partikel größer 100 μm als Überkorn (rot) definiert. Alle Partikel zwischen 63 und 100 μm sind Normalkorn (grün) (Abbildung 58, links). Linsenförmige Partikel, welche die Siebmaschen passiert haben und mittels DIA vermessen wurden, fallen z. B. häufig in den Bereich des Überkorns.

Wird anstatt der Maschenweite nach der Maschendiagonale ausgewertet, so sind die Trenngrenzen um den Faktor $\sqrt{2}$ verschoben. Das Normalkorn liegt nun zwischen 89 μm und 141 μm , darüber liegt das Überkorn. Faktisch müssten alle Partikel kleiner 89 μm dem Unterkorn zugeordnet werden. Daher

wurde die Zwischenklasse „Pseudounterkorn“ (gelb) eingeführt, welche zwischen der Maschendiagonale (89 μm) und der Maschenweite (63 μm) des unteren Siebes liegt (Abbildung 58, rechts).

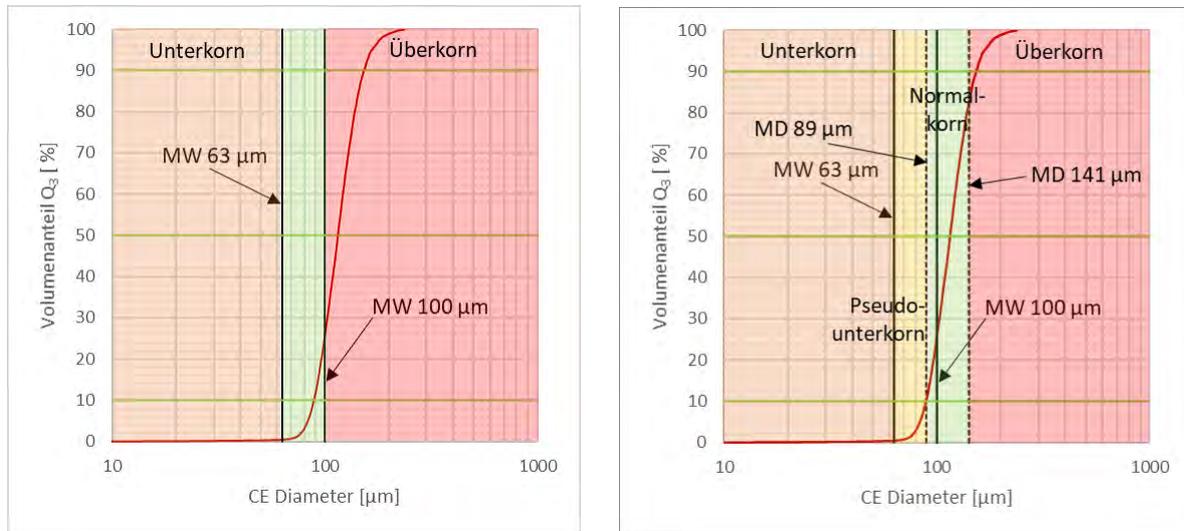


Abbildung 58 links: Graphische Darstellung der Anteile Unter-, Normal- und Überkorn für Auswertungen über die Maschenweite einer Probe Straßenstaub S8 der Siebfraction 63-100 μm ; rechts: Graphische Darstellung der Anteile Unter-, Pseudounter-, Normal- und Überkorn für Auswertungen über der Maschendiagonale einer Probe Straßenstaub S8 der Siebfraction 63-100 μm

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Qualitätskontrolle Siebung und DIA-Messung

Vor den vergleichenden Untersuchungen wurden Siebung, Einwaage (bei Mischproben) sowie Messung mittels DIA einer internen Qualitätssicherung unterzogen. Diese ergaben eine gute Wiederholbarkeit der Ergebnisse (überwiegend 1 % bis 4 % relative Abweichungen bei Triplikaten in den Einzelfractionen 40-63 μm und 160-200 μm).

4.2 Einflüsse apparativer Einstellungen

Der Einsatz von Geräten der DIA verlangt, dass der Nutzer sich vor dem Start der Messung Gedanken über die Geräteeinstellungen macht. Dies betrifft sowohl die Probenvorbereitung, die Messung sowie die Auswertung der Daten. Agglomerate erscheinen als zu große Partikel und verschieben die Summenkurven hin zu größeren Volumen- oder Massenanteilen. Verschiedene Objektive oder Messküvetten sind für bestimmte Korngrößenbereiche anwendbar, wobei selbst in den vom Hersteller angegebenen Messbereichen in den oberen sowie unteren Regionen Unterbefunde festgestellt werden können. Bei einer Quarzmehl-Mischprobe von 0-63 μm liegt der volumenbasierte Anteil an Partikel kleiner 20 μm bei der statischen DIA zwischen 9,7 % (2,5x-Objektiv) und 42,9 % (50x-Objektiv). Speziell bei Mischproben mit einer großen Varianz an Korngrößen ist die Auswahl nur eines Objektivs mit großen Unsicherheiten belastet. Eine weitere Fehlerquelle ist das Anwenden von Filtern. Ein Filter insbesondere am oberen Messbereich kann durch In- oder Exklusion einzelner Partikel leicht zu einer Verschiebung der volumenbasierten Summenkurven führen.

4.3 Vergleich Auswertung: 2D-Deskriptoren

Die Geräte der DIA bieten eine große Vielfalt an 2D-Deskriptoren an, die für einen Vergleich mit der Siebung nicht gleich gut geeignet sind. Abbildung 59 zeigt die Ergebnisse von Partikelanalysen sieben verschiedener Einzelfractionen des Straßenstaubs S8. A.1 zeigt hier die Klassifizierung der Partikel in

Normal-, Unter- und Überkorn für eine volumenbasierte Auswertung des x_A nach der Maschenweite. B.1 zeigt die Klassifizierung der Partikel für eine volumenbasierte Auswertung des x_{Fmin} (x_{Fmin}) nach der Maschenweite. Es zeigt sich, dass der x_{Fmin} in allen Korngrößenfraktionen einen größeren Anteil an Normalkorn und einen deutlich geringeren Anteil an Überkorn, aber einen größeren Anteil an Unterkorn ergibt. Dies ist den überwiegend länglichen Partikeln des Materials geschuldet, welche - wie in Kapitel 3.3.3 erläutert – die Möglichkeit haben, das Sieb mit einem geringeren x_{Fmin} als der Maschenweite zu passieren.

Die Auswahl des 2D-Deskriptors – wie hier exemplarisch x_A und x_{Fmin} - hat also einen entscheidenden Einfluss auf die Aussage der Messung. Je mehr Partikel von der Kugelform abweichen, – wie hier bei dem organikreichen Straßenstaub S8 gezeigt – desto größer ist dieser Einfluss.

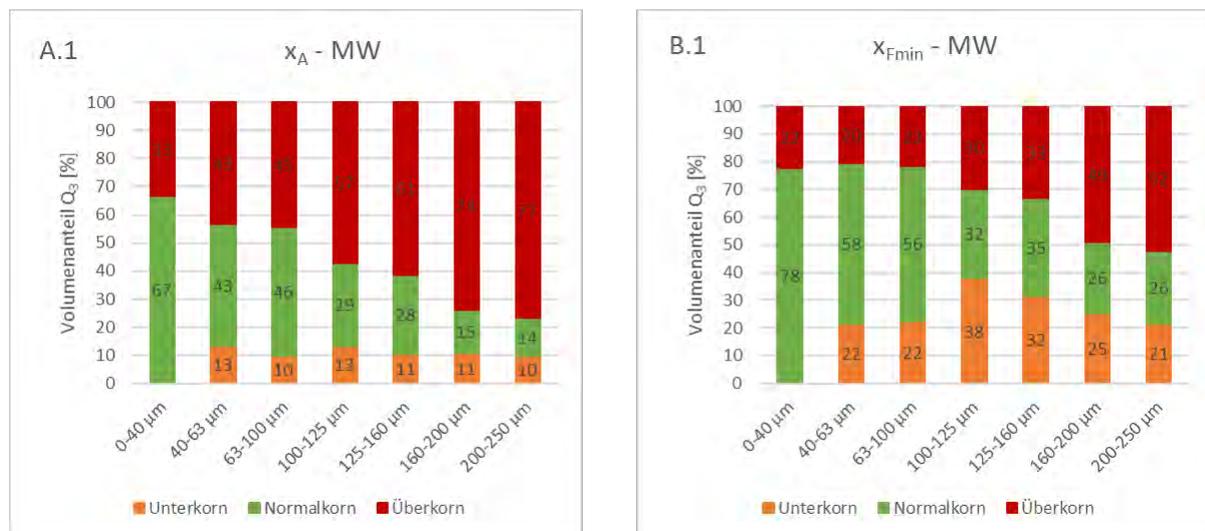


Abbildung 59 Normal-, Unter-, Pseudo- und Überkornanteil der Einzelfraktionen S8 (DIA, FRA-UAS) bei verschiedenen 2D-Deskriptoren x_A (A.1), x_{Fmin} (B.1) und der Auswertemethode nach Maschenweite (MW)

Für einen Vergleich zwischen dynamischer und statischer DIA in nachfolgendem Kapitel wurde der 2D-Deskriptor x_A trotz größerer Abweichungen vom Siebergebnis gewählt, da er bei beiden Geräteherstellern angeboten wird.

4.4 Vergleich Auswertung: Maschenweite vs. Maschendiagonale

Die Zuweisung der Partikel in die Normalkornfraktion und die einzelnen Fehlglutklassen kann durch die Anwendung der Maschendiagonale als Bezugsparameter geändert werden. Sieben Siebfraktionen des Straßenstaubes S8 wurden mittels dynamischer sowie statischer DIA untersucht. Die Auswertung erfolgte mit x_A und der Maschenweite sowie der Maschendiagonale. Abbildung 60 zeigt, dass bei beiden Messprinzipien in allen Fraktionen das Überkorn bei Auswertung nach der Maschenweite (A.1 und B.1) mit 33-77 % (dynamisches DIA) bzw. 63-86 % (statisches DIA) einen großen Anteil hat. Dieser kann durch die Anwendung der Maschendiagonalen (A.2 und B.2) signifikant auf 7-33 % beim dynamischen DIA und 17-30 % beim statischen DIA verringert werden. Die Ergebnisse mit anderen Materialien (Quarzmehl, S7) führten zu vergleichbaren Ergebnissen.



Abbildung 60 Normal-, Unter-, Pseudunter- und Überkornanteile der Einzelfraktionen S8 (A (oben): DIA dynamisch; B (unten): DIA statisch) beim 2D-Deskriptor x_A und der Auswertemethode nach Maschenweite (MW, links „1“) und Maschendiagonale (MD, rechts „2“)

Auffällig ist aber auch, dass die Ergebnisse der dynamischen und der statischen DIA stark voneinander abweichen, was durch die unterschiedlichen Messprinzipien zu erklären ist. Bei der statischen DIA ist der Überkornanteil größer und der Unterkornanteil kleiner, was an der Vermessung der Partikel in präferierter Lage mit der größten geometrischen Ausprägung auf dem Objektträger liegt. Ferner besteht bei der dynamischen DIA immer die Möglichkeit, dass große Partikel schlechter von der Pumpe angesaugt und entsprechend seltener an der Messküvette vorbeigeführt werden.

Es zeigt sich, dass bei beiden eingesetzten Geräten grundsätzlich keine Auswertekombination zu einer Übereinstimmung mit den mittels Siebung fraktionierten Feststoffanteilen führte. Da verkehrsflächenbürtige Feststoffe eher faserig und unregelmäßig geformt als kugelförmig vorliegen, führt ein direkter Vergleich zwischen Siebanalysen und DIA-Messungen von Einzelfraktionen zwangsläufig zu signifikanten Fehlkornanteilen. Beim Vergleich von Feststoffen aus mehreren Siebklassen (0 bis 63 μm oder 0 bis 250 μm) werden die Fehlkornanteile geringer. Ein Unterkorn ist naturgemäß nicht vorhanden und die Verschiebungen in die einzelnen Klassen heben sich zum Teil auf.

5 Fazit

Bei der Bestimmung einer Partikelvolumen- oder -massenverteilung gibt es eine Vielzahl von unterschiedlichen Methoden mit unterschiedlichen Anwendungsbereichen und Vor- und Nachteilen. Ein Ergebnis – egal mit welcher Methode – ist nie falsch. Wichtig bei einer Bewertung des Ergebnisses ist aber, sich über das Messprinzip, die Randbedingungen der Messung, die Erzeugung der Daten und der angewendeten Auswertemethode im Klaren zu sein.

Die Siebung basiert auf der Durchgangswahrscheinlichkeit jedes einzelnen Partikels, welche von der 3D-Partikelform, seiner Ausrichtung, der Art der Siebung, der Sieböffnung sowie der -dauer abhängt. Tendenziell werden die Partikel in einer Vorzugsrichtung vermessen, welcher der geringsten räumlichen Ausrichtung entspricht. Eine statische DIA von Feststoffen führt zumeist zur Vermessung der größten Fläche des Partikels. Im Vergleich zu einer Siebsummenkurve werden daher mehr größere Partikel angezeigt (Überkorn). Bei der dynamischen DIA, egal ob trocken oder in einer Flüssigkeit dispergiert, bewegt sich das Partikel und kann mehrfach aus allen Richtungen aufgenommen werden, daher wird im Vergleich zur statischen Bildanalyse tendenziell weniger Überkorn angezeigt.

Beide instrumentelle Methoden (statische und dynamische DIA) haben eine große Anzahl an Auswertemöglichkeiten. Für Einzelfraktionen konnte bislang keine passgenaue Methode gefunden werden, mit der die Ergebnisse der Siebung und der digitalen Bildanalyse sehr gut übereinstimmen. Dies liegt an der Inhomogenität der verkehrsbürtigen Feststoffe, welche das Sieb auch bei Längen, die größer als die Maschenweite sind, passieren können. Beim Vergleich von Feststoffen aus mehreren Siebklassen (0 – 63 µm oder 0 – 250 µm) werden die Fehlkornanteile geringer. Die größten Übereinstimmungen mit den Ergebnissen einer Siebsummenkurve ergab bei der DIA die Auswertemethode, die den Deskriptor einer schmalen Partikelseite (z. B. x_{Fmin} , Breite) und die Maschendiagonale zur Grundlage hatte. Diese Auswertemethode wird daher für Verkehrsflächenabflüsse empfohlen.

6 Literatur

- Baum, P., Dittmer, U. (2019): Size Dependant Metal Loads of Urban Stormwater Runoff Compared to the Loads of Total Suspended Solids. NOVATECH 2019, 10th International Conference on Sustainable Techniques and Strategies in Urban Water Management, 1. - 5.7.2019.
- DIN 66160 (2017): Messen disperser Systeme - Begriffe
- DIN 66165-1 (2016): Partikelgrößenanalyse – Siebanalyse – Teil 1: Grundlagen
- DIN 66165-2 (2016): Partikelgrößenanalyse – Siebanalyse – Teil 2: Durchführung
- DIN ISO 3310-1 (2017): Analysensiebe – Technische Anforderungen und Prüfung – Teil 1: Analysensiebe mit Metalldrahtgewebe
- DIN ISO 9276-6 (2012): Darstellung der Ergebnisse von Partikelgrößenanalysen – Teil 6: Deskriptive und quantitative Darstellung der Form und Morphologie von Partikeln
- DWA A-102-2 (2020): Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer. Teil 2: Emissionsbezogene Bewertungen und Regelungen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall. Hennef Dezember 2020, korrigierte Fassung Stand Oktober 2021
- Gelhardt, L.; Huber, M.; Welker, A. (2017): Development of a Laboratory Method for the Comparison of Settling Processes of Road-Deposited Sediments with Artificial Test Material. Water, Air Soil Pollut. Vol. 228:467, 1 - 14. DOI: 10.1007/s11270-017-3650-8.
- Gelhardt, L. (2020): Charakterisierung von Feststoffen auf urbanen Verkehrsflächen als potenzielle Schadstoffträger im Niederschlagsabfluss – Entwicklung einer Methode zur

Messung der Sinkgeschwindigkeit und absetzrelevanter Kenngrößen. Doktorarbeit.
Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern

7 Danksagung

Die dargestellten Untersuchungen wurden im Rahmen des RESA-Forschungsprojekts „Entwicklung einer Analyseverfahren zur AFS63-Bestimmung in Regenwetterabflüssen – Untersuchung der maßgeblichen Einflussfaktoren“ vom Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MULNV) gefördert. Die Laboruntersuchungen an der FRA-UAS wurden von Avinoam Ebel durchgeführt.

Korrespondenz:

Dr. Eva Heinz
Ruhr Universität Bochum
Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik
Universitätsstraße150
D-44801 Bochum
Tel +49 234 32 25897
E-Mail eva.heinz@rub.de

Strategische Planung von blau-grünen Infrastrukturen zur Verringerung der Gewässerbelastung durch Mischwasserüberläufe

Franziska Knoche¹⁾, Frank Schumacher²⁾, Malte Zamzow¹⁾, Jakob Sohr³⁾, Matthias Rehfeld-Klein³⁾, Pascale Rouault¹⁾, Andreas Matzinger¹⁾, Erika Pawlowsky-Reusing⁴⁾

¹⁾ Kompetenzzentrum Wasser Berlin, Cicerostaße 24, 10709 Berlin, Deutschland

²⁾ Ingenieurbüro für Wasser und Umwelt, Südwestkorso 70, 12161 Berlin, Deutschland

³⁾ Senatsverwaltung für Umwelt, Mobilität, Verbraucher- und Klimaschutz, Brückenstraße 6, 10179 Berlin, Deutschland

⁴⁾ Berliner Wasserbetriebe, Neue Jüdenstraße 1, 10179 Berlin, Deutschland

Kurzfassung: Mischwasserüberläufe führen im Sommer zu Sauerstoffdefiziten in Berliner Gewässerabschnitten bis hin zu Fischsterben. Zur Verhinderung solcher Zustände ist ergänzend zur Kanalnetzsanierung eine Abkopplung von 20 bis 40 % der Flächen in den Mischwassereinzugsgebieten notwendig und in Planung. Im Projekt MiSa - Mischwasser(Einzugsgebiets)Sanierung - wurden im Auftrag der Umweltverwaltung mögliche Abkopplungsstrategien in Workshops mit Berliner Bezirksverwaltungen definiert. Zur Strategiebewertung wurde eine Modellkette aus Kanalnetz- und Gewässergütemodell aufgebaut.

Key-Words: Blau-grüne Infrastruktur, Regenwassermanagement, Mischwasserüberläufe, Oberflächenabkopplung, Kanalnetzmodellierung, Gewässergütemodellierung

1 Einleitung

Überläufe der Berliner Mischkanalisation nach Starkregenereignissen führen in den betroffenen Gewässerabschnitten regelmäßig zu geringen Sauerstoffkonzentrationen, die Fischsterben zur Folge haben können (Riechel et al. 2016). Um die Gewässergüte der Berliner Oberflächengewässer zu verbessern, wird im Mischkanalisationssystem derzeit ein umfangreiches Sanierungsprogramm umgesetzt und im Jahr 2024 abgeschlossen sein. Damit wird numerischen Simulationen zufolge das emissionsbasierte Ziel, eine jährliche Mischwasserentlastungsmenge von 25 % des Jahresregenabflusses nicht zu überschreiten, eingehalten. Allerdings wird für die von Mischwasserüberläufen betroffenen Gewässerabschnitte auch damit das Ziel der Wasserrahmenrichtlinie (EU 2000) - ein gutes ökologisches Potenzial - noch nicht erreicht, so dass weitere Maßnahmen folgen müssen (Riechel et al. 2020). Dazu werden im Rahmen des Projektes MiSa - Mischwasser(Einzugsgebiets)Sanierung - die Effekte von Maßnahmen in den Bereichen Oberflächenabkopplung, Kanalnetz Anpassung und Gewässermanagement auf die Anzahl und das Volumen von Mischwasserentlastungen sowie deren Auswirkungen auf die Sauerstoffverhältnisse bewertet. Basierend auf den Ergebnissen sollen Strategien zur Verbesserung der Gewässergüte entwickelt werden.

2 Material und Methoden

Das Projekt MiSa gliedert sich in drei Schritte: 1. Defizitanalyse, 2. Modellaufbau und -validierung und 3. Szenarienrechnung.

Im ersten Schritt „Defizitanalyse“ wurde anhand langjähriger Messdaten aus den Berliner Fließgewässern eine Untersuchung zu Schwere und Ausmaß von Sauerstoffdefiziten nach Mischwasserüberläufen (MWÜ) durchgeführt. Für die Bewertung wurde eine Kombination aus drei Indikatoren gemeinsam mit Gewässerexperten definiert; die Unterschreitungsdauer einer kritischen O₂-Konzentration, die Anzahl kritischer O₂-Ereignisse sowie die negative Abweichung von einem Referenzzustand (O₂-Konzentration

eines Gewässers ohne Mischwassereinfluss). Für Fische kritische O₂-Bedingungen liegen vor, wenn ein Grenzwert von 1,5 mg/L unterschritten wird.

Im zweiten Schritt „Modellaufbau/-validierung“ wurde die Grundlage für die modellgestützte Bewertung geschaffen. Die Bewertung erfolgt basierend auf den Ergebnissen einer Modellkette bestehend aus einem Kanalnetzmodell der Berliner Wasserbetriebe (Software InfoWorks ICM) und einem Gewässergütemodell der Berliner Senatsverwaltung (Software GERRIS/HYDRAX/QSim) (Matzinger et al. 2013). Die Modellkette wurde aktualisiert und auf das gesamte Berliner Mischsystem erweitert. Das Kanalnetzmodell umfasst nun alle 18 Mischwassereinzugsgebiete Berlins mit den 17 Hauptpumpwerken sowie 176 Mischwasserauslässen. Letztere stellen den Input für das Gewässergütemodell dar, welches seinerseits um drei Stauhaltungen sowie die Panke erweitert wurde. Beide Modelle wurden einzeln kalibriert und als Kette am Beispiel des Jahres 2017 validiert. In Berlin lagen hierfür langjährige, hochaufgelöste Messdaten (2000 bis 2019) aus den betroffenen Gewässerabschnitten (u.a. Sauerstoffgehalt) und an den Modellrändern (Wasserstand, Durchfluss) vor. Für die Kanalseite wurde auf Daten von neun Niederschlagsschreibern sowie den Durchflussdaten an den Hauptpumpwerken zurückgegriffen.

Parallel dazu wurden im Rahmen mehrerer Workshops zusammen mit den Berliner Wasserbetrieben (BWB), der Senatsverwaltung für Umwelt, Mobilität, Verbraucher- und Klimaschutz (SenUMVK) sowie den Bezirken Charlottenburg-Wilmersdorf und Friedrichshain-Kreuzberg verschiedene, in der Zukunft denkbare Handlungsoptionen im Kanalnetz, im Gewässer sowie insbesondere im Bereich Oberflächenabkopplung in den Mischwassereinzugsgebieten erarbeitet. Diese sollen im dritten Schritt „Szenarienrechnung“ in Form von Szenarien mit der Modellkette simuliert und anschließend mithilfe der MiSa-Indikatoren bewertet werden.

3 Ergebnisse

3.1 Defizitanalyse

Tabelle 7 zeigt die vergleichende Bewertung der durch das Monitoring überwachten Berliner Fließgewässer Spree (Mühlendamm Schleuse - MUE, Bellevue - BEL, Caprivibrücke - CAP, Charlottenburg - CHA und Sophienwerder - SOP), Berlin-Spandauer Schifffahrtskanal (BSK) und Landwehrkanal (LWK) anhand der langjährigen Mittelwerte der drei MiSa-Indikatoren. Ausgeprägte Belastungen zeigen sich vor allem in den zentralen Bereichen der Stadt an den drei Messstellen CHA, Möckernbrücke (MOE) und Dovebrücke (DOV).

Tabelle 18: Vergleichende Bewertung der überwachten Berliner Fließgewässer anhand von Messdaten der Jahre 2000 bis 2019, Unterschreitungsdauer der kritischen O₂-Konzentration in Stunden, Anzahl kritischer O₂-Ereignisse, Negative Abweichung vom Referenzzustand Mühlendamm Schleuse (MUE)

Messstelle	Gewässer	Ø Unterschreitungs- dauer pro Jahr [h]	Ø Kritische O ₂ -Ereignisse pro Jahr	Ø Negative Abweichung pro Jahr [%]
MUE	Spree	0.22	0.06	0
BEL	Spree	41.08	1.33	3
CAP	Spree	164.58	3.27	17
CHA	Spree	295.19	2.89	18
SOP	Spree	4.74	0.25	6
MOE	LWK	276.03	5.47	34
DOV	LWK	361.00	7.67	30
BSK	BSK	82.82	2.94	13

3.2 Validierung der Modellkette

Die einzeln kalibrierten Modelle wurden als Modellkette für den Zeitraum Mai bis September 2017 (niederschlagsreiches Jahr) validiert. Im Ergebnis konnten mit der Modellkette die für MiSa besonders relevanten O₂-Konzentrationen im Jahresverlauf und nach Mischwasserüberläufen sehr gut abgebildet werden. In den Streudiagrammen in Abbildung 1 sind Anzahl und Unterschreitungsdauer auf Basis von Messwerten den simulierten Ergebnissen gegenübergestellt. Dies wurde für drei Sauerstoffkonzentrationen 1,5 mg/L, 2,5 mg/L und 3,5 mg/L separat durchgeführt. Das linke Diagramm zeigt die für den Betrachtungszeitraum von Mai bis September 2017 erreichte Modellgüte hinsichtlich kritischer Sauerstoffdefizite nach Mischwasserüberläufen an sechs von den acht in Tabelle 7 aufgelisteten Messstellen. Für die Messstellen Bellevue (BEL) und Dovebrücke (DOV) lagen keine Messwerte im Betrachtungszeitraum vor. Für fünf der betrachteten Messstellen stimmt die Anzahl simulierter Ereignisse sehr gut mit den Beobachtungen überein. Einzig an der Messstelle Sophienwerder (SOP), an der nach Mischwasserüberläufen keine Sauerstoffdefizite im Sommer 2017 kleiner 3,5 mg/L gemessen wurden, werden deutlich zu viele Defizitereignisse simuliert. Wie in Abbildung 1 rechts zu erkennen ist, wird auch die Dauer, mit der der jeweilige kritische Grenzwert der Sauerstoffkonzentration unterschritten wurde, mit dem erweiterten und angepassten Modell, mit Ausnahme für SOP, zufriedenstellend abgebildet.

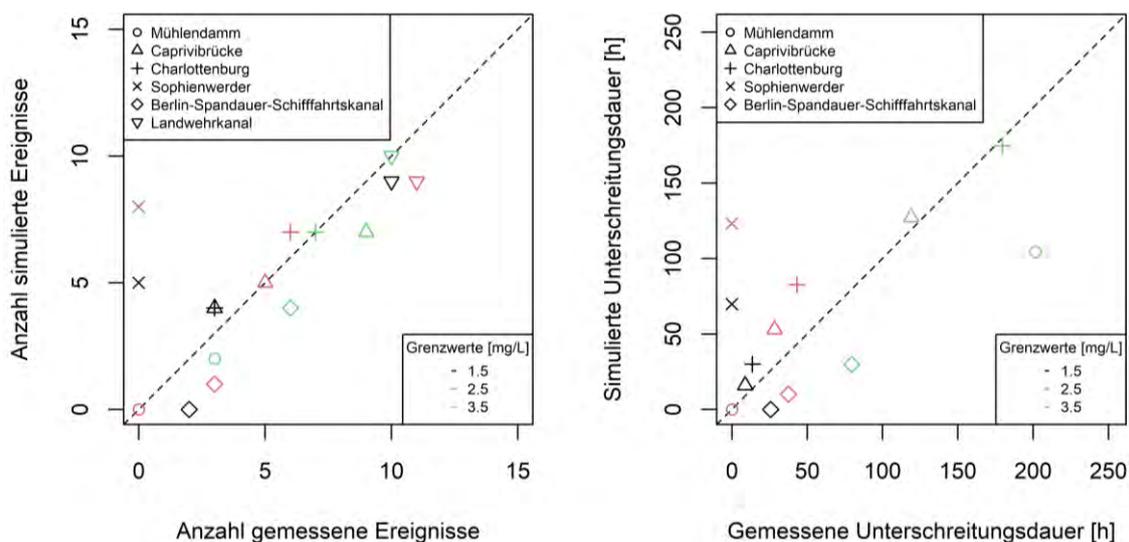


Abbildung 61: Vergleich der gemessenen und simulierten Anzahl kritischer O₂-Ereignisse (links) sowie der Unterschreitungsdauer in Stunden (rechts)

3.3 MiSa-Planungsinstrument

Um möglichst realitätsnahe Rückschlüsse auf die Wirksamkeit der Maßnahmen ziehen zu können, werden die Szenarien auf Basis von realen Niederschlagsereignissen bewertet, die zu kritischen O₂-Ereignissen im Gewässer geführt haben. Dazu sind 14 Niederschlagsereignisse aus den Jahren 2011 bis 2019 ausgewählt und mit der Modellkette simuliert worden. Abbildung 62 zeigt in Form georeferenzierter Isolinien die Summe der Unterschreitungsdauer der 14 Niederschlagsereignisse für die mit dem Gütemodell betrachteten Berliner Gewässer. Die verschiedenen Szenarien der strategischen Maßnahmenplanung werden anschließend mit dem Basisszenario verglichen und anhand der drei MiSa-Indikatoren bewertet. Die angepasste und aktualisierte Modellkette, die 14 Niederschlagsereignisse sowie die drei MiSa-Indikatoren bilden zusammen das MiSa-Planungsinstrument.

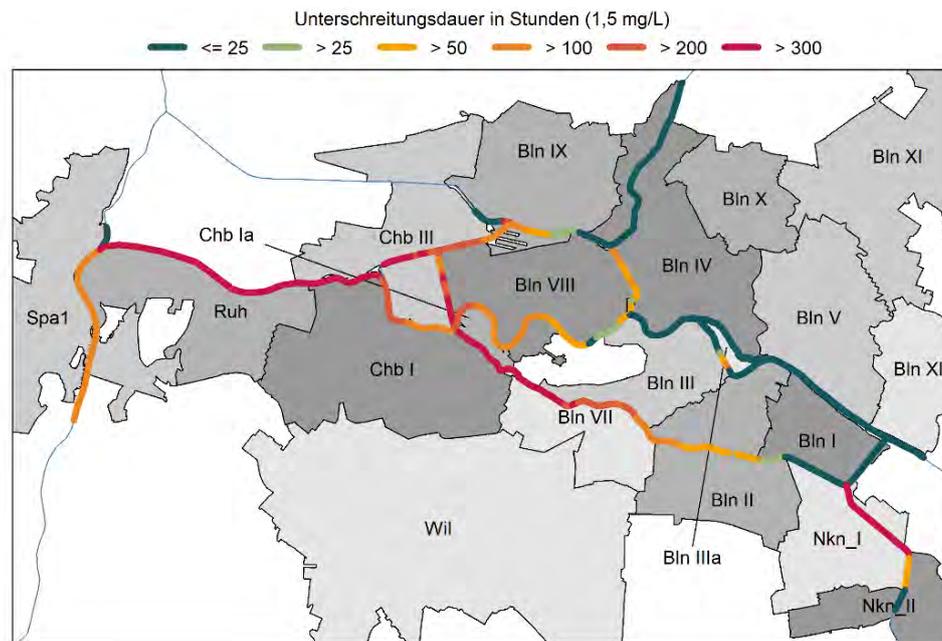


Abbildung 62: Summe der Unterschreitungsdauer der kritischen Sauerstoffkonzentration (1,5 mg/L) von 14 Niederschlagsereignissen mit Mischwasserüberläufen in die Berliner Fließgewässer, grau hinterlegt: Mischwassereinzugsgebiete

3.4 Strategische Maßnahmenplanung

Im Rahmen der Workshops in Zusammenarbeit mit zwei Berliner Bezirken wurden realistische Strategien und Szenarien der Oberflächenabkopplung vom Kanalnetz entwickelt. Zunächst wurden die drei Zeithorizonte 10, 30 und mehr als 30 Jahre definiert, in denen Maßnahmenumsetzungen bereits geplant beziehungsweise möglich sind. Für jeden Zeithorizont wurden Art der dezentralen Regenbewirtschaftungsmaßnahmen (z.B. Parkplatzentsiegelung, Gründächer, blau-grüne Straßenzüge, usw.), Verortung (Straße, Liegenschaften) und Ausmaß (z.B. öffentliche Liegenschaften, hitzebelastete Straßenzüge, alle Flachdächer, usw.) festgelegt. Die ermittelten Abkopplungspotenziale von 3 %/8 % (10 a), 31 %/24 % (30 a) und 58 %/37 % (> 30 a) für die beiden Bezirke werden im nächsten Schritt mit der Modellkette simuliert und mit den MiSa-Indikatoren bewertet.

In Rahmen einer Potenzialanalyse wurde der fiktive Gewässerzustand ermittelt, der sich durch eine ideelle, nicht realistische 100-prozentige Abkopplung von Teileinzugsgebieten der Berliner Mischwassereinzugsgebiete ergeben würde. Die Auswahl der Teileinzugsgebiete erfolgte so, dass sie zu einer Entlastung bestimmter Gewässerabschnitte (Landwehrkanal und Neuköllner Schifffahrtskanal, Berlin-Spandauer Schifffahrtskanal und Panke, Spree im Stadtzentrum) führen.

Der Vergleich von Abbildung 63 und Abbildung 64 zeigt beispielhaft an einem einzelnen Niederschlagsereignis (E12), dass es bei einer 100-prozentigen Abkopplung von Mischwassereinzugsgebieten des Landwehrkanals und des Neuköllner Schifffahrtskanals dort erwartungsgemäß zu keinen kritischen Sauerstoffereignissen mehr kommen würde. Darüber hinaus verbessert sich aber auch die Gewässergüte der weiter unterhalb gelegenen Gewässerabschnitte der Spree unterhalb der Einmündung des Landwehrkanals. Umgekehrt ist mit dieser auf den Landwehrkanal begrenzten Maßnahme keine Entlastung von Gewässerabschnitten der Spree oberhalb der Einmündung oder des Berlin-Spandauer Schifffahrtskanals zu erwarten. Dazu dienen die beiden anderen 100-prozentigen Abkopplungsszenarien der Stadtsprees sowie des Berlin-Spandauer Schifffahrtskanals und der Panke.

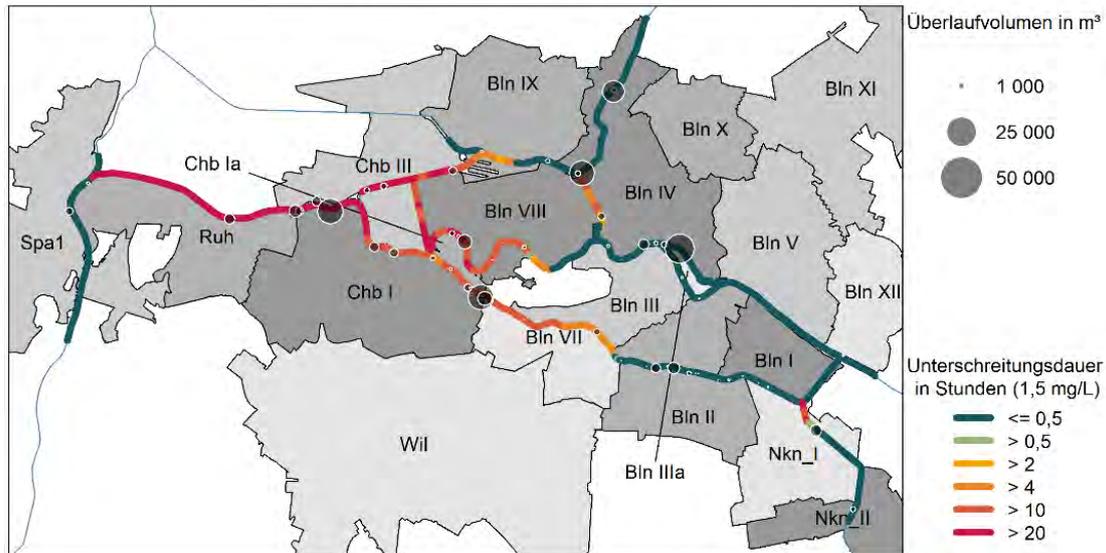
MWÜ und Gewässerbelastung - E12


Abbildung 63: Unterschreitungsdauer der kritischen Sauerstoffkonzentration (1,5 mg/L) von Ereignis 12 mit Mischwasserüberläufen in die Berliner Fließgewässer, grau hinterlegt: Mischwassereinzugsgebiete, schwarze Kreise: Überlaufvolumen der Mischwasserentlastungen

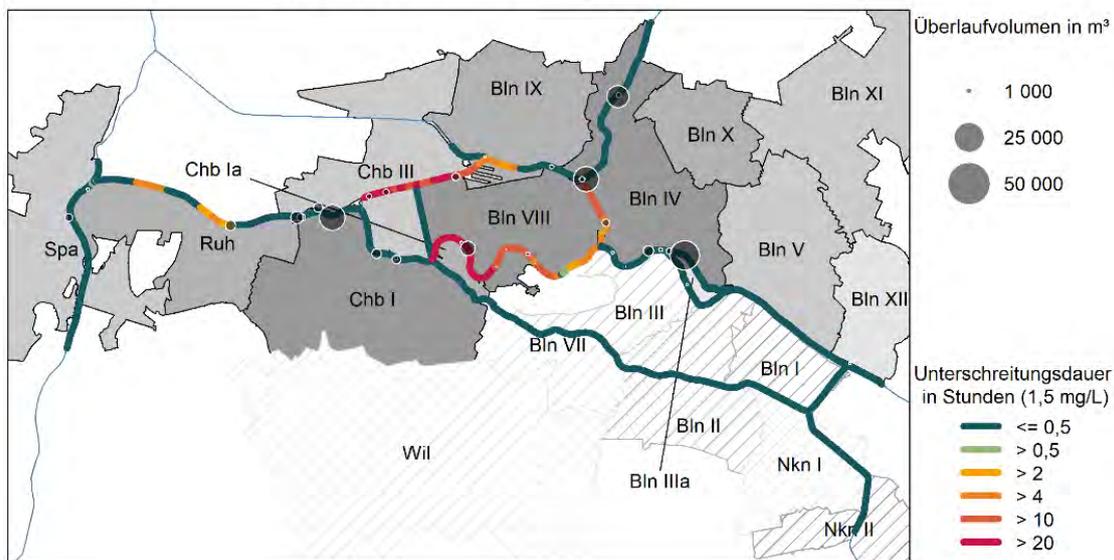
MWÜ und Gewässerbelastung - E12


Abbildung 64: Unterschreitungsdauer der kritischen Sauerstoffkonzentration (1,5 mg/L) von Ereignis 12 mit Mischwasserüberläufen in die Berliner Fließgewässer im Szenario mit 100 % Abkopplung der Mischwassereinzugsgebiete am Landwehrkanal, grau hinterlegt: Mischwassereinzugsgebiete, schraffiert: Mischwassereinzugsgebiete mit abgekoppelten Teileinzugsgebieten, schwarze Kreise: Überlaufvolumen der Mischwasserentlastungen

4 Schlussfolgerungen

- Mithilfe der MiSa-Indikatoren können Sanierungen des Mischkanalisationsnetzes immissionsbasiert bewertet werden.
- Die Modellkette aus Kanalnetz- und Gewässergütemodell kann die Auswirkungen von Mischwasserüberläufen auf die Hauptfließgewässer des Berliner Stadtgebietes im Ist-Zustand gut abbilden.
- Durch die Kopplung beider Modelle lassen sich Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung im gesamten Einzugsgebiet der Berliner Mischwasserkanalisation in verschiedene Szenarien integrieren und bezüglich ihrer Auswirkungen auf die Berliner Gewässer bewerten.
- Das Workshop-Format und die enge Zusammenarbeit aller Partnerinstitutionen ermöglicht erstmals eine strategische Planung von Abkopplungsmaßnahmen unter Einbezug von Wirtschaftlichkeit, Umsetzbarkeit, Klimaanpassungs- und Überflutungsschutzmaßnahmen.

5 Literatur

EU (2000): Water Framework Directive, Directive 2000/60/EC. European Parliament and Council, 23/10/2000.

Matzinger A., Riechel M., Uldack M., Caradot N., Sonnenberg H., Rouault P., Pawlowsky-Reusing E., Heinzmann B. und von Seggern D. (2013): Aufbau, Validierung und Anwendung eines modellbasierten Werkzeugs für die immissionsbasierte Maßnahmenplanung im Berliner Mischwassersystem. Aqua Urbanica 2013 - Gewässerschutz bei Regenwetter, 8, Dübendorf, Switzerland.

Riechel M., Matzinger A., Pawlowsky-Reusing E., Sonnenberg H., Uldack M., Heinzmann B., Caradot N., von Seggern D. und Rouault P. (2016): Impacts of combined sewer overflows on a large urban river – Understanding the effect of different management strategies. Water Research, 105, 264-273.

Riechel M., Matzinger A., Pallasch M., Joswig K., Pawlowsky-Reusing E., Hinkelmann R. und Rouault P. (2020): Sustainable urban drainage systems in established city developments: Modelling the potential for CSO reduction and river impact mitigation. Journal of Environmental Management, 274.

Korrespondenz:

Franziska Knoche
Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH
0049 30 53653 846
franziska.knoche@kompetenz-wasser.de

Behandlung von Regenwasser im Siedlungsraum - Schadstoffrückhalt unter besonderer Berücksichtigung von organischen Spurenstoffen

R. Töws¹, F. Steinweg¹, D. Wicke², P. Rouault², M. Burkhardt³

¹ Funke Kunststoffe GmbH, Siegenbeckstraße 15, 59071 Hamm, Deutschland

² Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH, Cicerostaße 24, 10709 Berlin, Deutschland

³ OST - Ostschweizer Fachhochschule, Oberseestraße 10, 8640 Rapperswil, Schweiz

Kurzfassung: In urbanen Gebieten kann abfließendes Regenwasser belastet sein, insbesondere auch mit gelösten organischen Spurenstoffen und Schwermetallen. Diese Substanzen werden von Gebäuden sowie Verkehrsflächen abgewaschen und können über Versickerungen in das Grundwasser gelangen. Mit einem neuen Adsorbersubstrat wurden Schwermetalle, organische Spurenstoffe und deren Transformationsprodukte aus dem Regenwasser so gut entfernt, dass sich damit neue Anwendungsbereiche für Schwammstadt-konzepte im urbanen Raum eröffnen.

Key-Words: Spurenstoffe, Regenwasserabfluss, Stoffrückhalt, Adsorbentmaterial, Biozide, Schwammstadt

1 Hintergrund

Die Qualität von urbanem Regenwasserabfluss gewinnt für blau-grüne Infrastrukturen im Siedlungsraum an Bedeutung, weil anfallendes Regenwasser rasch versickert oder verdunstet werden soll. Neben Massnahmen an der Quelle zur Reduzierung von Schadstoffemissionen stellt die Behandlung von belastetem Regenwasserabfluss einen zentralen Baustein der Regenwasserbewirtschaftung dar [1, 2]. Mittlere und hohe Belastungen erfordern meistens eine Behandlung mit Bodenpassage oder Adsorberanlagen. Die Behandlungsziele konzentrieren sich hauptsächlich auf klassische Schadstoffe des Verkehrs, wie GUS (AFS), Schwermetalle und Mineralöle, und nur vereinzelt auf andere gelöste Schadstoffe. Seit einigen Jahren ist das Vorkommen von organischen Spurenstoffen im Regenabwasser in den Fokus gerückt, vor allem aufgrund ihrer hohen ökotoxikologischen Relevanz, der Bildung von Transformationsprodukten, und dem Auftreten verschiedenster Stoffe in urbanen Oberflächengewässern oder Grundwasser [3-7]. Transformationsprodukte entstehen aus organischen Ausgangsmolekülen durch mikrobiellen Abbau, unter dem Einfluss von Sonnenlicht oder Wasser. Eine besondere Herausforderung ist, solche Bruchstücke der Ausgangsstoffe in Boden oder Substrat zu binden, weil sie klein und meistens mobiler sind. Verglichen mit Schwermetallen sind Spurenstoffe mobiler und vielfach toxischer, daher von hoher Relevanz für die Wasserqualität.

Wie für Pflanzenschutzmittel und Biozidprodukte gilt auch für jedes Transformationsprodukt im Grundwasser ein allgemeingültiger Grenzwert von 0,1 µg/l pro Stoff und 0,5 µg/l für die Summe der Wirkstoffe und Transformationsprodukte. Zwar ist der Grundwasserschutz in Abhängigkeit von den Schutzzonen unterschiedlich stark ausgeprägt, Verschmutzungen sollten aber im urbanen Raum gerade aufgrund zunehmender Regenwasserversickerungen vermieden werden.

In Beschichtungen für Fassaden kommen Biozide wie Diuron, Terbutryn, OIT und DCOIT, in wurzelfesten Bitumendichtungsbahnen Mecoprop und MCPA, in Kautschukabdichtungen Benzothiazole und Zink vor. Diese werden bei Regenwetter sukzessive freigesetzt [8-11]. Um zu verhindern, dass solche Stoffe durch Versickerung ins Grundwasser oder über die Regenkanalisation in Oberflächengewässer gelangen, werden auf innerstädtischen Flächen mit wenig Platz für Flächenversickerungen geeignete Substrate mit kompakten Anlagen benötigt. Dieser nachgeschaltete Ansatz ist ein weiterer Baustein zur Reduzierung der Umweltbelastung durch urbanen Regenwasserabfluss und zur nachhaltigen Umsetzung von Schwammstadt-konzepten bei belasteten Regenwasserabflüssen [12].

2 Entwicklung eines Adsorbersubstrats

Ziel war es, neue technische Lösungen zum Schutz des Grundwassers zu entwickeln. Für den effektiven und zuverlässigen Rückhalt von partikulären Stoffen (GUS), Schwermetallen und gelösten organischen Spurenstoffen sowie deren Transformationsprodukten sollte ein universell einsetzbares Filtersubstrat mit hoher Wasserdurchlässigkeit (geringes Kolmationsrisiko) zu entwickeln. Basierend auf einer gründlichen Literaturrecherche zum Stand der Technik und Erfahrungswerten aus der Praxis wurden potentiell geeignete Materialien beschafft [13]. Im Labor wurden verschiedene Substratmischungen schrittweise getestet und für die Mischung mit dem besten Rückhalt die Leistungsfähigkeit unter realen Anwendungsbedingungen in Säulen an einer Gebäudefassade und in einem kleinen Einzugsgebiet bilanziert.

Die Schwermetalle Zink und Kupfer (gesamt, gelöst) wurden mittels ICP-MS, die organischen Stoffe mit LC-MS/MS analysiert. Zusätzlich zu den Wirkstoffen Diuron und Terbutryn sind im Feld auch deren Transformationsprodukte Diuron-desmethyl (DCPMU) sowie Hydroxy-Terbutryn und Desethyl-Terbutryn (M1) gemessen worden (Tab. 1).

Tabelle 19: Analysierte Substanzen und Transformationsprodukte und deren Herkunft bei der Pilotinstallation.

Substanz	Herkunftsflächen und Bedeutung der Stoffe
Diuron	Biozid im Filmschutzmittel der Fassadenfarbe
Diuron-desmethyl (<i>DesM-Diuron</i>)	Transformationsprodukt von Diuron
Terbutryn	Biozid im Filmschutzmittel der Fassadenfarbe
Terbutryn-2-hydroxy (<i>OH-Terbutryn</i>)	Transformationsprodukt von Terbutryn
Terbutryn-desethyl (<i>DesE-Terbutryn</i>)	Transformationsprodukt von Terbutryn
Mecoprop (MCP)	Durchwurzelungsschutzmittel in der Bitumenbahn
Benzothiazol	Vulkanisationsbeschleuniger in Kautschukbahn (EPDM)
Zink (gesamt, gelöst)	Abschwemmung von Zinkblech, Vernetzungsstoff in EPDM, Bestandteil in Zinkpyrithion
Kupfer (gesamt, gelöst)	Abschwemmung von Kupferblech

3 Substratversuche im Labor

Anlehnend an die VSA-Leistungsprüfung wurden in einer Serie von Säulenversuchen (Materialfüllung: 200 mm Höhe, 85 mm Innendurchmesser) Wirkungsgrade für Biozidmischungen aus MCP, Diuron, Terbutryn und DCOIT ermittelt [14]. Nach mehreren Entwicklungsschritten wurden zwei Substratmischungen im Vergleich zu Oberboden in fünf Säulenversuchen auf den Rückhalt der Spurenstoffe Terbutryn, Diuron und Mecoprop (MCP) untersucht. In der besten Substratmischung wurde im Mittel über drei verschiedene Filtergeschwindigkeiten Terbutryn zu 83 %, MCP zu 78 % und Diuron zu 84 % zurückgehalten. Im Oberboden hingegen liegt der mittlere Rückhalt von Terbutryn nur bei 38 % und der von Diuron und MCP noch deutlich darunter (Abbildung 1).

Die vielversprechendste Mischung wurde im Mischungsverhältnis nochmals optimiert und in zehn weiteren Säulenversuchen auf den Rückhalt von MCP, Diuron und DCOIT analysiert. Mit dieser Substrat-

mischung wurden mittlere Wirkungsgrade von 99 % für DCOIT und Diuron, sowie 90 % für MCPP erreicht. Auf Grundlage des hohen Stoffrückhalts wurde die leistungsfähigste Mischung für eine Anwendung unter realen Anwendungsbedingungen im Feld ausgewählt.

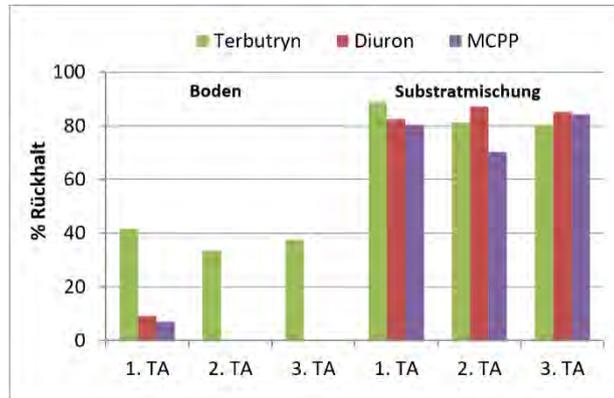


Abb. 1: Stoffrückhalt für die Substratmischung und Boden gemäss VSA im Labor (TA=Teilabschnitt).

4 Stoffrückhalt an der Quelle

Das optimierte Substrat wurde in zwei Filtern (Substrathöhe je 20 cm, Innendurchmesser je 85 mm) an Fassaden eingesetzt (Abb. 2, links). Zuvor wurden zwei nach Südwesten ausgerichtete Fassadenflächen (jeweils 4 m hoch, 1,8 m breit) neu beschichtet (je Putz + Farbe): Probefläche 1 mit Wirkstoff Terbutryn, Probefläche 2 mit OIT als Hauptwirkstoff. Das Ablaufwasser der angeschlossenen Fassadenflächen wurde jeweils durch die abwärtsdurchströmten Substratfilter geleitet und der Ablauf ereignisbezogen aufgefangen und umgehend chemisch analysiert. Aus den Konzentrationen im Zu- und Ablauf des Filters wurden die Stoffeliminationen ermittelt. Die Filter waren trockenfallend.

Das Verhältnis der Fassadenfläche (jeweils 7,2 m²;) zum Filterquerschnitt (0,005 m²) betrug ~1'500:1. Typischerweise gelangen an Fassaden nur ~1 % des Jahresniederschlags zum Abfluss. Bezogen auf die beiden Versuchsflächen betrug der Anteil über die Versuchsdauer von ca. 1 Jahr aufgrund der windexponierten Lage der Versuchsflächen sogar etwa 7 %. Damit lag ein Verhältnis der Anschluss-/Versickerungsfläche von ca. 70:1 vor. Über die Versuchsdauer wurden die Niederschlagshöhe und der Fassadenabfluss erfasst.

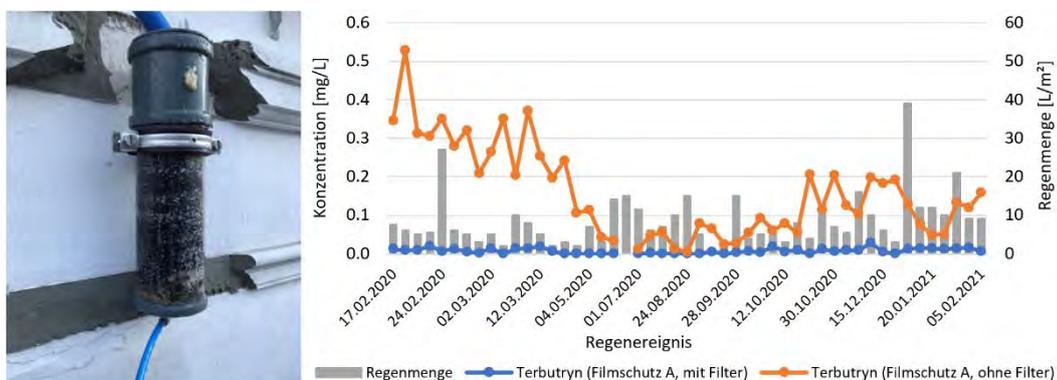


Abb. 2: Filterinstallation an der Fassade (links) und Stoffrückhalt von Terbutryn über Versuchsdauer (rechts).

Über den Versuchszeitraum von 13 Monaten emittierten von den Fassadenflächen bezogen auf die aufgetragene Menge 0,2 % Terbutryn (8 mg/m²) und 10,5 % OIT (27 mg/m²) in den Fassadenabfluss. Die Zulaufkonzentrationen zeigen in den ersten Monaten einen stetigen Konzentrationsrückgang, ausgehend von hohen Anfangskonzentrationen (Anfangsauswaschung). Nach einem anhaltend niedrigen Konzentrationsniveau in den Sommermonaten stiegen die Konzentrationen im Herbst wieder leicht an. Die geringeren Konzentrationen im Sommer deuten auf einen relevanten photolytischen Abbau der Wirkstoffe an der Oberfläche durch UV-Strahlung hin, wie dieser auch aus anderen Untersuchungen bekannt ist [3, 10]. Die Ablaufkonzentrationen des Filters (blau Messpunkte) waren unabhängig von der Dynamik der Zulaufkonzentrationen (orangene Messpunkte) auf gleichbleibend niedrigem Niveau (Abb. 2, rechts: Terbutryn).

Die Ergebnisse zeigen zudem, dass Terbutryn und OIT von dem neu entwickelten Substrat sehr wirksam über den Untersuchungszeitraum von 13 Monaten zurückgehalten wurden (Abb. 2, rechts: Terbutryn). So ergibt sich ein Frachtrückhalt von 94 % für Terbutryn und von > 98 % für OIT.

5 Barrierekonzept im Einzugsgebiet

5.1 Vorgehen

Der Pilotfilter wurde in Berlin (Mai 2020) installiert und über den Zeitraum von 400 Tagen beschickt. Aufgebaut und angeschlossen an den Filter wurden mehrere Flächenmaterialien, deren Freisetzung von Spurenstoffen in Regenwasserabfluss bekannt ist. Die Flächen wurden neu erstellt und setzten sich aus zwei Metallflächen (Kupfer 2,8 m², Zink 2,1 m², unbeschichtet), zwei Kiesdächer mit Bitumen- und EPDM-Dichtungsbahnen (je 5 m²) und einer biozidbeschichteten Fassade (150 m²) zusammen.

Die wurzelfeste Bitumenbahn enthielt den Wirkstoff MCPP und die EPDM-Abdichtungsbahn die auswaschrelevanten Stoffe Benzothiazol und Zink. MCPP ist ein weit verbreitetes Durchwurzelungsschutzmittel in Bitumenbahnen und seit Jahrzehnten bekannt als Quelle von Gewässerbelastungen [9]. In wurzelfesten Bitumenbahnen wird neben MCPP mittlerweile auch MCPA eingesetzt. Benzothiazol und Zink kommen als Vulkanisationsbeschleuniger und Vernetzer in EPDM-Bahnen vor. Je nach Vernetzungsgrad schwanken die Einsatzkonzentrationen. Die Fassade war vor Untersuchungsbeginn mit einer biozidhaltigen Farbe neu gestrichen worden, die die Wirkstoffe Diuron, Terbutryn und OIT enthielt. Der Pilotfilter (Innendurchmesser 0,375 m, Substrathöhe 0,2 m, 22 Liter Substrat) war in einem Schacht unweit der Emissionsquellen unterirdisch installiert (Höhe 1,75 m) (Abb. 3).

Die an den Pilotfilter angeschlossene Gesamtfläche umfasste 165 m², davon 15 m² horizontale und 150 m² vertikale Flächen. Der Fassadenabfluss gelangte über die Zink- und Kupferflächen sowie die Dachentwässerung ohne weitere Verdünnung direkt in den trockenfallend betriebenen Filter (Abb. 3, rechts). Das gereinigte Regenwasser versickerte über eine Rigole (1.000 L) in den Untergrund.



Abb. 3: Pilotfilter zur Regenwasserbehandlung am Standort Berlin. Links: Blick in den geöffneten Schacht, rechts: Aussenansicht des Schachtes und der angeschlossenen Flächen.

Zu- und Abflussmengen wurden erfasst, jeweils 0,5 % volumenproportional in Mischproben (10 L, Glasflaschen) gesammelt und über die Versuchsdauer je 19 Proben vom Zu- und Abfluss des Filters auf die Zielsubstanzen chemisch analysiert (Tab. 1). Rund 90 % des Regenwasserabflusses sind damit erfasst worden. Mit der Probenahme-strategie waren nicht nur ein grosses Spektrum unterschiedlicher Abflussmengen, sondern auch die jahreszeitlichen Schwankungen abgedeckt, um Aussagen zum Schadstoffrückhalt des Filters bei unterschiedlichen hydraulischen Belastungen zu treffen. Der Niederschlag wurde vor Ort fortlaufend erfasst (Regenmenge 561 mm).

5.2 Ergebnisse

Abb. 4 zeigt die Zulaufkonzentrationen in den Filter. Die höchsten mittleren Konzentrationen wurden für Zink (2.200 µg/L), gefolgt von Kupfer mit einer rund 10-mal geringeren mittleren Konzentration (220 µg/L) ermittelt. Bis zum Ende der Versuchsdauer waren die Konzentrationen der beiden Schwermetalle im Zulauf des Filters hoch, mit 1'000-2'000 µg/L Zink und 100-200 µg/L Kupfer (Abb. 5). Die gelösten Anteile lagen jeweils bei rund 50 % der Gesamtkonzentrationen.

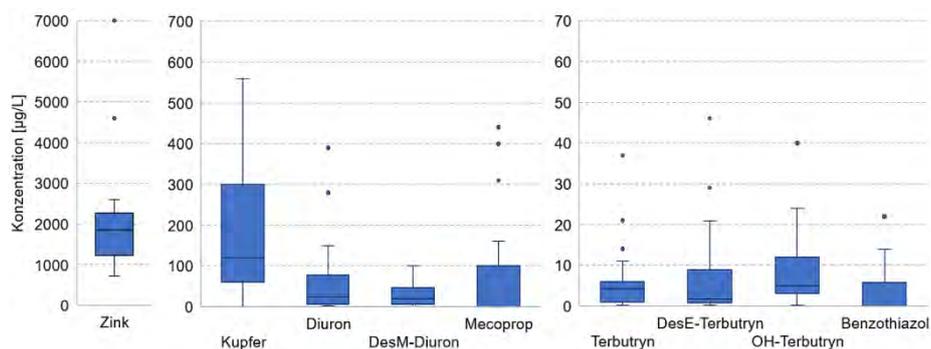


Abb. 4: Zulaufkonzentrationen für Zink, Kupfer, vier Spurenstoffe und drei Transformationsprodukte am Standort der Pilotinstallation in Berlin (n=19).

Bei den organischen Spurenstoffen lagen die mittleren Konzentrationen von Diuron und Mecoprop bei je rund 70 µg/L, gefolgt von Terbutryn und Benzothiazol mit 7 und 4 µg/L. Die Spurenstoffe zeigten abnehmende Konzentrationshöhen über die Zeit (Abb. 5), beispielsweise im Zulauf 250 µg/L Diuron im

ersten Monat und 20 µg/L nach 12 Monaten. Diese zeitliche Abnahme korreliert mit der abnehmenden Auswaschung der Fassadenfarbe, vor allem wenn die Biozide verkapselt eingesetzt werden. Die Konzentrationen der analysierten Transformationsprodukte Desmethyl-Diuron (DesM-Diuron), Desethyl-Terbutryn (DesE-Terbutryn) und Hydroxy-Terbutryn (OH-Terbutryn) bewegen sich in einem ähnlichen Konzentrationsbereich wie die Wirkstoffe (Abb. 4). Die Transformationsprodukte von entsprechenden Ausgangsstoffen gelangen folglich in relevanten Konzentrationen in den Fassadenabfluss und eine Regenwasserbehandlung sollte auch diese berücksichtigen [12, 13].

Für Mecoprop und Benzothiazol aus den Dichtungsbahnen bestätigte sich ebenfalls die abnehmende Auswaschung. Nach Anfangskonzentrationen von mehr als 400 µg/L Mecoprop sanken diese nach fünf Monaten auf weniger als 1 µg/L. Die rasche Abnahme weist darauf hin, dass vor allem zu Beginn Mecoprop von der Dachbahnoberfläche abgewaschen wurde und nicht aus dem Material diffundierte. Je nach Produkt ist die Höhe der Freisetzung rezepturbedingt sehr verschieden. Produkte können höhere oder geringere Stoffmengen über die Zeit der Exposition freisetzen [3]. Bezogen auf die Quellflächen wurden im Versuchszeitraum 3 mg/m² Diuron, 0,3 mg/m² Terbutryn, 60 mg/m² Mecoprop und 5 mg/m² Benzothiazol emittiert.

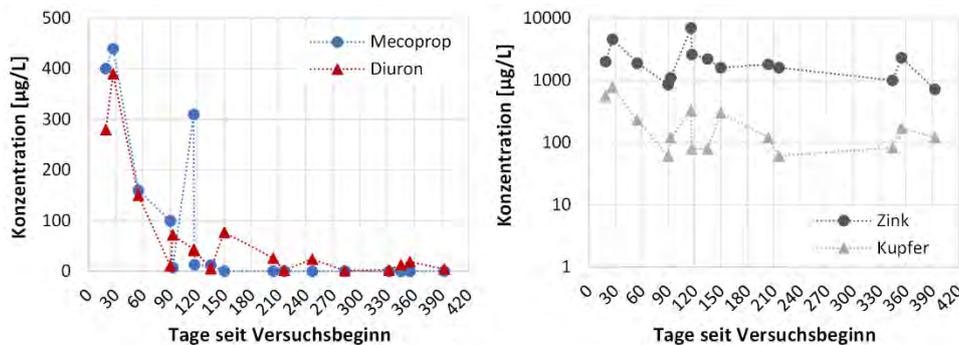


Abb. 5: Konzentrationen von Mecoprop und Diuron (links) sowie Zink und Kupfer (rechts, log-Skala) im Filterzulauf. Die gepunktete Linie dient der besseren Lesbarkeit und repräsentiert keine Messwerte.

Der mittlere Stoffrückhalt, ermittelt aus der Summe der ereignisbezogenen Differenzen von Zu- und Abflafrachten, erreicht je > 90 % für die Schwermetalle und Spurenstoffe. Die Einzelstoffe und Transformationsprodukte zeigen eine Spannweite des Rückhalts von 85 % für Mecoprop bis 97 % für Diuron, Desmethyl-Diuron und Benzothiazol (Abb. 6). Im Beprobungszeitraum von 13 Monaten wurden durch die 22 Liter Substrat etwa 16.000 mg (1.300 mg/kg) Zink, 1.400 mg (120 mg/kg) Kupfer sowie 1.100 mg (90 mg/kg) der analysierten Spurenstoffe zurückgehalten. Bemerkenswert ist, dass die untersuchten Transformationsprodukte von Diuron und Terbutryn genauso gut entfernt wurden wie die Wirkstoffe. Dies ist zudem der erstmalige experimentelle Nachweis für eine Regenwasserbehandlungsanlage, dass sich Transformationsprodukte wirksam entfernen und Grundwasserbelastungen vermeiden lassen.

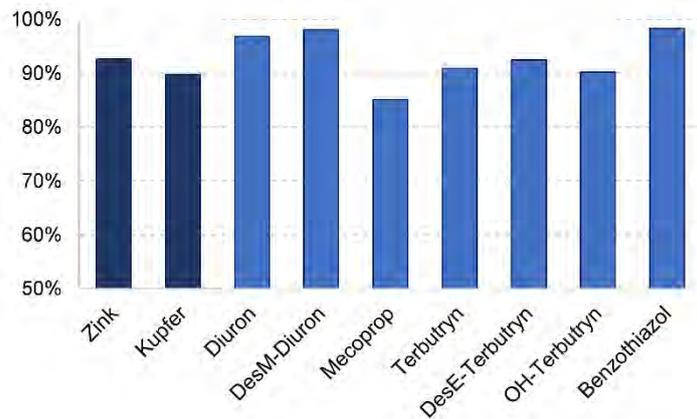


Abb. 6: Stoffrückhalt der Gesamtfracht über den Versuchszeitraum von 13 Monaten.

Für den gelösten Anteil der Metalle liegt der Rückhalt bei Kupfer etwas niedriger als für den Gesamtgehalt (85 % vs. 90 %), ist aber für Zink gleich hoch (je ca. 93 %). Der Rückhalt der Schwermetalle beruht sowohl auf dem Rückhalt durch Filtration, bzw. der Anlagerung des partikulären Anteils an der Oberfläche des Substrats, als auch der Adsorption der gelösten Metallfraktionen am Substrat. Weniger relevant war im Filter der Einfluss des pH-Werts auf die Schwermetallmobilität.

Abb. 7 zeigt die Frachtreduktion für die Einzelereignisse über die Durchflussmenge bezogen auf das Bettvolumen. Die Variabilität des Stoffrückhalts ist ausserordentlich gering, Der Sachverhalt zeigt, dass der hohe Wirkungsgrad weitgehend unabhängig von den Zulaufkonzentrationen und der hydraulischen Belastung ist (Abb. 7).

Für Mecoprop variiert der Rückhalt am stärksten, beeinflusst durch stark schwankende Zulaufkonzentrationen (Abb. 5). Hohe Mecoprop-Frachten zu Beginn werden sehr effektiv zurückgehalten. Bei Zulaufkonzentrationen $< 1 \mu\text{g/L}$, die nach mehr als 900 Bettvolumen auftraten, sinkt der prozentuelle Rückhalt folgerichtig. Hier spielt aber auch zusätzlich die analytische Genauigkeit hinein. Mit andauernder Versuchsdauer sinken die Ablaufkonzentrationen in den Bereich der Bestimmungsgrenze, entsprechend nimmt die Genauigkeit der Messungen ab, sodass der MCPP-Rückhalt weniger aussagekräftig wird. Der Rückhalt von Benzothiazol, Diuron, Terbutryn und den Transformationsprodukten liegt über die gesamte Untersuchungszeit mit mehr als 1500 Bettvolumen Betriebsdauer, trotz teils niedrigen Zulaufkonzentrationen, auf konstant hohem Niveau. Eine hohe Stoffelimination ist folglich sowohl bei hohen als auch bei geringen Zulaufmengen bzw. -konzentrationen überwiegend zu erwarten.

Das Filtersubstrat wurde im Untersuchungszeitraum mit knapp 11 m^3 Regenwasser beschickt. Die Substratoberfläche betrug im Pilotversuch insgesamt ca. $0,11 \text{ m}^2$. Bezogen auf die angeschlossene Fläche von 15 m^2 Dachfläche (150 m^2 vertikale Fassadenfläche sind weniger abflusswirksam) ergibt sich ein Anschluss-Versickerungsverhältnis von ca. 150:1 bei einer Einstauhöhe von ca. 20 cm. Im Regelbetrieb kam es über den Beprobungszeitraum zu keinem hydraulischen Versagen und auch zu keinem stofflichen Durchbruch.

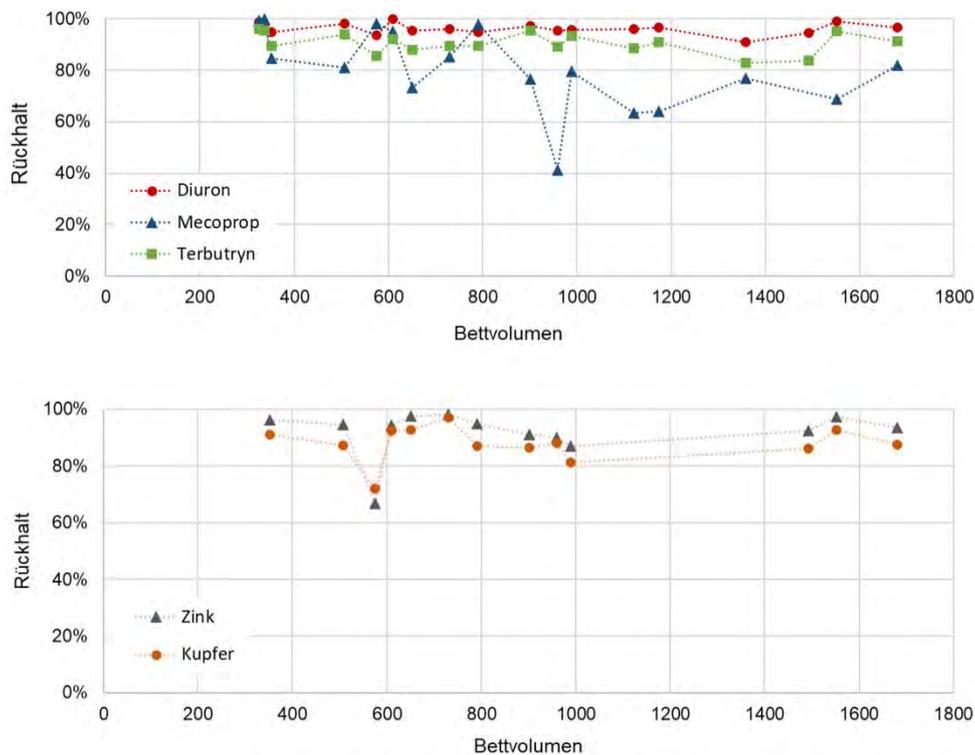


Abb. 7: Verlauf der Frachtreduktion der Einzelereignisse für Diuron, Mecoprop und Terbutryn (oben) und Zink und Kupfer (unten). Die gepunktete Linie dient der besseren Lesbarkeit und repräsentiert keine Messwerte.

6 Schlussfolgerungen

Der Gesamtfrachtrückhalt aller untersuchten Schwermetalle und Spurenstoffe war mit rund 90 % im Labor, an der Fassade sowie im Einzugsgebiet mit einer Mischbelastung sehr hoch. Bemerkenswert ist auch, dass die untersuchten Transformationsprodukte der beiden Biozide Diuron und Terbutryn mit > 90 % gleich effektiv entfernt werden. Das neu entwickelte System mit einer Substratpassage ist sehr gut geeignet, die klassischen Schwermetalle und gewässerproblematische organische Spurenstoffe mit deren Transformationsprodukten zurückzuhalten. Die Stoffe können aus der Gebäudehülle (Dach, Fassade), dem Unterhalt von Plätzen und Wegen, oder dem Verkehr stammen.

Der polare Wirkstoff MCPP (geringe Sorptionsfähigkeit), für den als einzigem Parameter ein schwankender Rückhalt beobachtet wurde, sollte – wie auch andere mobile und langlebige Stoffe - bevorzugt an der Quelle substituiert werden (z.B. auswaschfreie Bitumenbahnen). Selbst in Kläranlagen mit vierter Reinigungsstufe kann MCPP weniger gut als andere Spurenstoffe entfernt werden.

Die unspezifische Stoffelimination basiert auf einer ausgeklügelten Substratrezeptur und lässt sich zur Behandlung von Strassen-, Weg-, Dach- und Fassadenabflüssen einsetzen. Besonders interessant dürfte der Einsatz in Rinnensystemen sein, weil sich diese als Barrierenmassnahmen mit Pflanzgruben in Schwammstadt-Konzepten kombinieren lassen. Damit stellt das System einen wichtigen Baustein für den Umgang mit belasteten Regenwasserabflüssen in der wassersensiblen Stadtentwicklung dar.

7 Literatur

- [1] Arbeitsblatt DWA-A 102-2 (2020), Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA)

- [2] VSA (2019): Abwasserbewirtschaftung bei Regenwetter. Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute (VSA), Glattbrugg.
- [3] Wicke, D., Tatis-Muvdi, R., Rouault, P., Zerball-van Baar, P., Dünnbier, U., Rohr, M., Burkhardt, M. (2021): Bauen und Sanieren als Schadstoffquelle in der urbanen Umwelt. – Abschlussbericht. Texte 155/2021, Deutsches Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- [4] Wicke, D., Matzinger, A., Sonnenberg, H., Caradot, N., Schubert, R.L., Dick, R., Heinzmann, B., Dünnbier, U., von Seggern, D., Rouault, P. (2021): Micropollutants in urban stormwater runoff of different land uses. *Water* 13 (9):1312
- [5] Gasperi J. et al. (2014): Micropollutants in urban stormwater: Occurrence, concentrations, and atmospheric contributions in three French catchments. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(8):5267-5281.
- [6] Lange, J., Olsson, O., Jackisch, N., Weber, T., Hensen, B., Zieger, F., Schütz, T., Kümmerer, K. (2017): Urbane Regenwasserversickerung als Eintragspfad für biozide Wirkstoffe in das Grundwasser? *Korrespondenz Wasserwirtschaft* 2017, 4, 198-202.
- [7] Steiner, M., Gosse, P. (2022): Gelöste organische Mikroverunreinigungen im Strassenabwasser. Vorstudie, im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU).
- [8] Burkhardt M. et al. (2012): Leaching of biocides from Façades under natural weather conditions. *Environmental Science and Technology*, 46(10): p. 5497-5503.
- [9] Burkhardt M. et al. (2008): Mecoprop in Bitumenbahnen - Auswaschung von Mecoprop aus Bitumenbahnen und Vorkommen im Regenabwasser. *Forschungsbericht, Bundesamt für Umwelt*, S. 28.
- [10] Bollmann, U.E., Minelgaite, G., Schlüsener, M., Ternes, T., Vollertsen, J., Bester, K. (2016): Leaching of Terbutryn and Its Photodegradation Products from Artificial Walls under Natural Weather Conditions. *Environmental Science and Technology* 50 (8): 4289-4295.
- [11] Wicke, D., Tatis-Muvdi, R., Rouault, P., Zerball-van Baar, P., Dünnbier, U., Rohr, M., Burkhardt, M. (2022) Emissions from Building Materials - A Threat to the Environment? *Water* 14(3): 303
- [12] Burkhardt, M., Kulli, B., Saluz, A. (2022): Schwammstadt im Strassenraum – Herausforderungen und Lösungen für blau-grüne Massnahmen. *Aqua und Gas*, 10, 13-29.
- [13] Burkhardt, M., Schmidt, S., Gohl, M., Zenker, A., Schmocker, M., Zbinden, D., Loretz, A., Bigler, R., Boller, M. (2007): Behandlung von Regenwasser – Grosstechnische Erfahrung mit unterirdischer Retention und nachgeschaltetem Adsorberfilter. *Aqua & Gas* 4, 78-85.
- [14.] Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute (VSA), VSA-Leistungsprüfung für Behandlungsanlagen, Merkblatt «Leistungsprüfung für Adsorbiermaterialien und dezentrale technische Anlagen zur Behandlung von Niederschlagswasser», 2019.

Das Projekt wurde durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU, AZ 34644) gefördert.

Korrespondenz:

Rudolf Töws

Siegenbeckstraße 15, 59071 Hamm, Deutschland

E-Mail r.toews@funkegruppe.de

Von der gesamtstädtischen Erfassung und Bilanzierung alternativer urbaner Wasserressourcen über die Verarbeitung der Daten in einem Erfassungs-, Speicherungs- und Bereitstellungsmodell bis zur Planung von Betriebswasserspeichern auf Quartiersebene

E. Rott¹, T. Jaworski¹, R. Minke¹

¹ Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft, Universität Stuttgart, Bandtäle 2, 70569 Stuttgart, Deutschland

Kurzfassung: Trinkwassereinsparung, Abwassermeidung und Kappung von Abflussspitzen bei Starkregen werden für die Quartiersplanung immer bedeutsamer. Um diese Ziele u. a. durch Nutzung alternativer Wasserressourcen (Niederschlag, Grauwasser etc.) möglichst effizient erreichen zu können, wurde ein Speicher-Berechnungsmodell (ESB-Modell) entwickelt. Dieses kann blaue Rauminformationen aus GIS-Daten (u. a. Auffangflächen, Gebäudenutzungstypen) erfassen, darauf basierend mittels Literaturdaten oder Messwerten automatisch den Betriebswasserbedarf ermitteln und schließlich eine Dimensionierung des erforderlichen Nutz- und Retentionsvolumens des Speichers durchführen.

Key-Words: Trinkwassereinsparung, Starkregenüberflutungsvorsorge, Betriebswasserbereitstellung, GIS, Speichermodellierung

1 Einleitung

In der quartiersbezogenen ressourceneffizienten Wasserwirtschaft wird die integrierte Planung zur Einsparung von Trinkwasser, Vermeidung von Abwasser und Kappung von Abflussspitzen bei Starkregenereignissen immer bedeutsamer. Synergieeffekte in allen drei genannten Bereichen können durch Nutzung alternativer Wasserressourcen, wie z. B. Regenwasser oder aufbereitetes Grauwasser zur Bereitstellung von Betriebswasser z. B. für die Grünflächenbewässerung oder die Toilettenspülung erreicht werden. Die dazugehörige Planung ist oftmals komplex und aufwendig. Zur Unterstützung dieses Planungsprozesses wurde ein Speicher-Berechnungsmodell (ESB: Erfassungs-, Speicherungs- und Bereitstellungsmodell) erstellt. Dieses deckt vom Import GIS-gestützter Informationen von Stadtquartieren über die Ermittlung des Betriebswasserbedarfs und des Anfalls alternativer Wasserressourcen (Niederschlagsauffangflächen samt Abflussbeiwerten, Gebäudenutzflächen zur Grauwassermengenermittlung, punktuelle Sonderquellen) bis zur Verarbeitung dieser Daten mit dem Ziel der Dimensionierung eines Speichers mit den Zielvorgaben des Rückhalts von Starkniederschlägen sowie der Betriebswasserbereitstellung möglichst vollumfänglich alle wichtigsten zu berücksichtigenden Parameter für ein wasserwirtschaftlich effizientes Quartier ab.

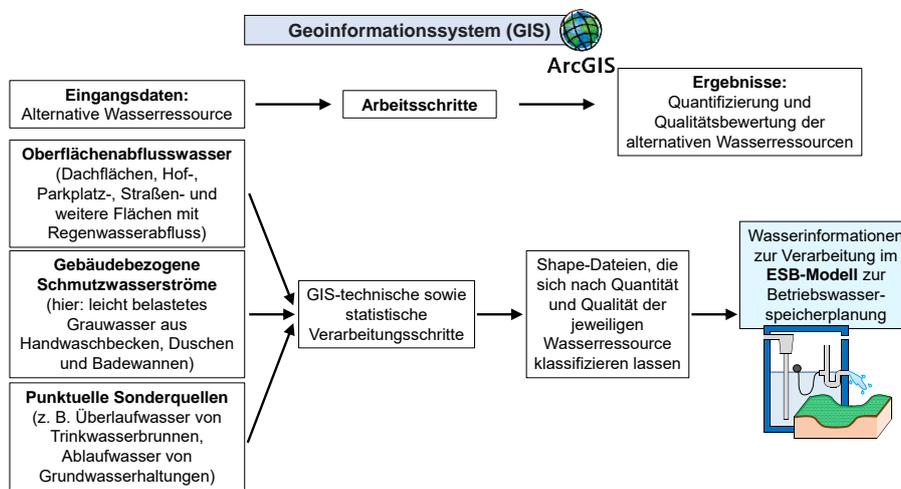
2 Methodik

Im BMBF-Vorhaben „INTERESS-I“ wurden in den Städten Frankfurt am Main und Stuttgart GIS-gestützte stadtweite Analysen zur Ermittlung und Bilanzierung alternativer urbaner Wasserressourcen durchgeführt. Diese Daten sind sehr vielfältig. Entsprechend heterogen sind auch die Ansätze, Wasserinformationen zu erfassen und aufzubereiten, um sie als blaue Rauminformationen zu nutzen. Tab. 1 zeigt beispielhaft verschiedene Wasserressourcen, die im städtischen Umfeld verfügbar sein können.

Die vorhandenen, spezifisch erhobenen oder abgeschätzten Wasserinformationen lassen sich mit Hilfe von GIS-Software aufbereiten, ergänzen und zu blauen Daten weiterverarbeiten.

Tabelle 20: Informationen zu potentiellen alternativen urbanen Wasserressourcen.

Alternative Ressourcen	Quantität	Qualität
Regenwasserablauf (Dachflächen)	Berechnung unter Zuhilfenahme von Regendaten des Deutschen Wetterdienstes und ALKIS-Datensätzen (liegen i. d. R. flächen-deckend vor).	Beurteilung der Abflussqualität aufgrund der Bewertungsverfahren von DWA-A 102-1/BWK-A 3-1 (2022), DWA-A 102-2/BWK-A 3-2 (2022) und DWA-M 153 (2020)
Oberflächenabfluss (Straßen, Plätze, Wege, Hof- und Parkplatzflächen)	Berechnung unter Zuhilfenahme von Regendaten des Deutschen Wetterdienstes und ALKIS-Datensätzen.	Beurteilung der Abflussqualität aufgrund der Bewertungsverfahren von DWA-A 102-1/BWK-A 3-1 (2022), DWA-A 102-2/BWK-A 3-2 (2022) und DWA-M 153 (2020)
Grauwasser (Gebäude anhand der Nutzungsstruktur, Grauwasser aus Handwaschbecken, Duschen und Badewannen)	Berechnung anhand von Literaturdaten des Trinkwasserbedarfs von für die Grauwassernutzung in Frage kommenden Verwendungszwecken.	Allgemeine Aussagen zur Qualität von Grauwasser (teilstromen) können durch Literaturquellen getroffen werden.
Punktuelle Sonderquellen (z. B. Überlaufwasser aus Trinkbrunnen, abgeleitetes Wasser aus Grundwasserhaltungen)	Messung der Quantität bzw. Ergiebigkeit, sofern keine Daten vorhanden sind.	Liegen keine Daten zur Qualität der Wasserressourcen vor, sollte eine Messkampagne zur Erfassung der Qualitätsdaten durchgeführt werden.



Nach Bedarf: Digitales Geländemodell in hoher Auflösung (mindestens 5 Meter) zur Erstellung von Fließweganalysen

Abbildung 65: Übersicht über Arbeitsschritte zur Erstellung blauer Daten auf der Basis unterschiedlicher Wasserinformationen.

Auf der linken Seite von Abb. 1 sind die potentiell verfügbaren Wasserinformationen untereinander aufgelistet. Es folgen mehrere Arbeitsschritte, welche letztendlich zu Ergebnissen führen, die mit Hilfe von GIS in Wasserinformationen zur Potentialabschätzung und Speicherdimensionierung aufbereitet werden. Diese Daten geben das Vorhandensein und das Potential für eine mögliche Nutzung von alternativen Wasserressourcen wieder. Bei den Potentialen, die daraus ableitbar sind, handelt es sich um die mengenmäßige Wasserverfügbarkeit der verschiedenen alternativen Ressourcen. Anhand der Art der betrachteten Ressource lassen sich Aussagen zur Qualität und zur zeitlichen Verfügbarkeit des

jeweiligen Wassertyps treffen. Aus diesen Daten lassen sich mit Hilfe von GIS auch Potentialkarten ableiten. So kann ein Fachplaner bereits bei der Betrachtung eines Wohnquartiers auf dieser blauen Karte erkennen, ob an dieser Stelle zum Beispiel viele größere Dachflächen sowie mehrere Trinkbrunnen vorhanden sind, woraus sich ein großes Potential für die Nutzung dieser Ressourcen, z. B. für die Bewässerung von urbanem Grün, ergeben könnte. Für die Verarbeitung der Wasserinformationen im ESB-Modell sind diese Karten (Ludwig et al., 2021) nicht relevant, weshalb sie an dieser Stelle nicht weiter vertieft werden.

Die Vielzahl an Daten wird zunächst GIS-technisch auf einer stadtweiten Ebene erfasst. Diese GIS-Daten werden für das gewünschte Quartier über statistische Verarbeitungsschritte in Form von mehreren Shape-Dateien auf die Quartiersebene übertragen. Dadurch werden sie für das ESB-Modell importierbar und können so als Grundlage zur Planung von Betriebs- und Retentionsspeichern für einzelne Häuser oder Wohnquartiere verwendet und ausgewertet werden. Im ESB-Modell, das derzeit noch auf MS-Excel basiert, kann die Speicherdimensionierung mittels einfacher Bedienung und einer Vielzahl von Funktionen durchgeführt werden. Die Funktionen des Modells sind in Abb. 2 dargestellt.

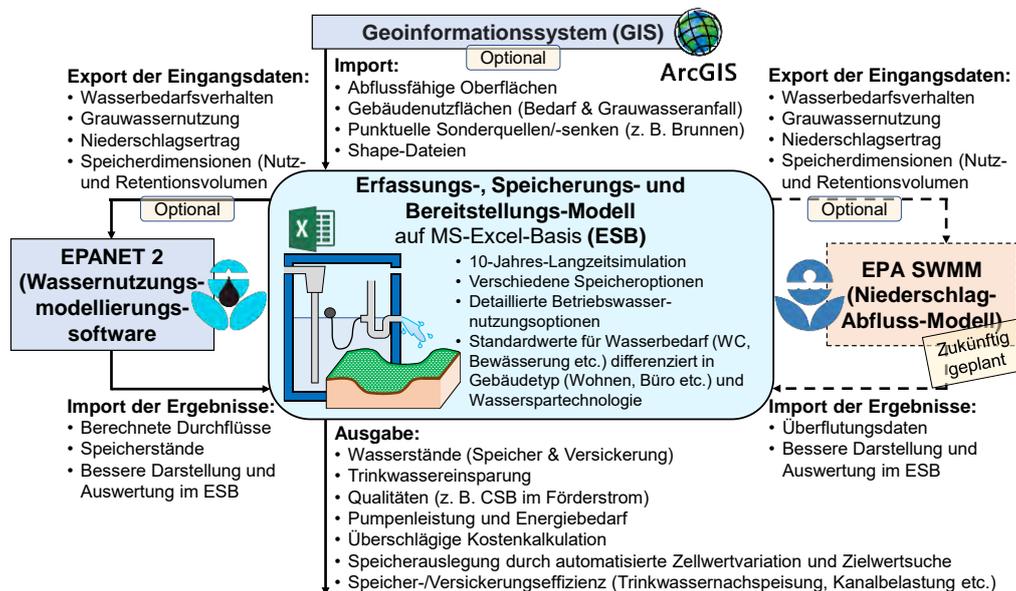


Abbildung 66: Übersicht zu den Funktionen des ESB-Modells.

Grundsätzlich werden vom ESB-Modell verschiedene Informationen wie Füllstände, Zu- und Abläufe, Qualitäten, Pumpenstromverbrauch, Speichereffizienz etc. ausgegeben. Im ESB-Modell kann die Speicherdimensionierung (Nutz- und Retentionsvolumen) durch eine automatisierte Variablenvariation (Zellwertvariation, z. B. Variation des Speichernutzvolumens, und Ausgabe der Ergebnisse in Abhängigkeit vom variierten Parameter) oder durch eine Zielwertsuche erfolgen.

Zur Ermittlung des Speichernutz- und -retentionsvolumens kann mit einer „schnellen“ Methode gearbeitet werden: Dafür sind basierend auf einer Literaturrecherche typische Wasserbedarfsdaten und Nutzungsverhalten für unterschiedliche Wasserverwendungszwecke (WC, Wäschewaschen, Reinigung, Handwaschbecken, Dusche und Badewanne) hinterlegt (u. a. Neunteufel et al., 2010; Roth et al., 2011a und 2011b). Diese Daten sind zusätzlich untergliedert in Technologien hinsichtlich ihrer Wassersparsamkeit (z. B. die Optionen Altbau, Durchschnitt, kurzfristig wassersparend, langfristig wassersparend auswählbar). Für verschiedene Gebäudenutzungstypen (Wohnen, Büro, Schule, Kita etc.) sind ferner durchschnittliche Faktoren zur Flächennutzung hinterlegt (z. B. Angestellte/m² in Verwaltungsgebäuden). Werden Gebäudedaten mit ihren Nutzflächen über Shape-Dateien also in das ESB-Modell übertragen, kann dieses über die hinterlegten Wasserbedarfsdaten und Flächennutzungsfaktoren den

Betriebswasserbedarf und auch das Grauwassernutzungspotential automatisch ermitteln. Zur Ermittlung des Retentionsvolumens kann mit statistischen Euler-Regen gearbeitet werden.

Liegen Messwerte zu den einzelnen Verwendungszwecken vor, kann die Ermittlung der Speicherdimensionen auch mittels Eingabe detaillierter dynamischer Realdaten erfolgen: Hierzu können Tages- oder Stunden-Messwerte zu den einzelnen Wasserverwendungszwecken (Betriebswasserbedarf, WC, Grauwasseranfall etc.) eingepflegt werden. Zur Ermittlung des Grünflächenbewässerungsbedarfs besteht die Option der Festlegung auf monatliche statische Bedarfsdaten (m^3 Wasserbedarf je m^2 Grünfläche und Monat) oder der Einpflegung dynamischer täglicher bzw. stündlicher Bedarfsdaten, z. B. aus Berechnungen in CropWat. Für beide Optionen kann der Niederschlag berücksichtigt werden (fällt ausreichend Regen am Tag an, wird keine Bewässerung im Modell vollzogen, das Wasser wird bei Regen also eingespart).

3 Anwendung

Das ESB-Modell ist in erster Linie für folgende Anwendungen ausgelegt (s. auch Abb. 2):

- Betriebswasserversorgung: Berechnung des erforderlichen Speichernutzvolumens, wenn Regenwasser und/oder Grauwasser für verschiedene Trinkwasserverwendungszwecke eingesetzt werden soll. Hierzu werden der Betriebswasserbedarf, der Trinkwassernachspeisungsaufwand, die Trinkwassereinsparung etc. ermittelt (10-Jahres-Simulation).
- Starkregenvorsorge: Berechnung des erforderlichen Retentionsvolumens, wenn ein bestimmter Starkregen abflussreduziert an den Kanal oder in eine Versickerung abgegeben werden soll. Hierzu werden z. B. die prozentuale Abflussspitzenkappung und die Drossel- und Notüberläufe basierend auf statistischen Euler-Regen ermittelt (10-Tages-Simulation).

Folgende erweiterte Optionen werden vom ESB-Modell angeboten:

- Schnittstelle für den einfachen und schnellen Übertrag von (Nutz-)Flächen aus GIS-Daten in das ESB-Modell, somit Eingabe mehrerer Gebäudenutzungstypen (Wohnen, Schule, Büro, Kita etc.) und/oder auch Punktquellen/-senken (z. B. Brunnenwasser) möglich.
- Durch hinterlegte Standard-Wasserbedarfswerte (typische Bedarfswerte, typische Wasserverbräuche) und Möglichkeit der Eingabe von Wasserspartechnologien detaillierte Betrachtung des Trinkwassereinsparpotentials möglich, d. h. Unterscheidung in Referenzszenario (Verhalten und Bedarf durchschnittlich, keine Wasserspartechnologien, kein Speicher), Wasserspartechnologieszzenario (Nutzung von Wasserspartechnologien) und Speicherszenario (Nutzung von Betriebswasser sowie Nutzung von Wasserspartechnologien).
- Schnittstelle für den einfachen und relativ schnellen Übertrag von ESB-Modell-Daten für komplexere EPANET-Modellierung (z. B. Implementierung eines Betriebswasserversorgungsnetzes). Hierzu wird mittels eines Makros eine INP-Datei geschrieben, die alle wesentlichen Daten aus dem ESB-Modell enthält, d. h. es wird ein „digitaler Zwilling“ des ESB-Modells in EPANET angefertigt.
- Möglichkeit des Anschlusses einer Muldenversickerung an den Speicher bzw. der direkten Versickerung von Niederschlagsabflüssen über eine Versickerung (weitere Versickerungsformen werden in Zukunft über eine EPA SWMM-Erweiterung angeboten).
- Ausgabe von Wasserbilanzen (in m^3/a) zur grafischen Übersicht des potentiell nutzbaren und tatsächlich genutzten Wassers innerhalb des Untersuchungsgebiets.
- Überschlägige Kostenkalkulation mit Ausgabe von Amortisationszeiten unter Berücksichtigung von Trinkwassergebühr, Abwasserentgelt, Kosten für den Speicher, das Fördersystem, die eventuelle Grauwasseraufbereitung, Versickerung, Leitungen und Anschlüsse sowie Mehrkosten durch etwaige Wasserspartechnologienutzung.

4 Ausblick

Derzeit wird noch an Erweiterungen des ESB-Modells gearbeitet:

- Verknüpfung des ESB-Modells mit einer Niederschlag-Abfluss-Modellierungssoftware wie EPA SWMM (Storm Water Management Model) (analog zur bereits eingebauten Verknüpfung des ESB-Modells mit EPANET). Hierdurch wird es möglich, ein Kanalnetz, an das der Speicher angeschlossen ist, zu dimensionieren, verschiedene Optionen einer Versickerung (Rigole, Mulden-Rigole etc.) zu implementieren oder Niederschlagsauffangflächen mit mehr Details zu versehen (derzeit bereits in Arbeit).
- Option zur „intelligenten Zisterne“ (IESB-Modell), d. h. Berücksichtigung von Wettervorhersagen und mittelfristigen Großwetterlagen zur Optimierung der Retentionswirkung und Betriebswasserbereitstellung des Speichers.
- Umschreiben des Modells in ein eigenständiges Programm.

5 Literatur

Arbeitsblatt DWA-A 102-1/BWK-A 3-1 (2022): Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer - Teil 1: Allgemeines.

Arbeitsblatt DWA-A 102-2/BWK-A 3-2 (2022): Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer - Teil 2: Emissionsbezogene Bewertungen und Regelungen.

Ludwig F., Well F., Moseler E.-M., Eisenberg B., Deffner J., Drautz S., Elnagdy M. T., Friedrich R., Jaworski T., Meyer S., Minke R., Morandi C., Müller H., Narvaéz Vallejo A., Richter P., Schwarz-von Raumer H.-G., Steger L., Steinmetz H., Wasielewski S., Winker M. (2021): Integrierte Planung blau-grüner Infrastrukturen. Ein Leitfaden. Hg. v. Ferdinand Ludwig, Friederike Well, Eva-Maria Moseler und Bernd Eisenberg. München.

Merkblatt DWA-M 153 (2020): Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser.

Neunteufel R., Richard L., Perfler R. (2010): Studie Wasserverbrauch und Wasserbedarf. Teil 1: Literaturstudie zum Wasserverbrauch – Einflussfaktoren, Entwicklung und Prognosen. Hg. v. Lebensministerium Österreich. Wien.

Roth U., Hermann M., Wagner H. (2011a): Der Einfluss moderner Haushaltsgeräte auf den Trinkwasserbedarf der Haushalte. Wasserversorgung, Wasserverbrauch, Wasserbedarf, Prognose, Haushaltsgeräte. gwf Wasser Abwasser Juli/August, 736–744.

Roth U., Hermann M., Wagner H. (2011b): Der Einfluss moderner Toilettenspülungen auf den Trinkwasserbedarf der Haushalte. Wasserversorgung, Wasserverbrauch, Wasserbedarf, Prognose, Toilettenspülung. gwf Wasser Abwasser März, 254–260.

Korrespondenz:

Dr.-Ing. Eduard Rott
 Bandtäle 2, 70569 Stuttgart, Deutschland
 +49 711 - 685 637 38
 eduard.rott@iswa.uni-stuttgart.de

Natürlicher Wasserhaushalt und Umgang mit Oberflächenabfluss im Viererfeld/Mittelfeld, Bern - Vom Masterplan zur Massnahme

Anna-Gesa Meier¹, Stephanos Anderski²

1 HOLINGER AG, Kasthoferstrasse 23, 3006 Bern

2 Stadt Bern, Direktion für Tiefbau, Verkehr und Stadtgrün, Tiefbauamt, Bundesgasse 38, 3001 Bern

Kurzfassung: Die Stadt Bern plant ein klimaangepasstes Wohnquartier, indem das Regenabwasser lokal bewirtschaftet werden soll. Ziel ist es, einen natürlichen bzw. naturnahen Wasserhaushalt zu gewährleisten und das Risiko durch Oberflächenabfluss zu verringern. Dafür wurde die Einleitmenge in die Regenwasserkanalisation beschränkt. Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wurden Massnahmen für die Regenwasserbewirtschaftung definiert. Es wurde gezeigt, dass die Ziele betreffend Wasserhaushalt und Oberflächenabfluss damit eingehalten werden können.

Key-Words: Regenwasserbewirtschaftung, Starkregen, Oberflächenabfluss, Klimaanpassung, Schwammstadt, Wasserhaushalt

1 Ausgangslage und Ziele

Die Stadt Bern plant auf dem Vierer- und dem Mittelfeld auf der Basis eines städtebaulichen Wettbewerbs ein attraktives, dicht bebautes, aber naturnahes Wohnquartier mit 1'140 Wohnungen (Abbildung 1a/b). Auf Grundlage des städtebaulichen Konzepts wurden die Leitlinien in einem Masterplan [2] formuliert und Ziele des klimaangepassten Quartiers definiert. Diese sind die Reduktion versiegelter Flächen auf ein funktionales Minimum, die Speicherung, Nutzung und Verdunstung von Regenabwasser sowie die Reduktion des Schadensrisikos bei Starkregen. Vor diesem Hintergrund wurde eine Machbarkeitsstudie von der Stadt Bern beauftragt und von der HOLINGER AG erarbeitet. Darin wurden Massnahmen zur Erreichung eines naturnahen, langjährigen Wasserhaushalts sowie der Schadensprävention durch extreme Starkniederschläge konzipiert.

2 Randbedingungen

Im Rahmen des Generellen Entwässerungsplans Stadt Bern wurde die Entwässerung des Viererfelds im Trennsystem und die Entwässerung des Mittelfelds im Mischsystem festgelegt. Das Regenabwasser aus dem Viererfeld soll über eine bestehende Regenabwasserleitung direkt in die Aare eingeleitet werden. Es wurden Spitzenabflussbeiwerte für Dächer (0.25) und für öffentlich zugängliche, private Verkehrsflächen (0.8) (Abbildung 1b) bestimmt, aus denen sich für ein historisches 5-jährliches Regenerignis die maximal zulässigen Gesamtabflüsse je Cluster ergeben. Versickerungsversuche haben eine ungenügende Sickerfähigkeit ergeben, sodass keine gezielte Versickerung möglich ist.

3 Langjähriger Wasserhaushalt

Für die Untersuchung der erforderlichen Massnahmen zur Annäherung an einen naturnahen, langjährigen Wasserhaushalt wurde die Software Wasserbilanz-Expert (WABILA; [1]) verwendet. Als Referenzen wurde eine unbebaute Grünlandfläche sowie der bebaute Zustand ohne Regenwasserbewirtschaftungsmassnahmen verwendet.

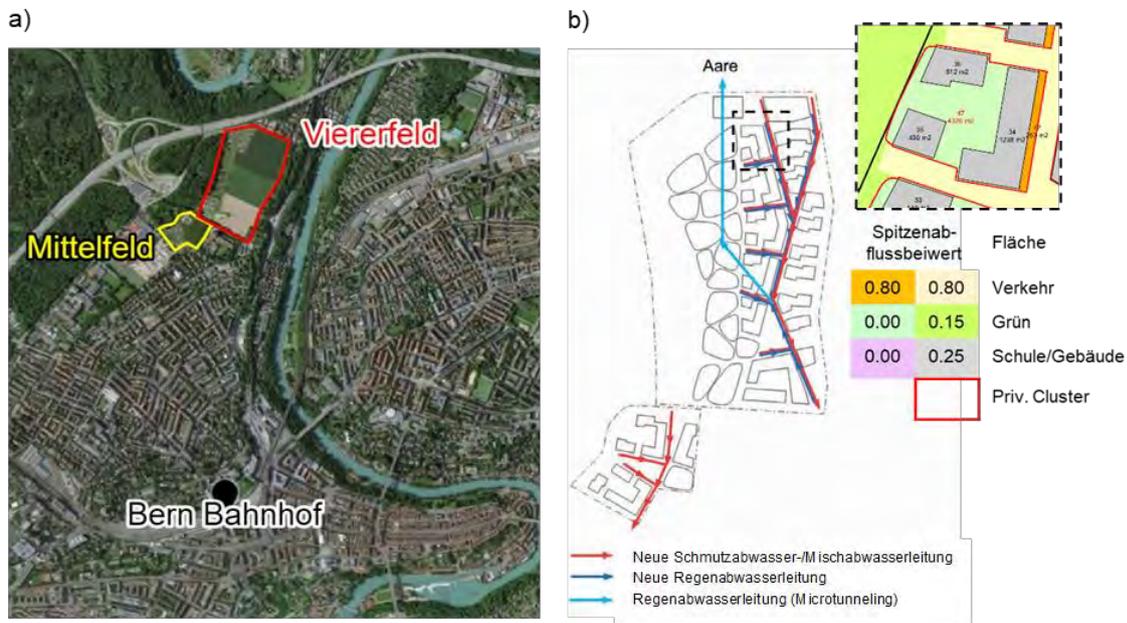


Abbildung 67: Lage des Viererfelds/Mittelfelds (a); geplante Bebauung, Entwässerungssystem sowie Randbedingungen (Ausschnitt) Siedlungsentwässerung (b).

Es wurden drei Systembausteine additiv untersucht und die Berechnungen in drei Szenarien für jedes Cluster durchgeführt. Abbildung 68 zeigt das Ergebnis eines Clusters. Für das Szenario Gründach wurde eine extensive Begrünung auf 75% der Dachflächen angenommen. Im Szenario Fuge wurde zusätzlich zur Dachbegrünung 50% der Verkehrsflächen mit einem hohen Fugenanteil (8%) definiert. Schliesslich wurde ergänzend die Regenwassernutzung für die Bewässerung der Grünflächen berücksichtigt. Aus Abbildung 68 wird deutlich, dass insbesondere die Dachbegrünung und die Regenwassernutzung / Bewässerung den Abfluss der Flächen reduzieren und positiv auf die Verdunstung wirken. Dies wirkt sich auch positiv auf die notwendige Rückhaltung auf den Liegenschaften aus.

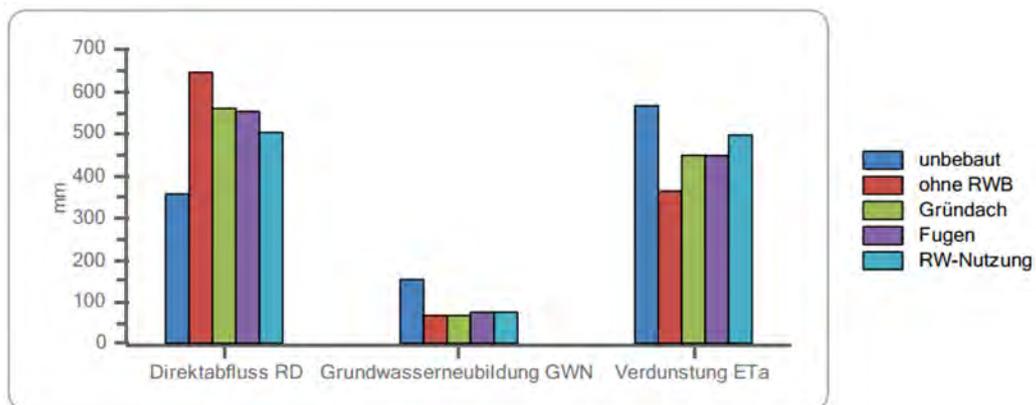


Abbildung 68: Vergleich Wasserbilanzen je Szenario gem. WABILA; ohne RWB = ohne Regenwasserbewirtschaftung.

4 Schadensprävention Starkregen

Für die Abschätzung des Gefährdungspotenzials durch Oberflächenabfluss bei Starkregen wurde eine von der HOLINGER AG in Zusammenarbeit mit dem VSA und dem BAFU entwickelte Methodik angewandt (Projekt "Umgang mit Oberflächenabfluss bei Starkregen", noch unveröffentlicht). Das verwendete Wasserbilanzmodell erlaubt es, die potenziellen Zuflüsse in städtische Gebiete, die in angrenzenden kleinen natürlichen Einzugsgebieten entstehen, abzuschätzen und den mittleren Wasserstand in Abhängigkeit der Kanalnetzkapazität, der Retentionsmassnahmen und der Oberflächenbeschaffenheit zu ermitteln. Analog zu anderen Naturgefahren wurden Regenereignisse mit einer Häufigkeit von 30, 100 und 300 Jahren betrachtet.

Zudem wurden kurze Regen (10 Min.) und Dauerregen (24h) untersucht. Auf Grundlage der bilanzierten Wasservolumina und unter der Vorgabe eines Gesamtgebietsabflusses von $0 \text{ m}^3/\text{a}$ wurden Massnahmenkombinationen, wie die oberirdische und unterirdische Speicherung auf Grünflächen und urbanen Plätzen, zum Umgang mit Starkregen im Quartier konzipiert.

5 Fazit und Ausblick

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie konnte gezeigt werden, dass die im Masterplan [2] definierten Ziele bezüglich des Wasserhaushalts und der Schadensprävention bei Starkregen auf dem Gebiet Viererfeld/Mittelfeld erreichbar sind.

Die Gestaltung und Auslegung der Massnahmen auf den privaten Clustern und zum Schutz vor Schäden bei Starkregen müssen in der weiteren Planung projektiert werden. Dabei ist die zeitlich abgestimmte Befüllung und Entleerung der einzelnen Bausteine in der nachfolgenden Planung genauer zu untersuchen, um die Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems gewährleisten zu können.

Die Ermittlung des Referenzzustands eines langjährigen Wasserhaushalts wurde auf Grundlage zur Verfügung stehender Daten (Niederschlag, Verdunstung) sowie unter Anwendung des DWA-M 102 [3] abgeschätzt. Es hat sich gezeigt, dass für die Beurteilung des langjährigen Wasserhaushalts noch wichtige Grundlagen fehlen, um vergleichbare Projekte niedrigschwellig und untereinander vergleichbar durchführen zu können.

6 Literatur

[1] IWARU. (2018). Wasserbilanz-Expert (WABILA) Software zum Arbeitsblatt DWA A-102 (Entwurf) - Software Handbuch Version 1.0. Münster/Hennef: DWA.

[2] Stadtplanungsamt Bern. (2020). Masterplan Viererfeld/Mittelfeld. Bern.

[3] DWA/BWK. (Dezember 2020). Merkblatt DWA-M 102-4/BWK-M 3-4 (ENTWURF). Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächen-gewässer – Teil 4: Wasserhaushaltsbilanz für die Bewirtschaftung des Niederschlagswassers.

Korrespondenz:

Dr. Anna-Gesa Meier
HOLINGER AG
Kasthoferstrasse 23
CH-3006 Bern
0041 31 370 30 39
anna-gesa.meier@holinger.com

Bewertung der Wirksamkeit einer realistischen wassersensiblen Planung in einem Stadtumbaugebiet in Berlin

P. Schütz¹, M. Riechel¹, M. Gunkel², A. Matzinger¹

¹Kompetenzzentrum Wasser Berlin (KWB); ²Berliner Wasserbetriebe (BWB)

Kurzfassung: Eine aktuelle Planung eines wassersensiblen Stadtkonzeptes für ein Berlin Stadtumbau- und Neubaugebiet wurde modelltechnisch geprüft. Durch die konsequente Umsetzung von Low Impact Development (LID) konnte das 76 ha große Gebiet fast vollständig abgekoppelt werden. Bezogen auf das Kanaleinzugsgebiet entspricht dies einer Abkopplung von 16 %, die wiederum zu einer Reduktion von Mischwasserüberläufen von 23 % führt. Die wasserwirtschaftliche Wirksamkeit wird zwar bei mangelnder Pflege eingeschränkt, der Effekt auf Mischwasserüberläufe bleibt aber nahezu identisch. Der große Effekt von realistischen LID-Umsetzungen und die Robustheit dieses Effektes gegenüber Maßnahmenausfällen stellt eine Empfehlung für die zunehmende Transformation von Entwässerungssystemen zu wassersensiblen Entwürfen dar.

Key-Words: blau-grüne Infrastruktur, Versiegelung, LID, Ausfallszenarien, Mischwasser

1 Einleitung

Die Versiegelung in urbanen Gebieten sorgt für eine Veränderung der Wasserbilanz, die häufig zu Hitzeinseln, Überflutungen oder Schäden an Gewässerökosystemen führen kann. Die zunehmende Verdichtung von Städten verschärft diese Situation zusätzlich. Eine wassersensible Stadtentwicklung mit dezentralen Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen, auch Low Impact Development (LID) genannt, kann dieser Entwicklung entgegenwirken. Das Gewässerschutzpotenzial eines solchen wassersensiblen Ansatzes wurde für ein 76 ha großes Berliner Stadtgebiet modelltechnisch untersucht, in dem sowohl eine Nachverdichtung als auch eine Qualifizierung als "Stadtumbaugebiet" geplant sind. Da ein Paradigmenwechsel von zentralen Entwässerungssystemen zu dezentraler Regenwasserbewirtschaftung auch Risiken birgt, wurden zusätzlich mögliche Auswirkungen von Maßnahmenausfällen bewertet.

2 Methodik

2.1 Untersuchungsgebiet

Das hier betrachtete Stadtumbaugebiet (URA) liegt im Nordosten Berlins im Bezirk Pankow. Es hat eine Fläche von 76 ha (davon 49 ha angeschlossene versiegelte Fläche) und beherbergt ca. 10'000 Einwohner. Städtebaulich ist das Gebiet geprägt von mehrstöckigen Wohngebäuden, Grünflächen und querenden Hauptverkehrsstraßen. Im Rahmen einer Nachverdichtung sind einerseits 1'200 neue Wohneinheiten geplant. Andererseits soll für das gesamte URA (Bestand und Neubau) ein Konzept zur Regenwasserbewirtschaftung erarbeitet werden. Dazu wurden im Forschungsprojekt *netWORKS4* in partizipativen Planungsprozessen mit lokalen Akteuren maßgeschneiderte LID-Lösungen für unterschiedliche Gebietsstrukturen anhand von sechs typischen Kulissen (Bestand Kita, Bestand Schule, Neubau Schule, Wohnungsneubau, bestehende Wohngebäude und Straßenraum) auf Grundstücksebene entwickelt (Nenz et al. 2020). Das URA wird vollständig im Mischkanal zu einem Pumpwerk entwässert, von dem das anfallende Abwasser zur Kläranlage gepumpt wird. Es liegt im Pumpwerkeinzugsgebiet *BlnXI* mit einer Gesamtgröße von 1'255 ha. Bezüglich der angeschlossenen versiegelten Fläche entspricht das URA ~ 20 % von *BlnXI*. Bei Starkregen kommt es häufig zu Mischwasserüberläufen in die Spree, die zu fischkritischen Sauerstoffbedingungen führen (Riechel et al. 2016).

2.2 LID-Maßnahmen & Flächenanteile

In den LID-Konzepten aus *netWORKS4* enthaltene Maßnahmen sind vor allem Dachbegrünung (extensiv & intensiv), Versickerung (Versickerungsmulden, Mulden-Rigolensysteme, Baumrigolen, Oberflächenversickerungen), teilversiegelte Flächen sowie Regenwassernutzung für Bewässerung und sanitäre Nutzung über Zisternen. Um die Wirksamkeit dieser LID-Maßnahmen modelltechnisch quantifizieren zu können, wurden die LID-Lösungen für die sechs Kulissen anhand ähnlicher Siedlungsstrukturen von der Grundstücksebene auf das restliche URA übertragen und hochskaliert. Diese Hochskalierung wurde anschließend mit dem aktuellen Planungsstand des Bezirksamtes sowie weiteren Randbedingungen abgeglichen. Dabei wurden die Bebauungspläne des Bezirkes Pankow, lokale Versickerungskapazitäten und örtliche Gegebenheiten beachtet. Es resultierten zwei Szenarien, die verglichen wurden, *Szenario 1 – Verdichtung ohne LID-Maßnahmen (S1)* und *Szenario 2 – Verdichtung mit LID-Maßnahmen (S2)*. Im URA wurden dadurch 98 % der angeschlossenen versiegelten Fläche (49 ha) LID-Ketten zugewiesen, das auf Ebene von *BlnXI* 20 % entspricht (siehe *Tabelle 1*).

Tabelle 21: Überblick versiegelte Flächen und Anschlussgrad an LIDs der *Szenarien S1 & S2*

	Stadtumbaugebiet (URA)		Pumpwerkeinzugsgebiet (<i>BlnXI</i>)	
	S1 (ohne LIDs)	S2 (mit LIDs)	S1 (ohne LIDs)	S2 (mit LIDs)
Versiegelte Fläche angeschlossen an LIDs	0.0 ha / 0.0 %	49.1 ha / 98.4 %	0.0 ha / 0.0 %	49.1 ha / 20.4 %

2.3 SWMM-Modell

Die LID-Maßnahmen wurden zunächst in zwölf LID-Ketten systematisiert und als solche in ein bestehendes Grobnetz des Pumpwerkeinzugsgebietes *BlnXI* in der Software *SWMM* (Rossmann 2015) integriert (siehe *Abbildung 1*). Als Untersuchungszeitraum diente das Sommerhalbjahr 2017 (Mai – Oktober). Dieser Zeitraum war sehr niederschlagsreich und geprägt von Starkregenerereignissen.

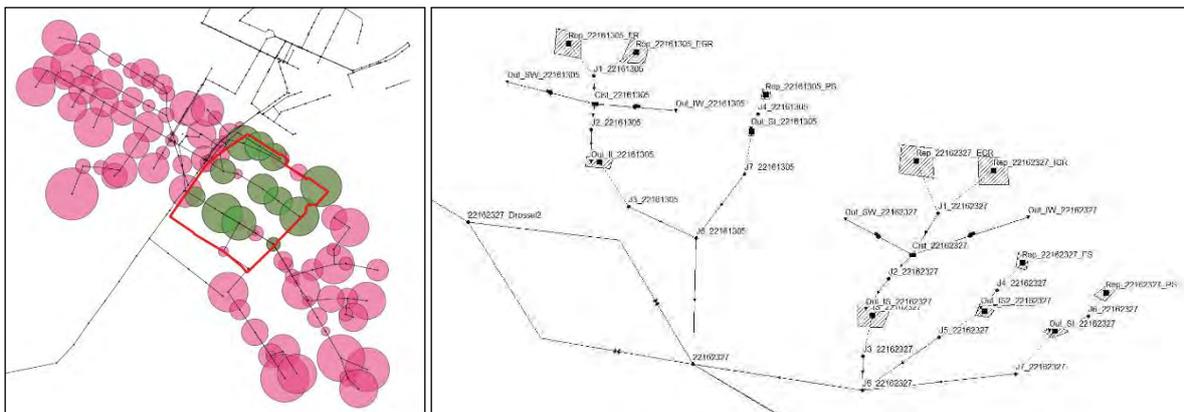


Abbildung 1: Links: Darstellung des Pumpwerkeinzugsgebietes *BlnXI* in *SWMM*, mit markiertem URA-Gebiet; Rechts: Integration der LID-Ketten in bestehendes Grobnetz

2.4 Ausfallszenarien

Um zusätzlich die veränderte Wirksamkeit der LID-Maßnahmen in Folge von mangelnder Pflege zu simulieren, wurden Schadensfälle (Kolmation, Sedimentation, Erosion, Pumpenausfall, Verschlämzung) für die einzelnen LID-Maßnahmen aufgrund von Literaturergebnissen und Betriebserfahrungen der Berliner Wasserbetriebe (BWB) erstellt. Daraus wurden zwei zusätzliche Szenarien mit unregelmäßiger Pflege alle 2 Jahre (*Ausfallszenario Leicht*) und alle 10 Jahre (*Ausfallszenario Stark*) definiert und durch veränderte LID-Parameter mittels *SWMM* simuliert (siehe *Tabelle 2*).

Tabelle 2: Anpassung der LID-Parameter in SWMM zur Simulation der Ausfallszenarien

LID-Maßnahme	Störfall	Angepasster SWMM-Parameter	Ausfallszenario Leicht (% Ausgangswertes)	Ausfallszenario Stark (% Ausgangswertes)
Versickerungsmulde	Kolmation	Bodendurchlässigkeit	-5 %	-5 %
	Sedimentation	Muldentiefe	-10 %	-50 %
		Bodendurchlässigkeit	-10 %	-25 %
Rigolen-Element	Kolmation	Bodendurchlässigkeit	-5 %	-5 %
	Sedimentation	Muldentiefe	-10 %	-50 %
		Bodendurchlässigkeit	-10 %	-25 %
Extensives Gründach	Erosion	Substratdicke	-10 %	-25 %
Intensives Gründach	Erosion	Substratdicke	-10 %	-25 %
Zisterne	Pumpenausfall	Pumpenkurve	-10 %	-25 %
	Verschlämmung	Zisternentiefe	-25 %	-50 %

3 Ergebnisse

3.1 Effekte der wassersensiblen Planung

Abbildung 2 zeigt die Reduktionseffekte durch die Integration von LID-Maßnahmen in *Szenario 2*. Der Oberflächenabfluss im URA konnte durch die Integration von LID-Maßnahmen zwischen *Szenario 1* und *Szenario 2* um über 90 % reduziert werden. Auf Pumpwerkeinzugsgebietsebene (*BlnXI*) konnte bei einem Anschlussgrad von 20 % der versiegelten Flächen an LID-Maßnahmen eine Abflussreduktion von immerhin 16 % erzielt werden. Das Mischwasserüberlaufvolumen konnte durch die LID-Maßnahmen sogar um 23,5 % reduziert werden. Somit konnte ein Faktor von ~ 1.45 zwischen Oberflächenabfluss- und Mischwasserüberlaufreduktion erzielt werden.

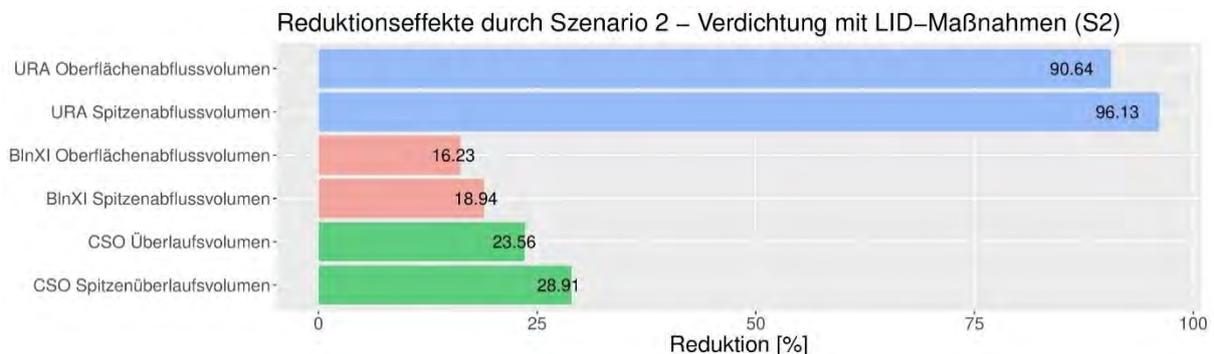
Abbildung 2: Effekte der LID-Maßnahmen aus *Szenario 2* – Verdichtung mit LID-Maßnahmen (S2)

Abbildung 3 zeigt die Reduktion der 26 im Untersuchungszeitraum simulierten Mischwasserüberlaufereignisse im Zusammenhang zu den auslösenden Regenereignissen. Es ist zu sehen, dass zwei Ereignisse (3;19) vollständig verhindert werden konnten, während die Reduktion der Mischwasserüberläufe bei zunehmendem Regenereignisvolumen abnimmt und für die größten Ereignisse (12; 7) deutlich un-

ter den 23.5 % Gesamtreduktion liegen. Bei Betrachtung einzelner Ereignisse fällt in *Abbildung 3* einerseits Ereignis Nr. 21 auf. Durch einen eher schwachen, aber lange (10 h) andauernden Regen, fällt die Reduktion höher aus als erwartet. Andererseits ist Ereignis Nr. 7 herauszustellen, welches eine Jährlichkeit im Bereich von 100 a aufweist und in Berlin in vielen Stadtteilen zu erheblichen Überflutungen geführt hat. Es stellt sich die Frage, ob die Modellannahmen für dieses Ereignis noch zutreffend sind.

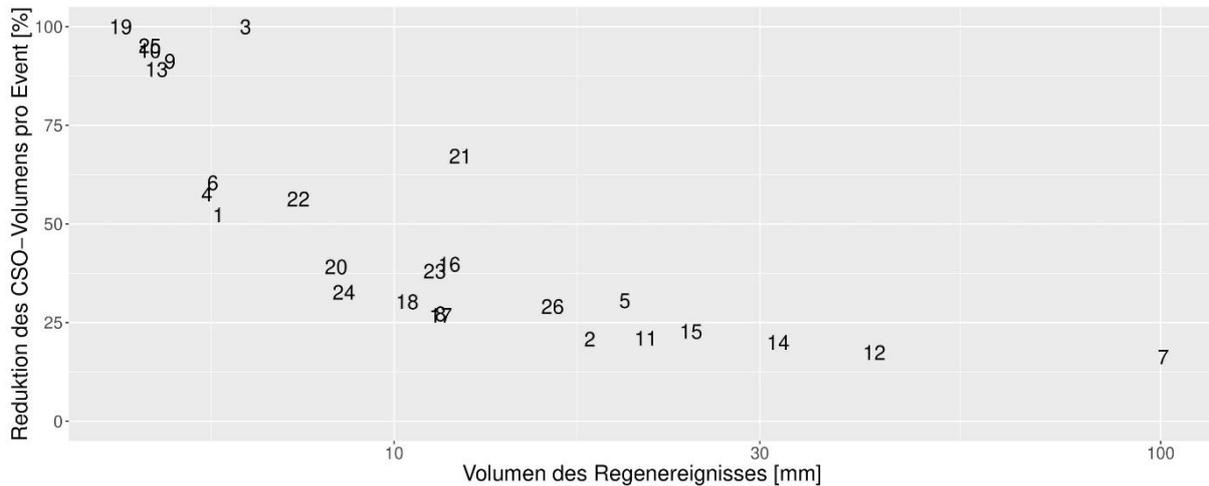


Abbildung 3: Korrelation zwischen Regenereignisvolumen und Reduktion des Mischwasservolumens durch LID-Maßnahmen (Vergleich zwischen *Szenario 1* und *Szenario 2*)

Abbildung 4 zeigt exemplarisch das Mischwasserüberlaufvolumen von dem mittleren Überlaufereignis Nr. 8. Das auslösende Regenereignis hat ein Volumen von 11.4 mm und eine Dauer von 85 min. Es ist zu sehen, dass durch die integrierten LID-Maßnahmen das Mischwasserüberlaufvolumen um ca. 27 % von ca. 15'000 m³ auf ca. 11'000 m³ reduziert werden konnte. Auch das Spitzenüberlaufvolumen konnte durch die LID-Maßnahmen von > 4 m³ auf < 3 m³ reduziert werden.

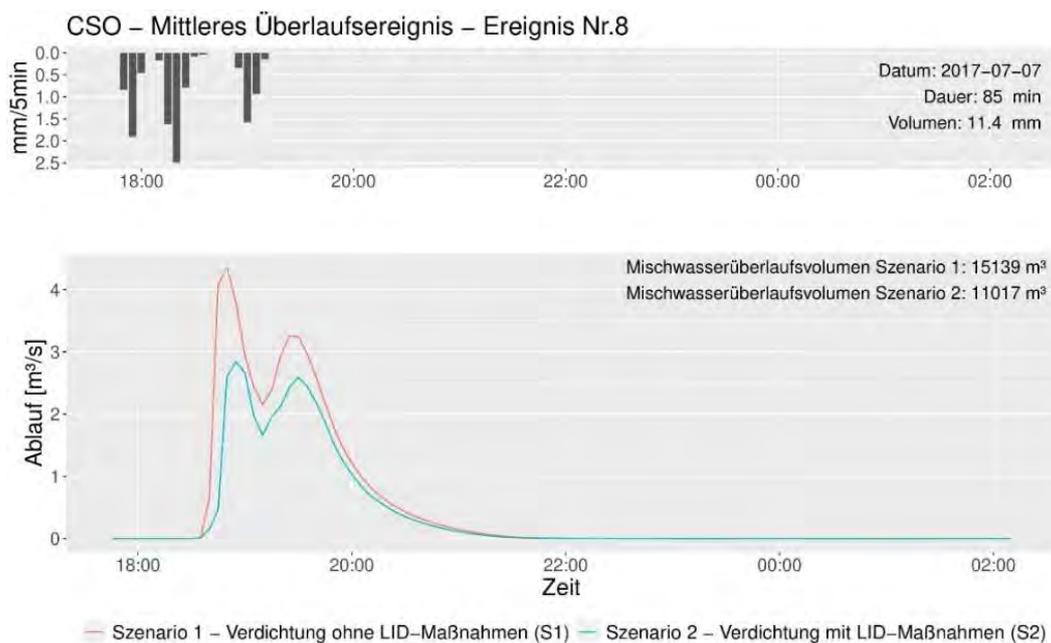


Abbildung 4: Reduktion des Mischwasserüberlaufvolumens bei einem mittleren Überlaufereignis durch die LID-Maßnahmen in *Szenario 2*

3.2 Ausfallszenarien

Bei der Simulation der zwei Ausfallszenarien konnte festgestellt werden, dass das Oberflächenabflussvolumen im Untersuchungszeitraum auf Stadtumbaugebietsebene (URA) gegenüber *Szenario 2 (mit LIDs)* für das *Ausfallszenario Leicht* um ca. 6 % und für das *Ausfallszenario Stark* um ca. 15 % steigt. Das Mischwasserüberlaufvolumen, welches hauptsächlich für Schäden am Gewässerökosystem verantwortlich ist, hat sich im *Ausfallszenario Stark* um < 1 % erhöht. Im Vergleich zu *Szenario 1 (ohne LIDs)* ist das Mischwasserüberlaufvolumen im *Ausfallszenario Stark* damit immer noch um 23 % niedriger. Dies zeigt, dass schlecht gepflegte LID-Maßnahmen aus wasserwirtschaftlicher Sicht noch immer erstaunlich gut funktionieren und wesentlich bessere Ergebnisse erzielen, als der aktuelle Zustand ohne LID-Maßnahmen.

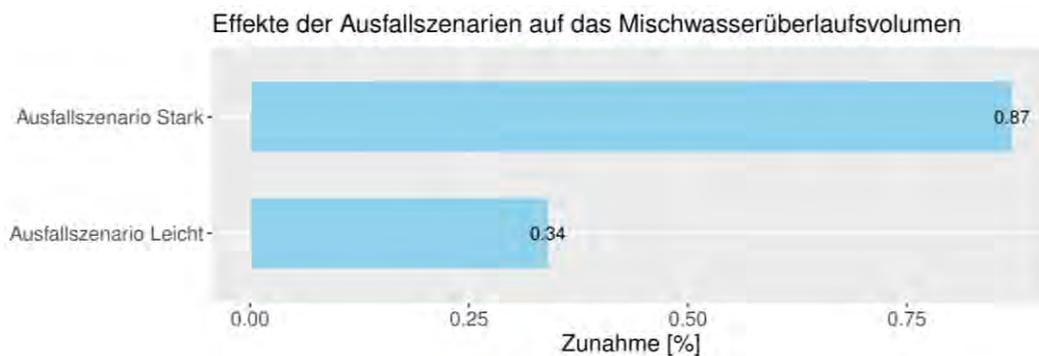


Abbildung 5: Auswirkungen der Ausfallszenarien auf das Mischwasserüberlaufvolumen

4 Schlussfolgerung

- Die Untersuchung zeigt, dass durch eine punktuelle Umsetzung von LID-Maßnahmen in einem Stadtumbaugebiet trotz Einschränkungen durch Planungsrealitäten im Bezirk deutliche Reduktionen des Oberflächenabflusses und des Mischwasserüberlaufvolumens erzielt werden können.
- Nicht überraschend sinkt das Reduktionspotenzial mit steigendem Regenereignisvolumen, bleibt aber selbst bei extremen Niederschlagsereignissen deutlich über der Abflussabkopplung (23 % Reduktion Mischwasserüberläufe > gegenüber 16 % Abkopplung).
- Die Vernachlässigung der Pflege von LID-Maßnahmen führt zu einer Steigerung der Abfluss- und Überlaufvolumina. Es bleibt jedoch festzustellen, dass der Funktionsverlust niedrig ausfällt und schlecht gewartete LIDs noch immer zu einer deutlichen Verbesserung führen. Allerdings kann die mangelnde Pflege für andere Aspekte (z.B. Bauphysik, Ästhetik, etc.) trotzdem das Potenzial von LIDs deutlich abmildern oder zu neuen Problemen führen.

5 Danksagung

Die Arbeiten wurden durch das Forschungsprojekt "*netWORKS4*" gefördert, innerhalb der Fördermaßnahme "Nachhaltige Transformation urbaner Räume" als Bestandteil des Programms "Forschung für nachhaltige Entwicklungen (FONA)" des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF). Wir bedanken uns weiter bei den Projektpartnern, dem Bezirksamt Pankow und weiteren Stakeholdern für die gute Zusammenarbeit.

6 Literatur

Nenz, D., Trapp, J. H., Matzinger, A., Rouault, P., Gunkel, M., Anterola, J. & Reichmann, B. (2020) Planerische Machbarkeitsstudien zur Umsetzung blau-grün-grau gekoppelter Infrastrukturen in Berlin. netWORKS-Papers Nr. 38

Riechel, M., Matzinger, A., Pawlowsky-Reusing, E., Sonnenberg, H., Uldack, M., Heinzmann, B., Caradot, N., von Seggern, D. & Rouault, P. (2016) Impacts of combined sewer overflows on a large urban river – Understanding the effect of different management strategies. Water Research 105 264-273

Rossman, L.A., U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (2015). Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1

Korrespondenz:

Paul Schütz
Cicerostraße 24
Tel.: 030 53653 800
paul.schuetz@kompetenz-wasser.de

Projektvorstellung KO-TRANSFORM

Neue Wege zur Konsensfindung in der Transformation der Siedlungswasser- und Grünflächenbewirtschaftung zur Klimawandelanpassung

K. Kearney¹, A. Stelzl², L. Waldschütz¹, D. Fuchs-Hanusch², M. Regelsberger³, T. Ertl¹

1 Institut für Siedlungswasserbau, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz, Universität für Bodenkultur Wien, Österreich

2 Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau, Technische Universität Graz, Österreich

3 Technisches Büro für Kulturtechnik, Marburggasse 11, 8200 Gleisdorf, Österreich

Kurzfassung: Im KO-TRANSFORM Projekt wurde in einer österreichischen Gemeinde eine Co-Creation Methode ausgetestet. Mit Hilfe eines mehrstufigen Beteiligungsprozesses wurde eine Möglichkeit zur besseren Konsensfindung in der klimasensiblen urbanen Freiraumgestaltung erprobt. Es wurde eine Kombination aus Stakeholder Analyse, Quantitative Storytelling und Multikriterielle Entscheidungsanalyse angewendet. Durch partizipative Prozesse soll die Akzeptanz möglicher Anpassungsmaßnahmen erhöht werden. Zur besseren Übertragbarkeit der Ergebnisse wurde ein Leitfaden erstellt, der sich an Gemeinden richtet.

Key-Words: Blau-Grün-Braune-Infrastruktur, partizipativer Beteiligungsprozess

1 Methodik

In diesem mehrstufigen Beteiligungsprozess wird ein partizipativer und transdisziplinärer Ansatz zur Konsensfindung in der städtischen Klimawandelanpassung erprobt, mit einem speziellen Fokus auf eine wassersensible Freiraumgestaltung mit Blau-Grün-Brauner Infrastruktur (BGB-I).

Die einzelnen Methoden wurden in der Fallstudien-Stadt Gleisdorf in der Steiermark umgesetzt und getestet. Zu Beginn erfolgte eine Stakeholder-Analyse, durch die möglichst diverse und repräsentative Stakeholder(-gruppen) aufgezeigt und eingehend beschrieben wurden. Anschließend wurden leitfadengestützte Interviews zu den projektrelevanten Themen geführt. Basierend auf den Stakeholder-Interviews wurden vier konkrete Narrative formuliert, welche die Bandbreite der individuellen Erzählungen, persönlichen Betroffenheitsgefühle und vorherrschenden Bedürfnisse und Wünsche in der Gemeinde abbilden. Diese Narrative stellen die Diskussions- und Arbeitsgrundlage für den ersten Workshop dar. Während der erste Workshop dazu diente, vorherrschende Narrative gemeinsam zu betrachten und zu hinterfragen, sowie Ideen und Visionen für die Stadt zu generieren, folgte der zweite Workshop mit der Entwicklung von konkreten Handlungsoptionen in Kleingruppen, als Input für die anschließende Multikriterielle Entscheidungsanalyse über ein Online-Analytical-Hierarchy-Process-Tool. Dieser letzte Schritt ermöglichte eine Reihung der Handlungsoptionen anhand von drei Kriterien, wie sie von den Teilnehmer_innen in ihrer Wichtigkeit eingestuft wurden. Zum Schluss wurde ein Leitfaden für Gemeinden erstellt, welcher praktische Empfehlungen und Hinweise zur Planung und Umsetzung von Beteiligungsprozessen enthält. (Kearney et al., 2022)

1.1 Stakeholder Analyse

Die Stakeholderanalyse in diesem Projekt erfolgte in mehreren Schritten, und diente nur internen Zwecken. Im Zuge der ersten Treffen mit der Gemeinde wurden einige Schlüsselakteure identifiziert, die

als Ausgangspunkt für weitere potentielle Stakeholder dienen. Die Liste der Akteure wurde mittels Recherchen ausgeweitet, wonach die einzelnen Stakeholder in einer Macht-Interessen-Matrix eingeordnet wurden. Damit konnten die Stakeholder geordnet charakterisiert, und mögliche Vorbehalte, Interessenskonflikte oder Agenden im Vorfeld ausgemalt werden. Aufbauend auf den Ergebnissen der Stakeholder Analyse wurde ein Interviewleitfaden erstellt, und alle identifizierten Personen wurden kontaktiert und um ein Interview gebeten. Nach der Schneeballmethode wurde jede/r Teilnehmer_in gefragt, welche Person(en) zusätzlich involviert werden sollten. Damit wuchs die Anzahl der kontaktierten Stakeholder auf 27 heran, von denen schlussendlich 20 Personen interviewt wurden. (Kearney et al., 2022)

1.2 Quantitative Storytelling und Workshop I

Die Quantitative Storytelling (QST) Methode ist ein relativ neuer Zugang in der Forschung zu „Science for Governance“, und wurde bisher in Fragestellungen zu klassischen „Nexus“-Themen eingesetzt. Grundsätze dieser Methode sind das Anerkennen und Aufzeigen von epistemologischen Unsicherheiten, und dem Darlegen von Narrativen, die politischen und gesellschaftlichen Entscheidungen zugrunde liegen (Cabello et al., 2021). Praktisch gesehen hat die QST-Methode keinen strengen formalen Ablauf, und ist damit flexibel auf lokale, projektspezifische Anforderungen anzupassen. Im vorliegenden Projekt wurden mittels Stakeholder-Interviews Narrative formuliert, welche als „sinnstiftende Erzählungen“ verstanden werden können. Diese Narrative bilden ein Spektrum an unterschiedlichen Betroffenheitsgefühlen (gegenüber Klimawandelauswirkungen), Bedürfnissen und Wünschen ab, welche unter den beteiligten Personen vorherrschen. In einigen Punkten waren die Narrative jedoch nicht rational oder basierend auf verfügbaren Daten und Fakten, sondern vor allem subjektiv geformt worden. Durch das ausdrücken, verschriftlichen und gemeinsame Betrachten der Erzählungen soll die Gelegenheit geboten werden, diese nüchtern zu beurteilen, und gegebenenfalls zu überdenken.

Der erste Workshop hatte das Ziel, alle beteiligten Personen in einem strukturierten Setting mit professioneller Moderation zusammenzubringen, aktive Diskussion zu fördern und die gängigen Narrative zur lokalen Klimawandelanpassung gemeinsam zu betrachten und zu hinterfragen. Nach einer Projektvorstellung inklusive der für Gleisdorf formulierten Narrative wurden Themen wie urbane Hitzeinseln, Zielkonflikte in der (Um-)Gestaltung von öffentlichen Freiräumen, dem Nutzen von Vegetation im Siedlungsgebiet und urbane Überflutungen durch Starkregen in einem moderierten Format diskutiert (siehe Erläuterungen zum Fishbowl-Diskussionsformat im StartClim Endbericht, Kearney et al. 2022). Teilnehmer_innen konnten sich abwechselnd einbringen, und auf einige Schlüsselfragen wurde von anwesenden Expert_innen eingegangen.

Anschließend wurden in Kleingruppen sogenannte „Rich Pictures“ erstellt, welche in Zusammenarbeit ausdiskutiert und mit Inputs von allen Gruppenmitgliedern zuerst gezeichnet und dann in der großen Gruppe präsentiert wurden. Diese Bilder sollten die Stadt, wie sie heute ist, darstellen, mit der Ergänzung von Visionen und Gestaltungs- und Änderungswünschen der jeweiligen Gruppenmitglieder. Dieser offene und kreative Prozess bot die Gelegenheit auch unrealistische oder „wilde“ Ideen einzubringen, und mögliche Zukunftsvisionen für die Stadt zu generieren. (Kearney et al., 2022)

1.3 Multikriterielle Entscheidungsanalyse und Workshop II

Im Zuge des zweiten Workshops wurden Handlungsoptionen zur klimasensiblen urbanen Freiraumgestaltung, anhand von ausgewählten Plätzen in Gleisdorf, in Kleingruppen ausgearbeitet. Im Anschluss wurden diese Optionen in der Großgruppe präsentiert und die Teilnehmer_innen hatten die Möglichkeit ihre zwei persönlich wichtigsten Optionen mit einem Sticker zu markieren. Mit diesem „Voting“ konnten die erarbeiteten Optionen weiter eingegrenzt werden. Nach einer Vorstellung der Multikriteriellen Entscheidungsanalyse (MCDA) allgemein wurde näher auf den Analytischen Hierarchieprozess

(AHP) eingegangen. Die Multikriterielle Entscheidungsanalyse wurde deshalb gewählt, da sie die Entscheidungsfindung in komplexen Fragestellungen unterstützt, und durch die Anwendung einer Gewichtung eine Reihung der Kriterien und Optionen ermöglicht (Zyoud et al., 2016). In diesem Projekt wurde der AHP angewendet. Bei dem AHP können die Teilnehmer_innen einen paarweisen Vergleich durchführen und somit angeben welches Kriterium bzw. welche Option für sie wichtiger ist gegenüber einem anderen. Hierzu wird die Saaty Skala verwendet (Saaty, 2008). Die AHP wird mit Hilfe eines Online Tools (Geopel, 2018) durchgeführt. Das Online Tool wurde gewählt, da für die Durchführung der AHP im zweiten Workshop keine Zeit war und die Teilnehmer_innen so die Bewertung eigenständig zuhause durchführen konnten. (Kearney et al., 2022)

2 Ergebnisse

Im folgendem werden die Projektergebnisse aufgezeigt und beschrieben.

2.1 Stakeholder Analyse

Eine Kategorisierung der Stakeholder erfolgte nach Enengel et al. (2012) in fünf Gruppen, darunter sogenannte strategische Fallakteure, wie zum Beispiel Politiker_innen und Führungskräfte, und lokale Akteure, wie z.B. Anwohner_innen oder Landwirt_innen. Die Stakeholder können gleichzeitig auch zwei oder mehreren Kategorien angehören. Im vorliegenden Projekt waren unter den 27 Stakeholdern lokale Politiker_innen, Mitarbeiter_innen der Gemeinde, Geschäftsführer_innen von lokalen Unternehmen sowie Vertreter_innen von lokalen Bürgerinitiativen, Anrainer, Schüler_innen und Pensionist_innen (Kearney et al., 2022).

2.2 Quantitative Storytelling

Die vier Narrative für Gleisdorf zeigten ein differenziertes Bild über die Wahrnehmungen und Wünsche, die in der Gemeinde bestehen. Während eine Narrative die Forderung eines „Blau-Grün-Braunen Paradigmenwechsels“ enthielt, in dem eine sehr starke Betroffenheit gegenüber Klimawandelauswirkungen zu erkennen war, vermittelte eine weitere Narrative ein anderes Bild. Unter dem Titel „Stadt bedeutet Bauwerke und Wohnraum, Grünraum ist im Umland“, wurden Vorbehalte gegen eine zunehmende Begrünung der Stadt deutlich, wogegen Auswirkungen des Klimawandels entweder gar nicht, oder sogar als positiv wahrgenommen wurden. Der Siedlungsraum wird gewissermaßen als getrennt von der Natur betrachtet. (Kearney et al., 2022)

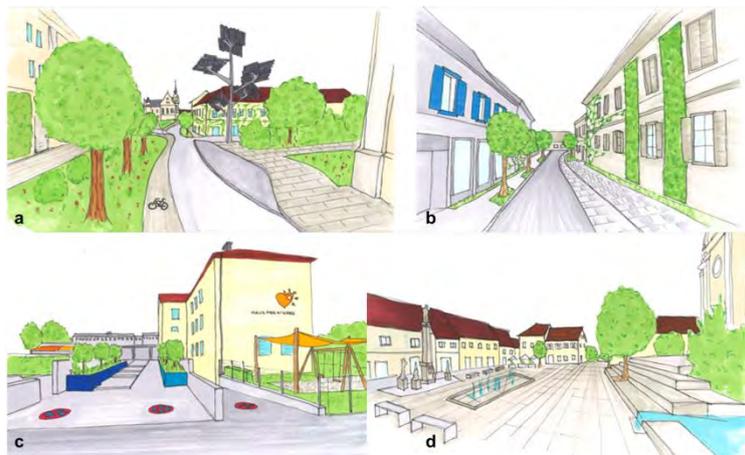


Abbildung 69: Darstellung der 4 Narrative (Kearney et al., 2022)

2.3 Multikriterielle Entscheidungsanalyse

Es wurden, während dem zweiten Workshop, 8 Optionen ausgearbeitet, 5 davon wurden als besonders wichtig von den Teilnehmer_innen erachtet. Die genaue Beschreibung der Optionen und Kriterien kann dem StartClim Endbericht (Kearney et al., 2022) entnommen werden. Die 5 Optionen, die in die AHP übertragen wurden, sind:

- Grünes Band und Aufenthaltszonen
- Mehr Leben am Hauptplatz
- Lebenszentrum statt Konsumzentrum
- Naturnahes Siedlungsgebiet und Schulzentrum
- Begrüntes Gewerbe- und Industriegebiet

Es wurden drei Kriterien definiert, anhand derer die Optionen bewertet wurden. Die Kriterien lauten:

- Annäherung an den natürlichen Wasserhaushalt
- Aufenthalts- und Lebensqualität
- Versiegelungsgrad

Die ausgearbeiteten Optionen und definierten Kriterien wurden für die AHP Auswertung in das Online Tool (Goepel, 2018) übertragen.

2.4 Ergebnisse Analytischer Hierarchieprozess

Die Teilnehmer_innen haben im ersten Schritt die Kriterien gewichtet. An erster Stelle steht das Kriterium Aufenthalts- und Lebensqualität mit ~60%, an zweiter Stelle ist der Versiegelungsgrad mit 25% und an letzter Stelle die Annäherung an den natürlichen Wasserhaushalt mit 15%. Im Anschluss wurden die Optionen paarweise anhand der einzelnen Kriterien bewertet. Um die globalen Gewichte ermitteln zu können, wird die Gewichtung der Kriterien mit der Gewichtung der Optionen multipliziert. Die höchste globale Gewichtung weist die Option *Mehr Leben am Hauptplatz* mit 28% auf. Danach folgen die Optionen *Grünes Band und Aufenthaltszonen* mit 24%, *Naturnahes Siedlungsgebiet und Schulzentrum* mit 21%, *Begrüntes Gewerbe- und Industriegebiet* mit 14% und an letzter Stelle ist die Option *Lebenszentrum statt Konsumzentrum* mit 13%. Der gemittelte Gruppenkonsens beträgt 65,9% und wird in die geringe Zustimmungskategorie eingeordnet. Mit Hilfe der Ergebnisse der AHP wird aufgezeigt, welches Kriterium und welche Option in dieser Stakeholdergruppe die höchste Priorität aufweisen (Kearney et al., 2022).

3 Schlussfolgerung

Entscheidungen über die urbane Freiraumgestaltung und die Umsetzung von BGB-I Maßnahmen im Siedlungsraum können zu zahlreichen Konflikten und Meinungsverschiedenheiten innerhalb einer Gemeinde führen. Um den Entscheidungsfindungsprozess zu unterstützen und die Akzeptanz der Entscheidungen unter den beteiligten und betroffenen Stakeholdern zu steigern, bieten sich partizipative Prozesse mit Co-Creation Elementen an. Die Planung und Umsetzung von Beteiligungsprozessen erfordern viel Zeit und Energie, jedoch können sie langfristig die Stakeholder-Zufriedenheit erhöhen und im Kontext des Klimawandels, die Legitimität und Akzeptanz von Anpassungsmaßnahmen steigern. Die im vorliegenden Projekt angewendeten Methoden wiesen viele Vorteile auf und lieferten für die Fallstudien-Gemeinde aussagekräftige Ergebnisse.

Die kombinierte Anwendung von QST mit einer anschließenden MCDA wies jedoch einige praktische Schwierigkeiten auf. Durch die kurze Projektlaufzeit und eingeschränkte finanzielle Mittel konnten zum Beispiel Plausibilitätskriterien, welche bei der QST-Methode zur Überprüfung der Narrative angewendet werden, nur oberflächlich untersucht werden. Außerdem musste aus zeitlichen Gründen die AHP online durchgeführt werden, wodurch sich eigene Herausforderungen ergaben. Für jene Personen,

welche am zweiten Workshop nicht teilnehmen konnten, und auch ältere Personen, die weniger vertraut mit digitalen Kommunikations- und Informationstechnologien sind, war die Durchführung der Online AHP eine Herausforderung und in manchen Fällen eine Barriere, die eine weitere Teilnahme ausschloss (Kearney et al., 2022).

Für die Fallstudie wurden im Zuge des zweiten Workshops konkrete Handlungsoptionen ausgearbeitet, welche mit Hilfe der AHP gewichtet wurden. Für die zukünftige Planung und Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen kann die Gemeinde an den Ergebnissen aus diesem Projekt ansetzen, und so bereits im Vorfeld potenzielle Meinungsverschiedenheiten erkennen und die Akzeptanz von Maßnahmen erhöhen.

4 Literatur

- Cabello, V., Romero, D., Musicki, A., Guimarães Pereira, Â., & Peñate, B. (2021). Co-creating narratives for WEF nexus governance: a Quantitative Story-Telling case study in the Canary Islands. *Sustainability Science*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s11625-021-00933-y>
- Engel, B., Muhar, A., Penker, M., Freyer, B., Drlik, S., & Ritter, F. (2012). Co-production of knowledge in transdisciplinary doctoral theses on landscape development—An analysis of actor roles and knowledge types in different research phases. *Landscape and Urban Planning*, 105(1–2), 106–117. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.12.004>
- Goepel, K. D. (2018). Implementation of an Online Software Tool for the Analytic Hierarchy Process (AHP-OS). *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, 10(3). <https://doi.org/10.13033/ijahp.v10i3.590>
- Kearney, K.; Stelzl, A.; Waldschütz, L.; Fuchs-Hanusch, D.; Regelsberger, M.; Ertl, T. (2022): KO-TRANSFORM – Neue Wege zur Konsensfindung in der Transformation der Siedlungswasser- und Grünflächenbewirtschaftung zur Klimawandelanpassung. Endbericht von StartClim21/22.F in StartClim21/22: Handeln und Aktivieren, Auftraggeber: BMK, BMWFW, Klima- und Energiefonds, Land Oberösterreich.
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International journal of services sciences*, 1(1), 83–98.
- Zyoud, S. H., Shaheen, H., Samhan, S., Rabi, A., Al-Wadi, F., & Fuchs-Hanusch, D. (2016). Utilizing analytic hierarchy process (AHP) for decision making in water loss management of intermittent water supply systems. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 6(4), 534–546. <https://doi.org/10.2166/washdev.2016.123>

Korrespondenz:

Katharina Kearney, MSc.
 Universität für Bodenkultur Wien
 Institut für Siedlungswasserbau, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz
 SIG - Muthgasse 18
 1190 Wien
 +43 680 2087476
katharina.kearney@boku.ac.at

Potenzialstudie Schwammstadt

K. Schulthess¹, M. Brögli¹, A. Miescher¹, A. Crujisen¹
 1 HOLINGER AG, Im Hölzli 26, 8504 Winterthur, Schweiz

Kurzfassung: Durch die Klimaveränderungen treten Ereignisse wie Starkregen und Hitzewellen immer häufiger auf. Um solche Phänomene in der kommunalen Planung zu berücksichtigen, braucht es eine strukturierte und koordinierte Planung. Hierfür bietet sich eine Potenzialstudie für die Umsetzung von Schwammstadt-Massnahmen an. Neben GIS-basierten Gebietsanalysen werden konkrete, verortete Möglichkeiten beleuchtet und regulatorische Handlungsspielräume aufgezeigt. Die Potenzialstudie bietet somit ein konkretes Planungsinstrument, das Gemeinden und Städte auf dem Weg zur Schwammstadt leitet.

Key-Words: Schwammstadt, koordinierte Planung, Planungsinstrument, Hitzeminderung, Abflussminderung, Biodiversität

1 Von Defiziten und Potenzialen

Eine nachhaltige Regenwasserbewirtschaftung in urbanen und dichten Siedlungsräumen erfordert eine strukturierte und koordinierte Planung. Heute ist allerdings in vielen Gemeinden und Städten der Schweiz unklar, wie das Thema Schwammstadt konkret angegangen werden soll, wo die Hebel liegen und welche Wirkungen und Effekte die Thematik hinsichtlich Aufenthaltsqualität, Beitrag zur Biodiversität sowie Abfluss- oder Hitzeminderung mit sich bringen kann.

Als mögliche Herangehensweise hierfür bietet sich die Identifikation des Potenzials für die Umsetzung von Schwammstadt-Massnahmen: wo liegen defizitäre Standorte mit beispielsweise starker Verdichtung und Hitzeinseln und wie gut eignen sich diese für die Umsetzung von Schwammstadt-Massnahmen. Darauf basierend können verortete Teilgebiete definiert, priorisiert und erste Massnahmenvorschläge ausgearbeitet werden.

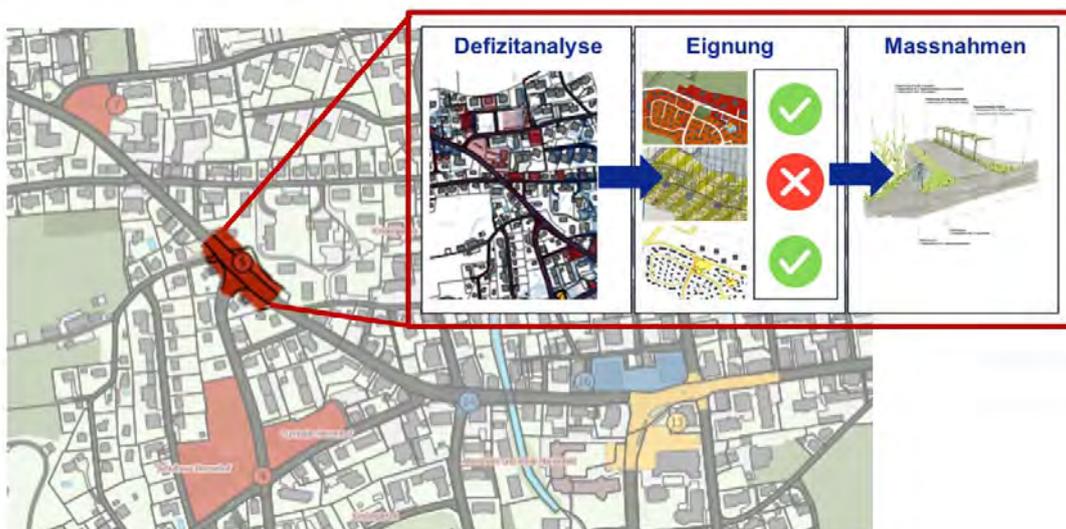


Abbildung 70: Beispiel eines Massnahmenplans Schwammstadt

Die verortbaren Ergebnisse der Schwammstadtpotenzialstudie können sogleich auf andere, auch bereits laufende Projekte einwirken. So kann auf effiziente Art und Weise ein fassbarer Fahrplan hin zur Schwammstadt erstellt werden: beginnend mit den "low hanging fruits", die rasch und einfach eine grosse Wirkung hinsichtlich Hitze- oder Abflussminderung erbringen, geht es in den nächsten Phasen an die mittel- und langfristigen Entwicklungen.

Die Potenzialstudie bieten ein geeignetes behördeninternes Koordinationsinstrument und kann helfen, die Entwässerungsgrundsätze zu schärfen und den guten Umgang mit Regenwasser zu fördern.

Neben verorteten Potenzialen bietet das neue Planungsinstrument auch Empfehlungen für reglementarische Handlungsspielräume und kann mit geeigneter Einbindung wertvolle Inputs an andere Planungsinstrumente liefern.

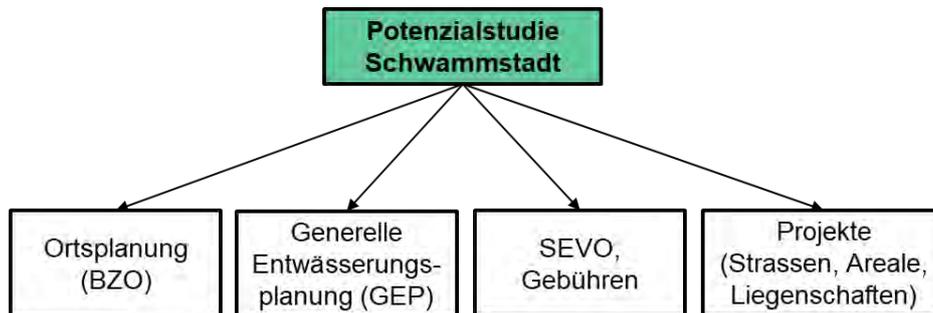


Abbildung 2: Potenzialstudie als Basis für die Entwicklung von Vorgaben und Inputs hinsichtlich Schwammstadt

2 Lokale Bedürfnisse und partizipative Vorgehensweise

Bei der Erarbeitung einer Potenzialstudie ist es zentral, dass gemeinde- oder städtespezifische Bedürfnisse miteinbezogen werden; sei dies beispielsweise ein verstärkter Fokus auf die Bewässerung des öffentlichen Grüns, die Einbindung der Biodiversitätsförderung oder der Einbezug von Sanierungsplanungen. So werden lokale Bedürfnisse und Herausforderungen berücksichtigt, wodurch die Akzeptanz der Behörden und parlamentarischen Gremien, aber auch der Bevölkerung gesteigert werden kann. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die genaue Analyse der reglementarischen Begebenheiten und Möglichkeiten. Je nach Auslegeordnung gibt es bereits Förderinstrumente oder Strategien, welche ergänzt werden können durch eine solche Studie.

Korrespondenz:

HOLINGER AG
 Katharina Schulthess
 Im Hölzli 26, 8504 Winterthur
 +41 52 267 09 57
 katharina.schulthess@holinger.com

Quartierpark Areal Thurgauerstrasse, Zürich

Marcel Lüthi¹, Uwe Günther¹, Inès Jomni²

1 Basler & Hofmann AG, Bachweg 1, 8133 Esslingen, Schweiz

2 Hager Partner AG, Bergstrasse 50, 8032 Zürich, Schweiz

Kurzfassung: An der Thurgauerstrasse entsteht eine moderne innerstädtische Parkanlage, bestehend aus verschiedenen konzipierten Flächen mit multifunktionaler Nutzung bezüglich Abwasserbewirtschaftung bei Regenwetter. Ein erlebbares, natürlich gestaltetes Wasserbecken dient als offenes Retentionsvolumen und wird durch ein System aus verschiedenen zusammenhängenden Entwässerungselementen mit unterschiedlichen Funktionen aus Versickerung und Retention ergänzt. Dies ist möglich dank einem ganzheitlichen Planungsprozess, welcher die vielfältigen Bedürfnisse und Randbedingungen berücksichtigt.

Key-Words: Parkanlage, Wasserbecken, Retention, Versickerung, multifunktional

3 Projektübersicht

In Zürich-Seebach entsteht an der Thurgauerstrasse ein neuer lebendiger und gut durchmischter Quartierteil mit Wohnungen, Gewerbeflächen, sowie einer Schulanlage und einem Quartierpark. Nach einer Testplanung mit drei interdisziplinären Teams wurden für das Gesamtareal Thurgauerstrasse zwei öffentliche Gestaltungspläne (GP) erarbeitet (Abbildung 71). Der GP «Schule/Quartierpark (Teilgebiet B)» beinhaltet die aus offenen Wettbewerben hervorgegangene Schulanlage (Bollhalder Eberle Architektur) den Quartierpark (Landschaftsarchitektur Hager Partner AG).

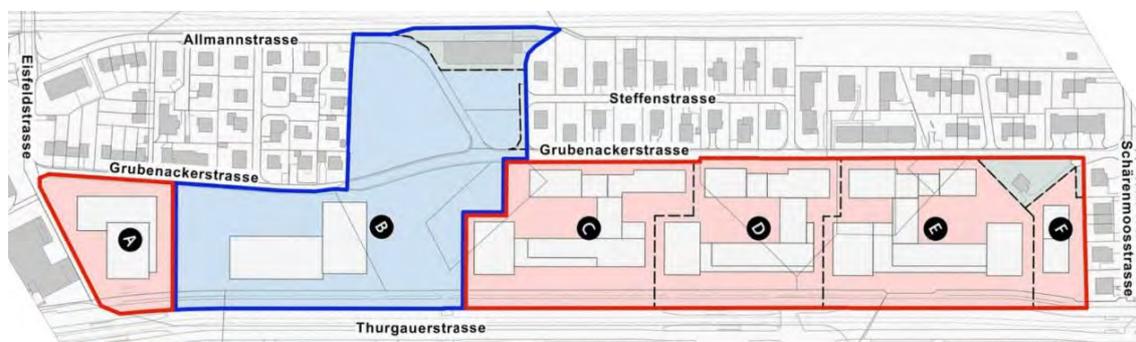


Abbildung 71: Übersicht Gestaltungsplan Teilgebiet B Schule/Quartierpark (Planwerkstadt AG, 2017)

Nachfolgend wird der Umgang mit dem anfallenden Niederschlagswasser innerhalb des neuen rund 16'460 m² grossen Quartierparks vorgestellt, welcher ab Herbst 2022 in die Realisierung gelangt. Grundlage bilden die seit 2019 laufenden Projektierungsarbeiten, sowie die im Rahmen des Bauprojektes erarbeiteten Projektunterlagen (GSZ, 2020). Der Projektperimeter ist in Abbildung 74 dargestellt.

Die grosse innerstädtische Parkanlage beinhaltet neben dem Gebäude «Altes Schützenhaus» verschiedene Grünflächen, öffentliche Wege und Plätze mit durchlässig und undurchlässig befestigten Flächen, sowie ein offenes, natürlich gestaltetes Wasserbecken. Letzteres befindet sich am Eingangsbereich an der Thurgauerstrasse und tiefsten Stelle des Parks (Abbildung 72). Das Wasserbecken verfügt über einen ständigen minimalen Wasserstand und wird hangseitig als Feuchtzone ausgebildet. Es soll damit in ökologischer Hinsicht als auch für die Parkbesuchenden jederzeit attraktiv sein. Der variabel defi-

nierte Wasserstand erlaubt die Nutzung als offenes Retentionsvolumen für die Abwasserbewirtschaftung bei Regenwetter. Mit dem Wasserbecken als multifunktionales und zentrales Element dieser Blau-Grünen Infrastruktur wird das bedeutende Parkelement Wasser in Szene gesetzt und für alle erlebbar gemacht.



Abbildung 72: Visualisierung Eingangsbereich Quartierpark Areal Thurgauerstrasse mit Wasserbecken

4 Randbedingungen

Die Rahmenbedingungen im Wettbewerbsprogramm für den Quartierpark verlangten, dass für das anfallende Regenabwasser aufgrund der beschränkten Ableitungsmöglichkeiten im innerstädtischen Gebiet umfangreiche Versickerungs- und Retentionsmassnahmen in das Projekt zu integrieren sind. Seit Beginn wird das Prinzip verfolgt, soviel des anfallenden Niederschlagsabwassers wie möglich zu versickern. Die Versickerungsmöglichkeiten sind aufgrund der geringen Durchlässigkeit und den erwarteten hohen freien Grundwasserspiegel nahe der Terrainoberfläche allerdings stark eingeschränkt.

Abbildung 73 zeigt einen Parkschnitt mit geologischem Profil und vermutetem oberen freien Grundwasserspiegel. Die Durchlässigkeit der für die Regenabwasserbewirtschaftung massgebenden obersten Schichten aus künstlichen Auffüllungen und verschwemmter Moräne wird als sehr gering beurteilt, und in einer Grössenordnung von $k_f = 10^{-5}$ bis 10^{-6} m/s geschätzt.

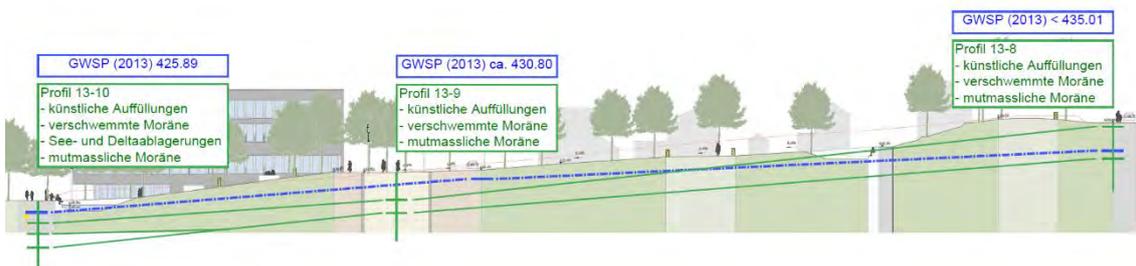


Abbildung 73: Parkschnitt mit geologischem Profil und vermutetem oberen freien Grundwasserspiegel

Der Projektperimeter liegt zwar ausserhalb von nutzbaren Grundwasservorkommen, tangiert im südlichen Teil aber einen Bereich eines tiefer liegenden Grundwasservorkommens mit teilweise artesisch gespanntem Grundwasser und befindet sich gesamthaft im Gewässerschutzbereich Au. Es muss daher darauf geachtet werden, dass keine Verschmutzungen des Grundwassers auftreten. Entwässerungsmassnahmen mit reiner Speicherfunktion sind dicht auszuführen, und es sind die aus Sicht Gewässerschutz im Gewässerschutzbereich Au massgebenden Grundsätze der Versickerung einzuhalten. Unter

anderem darf nur gering belastetes Dachabwasser unterirdisch versickert werden. Regenabwasser von jeglichen Verkehrsflächen ist über eine belebte Bodenschicht zu versickern.

5 Der Quartierpark als Blau-Grüne Infrastruktur

5.1 Gesamtkonzept

Es werden verschiedene zusammenhängende Entwässerungselemente mit unterschiedlichen Funktionen aus Versickerung und Retention eingesetzt (B&H, 2022). Zur Entlastung des Kanalnetzes wird das anfallende Regenabwasser primär über bewachsene Grünflächen oder durchlässig befestigte Flächen lokal versickert. Wo nicht anders möglich, wird das Regenabwasser gefasst und direkt oder indirekt über eine abgedichtete unterirdische Retention verzögert dem Wasserbecken zugeführt. Hier kann ein Teil des Wassers verdunsten und so zur Verbesserung des Mikroklimas beitragen. Zum Schutz der Infrastrukturanlagen und zur Entlastung der Mischabwasserkanalisation ist das Wasserbecken mit einem gedrosselten Basisabfluss in den Bachwasserkanal in der Thurgauerstrasse und mit einem hydraulisch entkoppelten Notüberlauf in die direkt darunterliegende Mischabwasserkanalisation ausgestattet.

Das komplexe Zusammenspiel der einzelnen Entwässerungskomponenten ist mittels Niederschlag-Abfluss-Langzeit-Simulation untersucht und auch für Extremereignisse nachgewiesen. Die Modellierung mit der Software KOSIM 7 (itwh, 2017) berücksichtigt u.a. auch Trockenwetterperioden sowie Mulden- und Verdunstungsverluste auf offenen Wasserflächen. Basis dazu bilden im Raum Zürich aufgezeichnete Niederschlags- und Evapotranspirations-Datenreihen der Jahre 1994-2019 (MeteoSchweiz, 2020). Abbildung 74 und Abbildung 75 veranschaulichen die eingesetzten umwelttechnischen Elemente:

- Begrünte Mulden-Rigolen-Systeme zur Fassung des Oberflächenabflusses und lokaler Versickerung mit Retention. Die Systeme können auch überschüssiges Hangwasser fassen und sind mit einer hochliegenden Sickerleitung als Entlastung ins Wasserbecken ausgerüstet;
- Drainagesystem unter dem Rasenspielfeld mit direkter Ableitung ins Wasserbecken;
- Abgedichtete unterirdische Retentionsanlage (RB4) aus Retentionskörben mit Auftriebssicherung für die Fassung des auf befestigten Flächen anfallenden und nicht zur Versickerung gelangenden Regenabwassers mit verzögerter Ableitung ins Wasserbecken;
- Unterirdische Versickerungsanlage (VS) für Wasser aus begrünten nicht begehbaren Dachflächen der Schulanlage mit Notüberlauf ins Wasserbecken;
- Massnahmen aus Sickerkies, damit allfälliges Hangwasser frei um Einbauten zirkulieren kann;
- Offenes, natürlich gestaltetes Wasserbecken mit ständigem minimalen Wasserstand, hangseitiger Feuchtzone und Überlauf in den Nivellierschacht;
- Nivellierschacht zur Regulierung der Überlaufhöhen aus dem Wasserbecken mit gedrosseltem Basisabfluss in die Bachwasserleitung und hydraulisch entkoppeltem Notüberlauf in die öffentliche Mischabwasserkanalisation von Entsorgung & Recycling Zürich (ERZ).



Abbildung 74: Projektperimeter Quartierpark (links) und Schema Entwässerungssystem (Mitte/rechts)

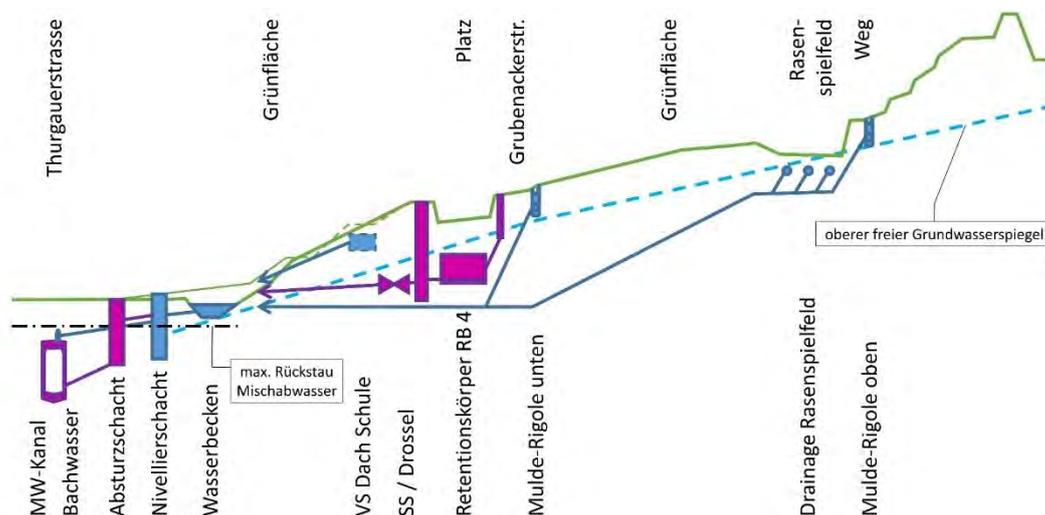


Abbildung 75: Hydraulisches Längenprofil Quartierpark Areal Thurgauerstrasse

5.2 Grünflächen

Neben den erwähnten hydrogeologischen Randbedingungen und der Hanglage diverser Grünflächen, kann nicht alles anfallende Regenabwasser versickert werden. Selbst in schwach geneigten Hanglagen können sich bei starken Niederschlägen erhebliche Oberflächenabflüsse bilden. Dies insbesondere bei Starkniederschlägen und abgetrocknetem Boden oder unter bereits gesättigten Bodenverhältnissen.

Das Rasenspielfeld wird mit einer Drainage versehen, welche das gefasste Wasser ins Wasserbecken leitet. Hangseitig werden entlang der Strasse und der Wege Mulden-Rigolen-Systeme verwendet, welche dem Überschüssen des Oberflächenabflusses von der geneigten Grünfläche auf die Strasse entgegenwirken und eine zusätzliche Versickerung ermöglichen. Der Kieskörper unter den Mulden dient dabei als Retention und kann zum Schutz der seitlichen Belagsflächen auch allfälliges Hangwasser fassen. Als Entlastung dient eine Sickerleitung, welche das Wasser fasst und verzögert ins Wasserbecken ableitet. Um die Wirkung der Retention zu verstärken bzw. das Ableiten weiter zu verzögern, wird die Sickerleitung möglichst weit oben etwas versetzt zur Strassenseite angeordnet, und nur oben gelocht.

5.3 Befestigte Flächen und Dächer

Das auf befestigten Flächen anfallende Regenabwasser wird grundsätzlich über die Schulter in bewachsenen Grünflächen versickert. Die oben beschriebenen Mulden-Rigolen-Systeme können ebenfalls für die Aufnahme von Regenabwasser dienen. Eine Versickerung über chaussierte Flächen ist nur für befestigte Einzugsflächen möglich, die zwingend kleiner sein müssen als die chaussierte Fläche, in welcher das Regenabwasser versickert. Wo nicht anders möglich, wird das Regenabwasser gefasst und über die unterirdische Retention RB 4 verzögert dem Wasserbecken zugeführt. Der Retentionskörper wird ausserhalb des Strassenbereiches erstellt und besteht aus abgedichteten Retentionskörben mit Auftriebssicherung. Der Einsatz von Retentionskörben verringert den Platzbedarf, und schränkt die Versickerung über die darüber liegende durchlässig gestaltete Oberfläche nicht zu stark ein.

Ein Teil des Regenabwassers der Schulanlage wird in den Quartierpark abgeleitet. Das Wasser stammt von der begrünten Dachfläche und von der östlichen Ableitung der Hangumströmungsleitung. Letzteres wird direkt ins Wasserbecken geleitet. Das Dachabwasser gelangt in die Versickerungsanlage (VS) unterhalb eines Parkzimmers mit Notüberlauf ins Wasserbecken. Die Dachentwässerung des Schützenhauses wird gesammelt und über den zentralen Retentionskörper RB 4 ins Wasserbecken geleitet.

Die unterirdischen Versickerungs- und Retentionsanlagen VS und RB 4 werden mit Sickerkies umgeben, um die Durchflusskapazität des Grundwassers zu erhalten. Somit kann aufgrund des schwankenden freien Grundwasserspiegels allenfalls aufstauendes Grundwasser seitlich abfliessen.

5.4 Wasserbecken

Das Wasserbecken wird aus den Zuleitungen der Drainagen, Rigolen und Retentionskörben gespeisen. Die Sohle wird abgedichtet und auftriebssicher ausgeführt. Damit wird eine aus Sicht Gewässerschutz unerwünschte Kommunikation mit dem Grundwasser verhindert. Um bei hohen Wasserständen trotzdem eine Versickerung teilweise zu ermöglichen, wird die hangseitige Böschung über dem Grundwasserspiegel begrünt. Unterhalb der Abdichtung wird ein Sickerteppich angeordnet, um die natürliche Zirkulation des Grundwassers nicht zu behindern.

Um die Algenbildung zu reduzieren wird primär auf organisatorische Massnahmen gesetzt. Dies beinhaltet hauptsächlich eine massgebliche Beschränkung von Düngemittleinsatz und den Einsatz von entsprechend geeigneter Mittel. Eine anderweitige Elimination von Nährstoffen (Stickstoff, Phosphor) ist ohne aufwendige technische Anlage kaum machbar. Zudem werden die Zu- und Überläufe situativ so platziert, dass auch bei weniger starken Regenereignissen eine möglichst gute Durchströmung erzielt wird. Die Einleitungen erfolgen erhöht im durch Bewuchs geschützten und begrünten Anlageteil.

Das Wasserbecken darf in niederschlagsarmen Perioden nicht austrocknen. Um dem entgegen zu wirken, wird die ohnehin erforderliche Entwässerung der innerhalb der Parkanlage angeordneten Trinkwasserbrunnen mit dem Wasserbecken verbunden. Da die Verdunstung im Wasserbecken geringer ist als der Stetslauf der Brunnen, kann ein minimaler Wasserspiegel von 20 cm gehalten werden und das Becken wird gleichzeitig leicht durchströmt; eine Win-win-Situation dank Multifunktionalität.

5.5 Nivellierschacht

Die Regulierung der Überlaufhöhen aus dem Wasserbecken erfolgt im nachgeschalteten Nivellierschacht. Dieser ist mit einer Tauchwand und unterschiedlich hoch und breit angeordneten Überfallkanten für den gedrosselten Basisabfluss in den Bachwasserkanal und für den Notüberlauf in die öffentliche Mischabwasserkanalisation von Entsorgung & Recycling Zürich ausgerüstet (Abbildung 76).

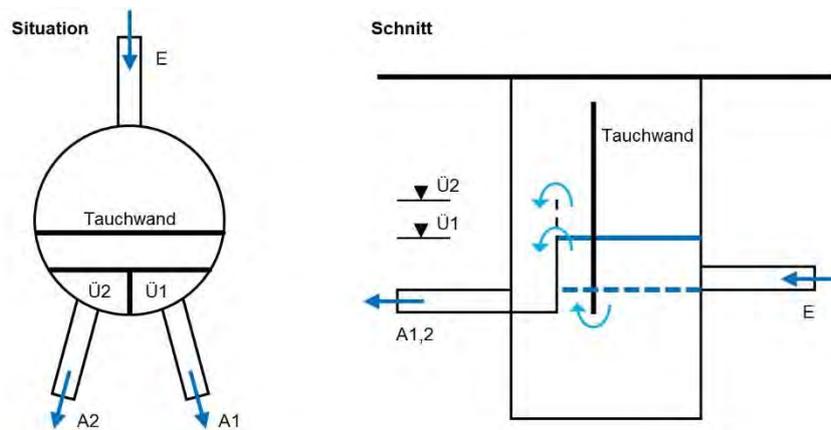


Abbildung 76: Schematische Darstellung Nivellierschacht mit Überfallkanten

Die Überfallhöhen und die Dimensionierung der Ableitungen sind auf die erwarteten Abflussmengen, die Rückstauverhältnisse in den beiden öffentlichen Kanälen, sowie auf die festgelegten Wasserspiegellagen im Becken abgestimmt. Die Ableitung in den Bachwasserkanal darf überstaut werden. Für den Fall, dass der Bachwasserkanal ausgelastet ist, stellt sich somit ein selbstregulierendes System ein. Das System bietet die nötige Flexibilität, damit bei einem geringeren Überstau der Bachwasserleitung ggf. mehr Wasser in den Bachwasserkanal geleitet werden kann und somit der Mischabwasserkanal weiter entlastet wird. Das Notüberlaufsystem ist so ausgelegt, dass es auch bei einem Rückstau aus der Mischabwasserkanalisation zu keinem hydraulischen Kurzschluss mit Rückfluss von Schmutzabwasser ins Parksystem kommt. Da aber auch anderweitige Verunreinigungen nicht ausgeschlossen werden können, wird zum Schutz des Bachwasserkanals dessen Auslauf mit einem Notfallschieber ausgerüstet.

Die Berechnungen zeigen, dass mit diesem System aus zahlreichen unterschiedlichen und multifunktionalen Entwässerungselementen trotz der grossen Arealfläche generell maximal rund 80 l/s ($T = 10$ Jahre) bis 114 l/s ($T = 20$ Jahre) ins öffentliche Kanalnetz abgegeben werden. Das System ist auch bei Extremereignissen robust und bietet Fauna und Flora einen massgebenden lokalen Wasserspeicher.

6 Fazit und Danksagung

Das in enger Zusammenarbeit mit Auftraggeber, Behörden und Drittplaner der benachbarten Schulanlage ausgearbeitete Entwässerungskonzept befindet sich aktuell in der Realisierungsphase und legt somit den Grundstein für den Umgang mit dem anfallenden Niederschlagswasser im Gesamtareal Thurgauerstrasse. Mit der Umsetzung verschiedener Komponenten des Schwammstadt-Konzeptes trägt das Projekt massgebend zur Förderung eines naturnahen Wasserhaushaltes bei. Es ist ein zeitgemässes Beispiel, wie sich Blau-Grüne Infrastrukturen unter Berücksichtigung der vielfältigen Bedürfnisse und Randbedingungen in die aktuellen und langfristigen Planungsprozesse integrieren lassen. Wir bedanken uns beim gesamten Planungsteam, der Auftraggeberin Grün Stadt Zürich und allen involvierten Drittplaner und Behörden, insb. ERZ für die gute und konstruktive Zusammenarbeit:

Projektteam: Hager Partner AG, Landschaftsarchitekten; Ampio Partizipation GmbH; Basler & Hofmann AG, Ingenieure; Kerst-Beratungen, Ökologie; Felix J. Frey Architekten GmbH.

7 Literatur

B&H. (2022). *Schulanlage & Quartierpark Areal Thurgauerstrasse, Entwässerungskonzept (Teilgebiet B)*. Basler & Hofmann AG, 10.06.2022. Zürich: Stadt Zürich, Grün Stadt Zürich und Amt für Hochbauten.

GSZ. (2020). *Areal Thurgauerstrasse, Zürich-Seebach, Quartierpark Thurgauerstrasse, Bauprojekt*. Hager Partner AG, Zürich, April 2020. Zürich: Stadt Zürich, Grün Stadt Zürich.

itwh. (2017). *KOSIM 7, Kontinuierliches-Langzeit-Simulationsmodell für den Nachweis von Bauwerken der Regenwasserbehandlung, Regenwasserbewirtschaftung und Regenwasserrückhaltung*. Hannover: Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie GmbH (itwh).

MeteoSchweiz. (2020). *Messdaten Niederschlag und Evapotranspiration Jahre 1994-2019, Automatische meteorologische Bodenmessstation Zürich / Affoltern (REH)*. Bern: Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, MeteoSchweiz.

Planwerkstadt AG. (2017). *Öffentlicher Gestaltungsplan «Thurgauerstrasse Teilgebiet B Schule / Quartierpark»*. Planwerkstadt AG, 19.12.2017. Zürich: Amt für Städtebau Stadt Zürich.

Korrespondenz:

Marcel Lüthi
Basler & Hofmann AG, Bachweg 1, CH-8133 Esslingen
+41 44 387 16 35
Marcel.Luethi@baslerhofmann.ch

Beispielsammlung Guter Umgang mit Regenwasser

A. Miescher¹, N. Probst¹, K. Schulthess¹

¹ HOLINGER AG, Im Holderli 26, 8504 Winterthur, Schweiz

Kurzfassung: Der gute Umgang mit Regenwasser (Stichwort "Schwammstadt") soll bei Bauvorhaben so früh wie möglich berucktigt werden. Um Städte und Gemeinden hierbei zu unterstützen, Ideen zu liefern und den Erfahrungsaustausch zu fördern, wurde eine Beispielsammlung mit inspirierenden Projekten aus der ganzen Schweiz erstellt. Die Beispielsammlung soll die zuständigen Ämter und Fachplaner dabei unterstützen, die Planung der Entwässerung des Regenwassers so früh wie möglich bei einem Bauvorhaben zu integrieren. Als Hilfestellung dafür wurde zusätzlich ein allgemein gültiges Ablaufschema für Bauvorhaben erstellt.

Key-Words: Schwammstadt, Praxisbeispiele, Liegenschaftsentwässerung, Strassenentwässerung, Baugesuchsprufung, Erfahrungsaustausch.

1 Die Beispielsammlung

Der gute Umgang mit Regenwasser – die Entsiegelung von Flächen und die Förderung von Verdunstung, Versickerung und Retention ("Schwammstadt-Prinzip") – soll bei Bauvorhaben so früh wie möglich berucktigt werden. Um zu zeigen, dass in der Schweiz "Schwammstadt" gelebt wird, haben acht Städte (Basel, Bern, Biel, Luzern, St. Gallen, Winterthur, Zürich und Zug) in Zusammenarbeit mit der HOLINGER AG eine Schweizer Praxisbeispielsammlung mit inspirierenden Projekten aus der Liegenschafts- und Strassenentwässerung erarbeitet.



Abbildung 77: Beispielsammlung Guter Umgang mit Regenwasser – Schweizer Praxisbeispiele zu Schwammstadt, Liegenschafts- und Strassenentwässerung.

Die Beispielsammlung enthält Beispiele zu folgenden Themen:

- Kleinere bis mittlere private Liegenschaften
- öffentliche Strassen und Plätze
- Arealüberbauungen und Grossbauten



Abbildung 2: diverse Beispiele aus dem Liegenschaftsbereich, öffentlichen Raum und Grossüberbauungen.

Ein wichtiges Ziel der Dokumentation ist es, den Erfahrungs- und Wissensaustausch zwischen den verschiedenen Städten und weiteren Akteuren zu fördern. Sie soll die zuständigen Ämter und Fachplanerinnen bei der Gestaltung der Entwässerung des Regenwassers unterstützen und inspirieren. Die Beispielsammlung ist seit Februar 2022 auf der Webseite des Schweizerischer Verbands Kommunaler Infrastruktur (SVKI) gratis und öffentlich zugänglich: <https://kommunale-infrastruktur.ch/327/de/schweizer-beispielsammlung-guter-umgang-mit-regenwasser>

Die Beispielsammlung umfasst projektierte sowie bereits realisierte Beispiele aus dem Liegenschaftsbereich, Strassen und Plätze, sowie Arealüberbauungen und Grossbauten. Zudem werden Werkzeuge aufgezeigt, welche zur Förderung von Schwammstadt-Massnahmen eingesetzt werden können.

2 Ablaufschema Baugesuchsprüfung

Die Planung der Entwässerung des Regenwassers soll so früh wie möglich im Planungsprozess und nicht erst bei der Baugesucheingabe berücksichtigt werden. Dadurch können die vielfältigen Möglichkeiten zur Reduktion des Regenwasserabflusses überhaupt erst ausgeschöpft, innovative integrale Lösungen gefunden und mögliche Interessenkonflikte frühzeitig berücksichtigt werden. Zur Unterstützung der Entwässerungsplanung wurde ein allgemein gültiges Ablaufschema für Bauvorhaben erstellt. Das Ablaufschema befindet sich sowie die Beispielsammlung auf der Webpage des SVKI und ist gratis.

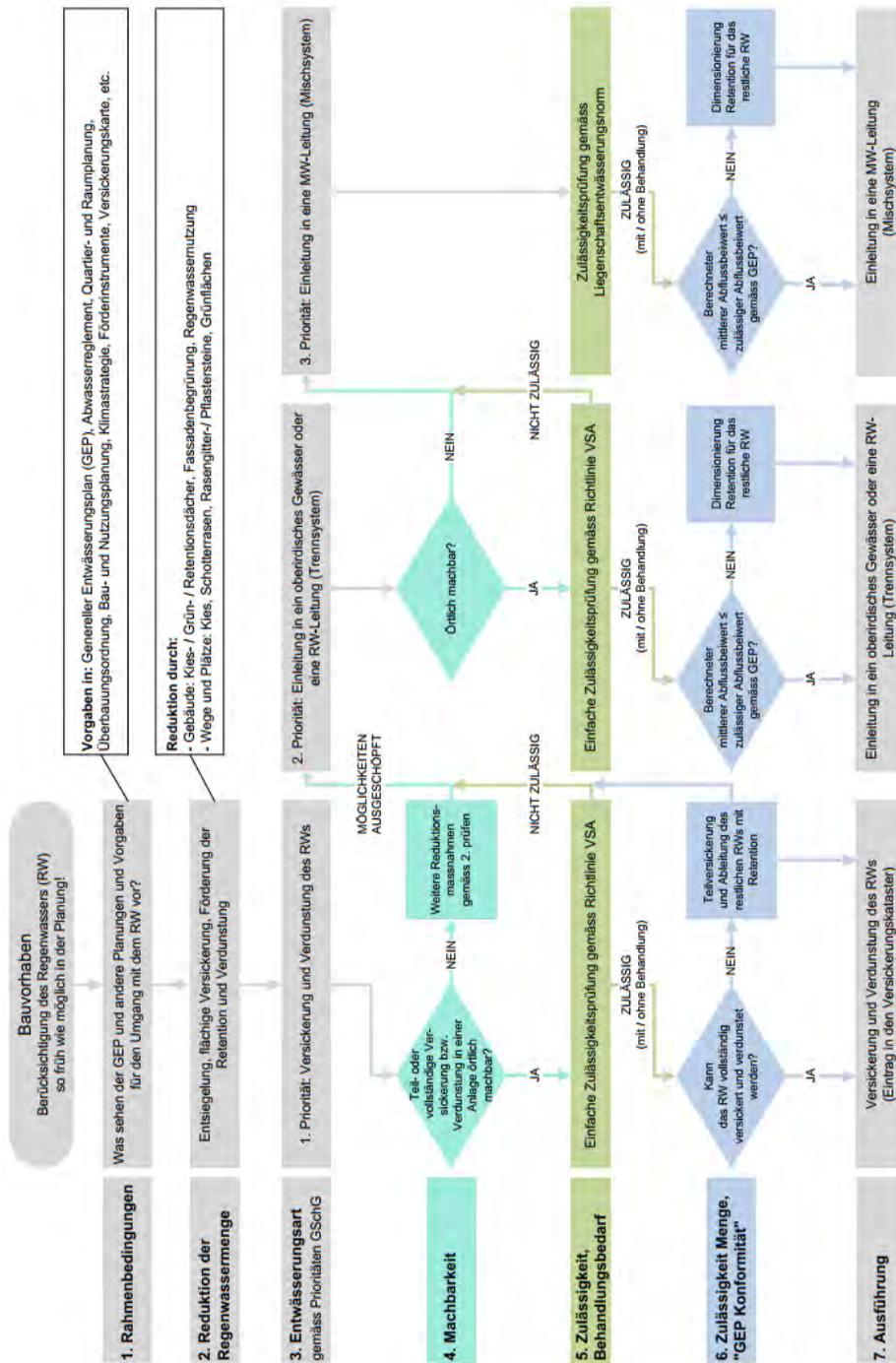


Abbildung 3: Ablaufschema Bauvorhaben: Planung Entwässerung Regenwasser

Korrespondenz:

Holinger AG
 Anton Miescher
 Im Hölderli 26, 8504 Winterthur
 +41 52 267 09 31
 anton.miescher@holinger.com

Mit duktilen Gussrohren und Steinwolle zu einem besseren Stadtklima

Henrike Walther¹ und Markus Quirnbach¹

1 Hochschule Ruhr West, Duisburger Str. 100, 45479 Mülheim a. d. Ruhr, Deutschland

Kurzfassung: Das vom BMBF geförderte Verbundprojekt *Boden-Rohr-System als innovatives Element der klimaangepassten Stadtentwässerung*, kurz BoRSiS, setzt sich im doppelten Sinne mit Anpassungsstrategien an den Klimawandel auseinander. Es bietet einerseits einen Speicherraum für Niederschlagswasser bei (Stark-)Regen, andererseits stellt es das gespeicherte Niederschlagswasser Bäumen zeitverzögert zur Verdunstung zur Verfügung.

Keywords: Schwammstadt, Klimawandel, Siedlungswasserwirtschaft, erweiterter Wurzelgraben, Gussrohre, Rockflow

1 Das Boden-Rohr-System als Anpassung an den Klimawandel

Hitzewellen, extrem lange Trockenzeit, Starkregen und Überschwemmungen – extreme Wetterereignisse als Folge des Klimawandels zeigen europaweit die hohe Vulnerabilität (Verwundbarkeit) der Städte. Das vom BMBF geförderte Verbundprojekt *Boden-Rohr-System als innovatives Element der klimaangepassten Stadtentwässerung*, kurz BoRSiS, setzt sich im doppelten Sinne mit Anpassungsstrategien an den Klimawandel auseinander. Es bietet einerseits einen Speicherraum für Niederschlagswasser bei (Stark-)Regen, andererseits stellt es das gespeicherte Niederschlagswasser Bäumen zeitverzögert zur Verdunstung zur Verfügung. Das Projekt vereint dabei Baum-Rigolen-Systeme mit in jeder Straße existierenden Leitungsgräben und Regenwasser-Speicherelementen. Die Leitungsgräben stellen für den Wasserspeicher und den Wurzelraum der Bäume einen bisher ungenutzten Raum dar, ohne dass ein zusätzlicher Platzbedarf auf der Oberfläche entsteht. So ist es möglich, den Wurzelraum für die Baumstandorte zu vergrößern und den Bäumen die Möglichkeit zu geben, weiter zu wachsen. Durch die verzögerte Wasserabgabe des Wasserspeichers können die Bäume länger bewässert werden. Diese Faktoren sorgen für eine bessere Vitalität und Lebensdauer der Bäume an den Baumstandorten. Die vitalen und großen Bäume haben einen positiven Effekt auf das Stadtklima, indem sie durch die Verdunstung von Wasser und das Spenden von Schatten helfen, urbane Hitzeinseln zu minimieren. Zudem gewinnen die Städte durch die Begrünung an Lebensqualität (Kruse et al. 2020). Des Weiteren können Bäume in Städten als Wind- und Lärmschutz fungieren, sie können durch ihre Filterleistung dazu beitragen, Schadstoffgehalte zu verringern, gleichzeitig sorgen sie mittels Photosynthese für die lebensnotwendige Sauerstoffproduktion und stellen vertikale Flächen für ganze Ökosysteme dar, die zum Erhalt der Artenvielfalt beitragen (Rötzer 26.09.22)

2 Systemaufbau des Boden-Rohr-Systems

Der Wasserspeicher hilft im Fall von Starkregenereignissen, die Kanalisation zu entlasten und beugt Überschwemmungen in Städten vor. Das aufgenommene Wasser kann teilweise versickert werden und wird zur Bewässerung der Bäume in den Baumstandorten verwendet (Rockwool 2021). Um den bisher ungenutzten Leitungsgraben überhaupt als Speicher für Niederschlagswasser und Wurzelraum nutzen zu können, ist eine Abkehr von der bisherigen Praxis erforderlich. Derzeit werden Leitungsgräben hoch verdichtet, um eine stabile Bettung der Rohre zu gewährleisten. Wurzeln sollen, soweit möglich, vom Leitungsgraben ferngehalten werden. Rohre aus duktilem Gusseisen, wie sie von den Mitgliedern des Industriepartners EADIPS®/FGR® e. V. hergestellt werden, können in porenreiche, grobe Schottermaterialien gebettet werden und sind dabei wurzelfest. Baumwurzeln können in den Leitungsgräben dieses Boden-Rohr-Systems einwachsen, ohne das Rohr zu schädigen (EADIPS FGR 2022). Der

Industriepartner Rockflow stellt das Speicherelement für diese Projekt. Das aus Steinwolle entwickelte Material Rockflow, das mit 95 Prozent ein höheres Speichervermögen besitzt als Kieskörper, wird in den Leitungsgräben sowie direkt unterhalb der Baumstandorte verlegt. Das Material wird aktuell zur dezentralen Versickerung verwendet und findet für dieses Projekt eine neue Funktion als Speicherkörper. Wie das Gesamtsystem aussehen soll, kann den Abbildungen 1 und 2 entnommen werden.

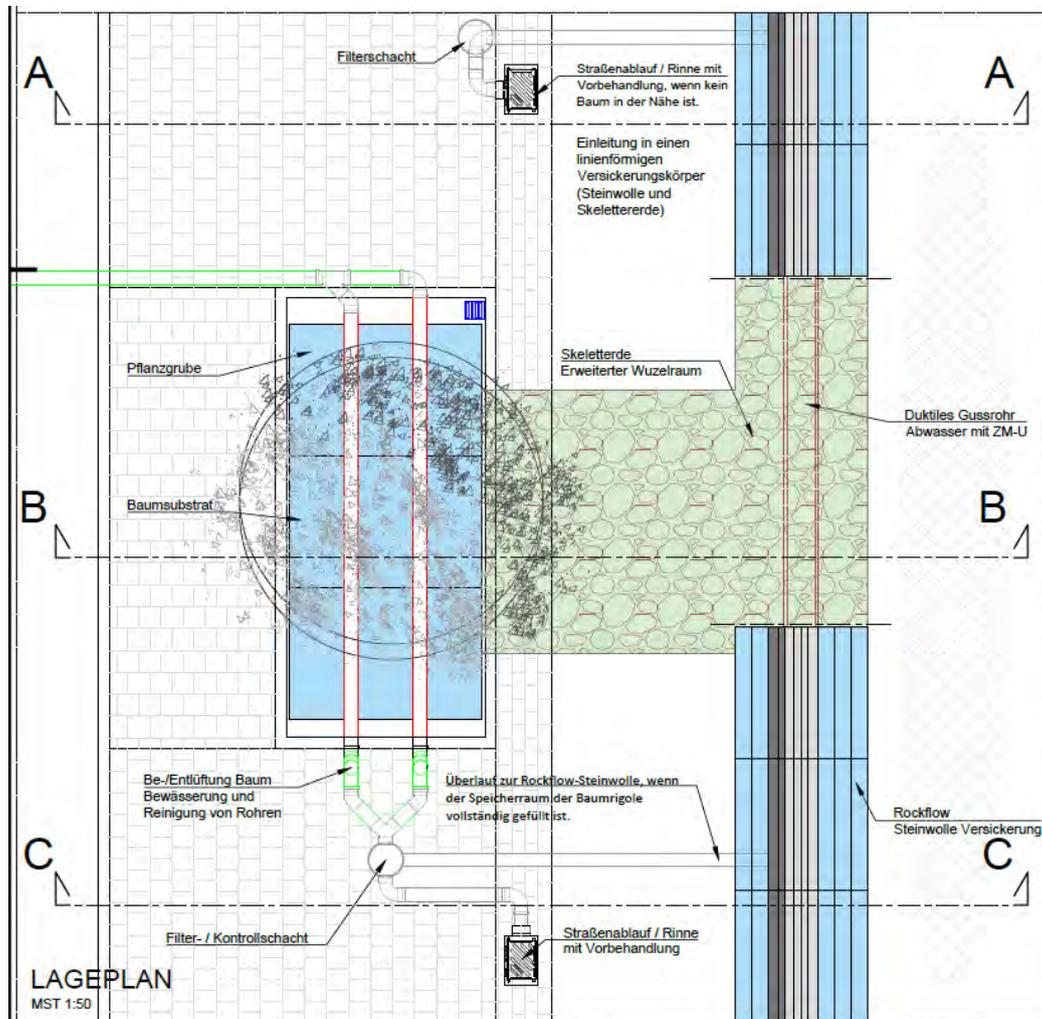


Abbildung 78: Lageplan des Boden-Rohr-Systems

In dem Systemquerschnitt (Abbildung 2) wird deutlich, an welchen Positionen des Systems sowohl das Steinwollelement (Speicher) als auch das Gussrohr verbaut werden. Ein Steinwollelement wird unmittelbar unterhalb der Baumrigole verbaut und ist auf der linken Seite der Abbildung dargestellt. Dieses Steinwollelement wird einen Nutzen für den in der Rigole gepflanzten Jungbaum haben. Da Steinwollelemente normalerweise nicht als Speicherelement konzipiert sind, sondern bei der dezentralen Versickerung eingesetzt werden, wird dieses Element an dieser Position nach unten und zu den Seiten mit einem Geotextil abgedichtet. Das Element fungiert unter der Baumrigole als eine Art Wanne. In diese Wanne wird Regenwasser von Dachflächen eingeleitet und gespeichert. Wenn dies, beispielsweise auf Grund von städtischen Richtlinien, nicht möglich ist, wird vorgereinigtes Regenwasser aus Straßenabflüssen eingeleitet. Das in der Wanne gespeicherte Wasser versorgt den Jungbaum, indem es durch die Kapillarkraft und die Verdunstung aus der Wanne aufsteigt. In Abbildung 2 wird auch deutlich, dass es für den Fall von sehr starkem Regen und der damit korrespondierenden großen Wassermenge einen

Notüberlauf geben wird, damit es nicht zu einem Rückstau kommen kann. Der Notüberlauf leitet das Wasser in den Wurzelgraben.

Wenn der Baum groß genug ist und seine Wurzeln in den Leitungsgraben wachsen können, ist der Hauptnutzen des Wannenelements erfüllt und die Wanne von keiner großen Relevanz mehr. Da alle in der Wanne verbauten Stoffe natürlichen Ursprungs sind, kann diese im Boden verbleiben. Die Wurzeln werden durch das Verbindungsstück zwischen Baum-Rigole und Boden-Rohr-System in den Leitungsgraben wachsen, da sie dem Weg des versickernden Wassers folgen. Dies ist in der Abbildung durch die blau geschlängelten Pfeile dargestellt. Zudem wird im Leitungsgraben grobkörniges Material verwendet, sodass ein großes Porenvolumen besteht. Eine be- und entlüftende Schicht im Leitungsgraben sorgt weiter für ideale Bedingungen für die Wurzeln im Leitungsgraben. Die längerfristige Bewässerung der Wurzeln im Leitungsgraben erfolgt durch das dort platzierte zweite Steinwolleelement. Damit die Steinwolle hier als Speicherelement fungiert, wird unter dem Element eine Schicht mit niedrigem k_f -Wert verbaut. Diese soll für eine langfristige Abgabe des Wassers aus dem Element sorgen. Somit soll die Versorgung des Baumes über einen Zeitraum von bis zu zwei Wochen gewährleistet werden.

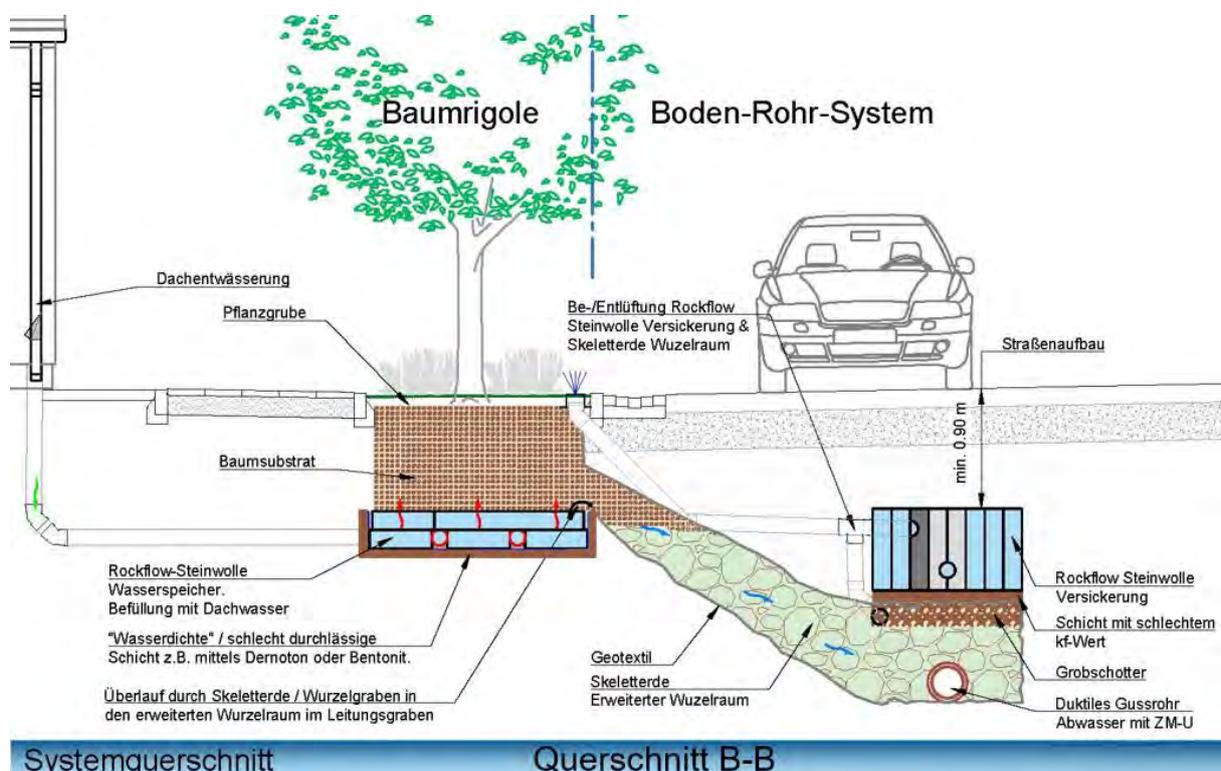


Abbildung 79: Querschnitt durch das Boden-Rohr-System

3 Projektbeteiligte und deren Funktionen

Durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Wasserwirtschaftlern, Geotechnikern, Ökonomen und Ökologen wird ein ganzheitlicher, innovativer Lösungsansatz entwickelt, dessen praxisnahe Umsetzung zur Lösung wichtiger gesellschaftlicher Problemstellungen beiträgt, die als Folge des Klimawandels auftreten.

Wie in Abbildung 3 dargestellt ist, gliedern sich die Arbeiten in fünf Arbeitspakete (AP). Dabei stellt das ganzheitliche Starkregen- und Klimaanpassungskonzept den übergeordneten Rahmen dieses Projektes dar. In den weiteren AP werden fachspezifische, relevante Fragestellungen untersucht und Lösungsansätze erarbeitet, die wiederum in das Gesamtkonzept einfließen. Über die komplette Projektlaufzeit

hinweg werden die Arbeiten in den einzelnen AP durch die Unternehmenspartner fachlich begleitet. Die AP 1 und 2 werden dabei vom Fachbereich Siedlungswasserwirtschaft der Institut Bauingenieurwesen an der Hochschule Ruhr West abgedeckt. In den Arbeitspaketen werden ein ganzheitliches Starkregen- und Klimaanpassungskonzept, sowie eine Wasserbilanzierung erstellt. Die im AP 3 verorteten wasserbaulichen Untersuchungen werden in einem Versuchsstand durch die Fachhochschule Bochum abgedeckt. Im AP 4 werden geotechnische Untersuchungen durch das Institut Bauingenieurwesen der Hochschule Ruhr West im Fachbereich Geotechnik abgedeckt. Das wirtschaftswissenschaftliche Institut der Hochschule Ruhr West beschäftigt sich mit den ökonomischen Fragestellungen des Projekts im AP 5. Das Sachverständigenbüro für urbane Vegetation begleitet alle AP eng in der Konzeptionierung, der Versuchsdurchführung, der Ausarbeitung von Handlungsempfehlungen sowie in der Vorplanung des Pilotprojekts. So wird zu allen Phasen des Projekts sichergestellt, dass keine baumökologischen Fehlplanungen untersucht und umgesetzt werden. Die Stadt Detmold ist der Praxispartner des Projekts und wird das System in einem Neubaugebiet umsetzen. Durch die Stadt Detmold als Anwender werden die konkreten Rahmenbedingungen für eine spätere reale Umsetzung in einem Pilotprojekt vorgegeben sowie entsprechendes Datenmaterial zur Verfügung gestellt. Zudem gibt es bereits Interessensbekundungen (Lols) aus den Städten Köln, Bochum, Leichlingen und Solingen.



Abbildung 80: Organigramm des BoRSiS Projekts

4 Zwischenstand und Ausblick im Forschungsprojekt

Aktuell läuft im AP 1 eine Bewertung verschiedener Anpassungsmaßnahmen von Städten an den Klimawandel durch eine neu erstellte Bewertungsmatrix. Diese soll mögliche Synergien mit anderen Maßnahmen aufzeigen und helfen, das Boden-Rohr-System in den Gesamtkontext der Schwammstadt einzuordnen. Im AP 2 wurde mit der Analyse von Klimaänderungssignalen begonnen. Diese Informationen sind für die Entwicklung eines ganzheitlichen Starkregen- und Klimaanpassungskonzepts unerlässlich. Für die Sicherstellung der Funktion des Projekts werden im AP 3 erste Verdunstungsversuche mit

der Steinwolle durchgeführt und ein Versuchsstand aufgebaut, der den Wurzelgraben abbildet. Hier werden die hydraulischen Eigenschaften verschiedener Bodenmaterialien und deren Interaktionen untersucht. Für selbige Materialien finden im Geotechnischen Labor (AP 4) Sieblinienversuche und Auflastversuche statt. Im AP 5 wird aktuell eine Kosten- und eine Mehrkosten-Analyse für alle angedachte Produkte durchgeführt, sodass ein Kostenüberblick entstehen kann.

Das Projekt ist bis September 2024 geplant. Innerhalb des Projektzeitrahmens sollen alle elementaren Versuche durchgeführt und das Projekt in mehreren Städten umgesetzt werden. In den Städten kann das Projekt in Neubaugebieten, wie bisher abgebildet, verbaut werden. Es ist jedoch auch möglich, Teile des Projekts im Bestand umzusetzen.

5 Besonderer Dank

Ein besonderer Dank gilt den Fördermittelgebern. Finanziert wird das Projekt neben Eigenanteilen der Industriepartner durch eine Förderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Förderprogramm „Forschung an Fachhochschulen“ unter dem Förderkennzeichen 13FH002KA0.

6 Literaturverzeichnis

EADIPS FGR (2022): Rohre, Formstücke & Armaturen aus duktilem Gusseisen. Online verfügbar unter <https://eadips.org/>, zuletzt aktualisiert am 26.01.2022, zuletzt geprüft am 22.04.2022.

Kruse, Elke; Biber, Carmen; Dickhaut, Wolfgang (2020): Straßenbäume als Komponente der Überflutungs- und Hitzevorsorge in Städten. In: *KA Korrespondenz Wasserwirtschaft* (1), S. 38–47.

Rockwool (2021): So funktioniert Rockflow. In: *ROCKWOOL*, 24.06.2021. Online verfügbar unter <https://www.rockwool.com/de/produkte/rockflow/so-funktioniert-rockflow/>, zuletzt geprüft am 22.04.2022.

Rötzer, Thomas (26.09.22): Leistungen von Stadtbäumen im Klimawandel. Zukunft der Stadtbäume im Klimawandel. Hamburg, 26.09.22.

Korrespondenz:

Henrike Walther
 Duisburger Str. 100, 45479 Mülheim a. d. Ruhr
 Tel: +49 [0]208/88254383
 E-Mail: henrike.walther@hs-ruhrwest.de

Verminderung des Mischwasserüberlaufs durch Blau-Grüne Infrastruktur: Szenarien in einem zukünftigen Klima

Giovan Battista Cavadini^{1,2}, Lauren Cook¹

¹Eawag, Ueberlandstrasse 133, 8600 Dübendorf, Schweiz

²Institut für Umweltingenieurwissenschaften, ETH Zürich, Schweiz

Kurzfassung: Blau-Grüne Infrastruktur-Szenarien wurden für das Einzugsgebiet von Fehraltorf (CH) simuliert, um Mischwasserüberläufen (MÜ) zu quantifizieren. Zwei verschiedene Niederschlagszeitreihen wurden verwendet, nämlich ein beobachteter (1990-2019) und ein synthetisch erzeugter Niederschlag, die ein mögliches zukünftiges Niederschlagsmuster (2070-2099) darstellen. Die Resultate zeigen, dass BGI das MÜ-Volumen unter den derzeitigen Bedingungen erheblich reduzieren können. Die Zunahme extremer Ereignisse wird das MÜ-Volumen potenziell verdoppeln, jedoch kann eine umfassende Umsetzung von Biorückhaltebecken den vorhergesagten Anstieg begrenzen.

Key-Words: Städtische Entwässerung, Mischwasserüberlauf, Blau-Grüne Infrastruktur, Klimawandel, SWMM

1 Einleitung

Als Folge der erwarteten Zunahme extremer Regenfälle aufgrund des Klimawandels, suchen Städte nach Lösungen, um die Widerstandsfähigkeit der Entwässerungsinfrastruktur zu verbessern (Farrelly and Brown 2011). Eine solche Lösung sind blau-grüne Infrastrukturen (BGI) (Ghofrani, Sposito, and Faggian 2017), die Flächen wie Gründächer, Biorückhaltebecken, versickerungsfähige Verkehrsflächen und urbane Teiche umfassen. Aufgrund ihrer Fähigkeit, Regenwasser zurückzuhalten und zu versickern, können BGI das Risiko von Überschwemmungen und Mischwasserüberläufen (MÜ) verringern (Fischbach et al. 2017), eine der Hauptursachen für die Verschmutzung urbaner Oberflächengewässer (Copetti et al. 2018).

In der Literatur ist das Potenzial von MÜ-Vermindern nur durch einzelne Arten von BGI quantifiziert worden (e.g., Joshi et al. 2021; Luan et al. 2019; Randall et al. 2019). Zudem werden Kombinationen verschiedener BGI-Typen nur selten bewertet, was zu Ergebnissen führt, die der Komplexität urbaner Systeme nicht berücksichtigt ist. Schließlich ist erwartet, dass der Klimawandel zu extremeren Niederschlägen führen wird (Cook, Anderson, and Samaras 2017), doch ist die Fähigkeit von BGI, MÜ in einem zukünftigen Klima zu reduzieren, nur selten untersucht (z.B. Roseboro et al. 2021) worden.

Ziel dieser Studie ist, verschiedene Konfigurationen von BGI zur Reduzierung von MÜ in einem zukünftigen Klima in der Stadt Fehraltorf (15 km östlich von Zürich, Schweiz) zu simulieren. Zu diesem Zweck wird ein Set von BGI-Szenarien als Input für das hydrologische Modell PCSWMM (CHI 2022) verwendet. Die Empfindlichkeit der MÜ-Vermindern gegenüber der Umsetzungsrate der BGI wird ebenfalls getestet, ebenso wie mehrere Szenarien für das zukünftige Klima, die aus regionalen Klimamodellen (EURO-CORDEX WCRP 2021) generiert werden.

2 Methoden

Das Einzugsgebiet von Fehraltorf (15 km von Zürich entfernt, Schweiz) wird als Fallstudie verwendet. Fehraltorf ist ein gut untersuchtes Einzugsgebiet (siehe Initiative "Urban Water Observatory" (EAWAG 2022)) mit einem detaillierten SWMM Entwässerungsmodell und einem umfassenden Sensornetzwerk im Kanalnetz. Das Einzugsgebiet ist ca. 95 Hektar groß, hat eine Mischwasserkanalisation und ist re-

präsentativ für Schweizer Klein- und Mittelstädte. Wenn das gemischte Regenwasser und die häuslichen Abwasser die maximale Kapazität der Kläranlage überschreiten, wird der MÜ direkt in Bäche geleitet, die durch das gesamte Einzugsgebiet fließen (Joshi et al. 2021), was zu relevanten Problemen mit der Wasserqualität führt.

In dieser Studie werden vier verschiedene Einzugsgebietszenarien betrachtet, die drei BGI-Typen umfassen, nämlich Biorückhaltebecken, versickerungsfähige Verkehrsflächen und Gründächer. Diese drei BGI-Typen stellen ein breites Spektrum an Umsetzungsmöglichkeiten dar, da sie auf unterschiedlichen Bodenbedeckungen umgesetzt werden können, wodurch die potenzielle BGI-Flächenumsetzung maximiert wird. Zunächst wurde die potenzielle Flächenverfügbarkeit für jeden BGI-Typ quantifiziert, dies mithilfe von GIS-Daten der aktuellen Bodenbedeckung in Fehraltorf (QGIS 3.16 Hannover (QGIS 2022)). In dieser Analyse werden nur die Untereinzugsgebiete berücksichtigt, die an die Mischwasserkanalisation angeschlossen sind, d.h. insgesamt 246 Untereinzugsgebiete (Gesamtfläche von 95,1 Hektar). Es wird davon ausgegangen, dass Biorückhaltebecken auf durchlässigen Flächen (z.B. Gärten, Verkehrsinseln, Hausumschwung), versickerungsfähige Verkehrsflächen auf undurchlässigen Flächen (z.B. Geh- und Radwege, landwirtschaftliche Wege) und Gründächer auf Flachdachgebäuden eingesetzt werden können. Um die Flächenverfügbarkeit von Gründächern realistisch zu modellieren, wurden die bestehenden Flachdächer in Fehraltorf mit LiDAR-Daten von SwissTopo identifiziert (SwissTopo 2022), dies mit einer ähnlichen Vorgehensweise wie Gergelova et al. (2020). Die räumliche Analyse führte zur Identifizierung der potenziellen BGI-Implementierungsflächen (siehe Tabelle 1). Die Gesamtimplementierungsfläche ist 68,3 Hektaren gross und entspricht 71,8 % des Einzugsgebiets. Die Szenarien, die in dieser Studie verwendet sind, gehen von einer 100-prozentigen Abdeckung des einzelnen BGI-Typs auf der verfügbaren Fläche aus. Obwohl diese Annahme kaum realistisch ist, stellt sie das maximale Potenzial des BGI-Szenarios dar (bester Fall).

Tabelle 22: Potenzielle BGI-Fläche im Fehraltorf Einzugsgebiet.

	Biorückhaltebecken	Versickerungsfähige Verkehrsflächen	Gründächer
Abdeckung [m ²]	350'034	229'845	103'082
Prozentsatz des Einzugsgebiets [%]	36.8	24.2	10.8

Das von Rodriguez et al. (in prep) entwickelte SWMM-Modell wird zur Modellierung der Leistungsfähigkeit des Kanalisationssystems für die verschiedenen Szenarien verwendet. Dieses Modell hat die Eigenschaft, den Grundwasserspiegel zu berücksichtigen, der ein wichtiger Faktor für die Quantifizierung der Leistung der BGI ist (Kim et al. 2019). Ziel der hydrologischen Simulation ist es, die Mischwasserüberläufe (MÜ) zu simulieren, da sie ein relevantes Umweltproblem in Mischwassersystemen darstellen (Copetti et al. 2018). Darüber hinaus können MÜ als Maß für die Robustheit des Abwassersystems betrachtet werden, um den Beitrag von BGI zur Reduzierung der Regenwassermengen zu quantifizieren. Zur Durchführung der BGI-Szenarien wird die gewünschte Fläche jedem BGI-Typ zugewiesen, während die aktuelle Bodenbedeckung als Basisszenario verwendet wird.

Es werden zwei verschiedene Niederschlagszeitreihen verwendet, nämlich eine beobachtete und eine synthetisch erzeugte Niederschlagszeitreihe. Der beobachtete Niederschlag wurde zwischen 1990 und

2019 an der MeteoSchweiz-Wetterstation in Kloten gemessen. Für die synthetisch erzeugten Niederschlagszeitreihen wird das regionale Klimamodell des Rossby-Zentrums verwendet (RCM) (RCA4, Samuelsson et al. 2011). Das ausgewählte allgemeine Zirkulationsmodell (General Circulation Model, GMC) ist ICHEC-EC-EARTH, mit dem repräsentativen Konzentrationspfad (RCP) von 8.5, der das schlimmste Szenario der Treibhausgasemissionen angibt (Business-as-usual-Szenario). Der für die Simulation betrachtete Zeitrahmen liegt zwischen 2070 und 2099 und stellt einen Zeitrahmen dar, in dem die Auswirkungen des Klimawandels als erheblich angesehen werden (Tollefson 2020).

Zur Charakterisierung von MÜ-Ereignissen werden drei verschiedene Indikatoren verwendet, nämlich Volumen, Dauer und Häufigkeit (definiert als Anzahl der Ereignisse). Die Indikatoren werden auf Systemebene berechnet; das Volumen wird durch Summierung des Volumens aller MÜ-Ereignisse berechnet. Bei der Berechnung der Dauer und der Anzahl der Ereignisse wurde davon ausgegangen, dass ein MÜ-Ereignis größer als 1 L/h ist und dass der Abstand zwischen den Ereignissen größer als 4 Stunden ist. Die Indikatoren sind jährlich aggregiert und in Boxplots dargestellt, um die Spannweite und den Median der 30-jährigen Simulationen zu zeigen.

Zunächst werden die BGI-Szenarien mit beobachteten Niederschlagszeitreihen simuliert und dann mit dem Basisszenario (keine BGI) verglichen, um ihre Auswirkungen unter den derzeitigen klimatischen Bedingungen zu quantifizieren. Zweitens wird die synthetische Niederschlagszeitreihe verwendet, um die Auswirkungen eines anderen Niederschlagsmusters auf die MÜ -Indikatoren zu bewerten. Schließlich werden die BGI-Szenarien mit den synthetischen Niederschlagszeitreihen simuliert, um das Potenzial der BGI bei der Vermeidung eines Anstiegs von MÜ in der Zukunft zu quantifizieren.

3 Resultate

Das erste Ergebnis ist ein Vergleich der verschiedenen BGI-Szenarien zwischen 1990 und 2019. Abbildung 1 zeigt die prozentuale Veränderung der BGI-Szenarien gegenüber der aktuellen Situation (ohne BGI) für die drei Indikatoren: jährliches Volumen, Dauer und Anzahl der Ereignisse. Die rot gestrichelte Linie ist der Medianwert der aktuellen Situation.

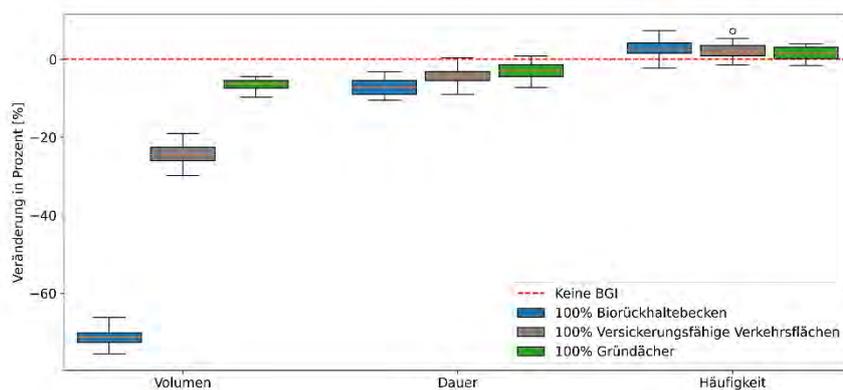


Abbildung 81: Volumen, Dauer und Häufigkeit von MÜ-Ereignissen für die Jahre 1990-2019, für verschiedene BGI-Szenarien.

Die erste Beobachtung ist, dass alle BGI-Szenarien die MÜ-Volumen potenziell reduzieren können. Die wirksamsten BGI sind Biorückhaltebecken, die das Volumen um bis zu 70 % reduzieren können, gefolgt von versickerungsfähigen Verkehrsflächen (25 %) und Gründächern (10 %). Interessanterweise verringern BGI die Dauer und die Anzahl der Ereignisse nicht in relevantem Maße. Dies lässt sich dadurch erklären, dass BGI vor allem den Spitzenwert des Regenwassers reduzieren und verzögern, wobei es

jedoch weiterhin zu MÜ-Ereignissen kommen wird. Die höhere Anzahl von Ereignissen mit Biorückhaltebecken lässt sich dadurch erklären, dass aufgrund der Verringerung des Volumens von MÜ, ein großes Ereignis als zwei oder mehr Ereignisse betrachtet werden könnte, was auf die Definition von "Ereignis" zurückzuführen ist (Volumen grösser als 1 L/h und zumindest vier Stunden zwischen zwei verschiedene Ereignisse). Es ist auch wichtig zu berücksichtigen, dass die verfügbare Fläche je nach BGI-Typ unterschiedlich ist (Tabelle 1). Wenn man die Ergebnisse auf die verfügbare Fläche umrechnet, ergibt sich, dass 1 Hektar Biorückhaltebecken das Abwasserüberlauf um 2 %, versickerungsfähige Verkehrsflächen um 1 % und Gründächer um 0,5 % reduzieren können. Daher sind Biorückhaltebecken, auch unter Berücksichtigung der verfügbaren Fläche, am effektivsten bei der Reduzierung des MÜ-Volumens.

Die Verwendung von synthetisch erzeugten Niederschlagszeitreihen im SWMM-Modell ermöglicht es zu untersuchen, wie sich der Klimawandel auf die MÜ-Indikatoren auswirken kann. Abbildung 2 zeigt einen Vergleich zwischen den simulierten MÜ mit beobachteten Niederschlägen und den zukünftigen MÜ, die mit synthetischen Niederschlagszeitreihen simuliert wurden, für die verschiedenen Indikatoren. Die Simulationen zeigen, dass das Volumen der MÜ in Zukunft voraussichtlich stark ansteigen wird. Das Volumen der MÜ könnte sich zwischen 2070 und 2100 verdoppeln, was auf die Zunahme extremer Niederschläge zurückzuführen ist. Auf der anderen Seite wird erwartet, dass die Dauer der MÜ-Ereignissen abnimmt. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass starke Niederschläge in kürzeren Zeiträumen auftreten werden. Es ist wichtig zu bedenken, dass der synthetische Niederschlag von einem RCP 8.5 ausgeht, d.h. dem "Worst-Case"-Treibhausgasemissionsszenario. Daher können die Ergebnisse von Abbildung 2 als Worst-Case-Szenario und als Obergrenze für das Volumen der MÜ gemäß den aktuellen Emissionspfaden betrachtet werden.

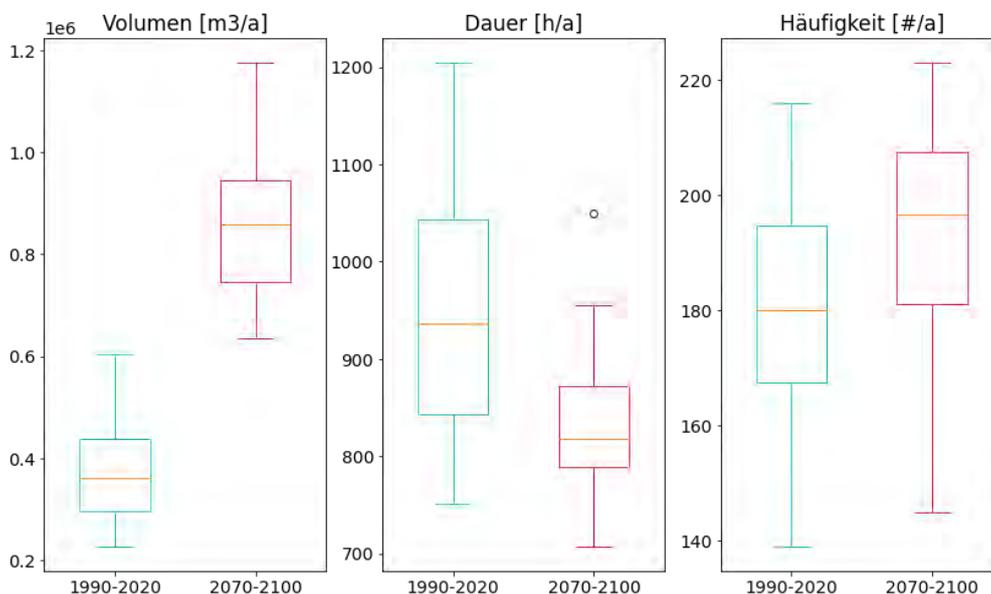


Abbildung 2: Vergleich zwischen den MÜ-Indikatoren, simuliert mit beobachteten Niederschlagszeitreihen (in blau) und synthetischen Niederschlägen (in rot, Darstellung von zukünftigem Klima). Beide Szenarien berücksichtigen die derzeitige Bodenbedeckung von Fehraltorf.

Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse der MÜ-Indikatoren für die drei BGI-Szenarien unter Verwendung der synthetisch erzeugten Niederschläge für das zukünftige Klima. Das einzige Szenario, das einen Anstieg des MÜ-Volumens vermeiden kann, ist eine umfangreiche Implementierung von Biorückhaltebecken,

die das MÜ-Volumen ähnlich wie die gegenwärtigen Werte halten könnte. Andererseits zeigen versickerungsfähige Verkehrsflächen und Gründächer eine geringere Leistung im Vergleich zum gegenwärtigen Klima. Die geringere Leistung von durchlässigen Belägen und Gründächern lässt sich durch das Niederschlagsmuster des zukünftigen Klimas erklären, bei dem sich die Anzahl der extremen Niederschläge verzehnfachen dürfte. Tatsächlich sind versickerungsfähige Verkehrsflächen und insbesondere Gründächer bei Extremereignissen weniger leistungsfähig, da sie im Vergleich zu Biorückhaltebecken nur begrenzt Wassermengen zurückhalten können. Die Dauer und die Anzahl der Ereignisse werden in Zukunft nicht stark beeinflusst, was bedeutet, dass der Schwerpunkt auf der Verringerung des Volumens der MÜ liegen sollte.

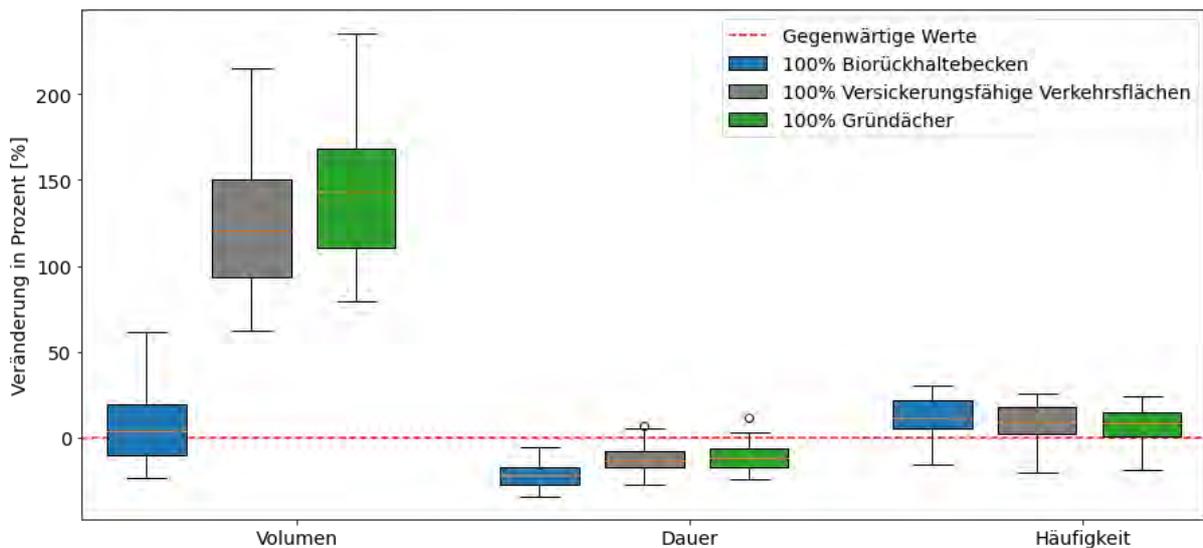


Abbildung 3: Volumen, Dauer und Häufigkeit von MÜ-Ereignissen für den Zeitraum 2070-2099, für verschiedene BGI-Szenarien. Die rot gestrichelte Linie stellt die gegenwärtigen Werte des Szenarios mit keiner BGI dar.

Die vorläufigen Ergebnisse dieser Studie zeigen den potenziellen Nutzen der Implementierung von BGI zur Verringerung von MÜ. Unter den derzeitigen klimatischen Bedingungen trägt jeder BGI-Typ zur Verringerung des Volumens von MÜ bei. Allerdings wird die Dauer und die Anzahl der Ereignisse nicht stark durch BGI beeinflusst. Die Verwendung synthetisch erzeugter Niederschlagszeitreihen, die ein Worst-Case-Szenario für künftige Niederschlagsmuster darstellen, hat gezeigt, dass MÜ in Zukunft aufgrund der höheren Häufigkeit von Extremereignissen voraussichtlich erheblich zunehmen werden. Daher müssen Stadtplaner Strategien entwickeln, um einen solchen Anstieg zu vermeiden. Die Simulation zeigt, dass eine großflächige Umsetzung von Biorückhaltebecken (36,8 Hektar) einen Anstieg des MÜ-Volumens in der Zukunft verhindern könnte. Obwohl eine solche Umsetzung für die Fallstudie nicht realistisch ist, geben diese Werte eine Vorstellung von der erforderlichen Fläche und den Ressourcen, die zur Verminderung der Auswirkungen des Klimawandels erforderlich wären. Diese Studie wird mit weiteren BGI-Szenarien und synthetisch generierten Niederschlagszeitreihen erweitert, um eine detailliertere Analyse des potenziellen Anstiegs der Mischwasserüberlauf in der Zukunft zu quantifizieren und das Potenzial der BGI zur Vermeidung dieses Anstiegs darzulegen.

4 Literatur

CHI. 2022. "SWMM5 Modeling with PCSWMM." Retrieved January 31, 2022 (<https://www.pcswmm.com/>).

- Cook, Lauren M., Christopher J. Anderson, and Constantine Samaras. 2017. "Framework for Incorporating Downscaled Climate Output into Existing Engineering Methods: Application to Precipitation Frequency Curves." *Journal of Infrastructure Systems* 23(4):04017027. doi: 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000382.
- Copetti, D., L. Marziali, G. Viviano, L. Valsecchi, L. Guzzella, A. G. Capodaglio, G. Tartari, S. Polesello, S. Valsecchi, V. Mezzanotte, and F. Salerno. 2018. "Intensive Monitoring of Conventional and Surrogate Quality Parameters in a Highly Urbanized River Affected by Multiple Combined Sewer Overflows." *Water Supply* 19(3):953–66. doi: 10.2166/ws.2018.146.
- EAWAG. 2022. "UWO Open Data." Retrieved August 24, 2022 (<https://uwo-opendata.eawag.ch/>).
- Farrelly, M., and R. Brown. 2011. "Rethinking Urban Water Management: Experimentation as a Way Forward?" *Global Environmental Change* 21(2):721–32. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2011.01.007.
- Fischbach, Jordan, Kyle Siler-Evans, Devin Tierney, Michael Wilson, Lauren Cook, and Linnea May. 2017. *Robust Stormwater Management in the Pittsburgh Region: A Pilot Study*. RAND Corporation.
- Gergelova, Marcela Bindzarova, Slavomir Labant, Stefan Kuzevic, Zofia Kuzevicova, and Henrieta Pavolova. 2020. "Identification of Roof Surfaces from LiDAR Cloud Points by GIS Tools: A Case Study of Lučenec, Slovakia." *Sustainability* 12(17):6847. doi: 10.3390/su12176847.
- Ghofrani, Zahra, Victor Sposito, and Robert Faggian. 2017. "A Comprehensive Review of Blue-Green Infrastructure Concepts." *International Journal of Environment and Sustainability* 6:15–36. doi: 10.24102/ijes.v6i1.728.
- Joshi, Prabhat, Joao Paulo Leitão, Max Maurer, and Peter Marcus Bach. 2021. "Not All SuDS Are Created Equal: Impact of Different Approaches on Combined Sewer Overflows." *Water Research* 191:116780. doi: 10.1016/j.watres.2020.116780.
- Kim, Hwansuk, Kristine Joy B. Mallari, Jongrak Baek, Gijung Pak, Hyun Il Choi, and Jaeyoung Yoon. 2019. "Considering the Effect of Groundwater on Bioretention Using the Storm Water Management Model." *Journal of Environmental Management* 231:1270–76. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.03.032.
- Luan, Bo, Ruixue Yin, Peng Xu, Xin Wang, Xiaomin Yang, Lan Zhang, and Xiaoyan Tang. 2019. "Evaluating Green Stormwater Infrastructure Strategies Efficiencies in a Rapidly Urbanizing Catchment Using SWMM-Based TOPSIS." *Journal of Cleaner Production* 223:680–91. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.03.028.
- QGIS. 2022. "Welcome to the QGIS Project!" Retrieved July 1, 2022 (<https://www.qgis.org/en/site/>).
- Randall, Mark, Fubao Sun, Yongyong Zhang, and Marina Bergen Jensen. 2019. "Evaluating Sponge City Volume Capture Ratio at the Catchment Scale Using SWMM." *Journal of Environmental Management* 246:745–57. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.05.134.
- Roseboro, Andrew, Maria Nariné Torres, Zhenduo Zhu, and Alan J. Rabideau. 2021. "The Impacts of Climate Change and Porous Pavements on Combined Sewer Overflows: A Case Study of the City of Buffalo, New York, USA." *Frontiers in Water* 3:110. doi: 10.3389/frwa.2021.725174.
- Samuelsson, Patrick, Colin G. Jones, Ulrika Will'En, Anders Ullerstig, Stefan Gollvik, Ulf Hansson, Erik Jansson, Christer Kjellström, Grigory Nikulin, and Klaus Wyser. 2011. "The Rossby Centre Regional Climate Model RCA3: Model Description and Performance." *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography* 63(1):4–23. doi: 10.1111/j.1600-0870.2010.00478.x.
- SwissTopo. 2022. "swissSURFACE3D." *Bundesamt für Landestopografie swisstopo*. Retrieved May 5, 2022 (<https://www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/height/surface3d.html>).
- Tollefson, Jeff. 2020. "How Hot Will Earth Get by 2100?" *Nature* 580(7804):443–45. doi: 10.1038/d41586-020-01125-x.

WCRP. 2021. "Cordex – Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment." *Cordex*. Retrieved January 27, 2022 (<https://cordex.org/>).

Korrespondenz:

Giovan Battista Cavadini
EAWAG
Ueberlandstrasse 133, 8600 Dübendorf
+41 58 765 5443
giovanbattista.cavadini@eawag.ch

Multifunktionale Versickerungsmulden im Siedlungsraum – Optimierung der bewachsenen Bodenzone

P. Stinshoff¹, B. Helmreich¹

1 Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft, Technische Universität München,
Am Coulombwall 3, 85748 Garching, Deutschland

Kurzfassung:

Versickerungsmulden mit optimierter bewachsener Bodenzone und einer biodiversen Bepflanzung können zur multifunktionalen Blau-Grünen Infrastruktur im Siedlungsraum beitragen. Aus wasserwirtschaftlicher Sicht sind Mulden in erster Linie zur Entwässerung und zum Schadstoffrückhalt zu bemessen. Das erweiterte Nutzungsspektrum erforderte zunächst, die bewachsene Bodenzone durch Substratbeimengung zu optimieren. Im Hinblick auf den Rückhalt von gelösten Schwermetallen und Biozide wie Terbutryn und Diuron aus Niederschlagsabflüssen konnten gute Ergebnisse erreicht werden.

Key-Words: Versickerungsmulden, Schadstoffrückhalt, Multifunktionalität, Schwermetalle, Biozide

1 Einleitung

Neben der Veränderung des lokalen Wasserhaushalts führt die zunehmende Versiegelung von Flächen durch die rasant fortschreitende Urbanisierung zur stofflichen Belastung von Niederschlagswasser mit einer Reihe von Schadstoffen in umweltrelevanten Konzentrationen. Hierbei sind besonders Schwermetalle von Verkehrsflächen und Metalldächern sowie Biozide aus Baumaterialien zu nennen (GALSTER & HELMREICH, 2022; HUBER et al., 2016; WICKE et al., 2022). Biozide stammen in erster Linie aus Fassadenflächen sowie bituminösen Dachabdichtungsbahnen von z.B. Gründächern. Im direkten Abfluss von neuen Fassadenflächen lassen sich Biozid-Konzentrationen von mehreren Milligramm pro Liter feststellen. Neueste Studien legen nahe, dass klassische Versickerungsmulden aber keine verlässliche Senke für Biozide aus Niederschlagswasser darstellen (BORK et al., 2021).

Bisher lag der Nutzungsschwerpunkt von Versickerungsmulden auf der sicheren Entwässerung von Niederschlagswasser und dem Schadstoffrückhalt. Oftmals werden diese daher mit Rasensaat begrünt, um u.a. den Pflegeaufwand gering zu halten. Damit einhergehend waren ästhetische und ökologische Gestaltungsmöglichkeiten eingeschränkt. Der Bedarf nach Multifunktionalität – d.h. Entwässerungssicherheit, optimierter Schadstoffrückhalt sowie verbesserte ökologische Vielfalt durch an das Klima angepasste heimische Pflanzen – hat zugenommen. In Verbindung mit dem Entwurf zur Aktualisierung des Regelwerks DWA-A 138-1 ist zu klären, in welchem Umfang diese Vorgaben für eine vielfältige Bepflanzung geöffnet werden können (DWA, 2020).

Eine Möglichkeit, partikuläre und auch gelöste Schwermetalle aus Niederschlagsabflüssen zurückzuhalten, dabei aber die Blau-Grüne Infrastruktur im Siedlungsraum gleichermaßen zu unterstützen, ist der Einsatz der bewachsenen Bodenzone von Versickerungsmulden (FARDEL et al., 2019; KLUGE et al., 2018). Voraussetzung hierfür sind vor allem eine gute Planung und regelmäßige Pflege.

In einem Forschungsvorhaben wird in Zusammenarbeit mit der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (HSWT) und dem Bodeninstitut Prügl an der Entwicklung und Evaluierung von multifunktionalen Versickerungsmulden mit bewachsener Bodenzone für den Siedlungsraum gearbeitet (vgl. Abbildung 82). An der TU München wird an der Entwicklung einer geeigneten und optimierten bewachsenen Boden-

zone geforscht. Die Optimierungen zielen auf Verbesserung der Pflanzenversorgung sowie einem besseren Schadstoffrückhalt. Die Untersuchungen zu einer angepassten und geeigneten Bepflanzung wird vom Partner HSWT übernommen und ist nicht Bestandteil dieses Beitrags.

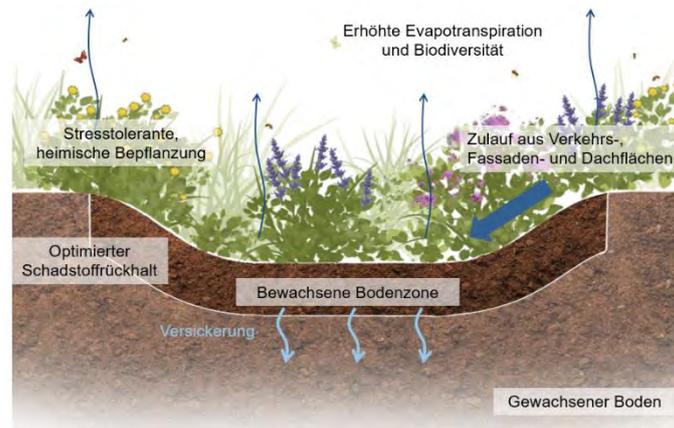


Abbildung 82: Schematische Darstellung der Effekte einer multifunktionalen Versickerungsmulde

2 Methoden

Die Entwicklung eines geeigneten Substrats wurde innerhalb eines 3-stufigen Prozesses von Laborversuchen über den halbtechnischen bis hin zum technischen Maßstab durchgeführt. Im ersten Schritt wurden Laborversuche zum Rückhalt der Schwermetalle Zink und Kupfer und den drei Bioziden Terbutryn, Diuron und Mecoprop auf Basis verschiedener Substrate durchgeführt. Aufbauend auf den Ergebnissen wurden Mitte 2021 bepflanzte, halb-technische Versuche angelegt, die weiterhin in Betrieb sind. Dabei liegt der Fokus auf drei unterschiedlichen Anwendungskomplexen mit spezifisch zusammengesetzten Niederschlagsabflüssen:

- Verkehrsflächenabfluss: realer Verkehrsflächenabfluss, (24.000 Kfz/d)
- Kupferdachabfluss: Ablauf eines realen Kupferdaches (Reinheitsgrad min. 99,9 % Cu nach DIN EN 1172), Erbaut 2009
- Fassaden-/Gründachabfluss: Synthetisch hergestelltes Niederschlagswasser versetzt mit Terbutryn, Diuron, Mecoprop (je 10 µg/L)

Für jeden Anwendungskomplex wurde je eine potentiell geeignete Substratmischung auf Grundlage von natürlichem Oberboden (Oberbodenmischung) sowie auf Grundlage von Quarzsand (Unterbodenmischung) entwickelt. Alle Substratmischungen verfügen über eine gleiche Beimengung von Ziegelsand zur Erhöhung der Wasserspeicherkapazität. Weitere Beimengungen ergaben sich vor dem Hintergrund der spezifischen Schadstoffspektren der o.g. Anwendungskomplexe. Die Bodensubstrate entsprechen den Kriterien des DWA-A 138-1 (2020) d. h. sie sind eingestellt auf einen Humusgehalt von 2–3 %, eine Wasserdurchlässigkeit von $\sim 5 \cdot 10^{-5}$ m/s und einen Schlammkornanteil von max. 15 %.

Mögliche negative Auswirkungen wie Auslaugung von Schadstoffen (z.B. Vanadium aus Ziegelsand) oder Nährstoffen (z.B. DOC aus Kompost) aus den Beimengungen wurden untersucht.

3 Vorläufige Ergebnisse

Die ersten Ergebnisse aus den Laborversuchen zeigten für gelöste Schwermetallen einen sehr guten Rückhalt durch natürlichen Oberboden und andere getestete Substrate. Auch in den halbtechnischen

Versuchen zeichnet sich nach den ersten 11 von mindestens 20 Versuchen mit realem Kupferdachabfluss ein guter Rückhalt von Kupfer in den Versuchssickermulden ab (vgl. Abbildung 83). Im Mittel wurde ein Rückhalt von > 99 % erreicht und alle Ablaufkonzentrationen waren unterhalb des Prüfwerts für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV (idF. v. 1999)).

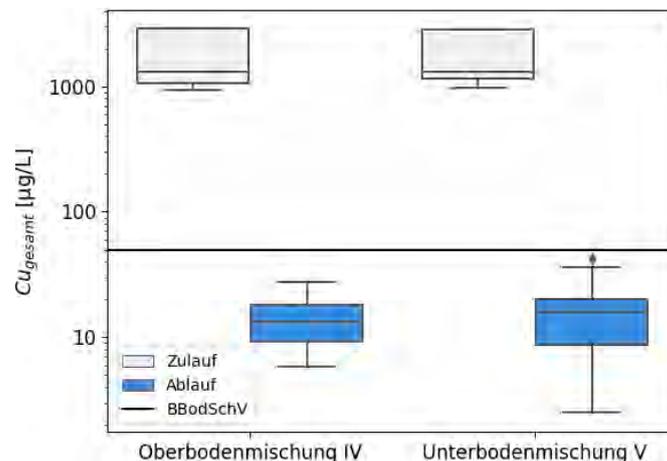


Abbildung 83: Rückhalt von Kupfer (gesamt) in den halbtechnischen Versuchen mit der Oberboden- und Unterbodenmischung (je Doppelbestimmung) mit realem Kupferdachabfluss (ausgewertete Versuche = 11); log y-Achse

Die Laborversuche ergaben eine insgesamt niedrige und differenzierte Biozidretention in folgender Reihenfolge: Terbutryn > Diuron >> Mecoprop. Aus diesem Grund wurden für die halbtechnischen Versuche in die Ober- und Unterbodenmischung Aktivkohle (10 Vol.%) beigemischt, um neben dem zu erwartenden biologischen Abbau in den längeren Freilandversuchen auch die Adsorption von Bioziden im Substrat zu verbessern.

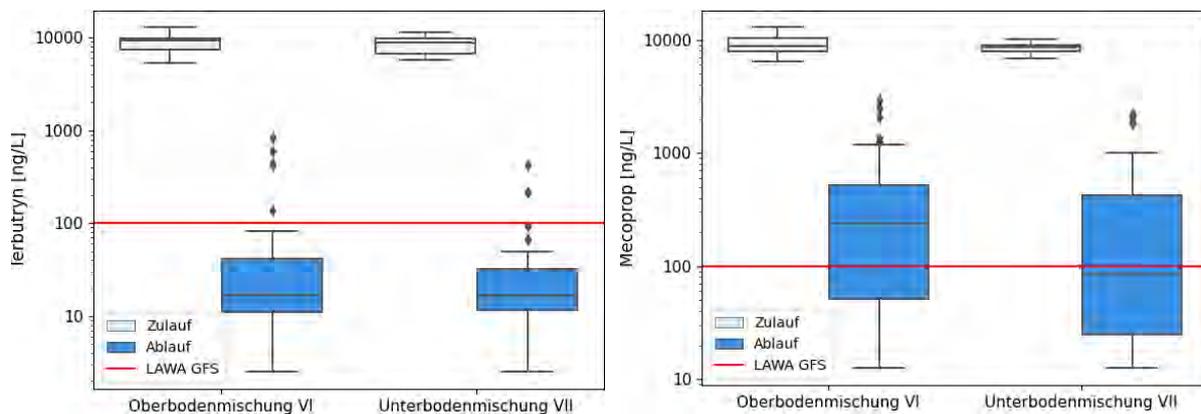


Abbildung 84: Rückhalt von Terbutryn (links) und Mecoprop (rechts) in den halbtechnischen Versuchen mit der Oberboden- und Unterbodenmischung (je Dreifachbestimmung) mit synthetischen Fassaden-/Gründachabfluss (ausgewertete Versuche = 11); log y-Achse

Für die ersten fünf Beschickungsversuche konnte ein deutlicher Effekt der Aktivkohle-Beimischung festgestellt werden. Nach nun bisher 11 ausgewerteten Versuchen liegt die Minderung der Zulaufkonzentrationen im Mittel um 2 bis 3 10er Potenzen. Trotzdem lagen die Ablaufkonzentrationen in den halbtechnischen Versuchen für Terbutryn und Mecoprop schon über dem LAWA Geringfügigkeitschwellenwert (2017) (vgl. Abbildung 84). Besonders für Mecoprop ließ sich hauptsächlich ein Zusammenhang zur Beschickungsrate darstellen (vgl. Abbildung 85), was sich gut mit Ergebnissen anderer

Studien deckt. Hohe Mecoprop Ablaufkonzentrationen wurden in Freilandversuchen des Umweltbundesamts etwa nur bei Starkregen beobachtet (UBA, 2016). Die schlechte Sorption von Mecoprop, welches hauptsächlich an organischer Substanz adsorbiert, kann durch seine Polarität und negative Ladung erklärt werden (BURKHARDT et al., 2009). Der Rückhalt von Diuron ist - bis auf einzelne Ausreißer - während der hohen Beschickungsrate, ähnlich zu Terbutryn, in beiden Substratmischungen immer noch sehr hoch.

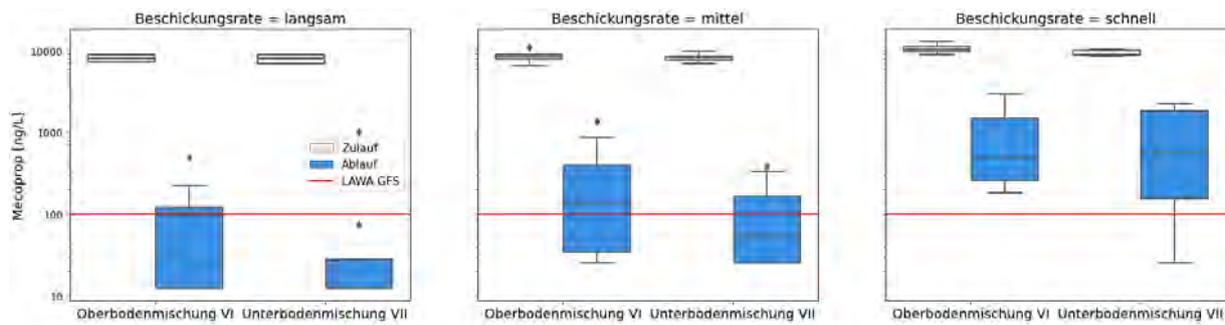


Abbildung 85: Rückhalt von Mecoprop in Abhängigkeit von der Beschickungsrate in den halbtechnischen Versuchen mit der Oberboden- und Unterbodenmischung (je Dreifachbestimmung) mit synthetischen Fassaden-/Gründachabfluss (ausgewertete Versuche = 11); log y-Achse

In den halb-technischen Versuchen wird bei den Untersuchungen zum Biozidrückhalt ein besonderes Augenmerk auf die Metaboliten gesetzt; Es werden jeweils drei Transformationsprodukte von Terbutryn und Diuron mitanalysiert. In Verbindung mit der längeren Versuchszeit von mindestens 1,5 Jahren hofft man so, deren erwarteten höheren mikrobiellen Abbau zu belegen. Bisher konnten diese Transformationsprodukte nur vereinzelt nachgewiesen werden, wodurch eine Verfrachtung der Biozide oder entsprechender Metabolite zum Grundwasser quantitativ eingegrenzt werden kann.

Für die halbtechnischen Versuche mit Verkehrsflächenabfluss sind bisher keine ausreichende Anzahl an Beprobungen für eine wissenschaftlich fundierte Auswertung vorhanden.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die vorläufigen Ergebnisse der Laborversuche und halbtechnischen Versuche zeigen für die optimierten Substratmischungen gute Rückhalteleistungen für Kupfer von Metalldächern und anderen Schwermetalle. Beim Rückhalt von Bioziden aus Fassaden- oder Gründachabflüssen ist ein ausreichender Rückhalt von Diuron und Terbutryn zu beobachten, welcher jedoch abhängig von der Beschickungsrate ist. Besonders bei Mecoprop wurde ein schlechter Biozidrückhalt bei höheren Beschickungsraten detektiert. Basierend auf den bisherigen Ergebnissen wurden mittlerweile zusätzliche Versickerungsmulden im Maßstab 1:1 gebaut und werden beprobt.

Dieses Forschungsprojekt bildet die Grundlage für einen zukünftigen Leitfaden mit Handlungsempfehlungen für Betreiber und Planer von Versickerungsmulden zur Verbesserung der Blau-Grünen Infrastruktur im Siedlungsraum. Neben geeigneten Substraten für die bewachsene Bodenzone und Staudenbepflanzung, sollen dort auch die ökologischen und ökonomischen Vorteile, sowie der Aufwand für die Pflege dargelegt werden.

5 Danksagung

Die AutorInnen bedanken sich bei dem Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) und dem Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) für die Finanzierung des Projektes (Az.: 67-0270-97540/2020).

6 Literatur

BBODSCHV: Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554), die zuletzt durch Artikel 126 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist, 1999
 BORK, MARCUS ; LANGE, JENS ; GRAF-ROSENFELLNER, MARKUS ; HENSEN, BIRTE ; OLSSON, OLIVER ; HARTUNG, THOMAS ; FERNÁNDEZ-PASCUAL, ELENA ; LANG, FRIEDERIKE: Urban storm water infiltration systems are not reliable sinks for biocides: evidence from column experiments. In: *Scientific Reports* Bd. 11 (2021), Nr. 1, S. 7242

BURKHARDT, MICHAEL ; JUNGHANS, MARION ; ZULEEG, STEFFEN ; SCHOKNECHT, UTE ; LAMANI, XOLELWA ; BESTER, KAI ; VONBANK, ROGER ; SIMMLER, HANS ; ET AL.: Biozide in Gebäudefassaden – ökotoxikologische Effekte, Auswaschung und Belastungsabschätzung für Gewässer. In: *Umweltwiss Schadst Forsch* (2009), S. 12

DWA: *DWA-A 138-1: Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser – Teil 1: Planung, Bau, Betrieb - Gelbdruck, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.*. November 2020. Hennef, 2020 — ISBN 978-3-96862-018-3

FARDEL, ALEXANDRE ; PEYNEAU, PIERRE-EMMANUEL ; BÉCHET, BÉATRICE ; LAKEL, ABDELKADER ; RODRIGUEZ, FABRICE: Analysis of swale factors implicated in pollutant removal efficiency using a swale database. In: *Environmental Science and Pollution Research* Bd. 26 (2019), Nr. 2, S. 1287–1302

GALSTER, SUSANNE ; HELMREICH, BRIGITTE: Copper and Zinc as Roofing Materials—A Review on the Occurrence and Mitigation Measures of Runoff Pollution. In: *Water* Bd. 14 (2022), Nr. 3, S. 291

HUBER, MAXIMILIAN ; WELKER, ANTJE ; HELMREICH, BRIGITTE: Critical review of heavy metal pollution of traffic area runoff. In: *The Science of the total environment* Bd. 541 (2016), S. 895–919

KLUGE, BJÖRN ; MARKERT, ARVID ; FACKLAM, MICHAEL ; SOMMER, HARALD ; KAISER, MATHIAS ; PALLASCH, MATTHIAS ; WESSOLEK, GERD: Metal accumulation and hydraulic performance of bioretention systems after long-term operation. In: *Journal of Soils and Sediments* Bd. 18 (2018), Nr. 2, S. 431–441

LAWA: *Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser, Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser*. Stuttgart : Kulturbuch-Verlag, 2017

UBA: *Schlussbericht des Forschungsvorhabens KURAS - Konzepte für urbane Regenwasserbewirtschaftung und Abwassersysteme – KURAS -Teilprojekt 11 Umweltbundesamt (UBA), Förderkennzeichen: 033W013L* (BMBF-Forschungsvorhaben). Berlin : Umweltbundesamt, 2016

WICKE, DANIEL ; TATIS-MUVDI, ROBERTO ; ROUAULT, PASCALE ; ZERBALL-VAN BAAR, PATRICIA ; DÜNNBIER, UWE ; ROHR, MIRKO ; BURKHARDT, MICHAEL: Emissions from Building Materials—A Threat to the Environment? In: *Water* Bd. 14 (2022), Nr. 3, S. 303

Korrespondenz:

Philipp Stinshoff
 Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft
 Technische Universität München
 Am Coulombwall 3
 85748 Garching
 +49 89 289 13717
philipp.stinshoff@tum.de

MUFUWU – MULTiFunktionaler Wurzelraum Realisierung der Schwammstadt für Stadtbäume mit wissenschaftlicher Begleitung im Leonhardgürtel in Graz

Anna Zeiser^{1, 2}, Thomas Weninger¹, Erwin Murer², Marek Lecko³, Daniel Zimmermann³, Sebastian Rath², Stefan Schmidt⁴, Peter Strauss¹

1 Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, Bundesamt für Wasserwirtschaft,
 Pollnbergstraße 1, 3252 Petzenkirchen

2 Verein Land schafft Wasser, Pollnbergstraße 1, 3252 Petzenkirchen

3 3:0 Landschaftsarchitektur Gachowetz-Luger-Zimmermann OG, Nestroyplatz 1/1, 1020 Wien

4 Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Gartenbau Schönbrunn, Grünbergstraße 24,
 1130 Wien

Das Projekt wurde von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft FFG im Rahmen des
 Programms „Stadt der Zukunft“ finanziell gefördert.

Kurzfassung: Im Zuge des Projekts MUFUWU Stadtbaum in Graz wurde das Schwammstadtprinzip für Stadtbäume in einer öffentlichen Bestandsstraße erfolgreich geplant und umgesetzt. Herausforderungen lagen hierbei beispielsweise in der Bestandsbaumsanierung oder der Einleitung von Oberflächenwasser unterschiedlicher Herkunft. In den ersten Standjahren wird das System mittels einer Vielzahl eingebauter Sensoren untersucht und beobachtet, wobei der Fokus auf der Funktionsweise des Substrats, dem Bodenwasserhaushalt und den Wasserflüssen liegt.

Key-Words: Schwammstadt, Stadtbaum, Bestandsstadt, Monitoring

1 Herausforderungen bei der Umsetzung der Schwammstadt für Bäume in einer öffentlichen Bestandsstraße

In den letzten Jahren wurden im deutschsprachigen Raum vermehrt Projekte mit der Schwammstadt für Stadtbäume geplant und umgesetzt (Grimm et al., 2021). Dieses System bietet die Möglichkeit der langfristigen und vitalen Entwicklung von Bäumen im verbauten Raum gekoppelt mit einer dezentralen Versickerung, Zwischenspeicherung und Transpiration von anfallendem Oberflächenwasser an Ort und Stelle (Biber, 2017; Zimmermann, 2022). Erreicht wird dies durch das Einbringen des Schwammstadtsubstrats als überbaubare Unterbaukonstruktion beispielsweise unter Nebenverkehrsflächen oder überbauten Flächen (Embrén et al., 2009).

Im Zuge der bisherigen Projektumsetzungen traten auf Grund der Neuartigkeit der Bauweise und dazu fehlender Normen laufend Wissenslücken, mögliche Fehlerquellen und Optimierungspotenzial zu Tage, die es bei zukünftigen Projekten zu überdenken und bearbeiten gilt. Hierzu zählen Fragen zur Dimensionierung und Gestaltung des Schwammstadtsubstrats, zur Vorreinigung, Einleitung und Verteilung des Oberflächenwassers, zur Ausführung und Bepflanzung der Baumscheiben, zur notwendigen Absicherung des Systems bei Überlastung, aber auch die Problematik der Diskrepanz zwischen Planung und Ausführung, sowie die Komplexität und Neuartigkeit des Systems als Hemmschuh in der baulichen Umsetzung sind laufend Thema. Des Weiteren sind von Seiten verschiedener Stakeholder auch Unsicherheiten bezüglich der Gefährdung des Straßenunterbaus und der anschließenden Wartung, Erhaltung und Funktionstüchtigkeit des Systems wahrnehmbar.

Die Implementierung der Schwammstadt für Stadtbäume im Straßensetting in der Bestandsstadt birgt im Vergleich zu Stadterweiterungsprojekten auf städtischem Neuland oder teilweise auch im Vergleich zu großen und offenen Plätzen zusätzliche Herausforderungen. Einbauten, wie Telekommunikationsleitungen, Kanal, Wasserversorgung, Gasleitungen und Fernwärme sind von vorneherein, soweit bekannt, in der Planung zu berücksichtigen. Gefällesituationen, vorhandene Fließpfade und Wasserwege, sowie rechtliche Rahmenbedingungen – auch Oberflächenwasser betreffend – beeinflussen ebenfalls in großem Maße die Möglichkeiten und planerischen Umsetzungen. Weiters sind gegebenenfalls Bestandsbäume vorhanden, für die zwischen einer Sanierung und Integrierung ins Konzept oder einer Neupflanzung unterschieden werden muss, wobei erstere Variante grundsätzlich vorzuziehen ist.

2 Wissenschaftlicher Rahmen

Das Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt betreibt seit einigen Jahren gemeinsam mit dem Verein Land schafft Wasser und der HBLFA Schönbrunn verschiedene Projekte mit dem Ziel der Untersuchung der Substrateigenschaften solcher Schwammstadtsubstrate für Stadtbäume. Eine Lysimeteranlage in Wien, gekoppelt mit Substratuntersuchungen im Labormaßstab bildet den Kern der Forschungsaktivitäten (Zeiser et al., 2021). Die wissenschaftliche Begleitung mittels Monitoring von umgesetzten Projekten im Realmaßstab des Straßenraumes sollen damit verknüpft Erkenntnisse liefern.

3 Das angewandte Planungs-, Forschungs- und Entwicklungsprojekt MUFUWU

Das gegenständliche Projekt ist im Leonhardgürtel in Graz situiert und wurde im November 2021 baulich fertiggestellt. Beauftragt durch die Stadt Graz, Abteilung Grünraum und Gewässer und finanziell gefördert durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG im Rahmen des Programms „Stadt der Zukunft“ wurde in dieser Straße über einen Abschnitt von ca. 60 m beidseitig Schwammstadtsubstrat für Stadtbäume mit vielfältigen Elementen geplant und umgesetzt (Ostseite – Bestandsbaumreihe, Westseite – Neupflanzungen). Die Funktionalität des Systems wird vor allem in den ersten Jahren wissenschaftlich beobachtet und die Entwicklung der Bäume begleitet.

Das Projektkonsortium bestehend aus 3:0 Landschaftsarchitektur und dem Verein Land schafft Wasser mit Unterstützung des Bundesamts für Wasserwirtschaft und der HBLFA Schönbrunn war unter Absprache mit dem Auftraggeber für die gestalterische und ausführungstechnische Planung, aber auch die Begleitung der Baumaßnahmen und die Planung und Installation der wissenschaftlichen Monitoringeinrichtungen zuständig. Mit der dabei geschaffenen Anlage und messtechnischen Infrastruktur wurde ein Grundstein für weitere Forschungsprojekte und Untersuchungen gelegt.

Das Projekt MUFUWU Stadtbaum soll gekoppelt mit den Erfahrungen auf Mikro- (Labor) und Meso-Skala (Lysimeter) Erkenntnisse zu einigen angeführten Wissenslücken und Fragestellungen liefern und gleichzeitig beispielhaft zeigen, wie Schwammstadt für Stadtbäume in der Bestandsstadt geplant und umgesetzt werden kann.

Zu den Schwerpunkten im Rahmen dieses Projektes zählen der Umgang mit verschiedenen belasteten Oberflächenwässern hinsichtlich Vorreinigung und Einleitung in die Schwammstadt (skizzierte Möglichkeiten in Abbildung 2 und 3), die Entwicklung regionaler Substrate auf Einschlamm- und Vormischungsbasis, der Versuch der Wurzelfreilegung und Sanierung von Bestandsbäumen, das Finden von Lösungen für auftretende Herausforderungen im Bestandsstraßensetting, die engmaschige Begleitung der Bauphase und die sensorische Begleitung und Untersuchung der wasserwirtschaftlichen und baumphysiologischen Entwicklungen.



Abbildung 86: Bilder vom Projektstandort während der Bauphase (links: Grobschlag als tragfähige Unterbaukonstruktion für Neupflanzungen auf der Westseite; rechts: mit Druckluftlanze freigelegte Wurzeln eines Bestandsbaumes auf der Ostseite) (eigene Aufnahmen)

Im Laufe der Umsetzungsphase wurde deutlich, wie essentiell angesichts des Mangels an Erfahrung bei den ausführenden Firmen und Stakeholdern und angesichts der fehlenden Normen und Richtlinien in der derzeitigen Phase der Systemetablierung eine enge Begleitung der baulichen Umsetzung für die Funktionalität des Systems ist. Mittel- und langfristig sollen Leitfäden, Regelwerke und an die örtlichen Gegebenheiten anzupassende Standardbauweisen die korrekte Planung und Umsetzung erleichtern. Hierfür braucht man wiederum Daten, Erfahrungen und Systemkenntnisse – was die Relevanz eines solchen Projektes im Realmaßstab unterstreicht (Paton et al., 2021).

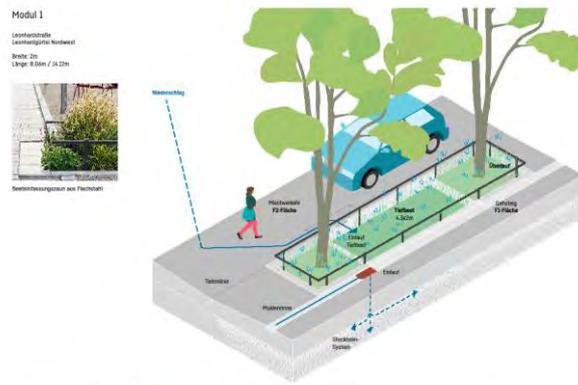


Abbildung 87: Modul 1 – Einleitung von Oberflächenwässer in den Schwammstadtkörper (F1 Wässer direkt, F3 Wässer über das bepflanzte Tiefbett mit Filterkörper nach ÖWAV-Regelblatt 45)

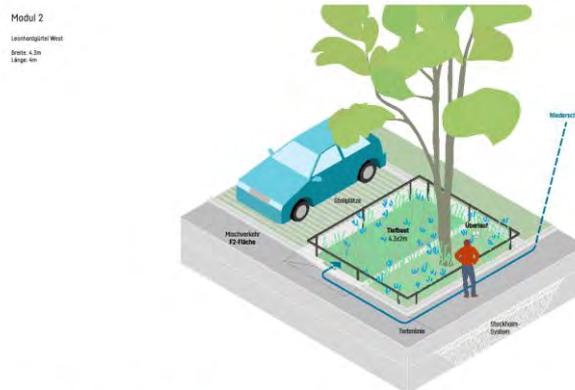


Abbildung 3: Modul 2 - Einleitung von Oberflächenwässer in den Schwammstadtkörper (F3 Wasser über den Einlauf mit Ein-Auslaufbox und das bepflanzte Tiefbeet)

4 Messtechnik und untersuchte Systemkomponenten

Während der Bauphase installierte Sensoren zur Erfassung des Bodenwasserhaushaltes (volumetrischer Wassergehalt und Matrixpotenzial) an verschiedenen Positionen im Substrataufbau gewähren einen Einblick in die Verteilung des eingeleiteten Oberflächenwassers, des Bodenwasserspeichers und des pflanzlichen Entzugs. Besonderes Augenmerk liegt bei diesen Untersuchungen auf einem abgeschlossenen Teilbereich des umgesetzten Straßenabschnitts mit dem Ziel der wasserwirtschaftlichen Bilanzierung.

Mit Hilfe von Messensorik, die die Wasserzuläufe ins System erfasst, Niederschlagsdaten, Saftstromsensoren, Instrumenten zur Beobachtung des Ausflusses aus dem System, und gezielten temporären Flutungsversuchen sollen belastbare Daten produziert werden. Dies schafft eine Grundlage für weitergehende hydrologische Modellierungen. Die Verdunstungsleistung der gepflanzten und sanierten Bäume, die Vitalität und der Zuwachs der Bäume, sowie die Qualität des Bodenwassers im Substrataufbau sind weitere Aspekte, die im Zuge des F&E-Projektes behandelt werden.

5 Erste Ergebnisse aus den Messungen vor Ort

Derzeit liegen Erfahrungen aus der Planungs- und Umsetzungsphase, sowie Ergebnisse aus zugehörigen Laborversuchen und erste Daten zu den Auswirkungen der diesjährigen Niederschlagsereignisse auf das untersuchte System am Leonhardgürtel vor. Niederschlagswasser gelangt auf mehrere Wege in den Untersuchungsabschnitt: über ein Zuleitungsrohr, über ein bepflanztes Tiefbeet bzw. als Überlauf direkt in die Schwammstadt und durch Versickerung durch Baumsubstrat oder Parkplatzflächen. Die eingebauten Sensoren im Schwammstadtsubstrat zur Untersuchung des Bodenwasserhaushalts zeigen unterschiedliche Reaktionen auf Niederschlagsereignisse hinsichtlich Verzögerungszeit zum Niederschlag, Intensität und Verlauf der Durchfeuchtung, je nachdem über welchen Eintrittspfad sie mit Wasser bespeist werden.

Im Baumsubstrat rund um die Wurzelballen der Neupflanzungen wurde in der heurigen Vegetationsperiode bereits starker Wasserentzug bis in Tiefen von 80 cm aufgezeichnet. Die Sensoren im darunterliegenden Schwammstadtbereich rund um diese Neupflanzungen deuten noch keine Wasserentnahmen oder Durchwurzelung an. Die Bestandsbäume hingegen scheinen das vorgemischte Schwammstadtsubstrat, das zur Bestandsbaumsanierung und Wurzelraumerweiterung diente, hingegen zumindest teilweise durchwurzelt zu haben.

6 Literatur

Biber, C. (2017). Advanced Urban Trees - How trees can be part of the solution. An advanced system of urban tree pits to be included in decentralized stormwater management. Hafencity Universität Hamburg.

Embrén, B., Alvim, B.-M., Stal, Ö., & Orvesten, A. (2009). Planting Beds in the City of Stockholm - A handbook. <https://www.sanu.ch/uploads/kursDoc/StockholmSystem-HandBook.pdf>.

Grimm, K., Murer, E. & Schmidt, S. (2021). Das Schwammstadtprinzip für Stadtbäume in Österreich – Genese, Stand der Dinge, ausgewählte Beispiele, Herausforderungen. Aqua Urbanica 2021, Innsbruck.

Paton, E., Kluge, B. & Nehls, T. (2021): Projektbericht – Ein Reallabor für die wassersensible Stadtentwicklung. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung. 65 (3), 126-131. https://www.oekohydro.tu-berlin.de/fileadmin/fg324/Documents/HyWa_Heft_3__2021_Projektbericht.pdf.

Zeiser, A., Weninger, T., Murer, E., Schmidt, S., Weisgram, R. & Strauss, P. (2021). Die Schwammstadt als Substrat für Stadtbäume. 75. ALVA-Tagung, LFZ Franzisco Josephineum, Wieselburg. Tagungsbericht 2021, 60-62.

Zimmermann, D. (2022). Die Schwammstadt für Bäume - ein Beitrag zu mehr Gerechtigkeit im Untergrund. ProBaum 01/2022, 2-10.

Korrespondenz:

Anna Zeiser
Pollnbergstraße 1, 3252 Petzenkirchen, Österreich
+43 7416 52 108 0
Anna.Zeiser@baw.at

Betriebsstörungen bei Anlagen der Siedlungsentwässerung und deren Einfluss auf urbane Überflutungen

F. Funke^{1*}, S. Reinstaller², & M. Kleidorfer¹

1 Universität Innsbruck, Arbeitsbereich Umwelttechnik, Technikerstr. 13, 6020 Innsbruck, AT

2 Technische Universität Graz, Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau, Stremayrgasse 10/I, 8010 Graz, AT

Kurzfassung: Mit einem gekoppelten 1D/2D Überflutungsmodell werden Betriebsstörungen in Anlagen der Siedlungswasserwirtschaft und deren Einfluss auf urbane Überflutungen untersucht. Dabei werden insgesamt 12 Szenarien mit Bemessungsregen unterschiedlicher Jährlichkeit beurteilt. Die Ergebnisse zeigen das Betriebsstörungen in zentralen Infrastrukturen einen deutlichen Einfluss auf Überflutungsflächen haben können, wohingegen fehlerhafte dezentrale Anlagen keinen sichtbaren Einfluss aufweisen. Zwei Referenzszenarien zeigen die überproportionale Bedeutung der Niederschlagscharakteristik in Bezug auf urbane Überflutungen.

Key-Words: 1D/2D Modellierung, urbane Überflutungen, Betriebsstörungen, Anlagen der Siedlungswasserwirtschaft, Starkregen,

1 Hintergrund

Anlagen der Siedlungsentwässerung sind einer Reihe von externen Einflussfaktoren ausgesetzt, die sich negativ auf deren Leistungsfähigkeit auswirken können und das Risiko von urbanen Überflutungen erhöhen. Dazu gehören sich ändernde Niederschlagscharakteristika in Folge des Klimawandels (Hosseinzadehtalaei et al., 2020), eine Zunahme der angeschlossenen versiegelten Fläche durch die fortschreitende Urbanisierung (Tscheikner-Gratl et al., 2019) aber auch eine Reihe von technischen Fehlern und Betriebsstörungen in zentralen und dezentralen Infrastrukturen (Mugume et al., 2015). Mit einem zunehmenden Anteil von dezentralen Anlagen der Siedlungsentwässerung und Unklarheiten bezüglich der Zuständigkeit und deren Wartung und Pflege, sowie einer fortschreitenden Alterung der oftmals zu selten inspizierten und gewarteten zentralen Systeme (Lashford et al., 2019), kann von einer Zunahme technischer Fehler und Betriebsstörungen ausgegangen werden. Ausgehend von dieser Problemstellung wurden mithilfe eines gekoppelten 1D/2D Überflutungsmodell Fehler und Betriebsstörungen in zentralen und dezentralen Anlagen der Siedlungsentwässerung einer kleinen Gemeinde in Österreich untersucht. Dabei werden die Störfallszenarien mit Niederschlagsereignissen unterschiedlicher Jährlichkeit gerechnet und mit zwei Referenzszenarien verglichen.

2 Methodik

2.1 Untersuchungsgebiet

Die Fallstudie dieser Untersuchung ist die Gemeinde Feldbach (13.000 Einwohner) in Österreich, welche einen kleinen Stadtkern im Norden und daran angrenzende städtische Randgebiete im Süden aufweist (vgl. Abb. 1). Das untersuchte Gebiet ist 1,3 km² groß und wird im Norden vom Fluss Raab begrenzt. Bei der Überflutungsmodellierung sind im Untersuchungsgebiet folgende Prozesse besonders relevant: i) Hangwasser aus im Süden angrenzende Hanglagen, die intensiv landwirtschaftlich genutzt werden, ii) zwei kleine Fließgewässer (Aderbach, Oedter Bach), die im Stadtgebiet über die Regenwasserkanalisation in die Raab abgeleitet werden und iii) Rückstau in das Kanalnetz bei einem Flusshochwasser der Raab. Im Untersuchungsgebiet befinden sich mit 6 Gründächern, etwa 3.000 m² teilversie-

gelten Oberflächen, einem Retentionsbecken und 6 Retentionsschächten vergleichsweise wenige dezentrale Anlagen der Regenwasserbewirtschaftung. Der Großteil des Gebiets wird über eine Kombination von Regen- und Mischwasserkanälen bewirtschaftet, die in die drei Fließgewässer einleiten.

2.2 Modellansatz

Das gekoppelte 1D/2D urbane Überflutungsmodell wurde mit der Software PCSWMM2D erstellt und ermöglicht, Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten in den Überflutungsflächen nachzubilden (Abdelrahman et al., 2018). Das Modell bildet dabei die hydraulischen und hydrologischen Prozesse auf drei Ebenen ab: i) das hydrologische Modell, welches aus dem Niederschlag die Abflussganglinie als Eingangsgröße für die hydraulischen 1D und 2D Modelle berechnet und dabei den Low Impact Development (LID)-Ansatz von SWMM 5.1 verwendet, ii) das hydraulische 2D Modell welches die Fließprozesse an der Oberfläche abbildet und das iii) hydraulische 1D Modell, welches den Abfluss im Kanalsystem simuliert. Das Modell, Überflutungsflächen und Fließgeschwindigkeiten wurden anhand eines Starkregenereignisses im Sommer 2021 validiert, für das Informationen zu Wasserständen, Fotos und Videos zur Verfügung standen.

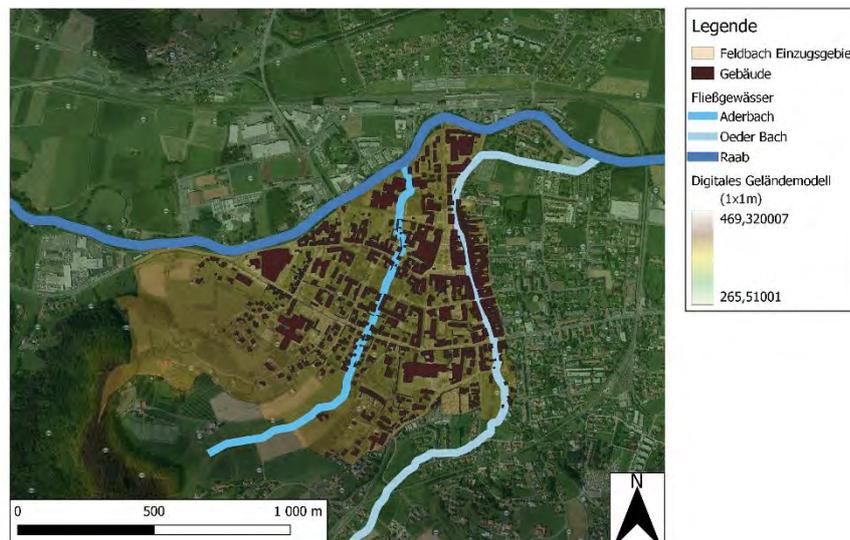


Abbildung 88: Übersichtskarte der Fallstudie Feldbach (Österreich) mit den drei relevanten Fließgewässern (Raab, Aderbach und Oedter Bach).

2.3 Szenarien

Insgesamt wurden für die Fallstudie 12 unterschiedliche Szenarien erstellt: i) das Basis-Szenario, welches den Ist-Zustand abbildet, ii) zwei Referenzszenarien mit geänderten Niederschlagscharakteristika und iii) neun Störfallszenarien in zentralen und dezentralen Anlagen der Siedlungsentwässerung (vgl. Tab. 1). Jedes Szenario wurde mit einem Modellregen nach Typ Euler-II mit einer Dauer von einer Stunde und Wiederkehrzeiten zwischen 1 und 100 Jahren gerechnet. Die Auswirkungen der Referenz- und Störfallszenarien werden dabei anhand der Überflutungsfläche mit Wasserständen > 10cm untersucht. Ab diesem Wasserstand ist vermehrt mit Schäden an Gebäuden, einer Einschränkung des Verkehrs und möglichen Personenschäden zu rechnen (LUBW, 2016).

Tabelle 23: Typ, Name und Beschreibung der Referenz- und Störfallszenarien, die in der Fallstudie untersucht wurden.

Szenario Typ	Szenario Name	Abkürzung	Beschreibung
Referenz Szenario	Klimawandel	KLI	Um 20% erhöhte Niederschlagsintensität des Bemessungsereignisses
	Nasse Vorbedingungen	VOR	6h Blockregen (35,9mm) vor dem Bemessungsereignis
Betriebsstörungen in technischen grauen Infrastrukturen	Flusshochwasser	FLU	Mischwasserüberlaufbauwerke durch Flusshochwasser vollständig blockiert (kein Durchfluss)
	Verstopfte Straßeneinläufe	VEI	Verstopfte Straßeneinläufe durch Laub, Müll oder Schnee (Abfluss um 66% reduziert)
	Ablagerungen Stauraumkanal	ABL	Ablagerungen in Stauraumkanälen durch vorangegangene Events oder fehlende Wartung (Durchmesser um 66% verringert)
	Kanalverstopfungen	VKA	Kanalverstopfung in allen Haltungen durch Trockenheit, Wurzeleinwuchs oder fehlende Wartung (Rauigkeit und Querschnitt angepasst)
	Verkläusung	VKL	Verkläusung der Wildbacheinläufe in das Kanalsystem (kein Durchfluss)
Betriebsstörungen in dezentralen grünen Infrastrukturen	Gründach Substraterosion	ERG	Gründach Substraterosion durch Sturm, Trockenheit oder fehlende Wartung und Pflege (Substrathöhe um 50% reduziert)
	Kolmation teilversiegelte Oberflächen	KOR	Verstopfung teilversiegelter Oberflächen durch Sedimentation (hydraulische Leitfähigkeit um 90% verringert)
	Ablagerungen Retentionsteich	SER	Das Einstauvolumen des Retentionsteichs ist durch die Erosion der Böschungen und Ablagerungen von Fremdmaterial um 75% verringert
	Fehlnutzung Retentionsschacht	FRE	Um 90% vermindertes Volumen in den Retentionsschächten durch Fehlnutzung oder Ausführungsfehler

3 Ergebnisse

Für den Ist-Zustand der Fallstudie Feldbach und die anderen untersuchten Szenarien zeigen sich mit zunehmender Wiederkehrzeit der Bemessungsniederschläge deutlich ansteigende Überflutungsflächen mit einer Wassertiefe > 10 cm (vgl. Abb. 2A). Bereits bei einem 1-jährlichen Bemessungsregen weisen im Ist-Zustand 1,7 ha des Untersuchungsgebiets kritische Wasserstände auf, die auf 10 ha bei einem 100-jährlichen Bemessungsniederschlag ansteigen.

Im Vergleich zum Ist-Zustand weisen für die Fallstudie Feldbach beide Referenzszenarien Klimawandel und nasse Vorbedingungen einen deutlichen Anstieg der Überflutungsflächen über alle Wiederkehrzeiten auf (vgl. Abb. 2B). Dabei zeigen die nassen Vorbedingungen vor allem bei geringen Wiederkehrzeiten einen überproportionalen relativen Anstieg (T1 = 134%) im Vergleich zum Ist-Zustand, der für höhere Wiederkehrzeiten kontinuierlich abnimmt (T100 = 25%). Das Klimawandelszenario zeigt für

mittlere Wiederkehrzeiten den höchsten relativen Anstieg der Überflutungsfläche (T20 = 55%), der für niedrige und hohe Wiederkehrzeiten niedriger ist (T100 = 24%).

Bei den Störfallszenarien in technischen grauen Infrastrukturen zeigen vier der fünf untersuchten Szenarien einen deutlichen Anstieg der Überflutungsfläche im Vergleich zum Ist-Zustand (vgl. Abb. 2B). Lediglich die Ablagerungen in Stauraumkanälen weisen keine sichtbaren Veränderungen auf. Die Kanalverstopfungen, Verklausung der Wildbacheinläufe und das Flusshochwasser zeigen gemittelt über alle Wiederkehrzeiten einen vergleichbaren Anstieg von 30%, wobei sich abhängig von den Wiederkehrzeiten geringe Unterschiede zeigen. Die verstopften Straßeneinläufe führen über alle Wiederkehrzeiten zu einem Anstieg von etwa 10%.

Betriebsstörungen in dezentralen Infrastrukturen weisen im Vergleich zu den anderen Szenarien keine sichtbaren Änderungen der Überflutungsfläche im Vergleich zum Ist-Zustand auf.

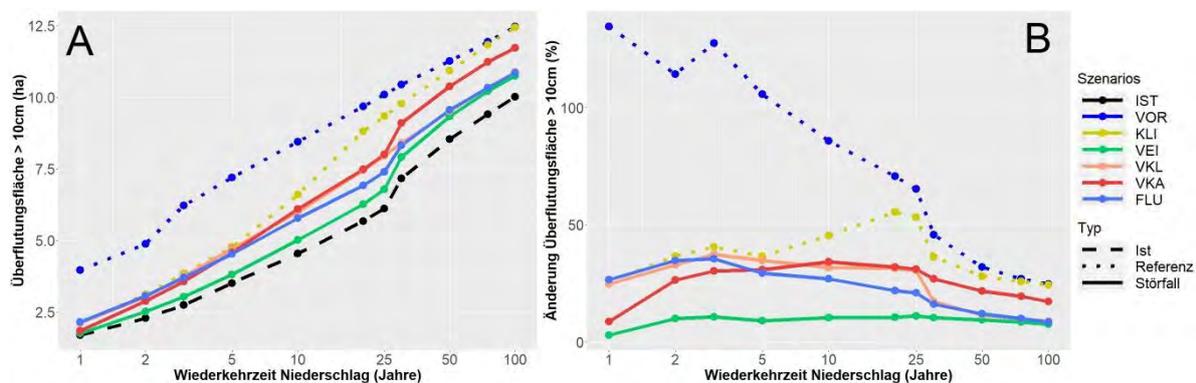


Abbildung 89: Einfluss von Referenz- und Betriebsstörungsszenarien auf die Überflutungsfläche für alle Szenarien, die einen sichtbaren Unterschied zum Ist-Zustand darstellen. A) zeigt die Überflutungsfläche in ha und B) zeigt die relative Änderung der Überflutungsfläche im Vergleich zum Ist-Zustand in %.

4 Diskussion

Im Vergleich zu den Störfallszenarien zeigen beide Referenzszenarien (Klimawandel und nasse Vorbedingungen) die höchsten Auswirkungen auf die Überflutungsflächen in der Fallstudie Feldbach. Niederschlagsmenge und Intensität sind damit die größten Einflussfaktoren für urbane Überflutungen. Der überproportionale Einfluss der nassen Vorbedingungen bei kleinen Wiederkehrzeiten ist wahrscheinlich auf die schlechte Sickerfähigkeit der Böden zurückzuführen, wodurch schon vor dem Bemessungsereignis relevanter Abfluss vor allem von den Hanglagen auftritt und Speicher gefüllt werden. Die Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung von aufeinanderfolgenden Niederschlagsereignissen und stellen die Verwendung von einzelnen Ereignissen für die Bemessung von Infrastrukturen in Frage. Vor allem im Hinblick auf den Überflutungsschutz sollten aufeinanderfolgenden Ereignissen und Vorbedingungen mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden.

Neben den Referenzszenarien weisen auch vier Störfallszenarien einen deutlichen Einfluss auf die Überflutungsflächen auf, wobei der Einfluss mit zunehmender Wiederkehrzeit abnimmt. Alle vier stehen in direktem Zusammenhang mit den zentralen Infrastrukturen der Misch- und Regenwasserkanalisation und zeigen deren Bedeutung in Bezug auf Überflutungsflächen auf. Da es sich bei den Störfallszenarien jeweils um Extrembeispiele handelt, z.B. alle Kanäle weisen eine Verstopfung auf, müssen die Ergebnisse diesbezüglich relativiert werden. Eine Sensitivitätsanalyse mit Abstufungen der einzelnen Betriebsstörungen steht noch aus. Der geringe Einfluss von Betriebsstörungen in dezentralen Infrastrukturen ist in dieser Fallstudie vor allem auf deren geringen Flächenanteil zurückzuführen. Beispielhafte Untersuchungen mit deutlich mehr dezentralen Anlagen und Ergebnisse anderer Studien

(Kluge et al., 2016) weisen trotzdem darauf hin, dass Betriebsstörungen in dezentralen Anlagen im Starkregenfall zu geringeren Auswirkungen führen.

Neben der Fallstudie Feldbach wurde die Methodik auch in einer deutlich kleineren virtuellen urbanen Fallstudie getestet (Funke et al., 2022). Hier zeigt sich eine vergleichbare Rangordnung der Schwere der Betriebsstörungen, wobei deutlich höhere Auswirkungen im Vergleich zum Ist-Zustand simuliert wurden. Dies deutet darauf hin, dass sich die Ergebnisse bedingt auch auf andere Gemeinden übertragen lassen, der genaue Schweregrad von Betriebsstörungen aber stark einzugsgebietsabhängig ist.

5 Danksagung

Die Arbeit wurde im Rahmen des vom Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus Österreich geförderten Projekt „BEJOND“ durchgeführt. Die Autoren danken außerdem Computational Hydraulics International (CHI), Kanada, für die Bereitstellung eines Universitätsstipendiums zur Nutzung von PCSWMM.

6 Literatur

- Abdelrahman, Y. T., El Moustafa, A. M., & Elfawy, M. (2018). Simulating flood urban drainage networks through 1D/2D model analysis. *Journal of Water Management Modeling*, 2018, 1–7. <https://doi.org/10.14796/JWMM.C454>
- Funke, F., Reinstaller, S., & Kleidorfer, M. (2022). Impact of model structure on analysing malfunctions in urban drainage systems. *Proceedings of Urban Drainage Modelling Conference 2022, January*, 3–5.
- Hosseinzadehtalaei, P., Tabari, H., & Willems, P. (2020). Climate change impact on short-duration extreme precipitation and intensity–duration–frequency curves over Europe. *Journal of Hydrology*, 590(March), 125249. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125249>
- Kluge, B., Sommer, H., & Kaiser, M. (2016). *Leistungsfähigkeit und Zustand langjährig betriebener dezentraler Regenwasserversickerungsanlagen (LEIREV) Abschlussbericht*.
- Lashford, C., Rubinato, M., Cai, Y., Hou, J., Abolfathi, S., Coupe, S., Charlesworth, S., & Tait, S. (2019). SuDS & sponge cities: A comparative analysis of the implementation of pluvial flood management in the UK and China. *Sustainability (Switzerland)*, 11(1), 1–14. <https://doi.org/10.3390/su11010213>
- [LUBW] Landesanstalt für Umwelt, M. und N. B.-W. (2016). *Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg*.
- Mugume, S. N., Gomez, D. E., Fu, G., Farmani, R., & Butler, D. (2015). A global analysis approach for investigating structural resilience in urban drainage systems. *Water Research*, 81, 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.05.030>
- Tscheikner-Gratl, F., Caradot, N., Cherqui, F., Leitão, J. P., Ahmadi, M., Langeveld, J. G., Le Gat, Y., Scholten, L., Roghani, B., Rodríguez, J. P., Lepot, M., Stegeman, B., Heinrichsen, A., Kropp, I., Kerres, K., Almeida, M. do C., Bach, P. M., Moy de Vitry, M., Sá Marques, A., ... Clemens, F. (2019). Sewer asset management–state of the art and research needs. *Urban Water Journal*, 16(9), 662–675. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1713382>

Korrespondenz:

Fabian Funke
 Arbeitsbereich Umwelttechnik, Technikerstraße 13, 6020 Innsbruck, Österreich
 +43 512 507 62160
 fabian.funke@uibk.ac.at

KI-basierte Vorhersage kanalinduzierter Überflutungen

B. Burrichter¹, J. Koltermann da Silva¹, M. Quirnbach¹

¹ Hochschule Ruhr West, Duisburger Str. 100, 45479 Mülheim a. d. Ruhr, Deutschland

Kurzfassung: Starkregenereignisse zeichnen sich durch kurze Vorwarnzeiten aus. Umso wichtiger sind schnelle Berechnungsmodelle, um für eine Starkregenprognose die resultierende Überflutungssituation zu ermitteln und als Echtzeitvorhersage bereitzustellen. Im Forschungsvorhaben KIWaSuS wird hierzu ein KI-basiertes Modell entwickelt, das auf Grundlage der Berechnungsergebnisse eines gekoppelten hydrodynamischen 1D/2D-Modells trainiert wird. Der vorliegende Beitrag stellt den Systemaufbau, die Untersuchungsmethodik sowie erste Ergebnisse vor, aus denen der weitere Handlungsbedarf abgeleitet wird.

Key-Words: Urbane Sturzfluten, Echtzeitvorhersage, Maschinelles Lernen, Künstlich Neuronale Netze

1 Einleitung

Eine Folge des Klimawandels sind zunehmend auftretende Starkregenereignisse, die insbesondere in den hochverdichteten urbanen Gebieten immer wieder zu einer Überlastung der Entwässerungsstruktur und in der Folge zu Überflutungen führen. Die jüngsten Ereignisse haben hier besonders verheerend gezeigt, welches hohe Sicherheitsrisiko für die betroffene Bevölkerung und auch Einsatzkräfte des Krisenmanagements von solchen Ereignissen ausgeht. Warnmeldungen über das Ausmaß und insbesondere die Örtlichkeit bevorstehender Ereignisse sind jedoch oft ungenau oder fehlen vollständig. Den Akteuren des Krisenmanagements fehlt so jegliche Grundlage für ein proaktives Handeln. Um dieser Problematik entgegenzuwirken, wird im Rahmen des Forschungsprojektes KIWaSuS¹ ein Echtzeitwarnsystem vor urbanen Sturzfluten entwickelt. Gegenüber klassischen Ansätzen wird dabei auf Verfahren der Künstlichen Intelligenz (KI) in Form von maschinellen Lernverfahren (ML) zur Vorhersage von urbanen Sturzfluten zurückgegriffen. Ziel ist es, Überstau- und Überflutungsflächen für einen Zeitraum von bis zu zwei Stunden möglichst adäquat vorherzusagen. Das System ist dementsprechend an den gemäß DIN EN 752:2017 als „kanalinduzierte Überflutungen“ definierten Zustand adressiert.

Die generelle Eignung von Verfahren des maschinellen Lernens zur Berechnung von Überflutungsflächen konnte bereits in verschiedenen Arbeiten nachgewiesen werden (vgl. Berkahn et al. (2019), Guo et al. (2021), Hofmann und Schüttrumpf (2021), Löwe et al. (2021)). Bei den Studien wurden ML-Verfahren verwendet, um für ein Niederschlagsereignis die maximale Überflutungssituation zu berechnen. Dieser Ansatz setzt im Falle einer Echtzeitvorhersage voraus, dass eine Niederschlagsvorhersage besteht, die die gesamte Ereignisdauer abdeckt und bei der das Entwässerungssystem (Kanalnetz + Oberfläche) nicht vorbelastet ist. Da konvektive Starkregenereignisse derzeit nur für einen Vorhersagehorizont von bis zu zwei Stunden adäquat vorhergesagt werden können, ist diese Voraussetzung nicht immer gegeben. Aus diesem Grund wurde in den hier vorgestellten Untersuchungen ein Ansatz entwickelt, der auf Basis einer Niederschlagsvorhersage die resultierende Überflutungssituation prognostiziert und dabei auch die Vorbelastung des Entwässerungssystems berücksichtigt. Darüber hinaus wird gegenüber einer statischen Karte eine dynamische Karte mit den Überflutungsflächen erzeugt, die es

¹ Weitere Informationen zum Projekt finden sich auf der KIWaSuS Homepage (www.kiwasus.de)

analog zu einem Wetterradar (u. a. www.wetteronline.de/wetterradar) ermöglicht, den Verlauf der bevorstehenden Überflutungssituation abzubilden. Die benötigte Niederschlagsvorhersage wird ebenfalls mit Hilfe von KI-Modellen aus Radardaten des Deutschen Wetterdienstes generiert. Ein entsprechender Ansatz hierzu wird im Projekt KIWaSuS entwickelt und ist in Koltermann da Silva et al. (2022b) beschrieben.

2 Material und Methoden

2.1 Übergeordneter Systemaufbau und Untersuchungsmethodik

Das in KIWaSuS geplante Vorhersagesystem für kanalinduzierte Überflutungen besteht aus insgesamt drei Komponenten. Dabei handelt es sich um i) ein Modell zur Vorhersage von Überstauvolumina (Modell 1), ii) einem Modell zur Vorhersage von Überflutungsflächen an der Geländeoberfläche (Modell 2) und iii) einem LowCost-Sensorsystem zur räumlich hochauflösenden Erfassung des Füllstandes im Kanalnetz. Alle drei Teilsysteme werden im späteren Betrieb miteinander gekoppelt. Das Modell zur Vorhersage von Überstauvolumina erhält somit neben Niederschlagsinformationen (gefallene Menge + prognostizierte Menge) auch den aktuellen Systemzustand des Kanalnetzes durch das LowCost-Sensorsystem. Gleichzeitig wird der prognostizierte Überstau als weitere Eingangsgröße in das Modell für die Überflutungsflächen angesetzt. Dadurch erhält auch das zweite Modell eine indirekte Information über den aktuellen Systemzustand. Einen Überblick über den geplanten Modellaufbau sowie die beschriebene Untersuchungsmethodik liefert Abbildung 90.

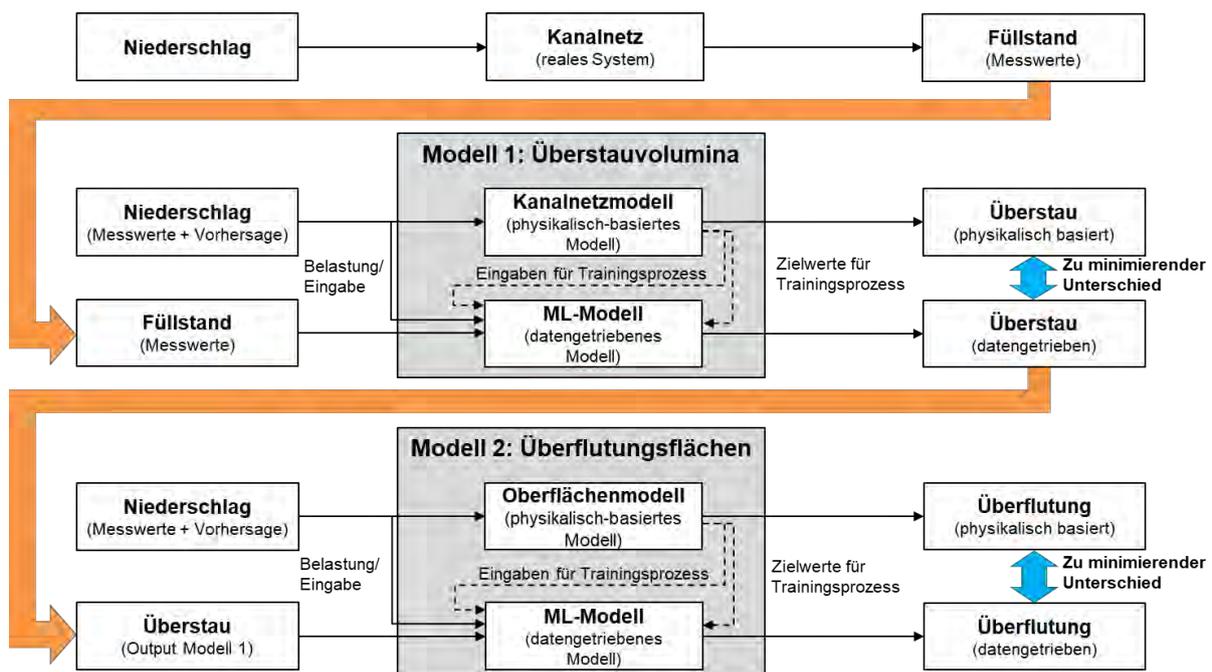


Abbildung 90: Übergeordneter Aufbau des Gesamtsystems und Untersuchungsmethodik

Da es für die Erfassung der Zielgrößen Überstau und Überflutungsflächen derzeit noch keine Messdaten gibt, werden diese mit Hilfe eines in der Software MIKE+ (DHI, 2021) implementierten physikalisch basierten 1D/2D Berechnungsmodell erzeugt (vgl. Kapitel 2.2). Das Ziel bei der Modellentwicklung ist dementsprechend, den Unterschied zu den Ergebnissen der physikalisch basierten Berechnungsmodelle weitestgehend zu minimieren. Der Mehrwert des entwickelten ML-basierten Modells liegt auf den deutlich geringeren Rechenzeiten von wenigen Sekunden, die somit die angestrebte Echtzeitvorhersage ermöglichen.

2.2 Datengenerierung und -vorverarbeitung

Bei der Modellierung von Prozessen mit Maschinellen Lernverfahren ist zunächst ein Trainingsprozess erforderlich, in dem das Verfahren anhand von Beispielpärchen den Zusammenhang zwischen Eingaben und der gewünschten Zielgröße erlernt. Die Genauigkeit des späteren Modells hängt daher stark von dem für den Trainingsprozess zur Verfügung gestellten Trainingsdatensatz ab. Für das Training werden Niederschlagsdaten von historischen Ereignissen verwendet, für die mit Hilfe der hydrodynamischen Berechnungsmodelle die jeweiligen Zielgrößen bestimmt werden. Als Untersuchungsgebiet wird dabei auf den Stadtteil Ückendorf in Gelsenkirchen zurückgegriffen, für den ein gekoppeltes 1D/2D-Modell vorliegt. Da Kanalnetze in Deutschland gemäß DIN EN 752:2017 und DWA-A 118 DWA (2006) für Überstauhäufigkeiten im Bereich von 2 bis 10 Jahren auszulegen sind, sind Niederschlagsereignisse, die zu einer Überlastung der Kanalisation führen, recht selten. Das zu entwickelnde Vorhersagemodell ist jedoch genau an diese Ereignisse adressiert und soll die volle Bandbreite aller potentiell in der Realität möglichen Überlastungsereignisse möglichst adäquat vorhersagen. Die alleinige Betrachtung der Niederschlagszeitreihe der nächstgelegenen Station ist somit nicht zielführend.

Stattdessen wurde bei der Erzeugung der Trainingsdatensätze zum einen auf Niederschlagsdaten von insgesamt acht Stationen zurückgegriffen, die in einem Umkreis von < 50 km zum Untersuchungsgebiet liegen, und zum anderen wurden zusätzlich Modellregen erstellt (vgl. Koltermann da Silva et al., 2022a). Während durch die Messdaten die Ereignisverläufe realitätsnah abgebildet werden, bieten Modellregen die Möglichkeit der repräsentativen Abdeckung von relevanten Dauerstufen und Wiederkehrzeiten. Insgesamt wurde ein Datensatz bestehend aus 153 natürlichen Regenereignissen mit einer Wiederkehrzeit > 5 Jahre und 103 Modellregen aufgebaut. Mit Hilfe des hydrodynamischen Modells wurden dann für diese Ereignisse die Überstauganglinien und Überflutungsflächen als zugehörige Zielgrößen für den Trainingsprozess ermittelt. Für das spätere Überprüfen der Modellperformance wurden die 26 Ereignisse der Station, die am nächsten zum Untersuchungsgebiet liegt, als Testdatensatz zurückgehalten. Die übrigen 232 Ereignisse wurden aufgeteilt in einen Trainingsdatensatz von 202 Ereignissen und einen Validierungsdatensatz von 30 Ereignissen zur Steuerung des Trainingsprozesses.

2.3 Modellaufbau und Untersuchungsumfang

Der Fokus der hier beschriebenen Untersuchungen liegt auf dem Modell 2 für Überflutungsflächen. Ziel des Modells ist es, aus einer Starkregenprognose die resultierende Überflutungssituation als Zielgröße möglichst verzögerungsarm abzuleiten. Hierzu stehen als potentielle Eingaben verschiedene Niederschlagsinformationen sowie die Überstauvorhersage aus Modell 1 zur Verfügung (vgl. Abbildung 91). Neben dem prognostizierten Niederschlag für die kommende Stunde wird auch der gefallene Niederschlag der letzten Stunde berücksichtigt. Darüber hinaus werden der kumulierte Niederschlag sowie die verstrichene Zeit seit Ereignisbeginn mitberücksichtigt, um bei einer Ereignisdauer von mehr als zwei Stunden auch die Vorbelastung ausreichend abzubilden. Als Überstauvorhersage wurden die im Rahmen der Datengenerierung erzeugten Überstauganglinien mit den Senkeneinzugsgebieten im Untersuchungsgebiet verschnitten. Im Ergebnis entsteht so eine Sequenz aus Rastern mit den akkumulierten Überstauvolumina je Zeitschritt und Senkeneinzugsgebiet. Gegenüber der Eingabe von Überstauganglinien soll so der räumliche Zusammenhang erhalten bleiben.

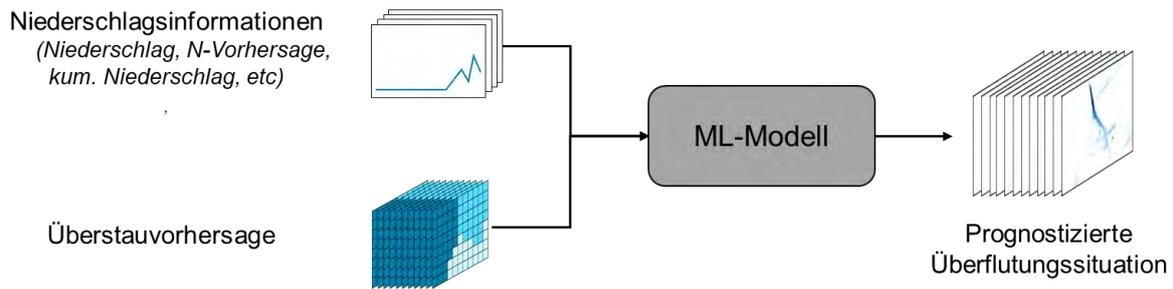


Abbildung 91: Geplanter Modellaufbau mit allen potentiellen Eingaben (links) und der gesuchten Zielgröße (rechts)

Während die Niederschlagsinformationen und dabei insbesondere die Niederschlagsvorhersage als Voraussetzung für die Prognose der Überflutungssituation angesehen werden, ist bei der Überstauvorhersage zunächst einmal zu prüfen, ob diese sich positiv auf die Modellperformance auswirkt. Daher werden zwei Modelle entwickelt, eins mit Niederschlagsinformationen als einzige Eingabe und eins mit den Niederschlagsinformationen und der Überstauvorhersage als Eingabe. Ziel ist es dabei, den in Abbildung 90 dargestellten Systemaufbau auf Konsistenz zu prüfen. Bei einem geringen oder fehlenden Mehrwert durch die Überstauvorhersage kann auf das LowCost-Sensorsystem sowie das Überstauvorhersagemodell im weiteren Verlauf verzichtet werden.

Als ML-Verfahren wurden Neuronale Netze gewählt, da diese sich einerseits bei der Verarbeitung von Bild- und Videodaten als besonders effizient erwiesen haben und diese zum anderen die Berücksichtigung unterschiedlicher Datenformate ermöglichen. Vor dem Hintergrund, dass das Training der Modelle sehr zeitintensiv ist und zunächst einmal die Eingrenzung des Untersuchungsumfangs im Vordergrund steht, wurden einfache Architekturen bestehend aus Faltungsschichten und vollständig verbundenen Perzeptronen-Schichten erstellt. Beide Modelle wurden jeweils für 100 Epochen trainiert.

Zur Auswertung der Vorhersageergebnisse und dem Vergleich der beiden Modellvarianten wurden der Critical Success Index (CSI) sowie der Root Mean Squared Error (RMSE) als Gütekriterien herangezogen. Während der CSI ein Maß zur Bewertung der Lagegenauigkeit darstellt, wird mit dem RMSE die direkte Abweichung zwischen prognostizierten (ML-Modell) und simulierten (HD-Modell) Wasserständen verglichen (Bennett et al., 2013). In Jamali et al. (2019) und Löwe et al. (2021) wurde zusätzlich ein Grenzwert von 0,05 m festgelegt, ab dem ein Pixel als „überflutet“ gilt und bei der Ermittlung der Gütekriterien berücksichtigt wird. Dieser Ansatz wurde in den hier durchgeführten Untersuchungen auf fünf Grenzwerte erweitert, für die zunächst die Metriken getrennt berechnet wurden. Anschließend wurden die Ergebnisse der Metriken in Anlehnung an das Vorgehen von Shi et al. (2017) gewichtet, wobei hohe Werte ein größeres Gewicht erhielten als niedrigere Werte (vgl. Tabelle 24). Aus den fünf Werten wurde dann für den finalen Vergleich das gewichtete Mittel gebildet.

Tabelle 24: Grenzwerte und zugehörige Gewichtungen für die Auswertung

Wasserstand [m]	Gewicht [-]
$x > 0,02$	1
$x > 0,05$	2
$x > 0,1$	5
$x > 0,2$	10
$x > 0,5$	20

3 Ergebnisse und Diskussion

Die Performance der beiden Modelle wurde anhand des Testdatensatzes ermittelt. Beide Modelle benötigen für eine Prognose weniger als 10 Sekunden und sind somit in Kombination mit einer Niederschlagsvorhersage echtzeitfähig. Die jeweilige Genauigkeit wurde mit Hilfe der zuvor beschriebenen Gütekriterien für die festgelegten Grenzwerte ermittelt. Das Ergebnis ist in Tabelle 25 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sowohl beim CSI als auch dem RMSE das Modell mit Niederschlagsinformationen und Überstau als Eingaben am besten abschneidet.

Tabelle 25: Vergleich der Modellvarianten mit unterschiedlichen Eingaben anhand der Gütekriterien RMSE und CSI. Der Pfeil gibt an, ob höhere oder niedrige Werte besser sind. Das bessere Ergebnis für jedes Kriterium und jeden Grenzwert ist jeweils fett markiert.

Modelleingaben	x > 0,02	x > 0,05	x > 0,1	x > 0,2	x > 0,5	gew. Mittel
RMSE ↓						
Niederschlag	0.069	0.092	0.128	0.201	0.462	0.320
Niederschlag + Überstau	0.058	0.077	0.111	0.189	0.388	0.274
CSI ↑						
Niederschlag	0.326	0.283	0.194	0.171	0.024	0.106
Niederschlag + Überstau	0.393	0.360	0.277	0.227	0.061	0.158

Die Ergebnisse aus Tabelle 25 zeigen zwar, dass das Modell mit Überstau als zusätzliche Eingabe besser abschneidet, die Werte aber im Vergleich zu anderen Studien wie Löwe et al. (2021) eher hoch (RMSE) oder gering (CSI) ausfallen. Damit war aufgrund des unterschiedlichen Lernproblems in einem gewissen Maße zu rechnen, da in den hier beschriebenen Untersuchungen die Ereignisse nicht abgeschlossen sind und damit nicht der gesamte Ereignisverlauf zur Verfügung steht. Darüber hinaus soll anstelle eines Rasters mit den maximalen Wasserständen für das gesamte Ereignis eine Sequenz von Rastern mit den maximalen Wasserständen für den Vorhersagehorizont ausgegeben werden. Beides führte in den durchgeführten Untersuchungen zu den vergleichsweise schlechten Ergebnissen.

Dies wird nachfolgend exemplarisch an der Vorhersagegüte für das Starkregenereignis vom 03.07.2009, das auf das Stadtgebiet Gelsenkirchen niedergegangen ist, aufgezeigt. Das Ereignis hat für die Dauerstufen 15, 30 und 60 Minuten eine Wiederkehrzeit von mehr als 200 Jahre. Abbildung 3 gibt den Ereignisverlauf wieder und zeigt den berücksichtigten Vorhersagehorizont, der sowohl für die Zielgröße Überflutungsflächen als auch die Eingaben Niederschlags- und Überstauvorhersage gilt. Für den gleichen Zeitraum wird auch in die Vergangenheit geschaut und der gemessene Niederschlag berücksichtigt. Abbildung 4 zeigt für einen Teilausschnitt des Untersuchungsgebietes und den gegebenen Vorhersage-Startzeitpunkt die Ergebnisse der Überflutungsvorhersage für 15, 30 und 60 Minuten in die Zukunft im Vergleich zu den Simulationsergebnissen des hydraulischen Modells an. Anhand der Abbildung zur Evaluierung der Lagegenauigkeit ist zu erkennen, dass mit einer zunehmenden Anzahl an überfluteten Pixel auch gleichzeitig der CSI für einen Grenzwert von 0,05 Metern zunimmt. Während beim Vorhersagezeitpunkt von + 15 Minuten der Wert bei 0,03 liegt und ein schlechtes Ergebnis liefert, wird beim Vorhersagezeitpunkt von + 60 Minuten mit 0,56 ein akzeptables Ergebnis erzielt. Der visuelle Abgleich zwischen Simulation und Vorhersage zeigt auch, dass die für die Akteure des Krisenmanagements relevanten Überflutungsflächen adäquat abgebildet werden.

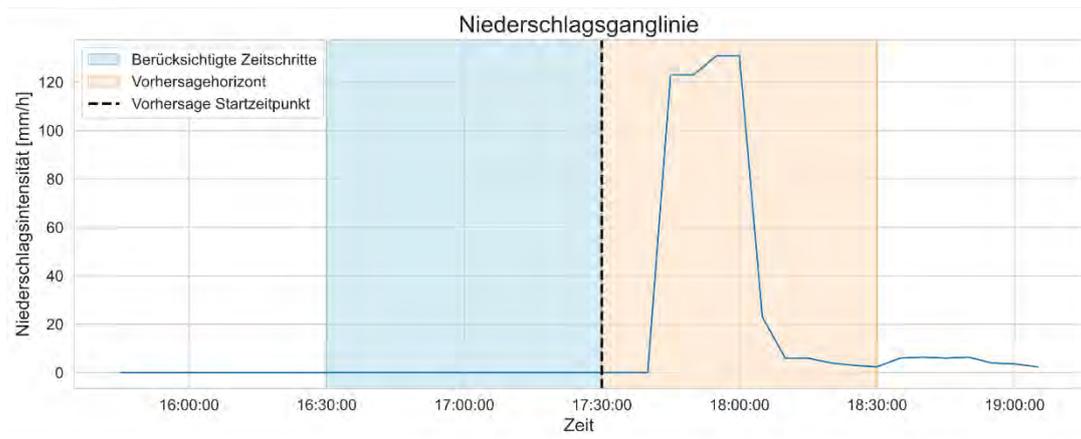


Abbildung 92: Niederschlagsereignis vom 03.07.2009 mit Darstellung des Vorhersagehorizonts sowie den berücksichtigten vergangenen Zeitschritten zum Vorhersagezeitpunkt

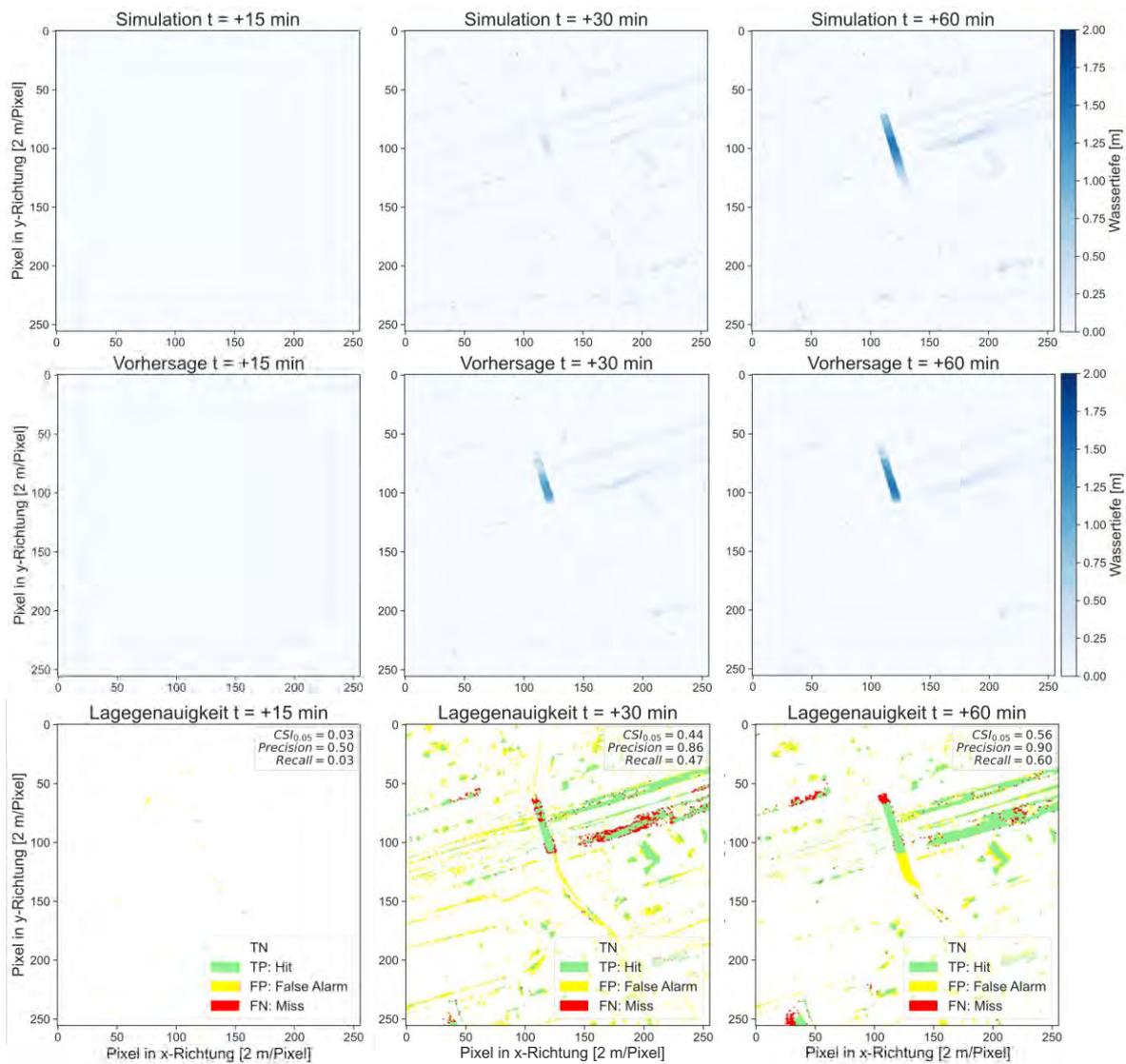


Abbildung 93: Vergleich der simulierten und prognostizierten Wassertiefen sowie Evaluierung der Lagegenauigkeit und absoluten Abweichung der Vorhersageergebnisse

4 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der aufgeführten Untersuchungen ist die Entwicklung eines KI-basierten Modells zur Echtzeitvorhersage von Überflutungsflächen in Folge von kanalinduzierten Überflutungen. Voraussetzung dafür sind zunächst einmal kurze Rechenzeiten, die mit den entwickelten Modellen erzielt werden können. In Hinblick auf die Genauigkeit zeigt sich, dass bei dem beschriebenen Systemaufbau, Überstau als zusätzliche Modelleingabe zu besseren Vorhersageergebnissen führt. Damit kann der beschriebene Systemaufbau als geeignet und die Entwicklung eines Überstauvorhersagemodells als zielführend angesehen werden. Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass noch Spielraum nach oben ist und hier weiteres Optimierungspotential besteht.

Aufbauend auf den beschriebenen Erkenntnissen erfolgen aktuell analog zu Guo et al. (2021) und Löwe et al. (2021) Untersuchungen mit Geländeinformationen und Flächendaten als zusätzliche Eingabegröße. Darüber hinaus wird die Genauigkeit verschiedener komplexerer Modellaufbauten getestet. Dabei werden einerseits tiefere Netzarchitekturen mit mehreren Schichten betrachtet, aber auch spezielle Architekturen wie U-Net, Autoencoders oder Generative Neuronale Netze. Neben komplexeren Architekturen werden aber auch einzelne Hyperparameter, wie der gewählte Optimierungsalgorithmus oder die Fehlerfunktion variiert, um die Vorhersagegenauigkeit weitestgehend zu optimieren. Im Anschluss wird das finale Modell dann mit dem Überstauvorhersagemodell sowie dem Niederschlagsvorhersagemodell gekoppelt, um die Genauigkeit im operationellen Betrieb zu evaluieren.

5 Dank

Ein besonderer Dank gilt dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), das das Projekt KIWaSuS im Rahmen der BMBF-Förderrichtlinie: „Künstliche Intelligenz in der zivilen Sicherheitsforschung“ im Programm „Forschung für die zivile Sicherheit 2018 bis 2023“ unter dem Förderkennzeichen 13N15556 fördert.

6 Literatur

- Bennett, N. D.; Croke, B. F.W.; Guariso, G.; Guillaume, J. H.A.; Hamilton, S. H.; Jakeman, A. J.; Marsili-Libelli, S.; Newham, L. T.H.; Norton, J. P.; Perrin, C.; Pierce, S. A.; Robson, B.; Seppelt, R.; Voinov, A. A.; Fath, B. D. et al. (2013): *Characterising performance of environmental models*. In: *Environmental Modelling & Software* 40, S. 1–20. DOI: 10.1016/j.envsoft.2012.09.011.
- Berkhahn, S.; Fuchs, L.; Neuweiler, I. (2019): An ensemble neural network model for real-time prediction of urban floods. In: *Journal of Hydrology* 575, S. 743–754. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.05.066.
- DHI (2021): *MIKE+*. Release 2021 Update 1. Hg. v. Danish Hydraulic Institute (DHI). Hørsholm, Denmark. Online verfügbar unter www.mikepoweredbydhi.com.
- DWA (2006): *Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen*. Arbeitsblatt DWA-A 118. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA). Hefen.
- DIN EN 752:2017 (2017): *Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden - Kanalmanagement*. Deutsches Institut für Normung e.V.
- Guo, Z.; Leitão, J. P.; Simões, N. E.; Moosavi, V. (2021): *Data-driven flood emulation: Speeding up urban flood predictions by deep convolutional neural networks*. In: *Journal of Flood Risk Management* 14 (1). DOI: 10.1111/jfr3.12684.
- Hofmann, J.; Schüttrumpf, H. (2021): *floodGAN: Using Deep Adversarial Learning to Predict Pluvial Flooding in Real Time*. In: *Water* 13 (16), S. 2255. DOI: 10.3390/w13162255.

- Jamali, B.; Bach, P. M.; Cunningham, L.; Deletic, A. (2019): *A Cellular Automata Fast Flood Evaluation (CA-ffé) Model*. In: *Water Resources Research* DOI: 10.1029/2018WR023679.
- Koltermann da Silva, J.; Burrichter, B.; Quirnbach, M. (2022a): *Vorhersagemodelle in KIWaSuS: Vorverarbeitungsschritte für die Entwicklung von KI-Modellen*. In: *Im Wandel - Klima, Wasser und Gesellschaft: Prozesse - Methoden - Kommunikation – Beiträge zum Tag der Hydrologie am 22./23. März 2022 an der Universität München, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* Heft 43.22. München, S. 81–90.
- Koltermann da Silva, J.; Burrichter, B.; Quirnbach, M. (2022b): *Radarbasiertes Kurzzeit-Niederschlagsvorhersagemodell von Starkregen in KIWaSuS*. In: *Grün statt Grau – Beiträge zur Aqua Urbanica am 14./15. November 2022 in Zweideln-Glattfelden, Schweiz*.
- Löwe, R.; Böhm, J.; Jensen, D. Getreuer; Leandro, J.; Rasmussen, S. Højmark (2021): *U-FLOOD – Topographic deep learning for predicting urban pluvial flood water depth*. In: *Journal of Hydrology* 603, S. 126898. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126898.
- Shi, X.; Gao, Z.; Lausen, L.; Wang, H.; Yeung, D.-Y.; Wong, W.; Woo, W. (2017): *Deep Learning for Precipitation Nowcasting: A Benchmark and A New Model*. Online verfügbar unter <https://arxiv.org/pdf/1706.03458>.

Korrespondenz:

Benjamin Burrichter
Duisburger Str. 100, 45479 Mülheim a. d. Ruhr
Tel: +49 [0]208/88254473
E-Mail: benjamin.burrichter@hs-ruhrwest.de

Quantifizierung der Auswirkungen von Schwammstadtelementen auf die Abflussganglinie bei Starkregensimulationen

M. Lukavsky¹, A. Sigrist²

¹ Hunziker Betatech AG, Pflanzschulstrasse 17, 8400 Winterthur, Schweiz

² Hunziker Betatech AG, Bellariastrasse 7, 8002 Zürich, Schweiz

Kurzfassung: Der Campus Höggerberg der ETH Zürich möchte mit Zeithorizont 2040 eine Arealentwicklung unter Einbindung eines weitreichenden Regenwasserkonzepts umsetzen. Das Konzept ist geprägt von Schwammstadtelementen wie Gründächern und Raingardens. Bei konventioneller Modellierung mit dem Spitzenabflussbeiwert werden die Retentionsprozesse im Abflussprozess nicht vollständig abgebildet. Durch die Integration von Schwammstadtelementen bei Starkregensimulationen wird der Abflussprozess exakter abgebildet und somit eine detaillierte Aussage zur Regenabwasserretention im Einzugsgebiet ermöglicht.

Key-Words: Starkregensimulation, Schwammstadt, Abflussprozess

1 Einleitung

Der Campus Höggerberg der ETH Zürich befindet sich inmitten eines Naherholungsgebiets in Zürich. Mit Zeithorizont 2040 möchte die ETH Zürich einen Ausbau des Campus unter Einbindung eines weitreichenden Regenwasserkonzepts auf Basis des «Masterplan 2040» umsetzen (ETH Zürich 2022). Die Entwässerung des Areals erfolgt im Trennsystem, das Regenabwasser wird in den nahegelegenen Holderbach eingeleitet. Die Abflusscharakteristik des Holderbach ist bereits heute massgeblich durch den Einfluss der Arealentwässerung des Campus geprägt. Für den Zielzustand 2040 liegen behördliche Vorgaben zur Begrenzung der Abflussspitze beim 10-jährlichen und 100-jährlichen Regenereignis vor.

Diese Vorgaben werden im Entwässerungskonzept des Areals behandelt. Für den Zielzustand 2040 werden zahlreiche Schwammstadtelemente für den Umgang mit Niederschlagswasser eingebunden: unter anderem Raingardens und Gründächer. Diese Elemente nehmen durch Retention und Versickerung Einfluss auf die Abflussspitze. Bei konventioneller Modellierung mit dem Spitzenabflussbeiwert werden die Retentionsprozesse im Abflussprozess nicht vollständig abgebildet. Daher braucht es einen neuen Modellierungsansatz, um den numerischen Nachweis der Effekte der Schwammstadtelemente auf die Abflusskurve zu liefern.

2 Methodik

Für die Modellierung wurde das Einzugsgebiet des Campus Höggerberg nach Nutzung in Teileinzugsgebiete gegliedert (siehe Abbildung 1). Die Nutzungsart unterscheidet verschiedene Platz-, Dach- und Grünflächen.



Abbildung 94: Flächen nach Nutzung des Campus Höggerberg für den Zielzustand 2040.

Dachflächen bilden 1/3 der Campusfläche der ETH Höggerberg. Daher ist die Reduktion bzw. die Verzögerung des Abflusses von Dachflächen ein Kernelement des Entwässerungsplans des Areals. Abbildung 95 zeigt die Flächenanteile der jeweiligen Dachüberbauungen für den Zielzustand 2040. Demnach werden bis 2040 65 % der Dachflächen begrünt sein.

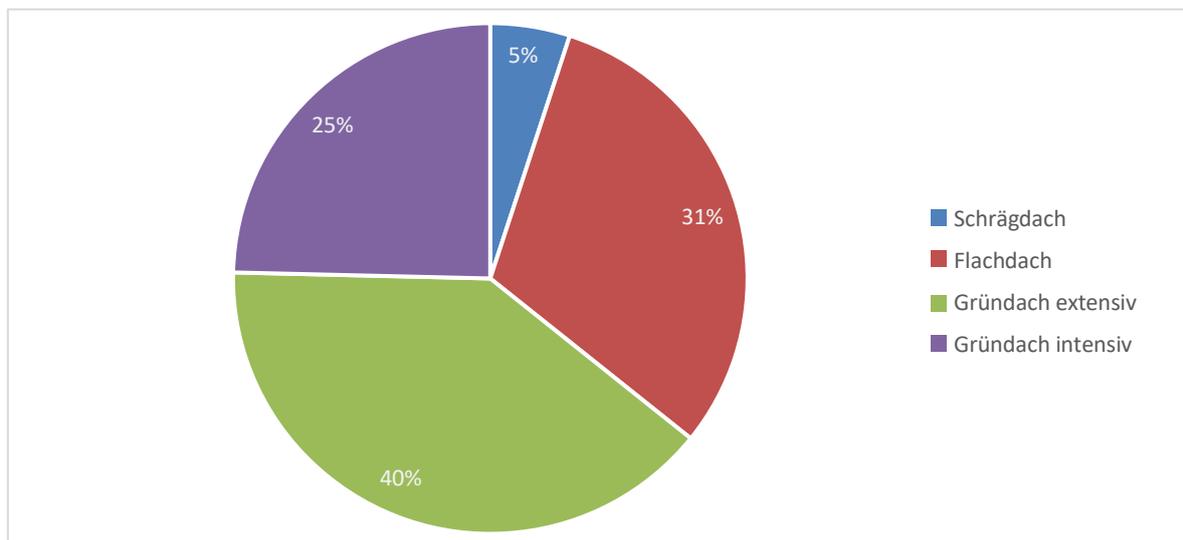


Abbildung 95: Dachflächen anteilig nach Überbauungsart für den Zielzustand 2040.

In der konventionellen Modellierung wurden die Gründächer mit einem Spitzenabflussbeiwert von 0.7 (extensiv) und 0.4 (intensiv) gemäss den gängigen Empfehlungen (Suissetec, VSA 2012) abgebildet. Schräg- und Flachdächer werden mit einem Abflussbeiwert von 1.0 abgebildet. In der Modellierung mit Schwammstadtelementen wurden die Gründächer gemäss Abbildung 96 abgebildet. Die Einstauhöhe, die Bodenzone sowie die Drainagematte dienen als Retentionsvolumen. Der Regen trifft auf die

Bodenzone und versickert. Über die Drainagematte fließt das Regenabwasser in die Kanalisation ab. Sobald der anfallende Regen die hydraulische Leitfähigkeit der Bodenzone übersteigt, staut sich Wasser an. Wenn die Einstauhöhe erreicht ist, überläuft das Regenabwasser in die Kanalisation. Schrägdächer sind in der Modellierung mit Schwammstadtelementen nach wie vor zu 100 % direkt abflusswirksam, bei Flachdächern wird eine Einstauhöhe von 2 cm berücksichtigt.

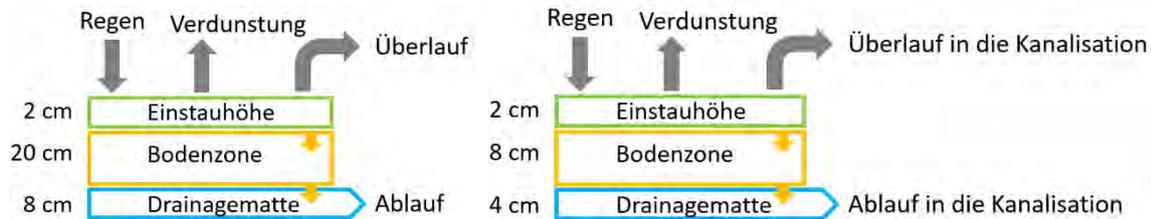


Abbildung 96: Aufbauschema gemäss Modellierung eines intensiv begrünten Gründachs (links) und extensiv begrünten Gründachs (rechts).

Die Teileinzugsgebiete und das Regenabwassernetz werden in die Software Mike+ von DHI importiert. Der Abflussprozess wird einmal konventionell mit Spitzenabflussbeiwerten mit dem Zeit-Flächen-Oberflächenabflussmodell modelliert. Zum Vergleich wird ein neues Modell aufgesetzt, in welchem die vorgesehenen Schwammstadtelemente in den Einzugsgebieten integriert und parametrisiert werden. Für die Simulation wird ein 100-jährliches 1-stündiges und ein 10-jährliches 30-minütiges Regenereignis genutzt.

Die Abflusskurven und die Bilanzierung der konventionellen Simulation und der Simulation mit Schwammstadtelementen werden verglichen. Am Beispiel eines Gründachs wird der errechnete Abflussbeiwert bei konventioneller Modellierung dem Abflussbeiwert bei Modellierung mit Schwammstadtelementen gegenübergestellt. Die Berechnung dieser Abflussbeiwerte erfolgt gemäss Gujer (2007). Wie in Abbildung 97 gezeigt, wird der Spitzenabflussbeiwert anhand der Abflussspitze ($Q_{R,max}$) und der maximalen Regenintensität (r_{max}) des betrachteten Regenereignisses berechnet. Der mittlere Abflussbeiwert stellt hingegen das gesamte Abflussvolumen dem gesamten Niederschlagsvolumen gegenüber.

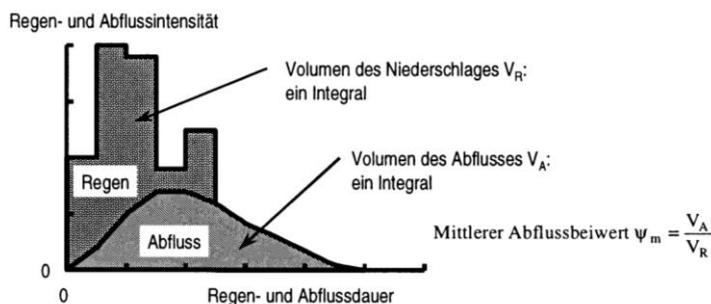
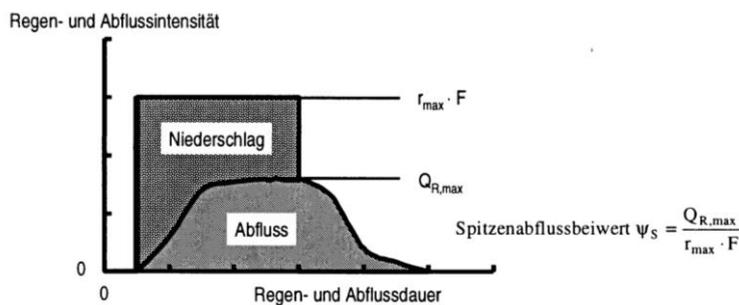


Abbildung 97: Definition des Spitzenabflussbeiwerts (oben) und des mittleren Abflussbeiwerts (unten) (Gujer, 2007, S. 207).

3 Ergebnisse

3.1 Vergleich der Abflusskurven und der Wasserbilanz

In Abbildung 98 werden die Abflusskurven der beiden Modellierungsmethoden bei einem 100-jährlichen (links) und einem 10-jährlichen (rechts) Niederschlagsereignis dargestellt. Die Abflusskurven bilden ein Teileinzugsgebiet des Campus Höggerberg ab. In beiden Fällen ist die Ganglinie mit Schwammstadtelementen zu Beginn des Ereignisses weniger steil und es ist im Nachgang ein andauernder Nachfluss von zwischengespeichertem Regenabwasser sichtbar. Ebenso sieht man in beiden Fällen, dass die Abflussspitze bei der Modellierung mit Schwammstadtelementen deutlich reduziert ist und leicht verzögert eintritt.

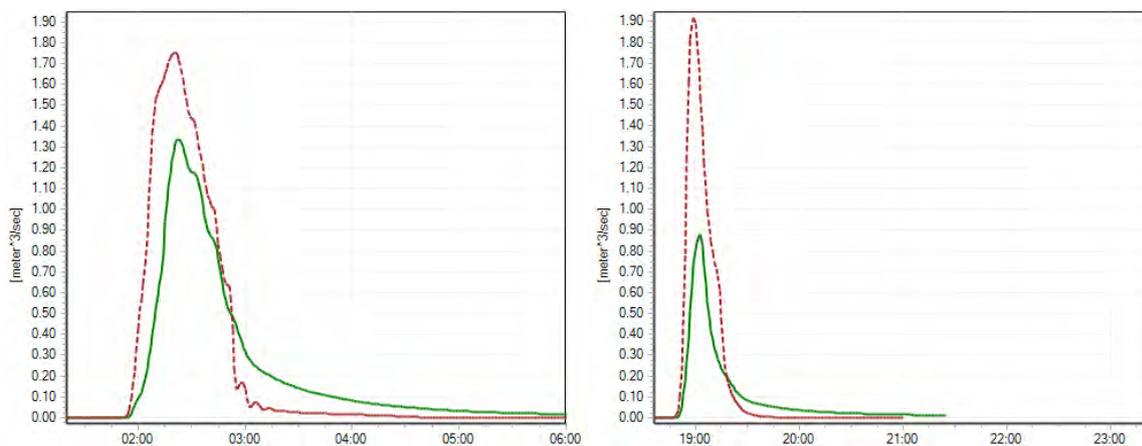


Abbildung 98: Abflussganglinie modelliert mit Spitzenabflussbeiwerten (braun) und mit Schwammstadtelementen (grün) bei einem 100-jährlichen 1-stündigen (links) und bei einem 10-jährlichen 30-minütigen Regenereignis (rechts).

Die Modellierung mit Schwammstadtelementen ermöglicht zudem detaillierte Aussagen zur Wasserbilanz. Während in der konventionellen Modellierung nur zwischen abflusswirksamem Anteil (Oberflächenabfluss) und nicht abflusswirksamem Anteil unterschieden wird, kann im Modell mit Schwammstadtelementen die Bilanz in die Anteile gemäss Abbildung 99 gegliedert werden. Bei der Modellierung mit Spitzenabflussbeiwerten sind unabhängig vom Regenereignis über das Gesamteinzugsgebiet 55 % der Fläche abflusswirksam.

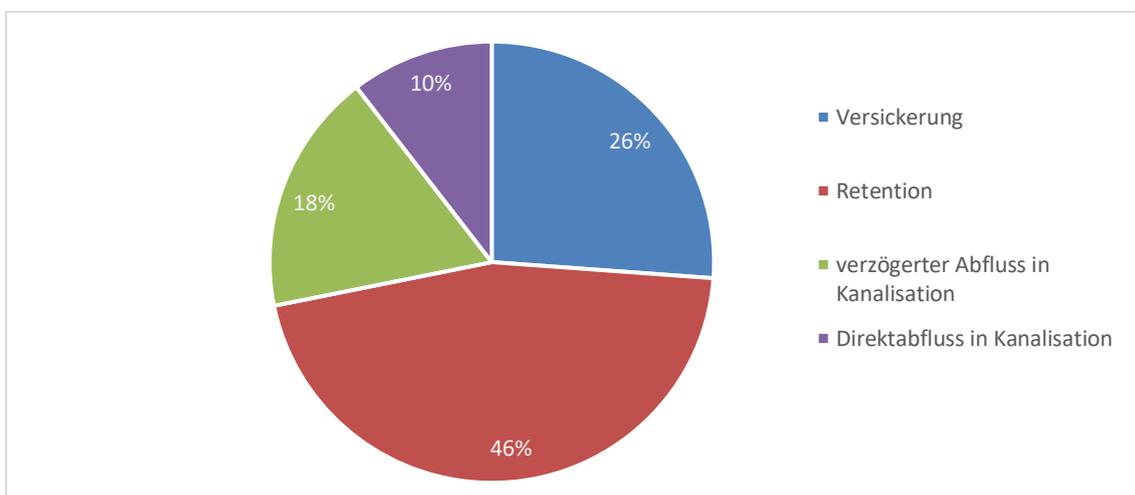


Abbildung 99: Wasserbilanz der ETH Zürich Campus Höggerberg für den Zielzustand 2040 bei einem 10-jährlichen Regenereignis mit 3h Nachlaufzeit.

3.2 Auswirkung eines Gründachs auf den Abfluss

Aus der generierten Abflusskurve eines Einzugsgebiets kann ein Spitzenabflussbeiwert berechnet werden. Bei der Modellierung mit Schwammstadtelementen ist der Spitzenabflussbeiwert variabel und abhängig von der Regenintensität. Tabelle 26 stellt den Spitzenabflussbeiwert der konventionellen Modellierung mit dem berechneten Spitzenabfluss bei der Modellierung mit Schwammstadtelementen gegenüber. Es werden Flachdächer, extensive und intensive Gründächer betrachtet. Bei Flachdächern ist bei einem 100-jährlichen Ereignis der Spitzenabflussbeiwert bei der konventionellen Modellierung und der Modellierung mit Schwammstadtelementen vergleichbar. Beim 10-jährlichen Ereignis ist der errechnete Spitzenabflussbeiwert bei allen Dachflächen deutlich tiefer als bei der konventionellen Modellierung. Das zeigt, dass vor allem beim 10-jährlichen Ereignis die Retentionsprozesse bei Dachflächen zur Dämpfung der Abflussspitze beitragen. Der mittlere Abflussbeiwert kann hingegen bei der Modellierung mit Schwammstadtelementen deutlich höher ausfallen als bei der konventionellen Modellierung: Für einen Betrachtungszeitraum von 48 Stunden erreichen die errechneten Werte beim 100-jährlichen 1-stündigen Regenereignis für ein extensives Gründach bis zu 95 %. Die Simulationsergebnisse und somit die errechneten Abflussbeiwerte sind stark abhängig von den gesetzten Anfangsbedingungen der Schwammstadtelemente. Daher sind die Anfangsbedingungen je nach Betrachtungsziel sorgfältig zu wählen.

Tabelle 26: Spitzenabflussbeiwerte bei konventioneller Modellierung (gemäss Suissetec, VSA 2012) und Modellierung mit Schwammstadtelementen (berechnet).

Dachaufbau	Regenereignis	Spitzenabflussbeiwert [%]	
		konventionell	Schwammstadtelementen
Flachdach	z = 10 a	100	60
	z = 100 a	100	100
Gründach extensiv	z = 10 a	70	15
	z = 100 a	70	50
Gründach intensiv	z = 10 a	40	5
	z = 100 a	40	45

4 Diskussion und Fazit

Bei der detaillierten Berücksichtigung von Schwammstadtelementen sinkt die Abflussspitze um 20 % beim 100-jährlichen Ereignis und um 50 % beim 10-jährlichen Ereignis gegenüber der konventionellen Modellierung. Durch die Integration von Schwammstadtelementen bei Starkregensimulationen wird der Abflussprozess exakter abgebildet und somit eine detaillierte Aussage zur Regenabwasserretention im Einzugsgebiet ermöglicht (Yang et al. 2021). Wie am Beispiel von Dachflächen gezeigt, generiert die Modellierung mit Schwammstadtelementen einen variablen Spitzenabflussbeiwert, weil die niederschlagsereignis-spezifischen Retentionsprozesse abgebildet werden können. Dies stellt einen Mehrwert für Behörden und Bauherren dar, da dadurch die Effekte von Schwammstadtmassnahmen für unterschiedliche Niederschlagsereignisse aufgezeigt werden können. Dies bietet einerseits Optimierungsmöglichkeiten bei der Auslegung der Kanalisation oder der Planung und Bewirtschaftung von Aussenbauwerken. Andererseits können durch Bilanzierungen die Auswirkungen auf den lokalen Wasserkreislauf aufgezeigt werden. Herausforderungen sehen wir bei der Festlegung der Anfangsbedingungen, sofern einzelne Starkregenereignisse isoliert betrachtet werden. Zudem ist die realitätsnahe Abbildung von Schwammstadtelementen mit einem erheblichen Aufwand, bspw. mit Abklärungen vor

Ort, verbunden. Deshalb sollte bei Projektbeginn das Vorgehen unter Berücksichtigung der Ziele und der Erwartungen an die Starkregensimulation gemeinsam mit dem Auftraggeber definiert werden.

5 Literatur

ETH Zürich (2022): Campus Höggerberg 2040.

<https://ethz.ch/en/campus/development/hoenggerberg.html>.

Gujer W. (2007): Siedungswasserwirtschaft. 3., bearbeitete Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Suissetec, VSA (2012): Anlagen für die Liegenschaftsentwässerung, SN 592 000.

Yang Y., Li J., Huang Q., Xia J., Li J., Liu D., Tan Q. (2021): Performance assessment of sponge city infrastructure on stormwater outflows using isochrone and SWMM models. Journal of Hydrology, 597.

Korrespondenz:

Magdalena Lukavsky
Hunziker Betatech AG
Pflanzschulstrasse 17
8400 Winterthur
+41 52 234 31 29

magdalena.lukavsky@hunziker-betatech.ch

Adrian Sigrist
Hunziker Betatech AG
Bellariastrasse 7
8002 Zürich
+41 52 234 50 95

adrian.sigrist@hunziker-betatech.ch

Radarbasiertes Kurzzeit-Niederschlagsvorhersagemodell von Starkregen in KIWaSuS

J. Koltermann da Silva¹, B. Burrichter¹, M. Quirnbach¹

¹ Hochschule Ruhr West, Duisburger Str. 100, 45479 Mülheim a. d. Ruhr, Deutschland

Kurzfassung: Für die Entwicklung des Niederschlagsvorhersagemodells im KIWaSuS-Projekt werden Verfahren des Maschinellen Lernens (ML) verwendet, um Kurzzeit-Niederschlagsvorhersagen anhand von Radardaten zu erzeugen. Besonderheiten bei der Datenverarbeitung für das ML-Modell und eine erste Modellarchitektur mit einem *Convolutional Neural Network* (CNN) werden präsentiert. Wegen der komplexen Eigenschaften des Datensatzes sind weitere Optimierungen beim Modellaufbau und bei der Datenverarbeitung nötig.

Key-Words: Niederschlag, Radardaten, Nowcasting, Maschinelles Lernverfahren

1 Einführung

Das zunehmende Auftreten von Starkregenereignissen ist eine Folge des Klimawandels, die besonders stark die Wasserwirtschaft beeinflusst. Im Juli 2021 haben die Starkregenereignisse in Nordrhein-Westfalen und in Rheinland-Pfalz flussbedingte Sturzfluten verursacht, die zu extremen Schäden geführt haben. Kanalinduzierte Überflutungen aufgrund von Starkregen können ähnlich große Schäden zur Folge haben, wenn sie in hochverdichteten urbanen Gebieten auftreten. Um das Sicherheitsrisiko für die betroffene Bevölkerung durch kanalinduzierte Überflutungen zu minimieren, wird im Rahmen des Forschungsprojektes KIWaSuS² (KI-basiertes Warnsystem vor Starkregen und urbanen Sturzfluten) ein Echtzeitwarn- und Echtzeitmanagementsystem für urbane Sturzfluten entwickelt.

Ziele des Forschungsprojekts sind, detaillierte und zeitnahe Informationen zu den Überflutungsflächen im Stadtgebiet für das kommunale Krisenmanagement bereitzustellen und die Vorwarnzeit zu erhöhen. Das ist bei kleinräumigen konvektiven Starkregenereignissen, die überwiegend in den Sommermonaten auftreten, eine große Herausforderung, die aktuell intensiv erforscht wird. Denn konvektive Starkregen zeichnen sich durch hoch dynamische Prozesse bezüglich der Entstehung und Entwicklung der Niederschlagszellen aus. Um dieser Problematik zu entgegen, wird ein Niederschlagsvorhersagemodell für Kurzzeit-Vorhersagen (Nowcasting) unter Einsatz von Verfahren der Künstlichen Intelligenz (KI) im KIWaSuS-Projekt (Quirnbach, 2021) entwickelt.

2 Nowcasting

Nowcasting ist die kurzfristige Niederschlagsvorhersage von bis zu zwei Stunden in der Zukunft. Mit der Einführung der Radartechnologie für Niederschlagsmessungen sind auch unterschiedliche Verfahren zur kurzfristigen Wettervorhersage entstanden (Pierce et al., 2012). Das bekannteste herkömmliche Verfahren von Nowcasting ist das Extrapolation-Verfahren (z. B. Ayzel et al., 2019a). In diesem Verfahren wird zunächst anhand vergangener Radarbildern ein Bewegungsvektor bestimmt, mit dem die Niederschlagszellen des letzten Radarbildes anschließend verlagert werden (reine Translation). Da diese Methodik Änderungen in den Niederschlagsintensitäten und in der räumlichen Ausdehnung der Regenzellen nur sehr begrenzt abbilden kann, stellt der Einsatz von Maschinellen Lernverfahren einen

² Weitere Informationen zum Projekt finden sich auf der KIWaSuS Homepage (www.kiwasus.de)

vielversprechenden Lösungsansatz dar, um genauere Prognosen zu erstellen. Dies konnte auch bereits in anderen Studien nachgewiesen werden (z. B. Shi et al., 2017 und Ravuri et al., 2021).

2.1 Radardaten als Eingabe und Zielgröße

Radardaten liefern flächendeckende und zeitlich hoch aufgelöste Niederschlagsmessungen. Durch den Radarverbund des Deutschen Wetterdienstes (DWD) steht seit 2000 in Deutschland eine Datenbank zur Verfügung, die für Modellierungen genutzt werden kann. Im KIWaSuS-Projekt werden Radardaten des DX-Produktes vom DWD (DWD, 2016) für den Radarstandort Essen als Eingabe in das Niederschlagsvorhersagemodell verwendet. Niederschlagsmessungen des DX-Produkts liegen nicht nur in einer 5-minütigen Auflösung als historischer Datensatz vor, sondern sie können auch auf dem Open Data Portal des DWD für die letzten 48 Stunden online abgerufen werden. Es handelt sich hierbei dennoch um Rohdaten und ihre Qualität ist von unterschiedlichen Fehlerquellen beeinflusst. Deswegen werden ergänzend aufbereitete Radardaten des DX-Offline-Produkts für den Radarstandort Essen für die Modellentwicklung verwendet.

Der DX-Offline-Datensatz ist das Ergebnis des DX-Offline-Projekts (Treis et al., 2016), in dem Daten des DX-Produkts für das Bundesland Nordrhein-Westfalen umfassend korrigiert und mit terrestrischen Messungen angeeicht wurden. DX-Offline-Daten liegen als historischer Datensatz vor und werden im KIWaSuS-Projekt für das Training des ML-Niederschlagsvorhersagemodells als Zielgröße eingesetzt. Das Modell soll Muster beim Entstehungs- und Entwicklungsprozess von Starkregenebenen erlernen, um im Echtzeitbetrieb auf Basis der DX-Produkt-Daten des DWD Starkregenereignisse mit einem Vorhersagehorizont von bis zu zwei Stunden vorherzusagen. Abbildung 100 stellt die Methodik für das ML-Modelltraining dar, wie sie zunächst bei der Modellentwicklung umgesetzt wird. Hier werden zwölf Radarbilder als Eingabe und zwölf Radarbilder als Zielgröße verwendet, was einem Vorhersagehorizont von einer Stunde entspricht. Eine Verlängerung des Vorhersagehorizonts mit einer Zunahme der Anzahl von Radarbildern als Zielgröße wird in der Zukunft angestrebt.

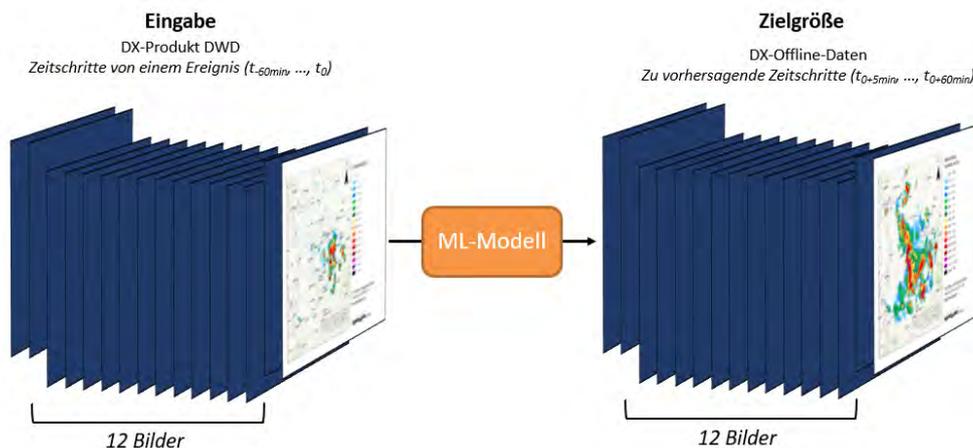


Abbildung 100: Methodik für das ML-Modelltraining

Der dargestellte Lösungsansatz für die Entwicklung des ML-Niederschlagsvorhersagemodells unterscheidet sich gegenüber anderen Untersuchungen in diesem Bereich, da hier zwei unterschiedliche Datensätze zum Modelltraining verwendet werden. Die Zielgröße des ML-Modells hat eine wesentlich höhere Datenqualität als die in Echtzeit verfügbaren Radardaten, was zu einer besseren Modellperformance beitragen soll.

2.2 Maschinelle Lernverfahren für Niederschlagsvorhersage

Im Bereich der Maschinellen Lernverfahren wird das Lernproblem der Niederschlagsvorhersage als Regression eingeordnet, was bedeutet: Die Vorhersage eines Werts oder einer Zeitreihe. Da Radardaten als Eingabe- und Zielgröße verwendet werden, soll das Modell eine Sequenz von Bildern (2D) analysieren und zeitliche sowie räumliche Zusammenhänge zwischen den Daten erlernen. Deswegen werden Verfahren des Deep Learnings für Bildverarbeitung (*Convolutional Neural Networks - CNN*) und gegebenenfalls für Prognosen von Zeitreihen (*Recurrent Neural Networks- RNN*) eingesetzt (Géron, 2019; Shi et al., 2017).

Als erste Modellarchitektur wird ein reines *Convolutional*-Modell trainiert, das auf dem Modell von Ayzel et al. (2019b) basiert. Da sich das Format und die Anzahl von Radarbildern für die Eingabe- und Zielgröße gegenüber dem Modell von Ayzel et al. (2019b) unterscheiden, wurden Conv3D-Schichten für den Modellaufbau ausgewählt, welche auch die zeitliche Dimension der Eingabe berücksichtigen können (Abbildung 101). Vorteil von solchen Modellen gegenüber Modellen mit RNN-Strukturen ist, dass sie weniger rechenintensiv sind, und deswegen als ML-Benchmark-Modell für Niederschlagsvorhersagen berücksichtigt werden können (Ayzel et al., 2019b).

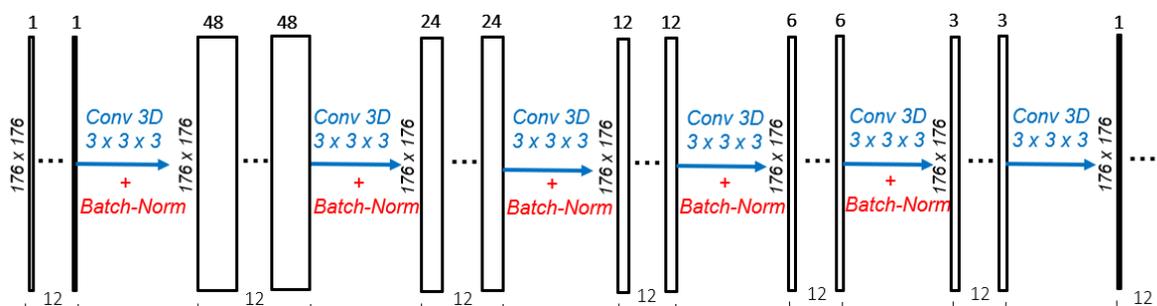


Abbildung 101: Modellarchitektur für ein 3D-CNN-Niederschlagsvorhersagemodell

Die Ausdehnung jedes Radarbilds ist $176 \text{ km} \times 176 \text{ km}$ zentriert auf dem Radarstandort in Essen. Die räumlichen Dimensionen der Radardaten werden beibehalten und die gesamten Dimensionen der Daten im Laufe des Modells werden nur durch die Anzahl der Filter in jeder Schicht geändert (48, 24, 12, 6, 3 und 1). *Batch-Normalization*-Schichten werden hinzugefügt, um die Optimierung des ML-Modells während des Trainings zu stabilisieren. Die Größe vom Kernel ($3 \times 3 \times 3$) wurde in Anlehnung an das Ergebnis von Ayzel et al. (2019b) ausgewählt.

3 Vorbereitung der Radardaten auf das ML-Modell

Das KIWaSuS-Projekt fokussiert sich auf konvektive Regenereignisse, die oft in den Sommermonaten auftreten, und die sich gegenüber stratiformen / advektiven Ereignissen durch einen unterschiedlichen Entwicklungsprozess auszeichnen. Es ist daher essenziell, das ML-Modell ausschließlich mit relevanten konvektiven Starkregenereignissen zu trainieren. Dafür wurde eine Methodik für die Identifizierung von Starkregenereignissen etabliert. Diese Methodik ermöglicht für die am Untersuchungsgebiet nächstliegende Niederschlagsstation, statistisch relevante Niederschlagsereignisse mit einer Wiederkehrzeit von mindestens drei Jahren und unterschiedlichen Dauerstufen zu identifizieren.

Um die Radardaten auf das für das ML-Modell geeignete Format zu bringen, sind unterschiedliche Vorverarbeitungsschritte nötig, die hier nicht weiter beschrieben werden. Die Vorverarbeitung der Radardaten einschließlich der Methodik für die Identifizierung der Starkregenereignisse ist ausführlich in Koltermann da Silva et al. (2022) dargestellt. Des Weiteren sind für das Modelltraining die Qualität und die Verteilung der Eingabedaten relevant, welche nachfolgend beschrieben werden.

3.1 Korrektur der Roh-Radardaten

Zu den unterschiedlichen Fehlerquellen, die die Qualität der Radardaten beeinflussen, gehört das Auftreten von Fehlsignalen bei der Radarmessung. Diese stellen eine weitere Anforderung an das Modell, da das Modell in diesem Fall selber Fehlsignale von richtigen Niederschlagsdaten unterscheiden soll. Das erfordert einen sehr komplexen Modellaufbau, wodurch die Anzahl der geeigneten ML-Verfahren stark eingeschränkt wird.

Um diese Einschränkung zu vermeiden und die Qualität der Prognosen zu verbessern, werden die Radardaten des DX-Produkts vom DWD mit frei verfügbaren und in Python-Package *wradlib* (Heistermann et al., 2013) implementierten Verfahren korrigiert. Festziel-, Boden- und dynamische Echos werden damit weitestgehend eliminiert und Dämpfungseffekte werden minimiert. Der Ablauf der Datenkorrektur ist in Abbildung 102 gegeben, und soll sowohl für den historischen Datensatz als auch im Echtzeit-Betrieb durchgeführt werden. Der komplette Korrekturablauf dauert nur wenige Sekunden und beeinträchtigt dadurch nicht die Erstellung von Vorhersagen im Echtzeit-Betrieb.

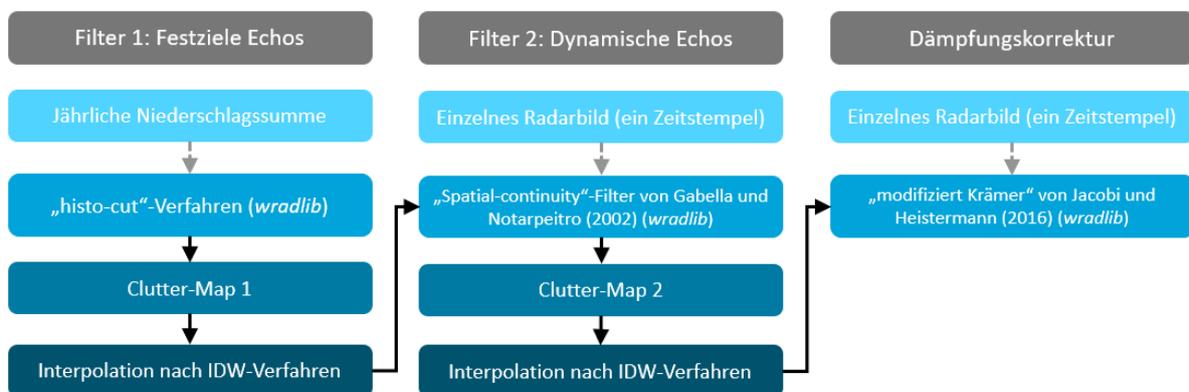


Abbildung 102: Ablauf der Datenkorrektur für die Radardaten des DX-Produktes vom DWD

3.2 Analyse der Datenverteilung

Die Ausdehnung des Radarbilds entspricht einem Radius von 80 km um den Radarstandort herum. Da Sommerereignisse sich durch kleinräumige Regenzellen auszeichnen, können Radarmessungen viele Null-Werte enthalten. Auch wenn eine Identifizierung von Radarbildern mit relevanten Ereignissen durchgeführt wurde, ist die Anzahl von Pixeln mit irrelevanten Werten in diesen Radarbildern noch sehr hoch (Tabelle 7). Der Datensatz weist dadurch eine rechtsschiefe Verteilung auf, wobei der häufigste Wert sich in der ersten Klasse der Tabelle (zwischen 0 und 0,15 mm/h) befindet.

Tabelle 27: Analyse der Datenverteilung für den Datensatz mit DX-Daten vom DWD

Wert des Pixels in Niederschlagsintensität [mm/h]	Anzahl von Pixeln in Prozent [%]
$\leq 0,15$	89,83
$> 0,15$ und $\leq 1,0$	6,22
$> 1,0$ und $\leq 2,5$	2,19
$> 2,5$ und $\leq 7,0$	1,23
$> 7,0$ und $\leq 50,0$	0,49
> 50	0,04

Das ist ungünstig für das ML-Modelltraining, weil das ML-Modell fälschlicherweise eine größere Relevanz für die häufigsten Werte berücksichtigt. Die Daten müssen dann weitestgehend transformiert werden, um diesen Effekt zu minimieren (Géron, 2019). Außerdem kann die Funktion für die Modelloptimierung (Fehlerfunktion) angepasst werden, um größere Gewichte für die Pixel mit relevanten Werten anzulegen (Shi et al., 2017). Die beiden Ansätze werden in weiteren Analysen bei der Modellentwicklung untersucht.

4 Schlussfolgerung und Ausblick

Die präsentierte Modellarchitektur wurde bereits für ein paar Iterationen trainiert, ein umfangreiches und abschließendes Training der Modelle steht aber noch aus. Deswegen konnte bisher auch keine quantitative Auswertung der Ergebnisse durchgeführt werden. Zwischenergebnisse zeigen dennoch, dass der Einsatz von Maschinellen Lernverfahren in der Niederschlagsvorhersage für den Anwendungsfall im KIWaSuS-Projekt sehr vielversprechend ist. Nach einer qualitativen visuellen Auswertung der ersten Ergebnisse kann festgestellt werden, dass auch eine Architektur ohne RNN-Strukturen die Ausdehnung der Niederschlagszellen abbilden kann.

Die Korrektur der Radardaten vor der Eingabe in das ML-Modell hat erfolgreich Fehlsignale aus den Rohdaten entfernt, sodass diese bereits beim aktuellen Trainingsstand nicht in den Prognosen erscheinen. Der Einfluss der rechtsschiefen Datenverteilung wird noch weiter analysiert, indem Datentransformationen getestet werden sollen, wie z.B. Log-, Quadratwurzel- und Kubikwurzel-Transformation. Ziel ist es, festzustellen, welche Transformation die beste Niederschlagsvorhersage ermöglicht. Außerdem wird eine gewichtete Fehlerfunktion in weiteren Analysen eingesetzt, wie bereits im vorherigen Kapitel angedeutet.

Andere Deep Learning Modellarchitekturen, wie eine Encoder-Decoder-Struktur (z.B. U-Net) und Architekturen mit convLSTM-Schichten, werden künftig ebenfalls untersucht. Die Vorhersagegenauigkeit wird dann mit geeigneten Gütekriterien bewertet. Es wird erwartet, dass die Verfahren gegenüber den klassischen Extrapolations-Verfahren bessere Ergebnisse liefern. Da die Modellentwicklung auch die Bestimmung der besten Hyperparameter umfasst, werden unterschiedliche Kombinationen von Modellarchitekturen und zugehörigen Hyperparametern analysiert.

5 Danksagung

Ein besonderer Dank gilt dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), das das Projekt KIWaSuS im Rahmen der BMBF-Förderrichtlinie: „Künstliche Intelligenz in der zivilen Sicherheitsforschung“ im Programm „Forschung für die zivile Sicherheit 2018 bis 2023“ unter dem Förderkennzeichen 13N15556 fördert.

6 Literatur

Ayzel G., Heistermann M. und Winterrath T. (2019a): Optical flow models as an open benchmark for radar-based precipitation nowcasting (rainymotion v0.1). Geosci. Model Dev. 12, 1387-1402, DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-12-1387-2019>.

Ayzel G., Heistermann M., Sorokin A., Nitikin O. und Lukyanova O. (2019b): All convolutional neural networks for radar-based precipitation nowcasting. Procedia Computer Science 150, 186-192.

Deutscher Wetterdienst (2016): Standortprodukt DX – Informationen zum Standortprodukt DX. Online verfügbar unter: https://www.dwd.de/DE/leistungen/radarprodukte/standortprodukt_dx.html, zuletzt geprüft am 01.03.2022.

- Géron A. (2019): Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras and TensorFlow. O'Reilly Media, Inc., Sebastopol, CA, USA. ISBN: 978-1-492-03264-9.
- Heistermann M., Jacobi S. und Pfaff T. (2013): Technical Note: An open source library for processing weather radar data (wradlib). Hydrol. Earth Syst. Sci. 17, 863-871, DOI:10.5194/hess-17-863-2013.
- Koltermann da Silva J., Burrichter B., Quirnbach M. (2022): Vorhersagemodelle in KIWaSuS: Vorverarbeitungsschritte für die Entwicklung von KI-Modellen. Im Wandel - Klima, Wasser und Gesellschaft: Prozesse – Methoden – Kommunikation. Beiträge zum Tag der Hydrologie am 22./23. März 2022 in München. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 43.22, 81-90.
- Pierce C., Seed A., Ballard S., Simonin D. und Zhihong L. (2012): Nowcasting, in: Doppler Radar Observations – Weather Radar, Wind Profiler, Ionospheric Radar, and Other Advanced Applications, Dr. Joan Bech (Ed.), ISBN: 978-953-51-0496-4, InTech. Online verfügbar unter: <http://www.intechopen.com/books/dopplerradar-observations-weather-radar-wind-profiler-ionospheric-radar-and-other-advancedapplications/nowcasting>.
- Quirnbach M. (2021): KIWaSuS – KI-basiertes Warnsystem vor Starkregen und urbanen Sturzfluten. KW Korrespondenz Wasserwirtschaft, 14 (6), 349-350.
- Ravuri S., Lenc K., Willson M., Kangin D., Lam R., Mirowski P. et al. (2021): Skilful precipitation nowcasting using deep generative models of radar. Nature, 597, 672-677, DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03854-z>.
- Shi X., Gao Z., Lausen L., Wang H., Yeung D., Wong W., Woo W. (2017): Deep Learning for Precipitation Nowcasting: A Benchmark and A New Model. 31st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017), Long Beach, CA, USA.
- Treis A., Einfalt T., Weigl E., Keller T., Gattke C., Kaiser, M. et al. (2016): Kombination hochaufgelöster Radarniederschlagsinformationen und terrestrischer Ombrome-terdaten – Ergebnisse des DX-Offline Projektes der Wasserverbände NRW mit dem Deutschen Wetterdienst. KW Korrespondenz Wasserwirtschaft, 9 (4), 233-242.

Korrespondenz:

Juliana Koltermann da Silva
 Duisburger Str. 100
 45479 Mülheim a. d. Ruhr
 Deutschland
 Tel: +49 [0]208 882 54 – 313
 E-Mail: Juliana.KoltermanndaSilva@hs-ruhrwest.de

Simulierter Feldtest zur Leistungsprüfung von technischen Adsorberanlagen

F. Keller¹, M. Patrick¹, A. Zenker², M. Burkhardt¹

1 OST – Ostschweizer Fachhochschule, Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik (UMTEC),
Oberseestrasse 10, 8640 Rapperswil, Schweiz

2 FHNW - Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut für Ecopreneurship,
Hofackerstrasse 30, 4132 Muttenz, Schweiz

Kurzfassung: Für Adsorberanlagen, die zur Reinigung von Dach-, Fassaden-, Platz- und Liegenschaftswasser eingesetzt werden, wurde im Technikums-Massstab ein neues Prüfverfahren entwickelt. Es gilt als ebenbürtig zur VSA-Feldprüfung. Ermittelt werden dabei die stoffliche und hydraulische Leistungsfähigkeit, indem beispielsweise der Rückhalt von Partikeln, Schwermetallen und Spurenstoffen sowie die Remobilisierung durch Tausalz bestimmt werden.

Key-Words: Strassenabwasser, Adsorberanlagen, Leistungsprüfung, Spurenstoffe, Schwermetalle

1 Hintergrund

Niederschlagsabwasser von Dächern, Fassaden, Strassen und Plätzen kann je nach Nutzung, Einzugsgebiet oder Verkehrsbelastung mit Partikeln, Schwermetallen und Spurenstoffen wie Industriechemikalien oder Pestiziden belastet sein. Massnahmen zur Vermeidung und Verminderung von Abfluss und Belastung des Niederschlagswassers sind daher wichtig und in der VSA-Richtlinie "Abwasserbewirtschaftung bei Regenwetter" als sogenannte "Priorität 0" integriert (VSA, 2019a). Vor dem Hintergrund, dass Schwammstadt-Konzepte zunehmend auf die Versickerung von Strassenabwasser in Pflanzgruben fokussieren, kommt wahrscheinlich Adsorbersubstraten eine besondere Bedeutung zu (Burkhardt, 2022).

Belastetes Niederschlagsabwasser ist gemäss Schweizer Gewässerschutzgesetzgebung sowie VSA-Richtlinie vor der Einleitung in ein Oberflächengewässer oder der Versickerung ins Grundwasser zu behandeln. In der VSA-Richtlinie sind in Abhängigkeit von der Belastungshöhe Wirkungsgrade für die Direkteinleitung und Versickerung vorgegeben.

Zur Entfernung der Schadstoffe können dezentrale technische Behandlungsanlagen (Adsorberanlagen) wie Schacht- und Rinnensysteme eingesetzt werden. Durch vergleichbare, unabhängige Informationen zur Leistungsfähigkeit lassen sich individuelle Leistungskontrollen vermeiden und der Planungs- sowie Bewilligungsprozess vereinfachen.

In der Schweiz ist als Leistungsnachweis für Adsorberanlagen gegenwärtig ein Feldtest an zwei Standorten vorgesehen (VSA, 2019b).

2 Ziele und Vorgehen

Entwickelt wurde ein simulierter Feldtest im Technikums-Massstab, um die hydraulische und stoffliche Leistungsfähigkeit für partikuläre Stoffe (GUS), Schwermetalle und Pestizide von markttypischen technischen Behandlungsanlagen unter reproduzierbaren Bedingungen zu ermitteln (VSA, Entwurf). Damit

lassen sich die Unwägbarkeiten unter Feldbedingungen (Witterungsverlauf, Stoffbelastung etc.) vermeiden, aber trotzdem hydraulische und stoffliche Belastungssituationen aus dem Feld nachvollziehbar abbilden.

3 Neu entwickeltes Prüfkonzept

Der simulierte Feldtest ist für dezentrale technische Kompaktanlagen, Schacht- und Rinnensysteme anwendbar, die für den Rückhalt von partikulären und/oder gelösten Stoffen aus Niederschlagsabwasser entwickelt sind. Solche Anlagen zeichnen sich durch eine standardisierte Bauweise und definierte Verfahrensprinzipien aus (z.B. Filtration, Adsorption). Das Prüfkonzept deckt fünf Einsatzbereiche ab, welche sich mit der VSA-Liste decken und um die Kategorie "Gleisentwässerung" erweitert wurden, weil technische Kompaktanlagen durchaus zur Behandlung von Gleisabwasser geeignet sein können.

1. Dächer oder Fassaden mit üblichem oder erhöhtem Metallanteil (beschichtet, unbeschichtet)
2. Dächer oder Fassaden mit pestizidhaltigen Materialien
3. Umschlag-, Lager-, Parkplätze und Strassen
4. Gemischtes Siedlungseinzugsgebiet
5. Entwässerung von Gleisanlagen

Der Hersteller legt die jeweiligen Einsatzbereiche der Anlage gemäss vorliegender fünf Flächenkategorien fest (**Error! Reference source not found.**).

3.1 Aufbau des Prüfanordnung

Die Prüfanordnung besteht aus einem Vorlagebehälter (Wasserspeicher), Zulaufpumpe, Durchflussmesser, Dosiereinheit, statischem Mischer und der zu prüfenden Anlage, wie sie vom Hersteller in der Praxis vorgesehen ist (Abb. 1). Der pH-Wert des Leitungswassers sollte über die gesamte Prüfdauer zwischen pH 6 und 7,5, die elektrische Leitfähigkeit zwischen 100 und 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ und die Konzentration von Kupfer und Zink $< 10 \mu\text{g}/\text{L}$ liegen (Blindwertkontrollen). Der pH-Wert, die Leitfähigkeit und die Temperatur werden vor der Dosierung (im Vorlagetank), nach der Dosierung und nach der Adsorberanlage kontinuierlich gemessen und aufgezeichnet.

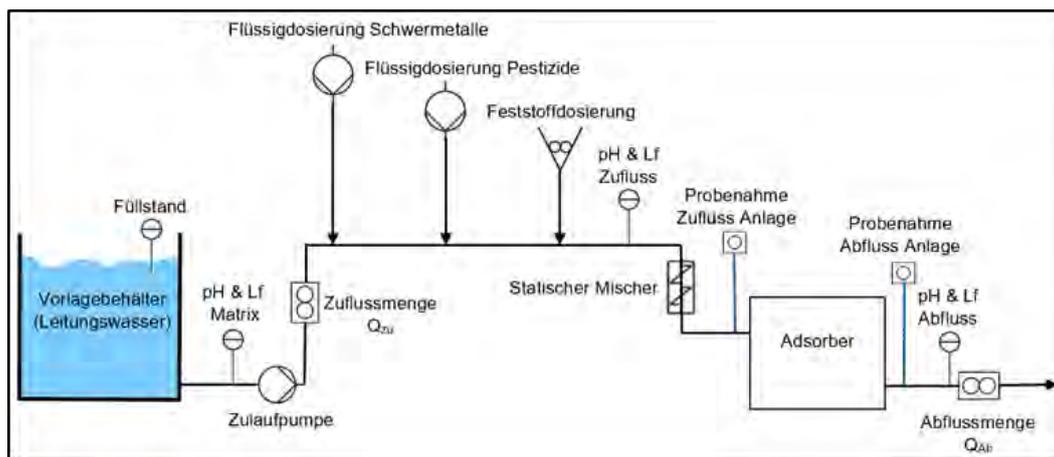


Abbildung 103: Schema zur baulichen Ausgestaltung des Prüfkonzeptes mit der Adsorberanlage.

3.2 Durchführung

Der simulierte Feldtest umfasst eine Inbetriebnahme, Standard-Prüfung, um den hydraulischen und stofflichen Wirkungsgrad zu bestimmen, sowie eine Dachwasser-Prüfung, mit einer Gesamtdauer von einem knappen Jahr (Abb. 1):

- Inbetriebnahme (IT1): Tests zur Orientierung, 3 Prüfrengenspenden (nicht bewertungsrelevant)
- Standard-Prüfung: Stoffrückhalt basiert auf drei Prüfblöcken (SP1, SP2, SP3) von je 10 Wochen Dauer mit insgesamt 63 Prüfrengenspenden, zwei hydraulischen Tests und einem Remobilisierungs-Test (1 Prüfrengenspende)
- Dachwasser-Prüfung: Ein Prüfblock (DP1) über 6 Wochen mit 9 Prüfrengenspenden.

Bei der Durchführung sind drei verschiedenen starke Prüfrengenspenden (Starkregen, Landregen, Kleinregen) in unterschiedlicher Anzahl und Abfolge berücksichtigt. Ein Starkregen korrespondiert bei einer Anschlussfläche von 500 m² mit 5.6 l/s (112 l/s ha) über 20 min, ein Landregen mit 2.8 l/s (56 l/s ha) über 60 min und ein Kleinregen mit 0.7 l/s (14 l/s ha) über 120 min. Die zu Grunde gelegten Prüfrengenspenden wurden aus Niederschlagsstatistiken für verschiedene Regionen der Schweiz empirisch hergeleitet.

Als Leitsubstanz für den Stoffrückhalt der gesamten ungelösten Stofffraktion (GUS), bzw. der partikulären Stoffe, wird das Quarzmehl "Millisil W 4" (Quarzwerke GmbH) gewählt. Zu den testrelevanten gelösten Stoffen zählen Kupfer und Zink sowie Mecoprop (Leitsubstanz für mobile Spurenstoffe) und Diuron (Leitsubstanz für geringe Mobilität und damit gut adsorbierende Spurenstoffe) jeweils in gelöster Form.

Bei der Inbetriebnahme wird mit einem Salzversuch das effektive Austauschvolumen der Adsorberanlage bestimmt. Die Kenntnis des Austauschvolumens ist Voraussetzung für eine optimale Auslegung der Probenahme. Mit den in Stark-, Land- und Kleinregen dosierten Stoffen GUS, Schwermetalle und Pestizide wird die grundsätzliche Anlagencharakteristik erfasst.

Die Zulaufkonzentrationen der Inbetriebnahme und bei der Standard-Prüfung belaufen sich auf je 0.2 mg/L Kupfer, Zink, Mecoprop und Diuron sowie 150 mg/L GUS (W4). Die Konzentrationen liegen im Bereich von quellennahen Konzentrationen im Feld und sind anspruchsvoll zu eliminieren (verglichen mit hohen Zulaufkonzentrationen). Auch ist damit sichergestellt, dass sich unter Berücksichtigung gängiger Bestimmungsgrenzen ein Wirkungsgrad von mindestens 99 % analytisch eindeutig nachweisen lässt. In SP2 wird nur W4 zugegeben, um die mögliche Kolmationsanfälligkeit der Anlagen vertieft zu überprüfen. Bei einer Anschlussfläche von beispielsweise 500 m² resultieren aus allen Prüfrengenspenden eine Zulauffracht von 60 kg GUS und 53 g pro gelöstem Stoff (Cu, Zn, MCP, Diuron). Wird die festgelegte GUS Fracht mit dem flächenspezifischen Stoffabtrag für AFS63 gemäss DWA-A 102-2 verglichen, der zwischen jährlich 28 g/m² a (Kategorie I) und 760 g/m² a (Kategorie III) liegt, sind mit der GUS-Menge zwei bis vier Jahre abgedeckt.

Bei den beiden hydraulischen Tests wird die Prüfrengenspende Landregen (SP2) für 5 Minuten simuliert und anschliessend die Intensität schrittweise bis zum Überlaufen der Anlage erhöht.

Der Remobilisierungs-Test mit Tausalz am Ende der Standard-Prüfung dient dazu, den remobilisierbaren Stoffanteil über ein simuliertes Landregenereignis zu ermitteln.

In der Dachwasser-Prüfung werden die gelösten Stoffe mit 1 mg/L dosiert und GUS bleibt unberücksichtigt, ebenfalls um in Konzentrationshöhe und Matrix dicht an der Realität zu liegen.

Zwischen den Prüfblöcken SP1, SP2 und SP3 sowie der Dachwasser-Prüfung sind jeweils Trockenwetterzeiten festgelegt, da auch in der Realität regenfreie Zeiten auftreten und die Anlagenleistung beeinflussen können. Die modulare Einteilung ermöglicht eine flexible Leistungsprüfung und allfällige Unterbrüche.

3.3 Probenahme und Beurteilung der Leistungsfähigkeit

Die Probenahme erfolgte über die gesamte Leistungsprüfung unmittelbar vor der Anlage und im Ablaufwasser (Abb. 1). Da die Zulaufkonzentrationen pro Ereignis konstant sind, reichen Stichproben aus. Die Proben werden 5 min vor Ende der Beschickung genommen. Darauf zu achten ist, dass bis zum

Zeitpunkt der Probenahme mindestens ein Austauschvolumen, welches bei der Inbetriebnahme durch den Salzversuch ermittelt wurde, durch die Versuchsanlage gegangen ist. Die Ergebnisse werden fortlaufend, mindestens nach SP1, SP2 und SP3 mit dem jeweiligen Hersteller besprochen.

In den noch laufenden Prüfungen zeigt sich, dass die Anlagen genau wie in der Realität auf die unterschiedlichen Wasserkontaktzeiten und je Stoffgruppe mit unterschiedlichen Eliminationen pro Regenspende reagieren (Abb. 2). So werden Stoffe bei Starkregen tendenziell schwächer zurückgehalten als bei Land- oder Kleinregen. Dies Verhalten ist auch aus der realen Anwendung bekannt, weil die Wasserkontaktzeiten bei hohem Wasserfluss geringer als bei langsam sind. Dies Verhaltensmuster gelöster Stoffe ist auch aus Untersuchungen für Bodenfilter bekannt. In der Leistungsprüfung fließen die Proben frachtgemittelt in die Leistungsbeurteilung ein.

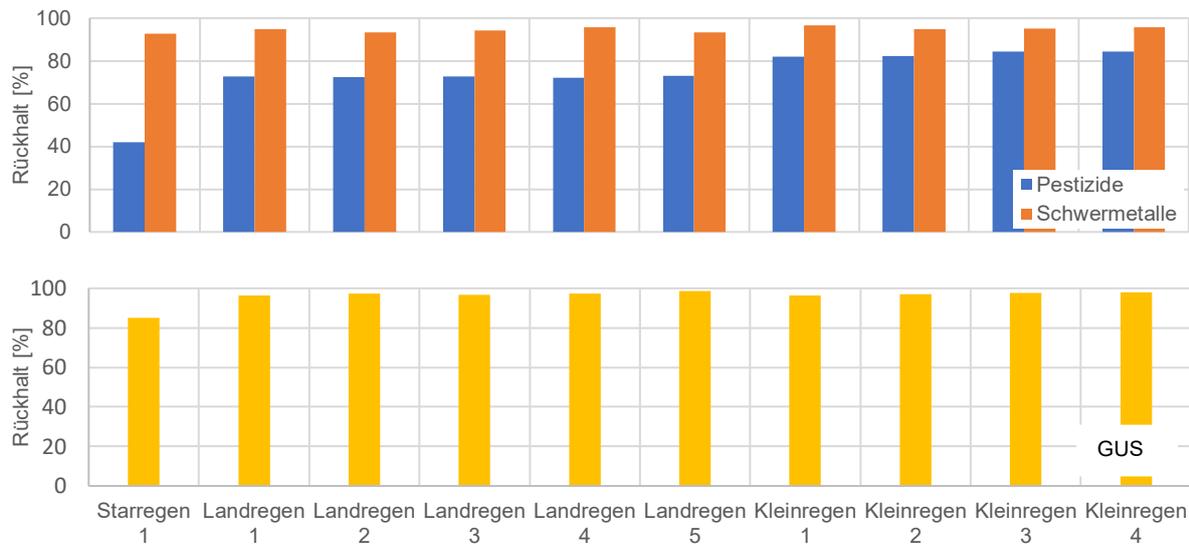


Abbildung 104: Rückhalt von Schwermetallen und Pestiziden (oben) und GUS (unten) über 10 Ereignisse in Prüfblock SP1 der Standard-Prüfung für zufällig ausgewählte Anlagen.

Der Stoffrückhalt in der Standard-Prüfung wird aus den frachtgemittelten Zu- und Ablaufkonzentrationen von 63 Prüfregenspenden für partikuläre Stoffe (GUS), Schwermetalle (Kupfer, Zink) und Pestizide (= Spurenstoffe; Mecoprop, Diuron) berechnet. Die analysierten Proben decken 62 % der dosierten Stofffracht ab.

Die Einordnung des stofflichen Wirkungsgrads erfolgt hinsichtlich der Anforderungen "Standard" (70-90% Wirkungsgrad) und "Erhöht" (> 90 % Wirkungsgrad) (VSA, 2019b) unter Beachtung der zugeordneten der Anwendungsbereiche (Flächenkategorien).

Der hydraulische Wirkungsgrad wird zu Beginn und am Ende der Standard-Prüfung ermittelt. Der Wirkungsgrad soll > 90 % betragen. Gegenwärtig laufen noch Diskussionen, wie eine allfällige Verschlechterung in die Gesamtbewertung einzubeziehen ist.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Zukünftig ist ein Leistungsnachweis für Adsorberanlagen mit dem simulierten Feldtest unter reproduzierbaren Bedingungen und klar festgelegten Zulauffrachten möglich. Dieser ist gleichwertig zum Feldtest. Das Prüfkonzept wird voraussichtlich im Sommer 2023 veröffentlicht (VSA, Entwurf).

Die entwickelte simulierte Feldprüfung orientiert sich bei den Konzentrationshöhen der dosierten Stoffe und den simulierten Regenereignissen stark an der Realität. Damit soll eine hohe Übertragbarkeit der Resultate in die Praxis erreicht und hohe Akzeptanz bei bewilligenden Fachstellen erreicht werden. Die Anforderungen wie Prüfdauer sowie hydraulische und stoffliche Belastungen gehen über die Prüfbedingungen vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) hinaus.

Gegenwärtig befinden sich sechs Anlagentypen, darunter zwei Rinnen und vier Schachtsysteme, die allesamt neuartige Anlagenkonzepte verfolgen, in der Leistungsprüfung. Die erfolgreich geprüften Adsorberanlagen werden in der Liste A "Technische Kompaktanlagen (Adsorber)" auf der Homepage des VSA aufgeführt (<https://vsa.ch/fachbereiche-cc/siedlungsentwaesserung/regenwetter/adsorber>). Erwartet wird der Abschluss der gesamten Prüfserie und Beurteilung im Mai 2023.

5 Danksagung

Das noch laufende Projekt wird unterstützt durch das Schweizer Bundesamt für Umwelt (BAFU), Umwelttechnologieförderung, und den Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute (VSA) und unter Beteiligung von den sechs Herstellern ACO AG, CREABETON BAUSTOFFE AG, 3P Technik Filtersysteme GmbH, Funke Kunststoffe GmbH, Mall Umweltsysteme AG und REHAU Vertriebs AG durchgeführt.

6 Literatur

Burkhardt, M., Kulli, B., Saluz, A. (2022): Schwammstadt im Strassenraum – Neue Herausforderungen für blau-grüne Infrastrukturen bei der Strassenentwässerung. Aqua und Gas, 10, 16-29.

VSA (Entwurf): Merkblatt - VSA Leistungsprüfung von Behandlungsanlagen: Simulierter Feldtest. Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute, Glattbrugg, Schweiz.

VSA (2019a): Abwasserbewirtschaftung bei Regenwetter. Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute, Glattbrugg, Schweiz.

VSA (2019b): Merkblatt - VSA Leistungsprüfung für Behandlungsanlagen. Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute, Glattbrugg, Schweiz.

Korrespondenz:

Michael Burkhardt, Prof. Dr.
OST – Ostschweizer Fachhochschule
Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik (UMTEC)
E-Mail: michael.burkhardt@ost.ch

Untersuchung des Oberbodens einer mittel- bis hochbelasteten Grünmulde

C.-Huwe¹,

¹ HAURATON GmbH & Co.KG, Werkstraße 13, 76437 Rastatt, Deutschland

Kurzfassung: Grünmulden bilden wichtige multifunktionale Elemente zur Behandlung und Versickerung von Niederschlagsabflüssen. Eine Untersuchung an einer Grünmulde zeigt, dass selbst bei regelgerechter Anlage nach DWA-A 138, zulaufnah eine Schadstofftiefenverlagerung mit Überschreitung von Grenzwerten (Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) Anhang 2 Nr. 4) auftreten kann. Ein Oberbodenersatz durch Filtersubstrate gemäß dem Arbeitsblatt für Retentionsbodenfilteranlagen DWA-A 178 könnte hier Abhilfe schaffen.

Key-Words: Grünmulde, Schadstofftiefenverlagerung, technische Filtersubstrate, Bodenschutz, Grundwasserschutz

1 Veranlassung

Nach dem Regelwerk DWA-A 138 (2008) sind Versickerungsanlagen Abwasseranlagen. Der Boden in diesen Anlagen und die zurückgehaltenen Stoffe sind Teile dieser Abwasseranlagen. Hierbei wird zum Boden- und Gewässerschutz auf die Abwägung im Sinne der Verhältnismäßigkeit zwischen dem Schutzanspruch von Böden und dem Nutzungsanspruch an die Böden verwiesen. Gleichzeitig ist die Anreicherung von Belastungsstoffen unter Berücksichtigung des Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBodSchG) und der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) kritischer als bisher zu sehen und zu minimieren.

Eine Überwachung der Auswirkung von Niederschlagsabflüssen auf Böden und Grundwasser ist bei hydraulisch und stofflich hoch belasteten Versickerungsanlagen empfohlen, sollte jedoch dem Grundsatz der Verhältnismäßigkeit folgen und könnte durchaus alle 5 bis 10 Jahre erforderlich werden.

Letztgenannten Maßgaben entsprechend wurde der untersuchten Grünmulde im Jahr 2006 neben den Vorgaben für deren Errichtung mit den Vorgaben zur Eigenkontrolle, Probenahme und zunächst 5-jähriger Überwachung die wasserrechtliche Erlaubnis gewährt.

Im Rahmen der Eigenüberwachung wurde im Jahr 2015 eine fortschreitende Tiefenlagerungen von Schwermetallen an den Einlaufpunkten ersichtlich. Zur Ermittlung erforderlichen Handlungsbedarfs wurden im Jahr 2020 am Einlaufpunkt 2 die zulaufnah Bodenuntersuchungen (1 m) bis auf 50 m Entfernung ausgeweitet.

2 Untersuchte Grünmulde

2.1 Regelwerksanforderung Oberbodenschicht

Die Grünmulde wurde gemäß den wasserrechtlichen Vorgaben nach den Anforderungen im Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 138 mit einer bewachsenen Bodenzone von 0,30 m Mächtigkeit erstellt, wobei nach zusätzlicher Maßgabe der k_f -Wert dieser Schicht 10^{-4} m/s nicht überschreiten darf. In Baden-Württemberg gelten ergänzend die Arbeitshilfen für den Umgang mit Regenwasser. Für einen gezielten Stoffrückhalt soll die Oberbodenschicht bestimmte Qualitätsmerkmale aufweisen:

- ein pH-Wert > 6
- ein Tongehalt von 5 – 20 %
- ein ausreichender Humusgehalt von 2 -10 %
- ein Durchlässigkeitsbeiwert k_f zwischen 10^{-3} und 10^{-6} m/s

2.2 Lage, Belastung und Bemessung

Die Grünmulde liegt in einem Wasserschutzgebiet III B südlich Rand eines Werksgeländes und verfügt über 396 m² Grundfläche (A_s) und 1,0 m Einstauhöhe. Die Grünmulde wird über 2 Zuläufe von einem daran angeschlossenen 7236 m² umfassenden, abflusswirksamen Entwässerungsflächenanteil (A_u) gespeist.

Der Zulauf 2 speist einen langgestreckten schmalen Abschnitt, während Zulauf 1 einen quadratischen Abschnitt der Grünmulde beschickt. Der Zulauf 1 entspringt einer LKW-Wartefläche mit 8 Stellplätzen vor der Zufahrt in das Werksgelände. Der Zulauf 2 erhält die Oberflächenabflüsse vom Verladeflächenbereich für 8 LKW mit Staplerverkehr aus dem Werksgelände. Beiden Zuläufen ist jeweils ein Leichtflüssigkeitsabscheider vorgeschaltet.



Abbildung 1: Größe und räumliche Lage von Entwässerungsfläche und Grünmulde

Die Bemessung basiert auf einem Regenereignis, welches nur einmal in 10 Jahren vorkommt. Dafür, werden mit einem rechnerisch angesetzten k_f -Wert von $5,0 \times 10^{-4}$ m/s bei 0,73 m Einstauhöhe 396 m² Sickerfläche (A_s) benötigt.

3 Entnahme der Bodenproben

Um den Bereich der während der Eigenüberwachung festgestellten Tiefenverlagerung (Fader, 20.04.2020) am Einlauf 2 horizontal und vertikal einzugrenzen, wurden am 22.07.2020 zusätzliche Bodenproben im Abstand von 6 m und 11 m Abstand entnommen (Fader, 20.08.2020). Als Leitparameter diente wurden hierfür die Konzentrationen des Schwermetalls Zink herangezogen.

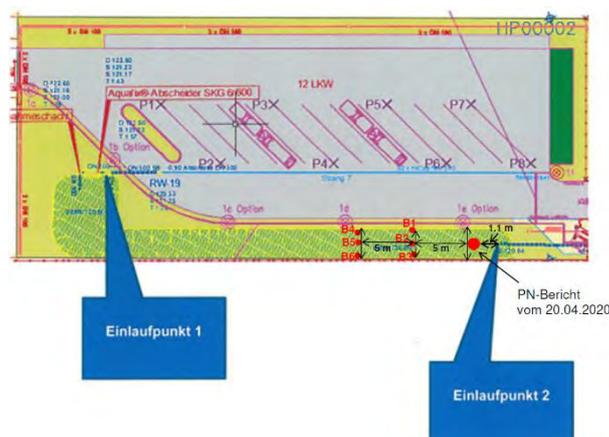


Abbildung 2: Übersicht Probenahmestellen

Im Rahmen der alle 5 Jahre stattfindenden Eigenkontrolle mit Probenahme zur Überwachung der Versickerungsanlage wurden im Jahr 2020 auch in tieferen Bodenschichten stark erhöhte Schwermetallkonzentrationen am Zulauf 2 festgestellt (IB FADER Umweltanalytik Bericht vom 20.04.2020). Es fanden sich im Oberboden Zinkgehalte bis zu 1382 mg/kg und in 30 – 60 cm Tiefe bis zu 234 mg/kg. In beiden Horizonten wurde der Vorsorgewert (Sand) gemäß Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) von 60 mg/kg überschritten.

Zur horizontalen und vertikalen Eingrenzung des belasteten Bereichs wurden am 22.07.2020 ergänzende Untersuchungen der Versickerungsmulde ausgeführt. Dazu wurden an der Muldensohle zwei Kreisbögen mit jeweils drei Probenahmestellen im Abstand von jeweils fünf Metern um den Einlaufbereich 2 gebildet. Die Lageplanskizze (Abbildung 2) zeigt die Probenahmestellen B 1 bis B 6 vom 22.07.2022 zusammen mit der Probenahme fläche vom 31.03.2020.

Ergänzend wurde am 29.10.2020 im Abstand von 4 m und 50 m vom Zulauf 2 auch in 0,6 - 0,9 m Tiefe die Zinkbelastung erfasst. (Tabelle 1). Dafür wurden Profile bis auf 0,60 m Tiefe gegraben und händisch jeweils 3 Proben für eine Mischprobe aus den Bodenschichten 0,00 – 0,30 m, 0,30 – 0,60 m entnommen. Für die Probenahme aus der Schicht 0,60 – 0,90 m wurde jeweils eine Mischprobe aus 9 Bohrstockproben aus der Grundfläche des gegrabenen Profils erstellt.



Abbildung 2: Entnahme von 9 Bohrstockproben aus 0.60 – 0.90 m Tiefe jeweils aus beiden Profilen

4 Ergebnisse

4.1 Beurteilung des Oberbodens

Eine Überprüfung der bei der Errichtung der Grünmulde geforderten Qualitätsmerkmale im Jahr 2020 ergab folgende Werte:

- ein pH-Wert Bereich von 6.5 – 6.9
- ein CaCO₃-Gehalt von 0,77% zulauffern und 1,0 – 1,4 % zulaufnah
- ein Glühverlust von 2,33 % zulauffern
- ein Durchlässigkeitsbeiwert von $1,2 \times 10^{-4}$ m/s (Messung mit Einring Infiltrimeter)

Eine Fingerprobe (DIN 19682-2:2007-11) zur Charakterisierung des Oberbodens ließ sich nicht auf Bleistiftstärke ausrollen und fühlte sich überwiegend samtig – mehlig an. Die schlechte Ausrollbarkeit und die Haftung von Feinmaterial in den Fingerrillen zeigten einen höheren Schluff-, als Tonanteil an. Der Tonanteil wurde dabei auf unter 10% abgeschätzt.

Der Oberboden erfüllte somit die Regelwerksanforderungen benannt in den Arbeitshilfen für den Umgang mit Regenwasser (2005).

4.2 Vertikale und horizontale Belastung der Grünmulde

Tabelle 1: Vertikale und horizontale Verteilung der Zinkkonzentrationen in mg/kg

Horizonttiefe	Abstand vom Zulauf 2				
	1 m	4 m	6 m	11 m	50 m
0,00 - 0,30	1154,7	323,5	320,7	118,0	46,6
0,30 - 0,60	392,7	57,0	188,7	46,0	17,2
0,60 - 0,90	-	32,9	-	-	18,8

Die niedrigste gemessene Zinkkonzentration fand sich in einer Probe entnommen aus der Schicht 0,60 - 0,90 m in 50 m Abstand vom Zulauf 2. Auf Grund der geringen Belastung mit Stoffen aus den Oberflächenzuflüssen kann in dieser Entfernung der gemessene Wert als geogener Ausgangsgehalt betrachtet werden.



Abbildung 3: Bild (l) mit optisch erkennbarer Tiefenverlagerung 4 m vom Zulauf 2, während im Bild (r) in 50 m Entfernung ein trennscharfer Übergang in 0,30 m Tiefe vom Ober- zum Unterboden vorliegt

5 Schlussfolgerung

Bis zu 11 m Entfernung konnten in den Bodenschichten 0,00 – 0,30 m, 0,30 – 0,60 m und 0,60 – 0,90 m deutlich erhöhte Konzentrationswerte des Schwermetalls Zink gemessen werden. Während im Oberboden zwischen 0,00 und 0,30 m Tiefe auf Grund seiner zugesprochenen Reinigungsfunktion erhöhte Werte zu erwarten sind zeigen jedoch die Konzentration in den darunter liegenden Bodenschichten eine ausgeprägte Tiefenverlagerung von Schwermetallen an, wobei die Vorsorgewerte (Sand) für Zink gemäß Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) von 60 mg/kg deutlich überschritten wurden. Da damit auch die Besorgnis der Grundwasserverunreinigung besteht musste in diesem Bereich ein Bodenaustausch durchgeführt werden.

Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass eine regelwerkskonformer Oberboden noch lange keine Gewährleistung für den sicheren Rückhalt von Schadstoffen aus den angeschlossenen Entwässerungsflächen bietet.

Weiterhin verdeutlichen diese Ergebnisse die extreme zulaufnahe Schadstoffakkumulation, während zulauffern nur geringe oder keine Belastungen mehr zu messen sind. Dies ist auch nicht verwunderlich, da die niederschlagsbedingte Beschickung von Grünmulden zwangsläufig den Niederschlagsintensitäten im Jahresverlauf folgt und somit der weitaus größte Anteil des Jahresabflusses mit geringen Niederschlagsintensitäten immer zulaufnah versickert.

Die Aufkonzentration von Schadstoffen am Zulaufbereich ergibt sich daher analog bei allen Grünmulden und widerlegt die Annahme, dass bei stärkeren Belastungen angeschlossener Entwässerungsflächen eine größere Muldenfläche mit mehr Oberbodenvolumen durch mehr Bindekapazität einen sicheren Schadstoffrückhalt gewährleistet.

Vorsorgemaßnahmen haben daher zwingend dem zulaufnahen Bereich zu gelten, welcher durchlässigkeitsabhängig flächenproportional weitaus am stärksten mit Wasser und Schadstoffen beaufschlagt wird. Hier könnte der Einsatz von Filtermaterialien, die gemäß dem Arbeitsblatt DWA-A 178 in Retentionsbodenfilteranlagen gefordert sind, der Gefahr von Filterdurchbrüchen entgegenwirken. Seitens des Bundesamt für Straßenwesen (BASt, 2015) wurde diese Anforderungen auch für die Behandlung von Straßenabflüssen angeführt.

Je nach Belastung und Größe der Mulde könnte entweder der gesamte Muldenbereich oder der überwiegend beaufschlagte Bereich in Zulaufnähe damit ausgestattet, mit wenige Zentimetern Mutterboden überdeckt und mit Raseneinsaat begrünt werden. Dies entspräche auch einem Hinweis in den Arbeitshilfen für den Umgang mit Regenwasser in Siedlungsgebieten (LfU 2005).

6 Literatur

Lambert B. (2012): Seminar Eignung von Böden zur Behandlung von Niederschlagsabflüssen, Karlsruhe 24.04.2012, Stoffliche Auswirkungen der Regelwerksbestimmung „Belebte Bodenzone“ auf das Sickerwasser

BBodSchV. (1999), Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung zuletzt geändert durch Art. 126 V v. 19.6.2020 | 1328 mit Anhang 2 Nummer 4

LfU (2005), Arbeitshilfen für den Umgang mit Regenwasser in Siedlungsgebieten, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU)

Kocher, B. (2015): Seminar „Aktuelle Entwicklungen in der Straßenentwässerung“ des VSVI Hessen, 04. November 2015 in Friedberg, Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)

Arbeitsblatt DWA-A 178 (2019), Retentionsbodenfilteranlagen" Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. © DWA, 1. Auflage, Hennef

Fader, H. (2020), Prüfbericht „Überprüfung von Versickerungsmulde im Rahmen der Eigenkontrolle“, Hauraton GmbH & Co.KG, Werk Ötigheim

Fader, H. (2020), Prüfbericht, Eingrenzung einer Zinkbelastung im Einlaufbereich 2, HAURATON GmbH & Co.KG, Werk Ötigheim

DIN 19682-2:2007-11 (2007), Bodenbeschaffenheit – Felduntersuchungen – Teil 2: Bestimmung der Bodenart

Korrespondenz:

HAURATON GmbH & Co.KG
 Claus Huwe
 Werkstraße 13
 76437 Rastatt / Deutschland
claus.huwe@hauraton.de

Modellierung des Verbleibs von Bioziden und ihren Transformationsprodukten bei der Versickerung der Abflüsse von mit Mörtel und Putz bedeckten Fassaden

P. Vega-Garcia^{1, 2}, R. Schwerd¹, B. Helmreich²

1 Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Abteilung Umwelt, Hygiene und Sensorik,
 Fraunhoferstraße 10, 83626 Valley, Deutschland

2 Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft, Technische Universität München,
 Am Coulombwall 3, 85748 Garching, Deutschland

Kurzfassung: Ziel der Studie war es, den Transport ausgewählter Biozide sowie 10 ihrer Transformationsprodukte (TP) aus Fassadenabflüssen, die in Freilandversuchen des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik analysiert wurden, in einem ungesättigten Bodenkompartment bis zum Erreichen eines Ortes der Beurteilung zu modellieren. Es wurde davon ausgegangen, dass ein Modell unter Verwendung der Stofftransportgleichung von van Genuchten und allgemeiner Zustandsannahmen unter Bezugnahme auf eine Sickerwasserprognose entwickelt werden kann, das verlässliche Abschätzungen einer Grundwassergefährdung zulässt.

Key-Words: Biozidauslaugung; Fassadenmaterial; Putz; Modellieren; ungesättigter Boden, Transport; Transformationsprodukt

1 Einleitung

In der Europäischen Gemeinschaft hat die Bewertung der Umwelteigenschaften von Baustoffen seit Jahren einen hohen Stellenwert. Nach der dritten Anforderung der Bauproduktenverordnung (EU-Bau-PVO) sind Bauwerke so zu gestalten, dass sie während ihres gesamten Lebenszyklus keine übermäßig hohen Auswirkungen auf die Umwelt haben. Bauprodukte wie Putze und Mörtel werden überwiegend an der Außenseite der Gebäude verwendet und sind atmosphärischen Einflüssen ausgesetzt. Bei Kontakt mit Regenwasser können Inhaltsstoffe aus den Bauprodukten ausgelaugt werden und in den Abfluss gelangen. Es ist gängige Praxis, den Fassadenbeschichtungen eine Mischung verschiedener Biozide mit bis zu 0,5 Gew.-% (bezogen auf die Trockenmasse) zuzusetzen. In den letzten Jahren gab es daher eine wachsende Besorgnis einer Kontamination der Niederschlagsabflüsse von Gebäudefassaden und ihrer aufnehmenden Gewässer (Oberflächenwasser und Grundwasser) mit diesen Substanzen. Es wurde die Hypothese aufgestellt, dass ein Modell entwickelt werden kann, das unter Verwendung der Stofftransportgleichung von van Genuchten (van Genuchten & Alves, 1982) und allgemeiner Zustandsannahmen unter Bezugnahme auf eine Sickerwasserprognose (SiWaPro) (Susset & Grathwohl, 2011) verlässliche Abschätzungen einer Grundwassergefährdung zulässt.

Der Transport von Verbindungen innerhalb eines Bodenkompartmentes umfasst eine Vielzahl von Mechanismen wie Konvektion, Diffusion, Dispersion, lineare Gleichgewichtsadsorption, Produktion und Zerfall nullter oder erster Ordnung (van Genuchten & Alves, 1982). Das Modell von van Genuchten stellt eine eindimensionale konvektiv-dispersive Transportgleichung für gelöste Stoffe dar und geht von einer Produktion nullter Ordnung und einem Zerfall erster Ordnung von Bioziden im stationären Fluss aus.

Das Ziel dieser Studie war es, den Transport von vier Bioziden und ihren Transformationsprodukten (TPs) innerhalb eines ungesättigten Bodenkompartmentes während der Infiltration bis zum Erreichen

eines definierten Ortes der Beurteilung zu modellieren, um die Relevanz für die Grundwasserkontamination abschätzen zu können. Als Eingangsparameter wurden Abflussdaten (Quellterm) für die Ausgangsverbindungen Carbendazim, Diuron, Octylisothiazolinon (OIT) und Terbutryn von Modellhäusern auf dem Gelände des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP verwendet (Vega-Garcia et al., 2020). Zehn TP's der verwendeten Biozide, nämlich 2-Aminobenzimidazol, N'-[3,4-Dichlorphenyl]-N,N-Methylharnstoff (DCMPU), 3,4-Dichloranilin (DCA), N'-3,4-Dichlorphenylharnstoff (DCPU), Octylamin, Octylmalonamsäure, 2-Hydroxy-terbutryn, Desbutyl-2-hydroxy-terbutryn, Desethyl-terbutryn, Terbutryn-sulfoxid wurden basierend auf ihrer biologischen Abbauleistung im Boden innerhalb eines ungesättigten Bodenkompartmentes betrachtet und modelliert, bis sie einen definierten Ort der Beurteilung (OdB) erreichten. In das Modell fließen sowohl geschätzte Stoffparameter aus Datenbanken als auch experimentelle Ergebnisse aus der Literatur ein. Die allgemeinen Rahmenbedingungen für die Sickerwasserprognose (SiWaPro) wurden aus Susset & Grathwohl (2011) und Susset et al. (2018) entnommen.

2 Methodik

Datenbasis für die Modellierung waren die Ergebnisse einer 18-monatigen Freilandstudie des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP an zwei Modellhäusern mit zwei unterschiedlichen Putzrezepturen und Biozidmischungen, deren Seiten nach den Himmelsrichtungen (Nord, Ost, Süd und West) ausgerichtet waren. Die Fassadenabflüsse wurden nach jedem Regenereignis und für jede Fassade separat asserviert und analysiert. Eine detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise, der Zusammensetzung der Materialien, der hydrologischen und der Abflussdatenanalyse finden sich in Vega-Garcia et al. (2020).

Um den Einfluss der Sickerwassermenge und der Quelltermkonzentration in der Simulation zu vergleichen, wurden die kumulierten Sickerwassermengen aus zwei Szenarien herangezogen: Szenario A bestand aus dem Fassadenabfluss, dem Abfluss von den Hausrändern (Randabfluss von den Randflächenstreifen rund um die Versuchshäuser: 6 m², bei Breite des Randstreifens: 0,5 m) und dem Dachablauf (Dachfläche: 9 m²). Szenario B beinhaltete nur den Fassadenabfluss und den Randabfluss (ohne Dachabfluss). Zusätzlich wurde ein drittes Szenario (Szenario C) mit einer 30 cm dicken Deckschicht mit einem Gehalt an organischem Kohlenstoff C_{org} von 2 % über den beiden „Ausgangsbodenarten“ (je 70 cm) berechnet, um die Auswirkungen der bewachsenen Bodenzone von Versickerungsmulden als Behandlungsmaßnahmen für das Ablaufwasser von Fassaden aufzuzeigen. Die Sickerwassermenge und die Quelltermkonzentration von Szenario B werden für die Modellierung von Szenario C verwendet. Die Modellierung der Ausgangsverbindungen und TP's wurde bis zum Erreichen eines OdB von 1 m unter der Erdoberfläche durchgeführt.

Die Transportprozesse von Bioziden wurden für zwei Bodenarten modelliert, nämlich für sandige Böden mit niedriger Feldkapazität und niedrigem Rückhalte- und Abbaupotential und für eine Mischung aus lehmigen, schluffigen und tonigen Böden mit hoher Feldkapazität und hohem Rückhalte- und Abbaupotential. Diese beiden Bodenarten wurden von Beyer et al. (2007, 2008) und Grathwohl et al. (2006) basierend auf einer statistischen Auswertung der in Deutschland vorherrschenden Bodentypen als die am weitesten verbreiteten identifiziert.

Als Maßstab zur Beurteilung einer möglichen Kontamination wurden die Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS) für Grundwasser der Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) gewählt, die für die eingesetzten Biozide jeweils 0,1 µg/L betragen (LAWA, 2016).

Für die Berechnung des Transports der Substanzen wurde die Gleichung von Van Genuchten, die ein-dimensionale Transportvorgänge abbildet, als mathematische Grundlage verwendet. Während ein Biozid das Kompartiment durchläuft, findet eine Konzentrationsänderung unter Bildung von TP's statt. Daraus ergibt sich auch unmittelbar eine Veränderung der Konzentrationen der TP's in Abhängigkeit von Ort und Transportzeit. Funktionen zur Bestimmung der Konzentration an TP's, die aus einer Eingangskonzentration der Biozide gebildet werden, wurden aus Daten erhalten, die in früheren Studien

veröffentlicht (e.g., Bollmann et al., 2017) wurden. TPs mit resultierenden Eingangskonzentrationen < 1 ng/L wurden vernachlässigt und kein weiterer Transport modelliert.

Die Programmiersprache MATLAB® wurde für Umsetzung numerischer Berechnungen und Datenanalysen verwendet, um die Konzentration von Bioziden am OdB zu modellieren und darzustellen.

Es wurde angenommen, dass der Fassadenabfluss ohne Kontakt mit einer Oberbodenschicht direkt in eine ungesättigte sandige oder lehmige/schluffige/tonige Bodenschicht versickert. Zu beachten ist, dass ein hoher Gehalt an organischem Kohlenstoff nur in der Oberbodenschicht zu erwarten ist, nicht im sandigen oder lehmigen/schluffigen/tonigen Boden.

3 Hintergrund und Ziel

Mischwasserüberläufe sind ein Weg für ein breites Spektrum verschiedener organischer Mikroverunreinigungen (MV) aus Regen- und Abwässern in offene Gewässer, was zu einer verminderten Wasserqualität und ökotoxikologischen Auswirkungen führen kann (Launay et al. 2016, Musolff et al. 2010, Schwarzenbach et al. 2006). Bis heute ist die Bedeutung von MV in Mischwasserüberläufen aufgrund begrenzter Messdaten noch nicht vollständig geklärt (Spahr et al. 2020). Eine umfassende Überwachung wird jedoch durch die enormen räumlichen (Mutzner et al. 2020) und zeitlichen (Madoux-Humery et al. 2015) Schwankungen und das Auftreten einer grossen Anzahl verschiedener Stoffe aus unterschiedlichen Quellen erschwert. Da MV ausserdem schon bei sehr niedrigen Konzentrationen (ng/L) toxische Wirkungen haben können, sind analytische Methoden mit hoher Empfindlichkeit erforderlich.

Traditionell gibt es drei Methoden zur Beprobung von Abwasser für die MV Analyse: Stichprobenahme, automatische Probenahme und Passivsammler. Bei der Stichprobenahme und der automatischen Probenahme werden einzelne Abwasserproben entweder zeit- oder volumenproportional entnommen und häufig zu einer Mischprobe pro Ereignis gemischt, um die mittlere Konzentration des Ereignisses zu analysieren. Die zeitliche Auflösung der Teilproben variiert innerhalb (z. B. 5 bis 15 Minuten (Wicke et al. 2021)) und zwischen den Studien oder wird durch den Fluss definiert (Masoner et al. 2019). Beim Passivsammler reichern sich die Stoffe auf einem Sorptionsmittel an, das dem Abwasser ausgesetzt wird (Mutzner et al. 2019). Eine vierte Probenahmemethode entwickelte sich in den letzten Jahren an der Eawag mit dem Bau einer feldtauglichen Massenspektrometrie-Plattform namens MS²fiel (Stravs et al. 2021). Dieses Gerät ermöglicht die Probenahme vor Ort und die umfassende Analyse polarer organischer MV mit einer hochauflösenden Flüssigchromatographie-Massenspektrometrie-Methode (LC-HRMS) mit einer zeitlichen Auflösung von 20 Minuten. Anstelle der herkömmlichen gemittelten Ereigniskonzentrationen ermöglicht das MS²fiel eine automatisierte Überwachung mit höherer zeitlicher Auflösung über längere Zeiträume, was wertvolle Informationen über die Dynamik verschiedener Stoffe bei Mischwasserüberläufen liefert. Bislang sind uns nur drei Studien bekannt, die MV-Konzentrationen mit einer zeitlichen Auflösung zwischen 5 und 30 Minuten und nur für eine kleine Anzahl von Substanzen untersucht haben (Madoux-Humery et al. 2013, Madoux-Humery et al. 2015, Mutzner 2019). Darüber hinaus ermöglicht das MS²fiel dank der hohen Auflösung des HRMS-Geräts die Analyse eines grossen Spektrums von Substanzen mit hoher Präzision.

4 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Modellierung zeigen, dass die untersuchten Biozide am OdB, mit Ausnahme von OIT, über dem GFS-Wert von 0,1 µg/L liegen, unabhängig davon, ob es sich um sandige oder lehmige/schluffige/tonige Böden handelt, wenn keine bewachsene Bodenzone vorhanden ist. Die erreichten Konzentrationen hängen dabei vom jeweiligen Biozid, den einbezogenen Abflussmengen und der Art des Bodens ab. Bei hohen Abflussmengen (Szenario A) wird der OdB schneller erreicht und es resultieren niedrigere Konzentrationen als bei geringeren Abflussmengen (Szenario B). Die Bodenart wirkt sich zudem auf die Zeit aus, die ein Biozid bis zum Erreichen des OdB benötigt: bei sandigen

Böden erreichen die Biozide den OdB schneller als bei lehmigen/schluffigen/tonigen Böden. Durch Einführung einer zusätzlichen, 30 cm dicken bewachsenen Bodenschicht mit einem organischen Anteil von 2 % (Szenario C) lassen sich die modellierten Konzentrationen am OdB um den Faktor ca. 10 absenken (Vega-Garcia et al., 2022) (Siehe Abbildung 1, exemplarisch für Diuron).

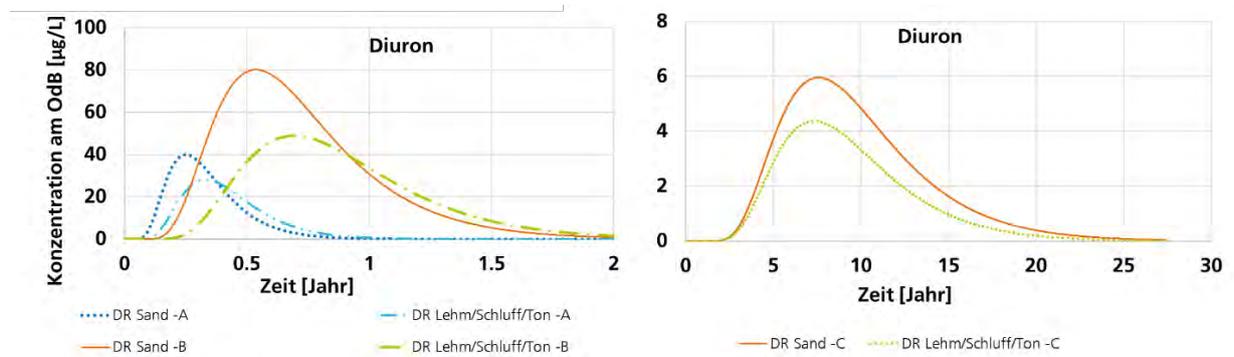


Abbildung 105: Modellierter Diuron-Konzentrationen am OdB (in 1 m Tiefe) in sandigen Böden und lehmigen/schluffigen/tonigen Böden für die Szenarien A und B (links) und modellierter Diuron-Konzentrationen am OdB für mit 30 cm dicken bewachsenen Bodenschicht mit einem organischen Anteil von 2 % (Szenario C) (rechts) (Vega-Garcia et al., 2022).

Die Konzentrationen der TPs am OdB für Diuron und die verschiedenen Abfluss- und Bodenszenarien sind in Abbildung 2 zu sehen. Für die modellierten TPs ergaben sich niedrigere Konzentrationen im Vergleich zu den Eingangskonzentrationen ihrer Biozid-Ausgangsstoffe. Die Zu- oder Abnahme oder Abnahme der TPs steht dabei in direktem Zusammenhang mit der Höhe der Biozid-Konzentration im Bodenkompartment zu einem bestimmten Zeitpunkt.

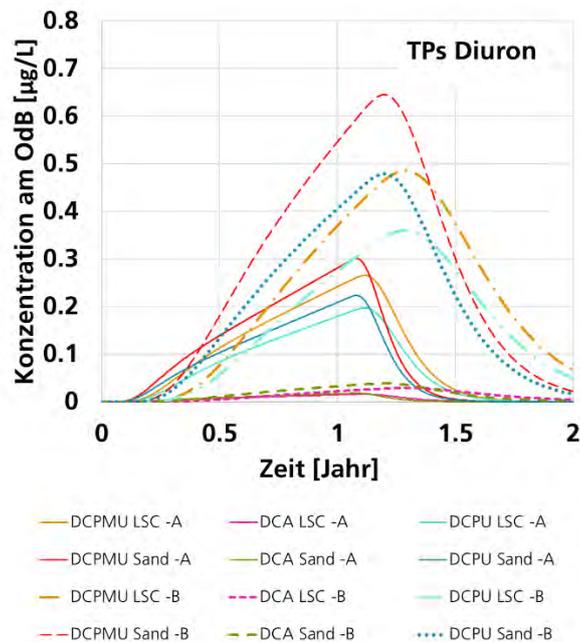


Abbildung 2: Modellierter TP-Konzentrationen am OdB für Diuron im Sandbodenszenario und in lehmigen/schluffigen/tonigen Böden für die Szenarien A und B.

Die Konzentrationsverläufe aller Substanzen am OdB zeigten ein ähnliches Muster: (1) die Substanz benötigt eine bestimmte Zeit, um den OdB zu erreichen; die Konzentration bleibt in der ersten Phase

des Transports nicht nachweisbar, (2) die Konzentration am OdB baut sich langsam auf und steigt an, (3) die Konzentration erreicht nach einiger Zeit das Maximum, (4) die Konzentration nimmt langsam ab, da die Beladung nicht hoch genug ist, um sie auf dem Maximum zu halten, (5) die Konzentration nähert sich Null, was anzeigt, dass die Substanz das System verlässt. TPs waren wegen der hohen Feldkapazität aufgrund des Tongehalts in lehmigen/schluffigen/tonigen Böden persistenter.

Die Zunahme oder Abnahme der TPs steht in direktem Zusammenhang mit der Höhe der Biozid-Konzentration im System zu einem bestimmten Zeitpunkt. Es ist zu beobachten, dass TPs tendenziell später am OdB ankommen, gleichzeitig aber länger in nachweisbaren Konzentrationen im System verbleiben und erst nach längerer Zeit wieder austreten.

Bislang resultiert die im Modell genutzte Sorptionskapazität ausschließlich aus dem Gehalt an organischem Kohlenstoff. Ein definierter Sorptionskoeffizient für die Biozide und ihre TPs in sandigen oder lehmigen/schluffigen/tonigen Böden fließt nicht mit ein. Derzeit reichen die zur Verfügung stehenden Daten nicht aus, um die Sorptionskapazitäten für die genutzten Böden zu bestimmen. Diesbezüglich besteht weiterer Forschungsbedarf. Eine Verfeinerung des gewählten Modellansatzes wäre zudem durch stärker abgesicherte stoffliche Parameter, vor allem der TPs zu erreichen, zu denen in der Literatur bzw. in Datenbanken oft große Spannweiten angegeben sind.

Mit dem gewählten Ansatz ist eine Modellierung des Transports von Bioziden und ihren TPs möglich. Die Anwendung der Szenarien nach SiWaPro (Bodentypen mit nur geringem Anteil an organischem Kohlenstoff) ermöglicht eine grundsätzliche Abschätzung, ob ein Biozideintrag zu relevanten Konzentrationen am OdB führt. Der Vergleich der Szenarien nach SiWaPro mit dem Szenario, bei dem die zusätzliche Deckschicht mit erhöhtem organischen Anteil eingeführt wurde, zeigt jedoch unmittelbar die potentielle Wirksamkeit solcherlei Behandlungsmaßnahmen für biozidbelastete Niederschlagsabflüsse von Fassaden im Sinne des Grundwasserschutzes. Bewachsene Bodenzonen werden bereits in Versickerungsmulden verwendet.

5 Literatur

- Beyer, C., Konrad, W., Rügner, H., Bauer, S., Park, C., Liedl, R., Grathwohl, P. (2007). Modellbasierte Sickerwasserprognose für die Verwertung von recycling- Baustoff in technischen Bauwerken (model-based prognosis of contaminant leaching for reuse of demolition waste in construction projects; in German). *Grundwasser* 12 (2), 2007, 94–107.
- Beyer, C., Konrad, W., Rügner, H., Bauer, S., Liedl, R., Grathwohl, P. (2008). Model based prediction of long-term leaching of contaminants from secondary materials in road constructions and noise protection dams. *Waste Management* 29, 2008, 839–850.
- U. Bollmann, U., Minelgaite, G., Schlüsener, M., Ternes, T., Vollertsen, J., Bester, K. (2017). Photodegradation of octylisothiazolinone and semi-field emissions from facade coatings. *Scientific Reports* 7, 1. doi.org/10.1038/srep41501.
- Grathwohl, P., Liedl, R., Beyer, C. Konrad, W. (2006). Übertragung der Ergebnisse des BMBF – Förderschwerpunktes “Sickerwasserprognose” auf representative Fallbeispiele (FKZ 02WP0517) (transfer of the results of the BMBF research priority “groundwater risk assessment” on representative case studies (02WP0517); in German). Final Report, University of Tübingen, Tübingen, Germany. <<http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb07/527536415.pdf>>.
- Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA). (2016). Ableitung von Geringfügigkeits-schwellenwerten für das Grundwasser (Determination of insignificant thresholds for groundwater). Düsseldorf.

- Susset, B., Grathwohl, P. (2011). Leaching standards for mineral recycling materials – A harmonized regulatory concept for the upcoming German Recycling Decree. *Waste Management*, 31(2), 201-214. doi:10.1016/j.wasman.2010.08.017
- Susset, B., Maier, U., Finkel, M., Grathwohl, P. (2018). Weiterentwicklung von Kriterien zur Beurteilung des schadlosen und ordnungsgemäßen Einsatzes mineralischer Ersatzbaustoffe und Prüfung alternativer Wertevorschläge (Further development of criteria for the assessment of the harmless and correct use of mineral substitute building materials and the examination of alternative values). *Texte 26/2018*. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. ISSN: 1862-4359.
- Van Genuchten, M., Alves, W. (1982). Analytical Solutions of the One-Dimensional Convective-Dispersive Solute Transport Equation. Technical Bulletin 157268, United States Department of Agriculture, Economic Research Service.
- Vega-Garcia, P., Schwerd, R., Scherer, C., Schwitalla, C., Johann, S., Rommel, S.H., Helmreich, B. (2020). Influence of façade orientation on the leaching of biocides from building façades covered with mortars and plasters. *Science of The Total Environment*, 734, 139465. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.139465
- Vega-Garcia, P., Lok, C. S. C., Marhoon, A., Schwerd, R., Johann, S.; Helmreich, B. (2022). Modelling the environmental fate and behavior of biocides used in façades covered with mortars and plasters and their transformation products. *Building and Environment*, 216 108991. doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108991

Korrespondenz:

Dr.-Ing. Pablo Alberto Vega-Garcia
Fraunhofer-Institut für Bauphysik
Fraunhoferstr. 10
83626 Valley
pablo.vega.garcia@ibp.fraunhofer.de

Monitoring organischer Mikroverunreinigungen in Mischwasserüberläufen mit einer mobilen HRMS-Plattform (MS²Field)

V. Furrer^{1,2}, H.Singer¹, C. Ort¹

1 Eawag, Ueberlandstrasse 133, 8600 Dübendorf, Schweiz

2 DBAUG, ETH Zürich, 8093 Zürich, Schweiz

(Deutsche Übersetzung des Extended Abstracts für die Konferenz SPN10, Graz 2022)

Kurzfassung: Das MS²field, eine automatisierte, mobile HRMS-Plattform, ermöglicht Echtzeitmessungen von gelösten organischen Mikroverunreinigungen mit einer zeitlichen Auflösung von 20 Minuten. Es wurde für den Einsatz bei Mischwasserüberläufen angepasst und während einer viermonatigen Feldkampagne getestet. Die Ergebnisse zeigen starke zeitliche Schwankungen der Konzentration von polaren organischen Mikroverunreinigungen während Entlastungsereignissen.

Key-Words: Mischwasserüberlauf, Mikroverunreinigungen, Online Monitoring, zeitliche Dynamik

6 Methodik

Wir setzten das MS²field an einem Mischwasserüberlauf ein, um Konzentrationsprofile von polaren organischen MV mit einer Auflösung von 20 Minuten zu erstellen. Das MS²field wurde kürzlich an der Eawag entwickelt und besteht aus einem automatischen Probenahmeschritt, gefolgt von einer Probenvorbereitung und schliesslich einer LC-HRMS-Messung (**Abbildung 106**). Die Probenahme erfolgt mit einer kontinuierlichen Bypass-Leitung, aus der alle 20 Minuten eine Probe mit einem 2 µm-Filter gefiltert wird. Nach der Filtration wird der Probe ein interner Standard zugesetzt. Anschliessend wird die Probe zur weiteren Abtrennung von Feststoffen durch eine Vorsäule gepumpt, bevor sie auf die LC-Säule (Atlantis T3 C18, 5 µm, 3 mm x 5 cm) geladen wird. Das HRMS (Q-Exactive HF, Thermo Fisher) wird im Switching-Modus betrieben, um positive und negative Messungen in einem einzigen Lauf zu ermöglichen. Darüber hinaus werden zwischen den MS1-Messungen abwechselnd MS2 im datenabhängigen und datenunabhängigen Modus erzeugt, um die Identifizierung von Targets und Non-targets zu ermöglichen. Das System kann aus der Ferne gesteuert werden und die vorläufigen Konzentrationen werden online in Echtzeit dargestellt.

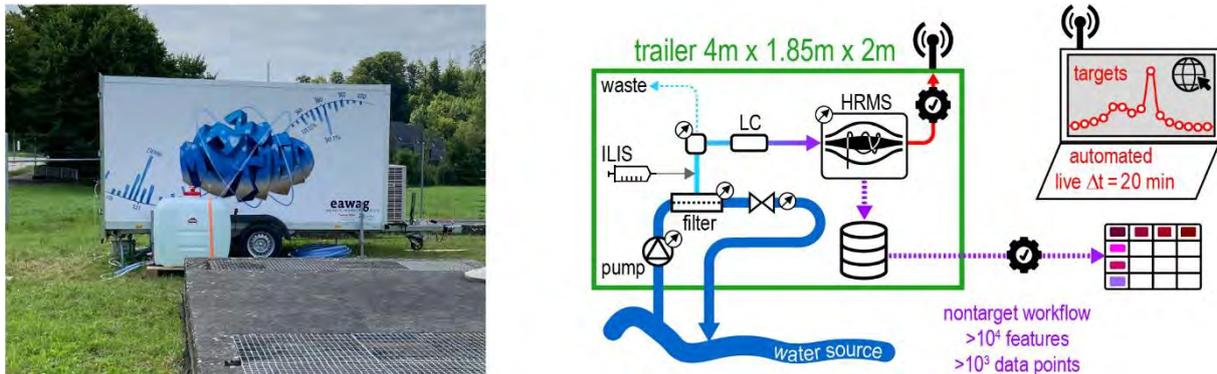


Abbildung 106. MS²field: Feldinstallation (links) und analytischer Workflow (rechts). Angepasst aus (Stravs et al. 2021).

Das MS²field wurde bereits bei eher sauberen Wasserquellen wie Bächen und (vor-)geklärtem Abwasser eingesetzt. Um es an einem Mischwasserüberlauf zu verwenden, waren einige Anpassungen erforderlich. Da wir nur während Überlaufereignissen messen, ist ein automatischer Start aus dem Standby-Modus erforderlich. Daher haben wir einen Radar-Levelsensor zur Erkennung des Anstiegs des Wasserlevels und einen Wassertank zur Ansaughilfe integriert. Da die Feststoffe im ungeklärten Abwasser das Risiko einer Verstopfung der Bypass-Leitung erhöhen, haben wir ausserdem eine automatische Rückspülung mit Hilfe des Wassertanks implementiert.

7 Resultate

Wir haben das angepasste MS²field von September bis Dezember 2021 bei einem Mischwasserüberlauf in der Schweiz eingesetzt. Wir konnten alle Überlaufereignisse, die während dieses Zeitraums auftraten, erfolgreich überwachen.

Als Beispiel ist die Konzentration des Arzneimittels Diclofenac während eines 14-stündigen Überlaufereignisses abgebildet (**Abbildung 107**). Die zeitproportionale mittlere Ereigniskonzentration wurde auf der Grundlage der 20-minütigen Messungen berechnet. Das Konzentrationsprofil zeigt starke zeitliche Schwankungen. Die alleinige Messung der gemittelten Konzentration würde zu einer Unterschätzung der Spitzenkonzentration um den Faktor fünf führen. Ausserdem gibt es während des Überlaufs nicht nur einen, sondern fünf Spitzenwerte, die deutlich über der berechneten mittleren Konzentration liegen. Dies zeigt, dass zeitlich hoch aufgelöste Messungen von MV bei Mischwasserüberläufen von grossem Wert sind. Erstens lassen sich dadurch realistischere Expositionsszenarien aufzeigen, was die Grundlage für eine bessere Bewertung der Umweltrisiken bildet, und zweitens lassen sich dadurch der Betrieb von Kanalisationssystemen und Massnahmen zur Emissionsminderung ableiten.

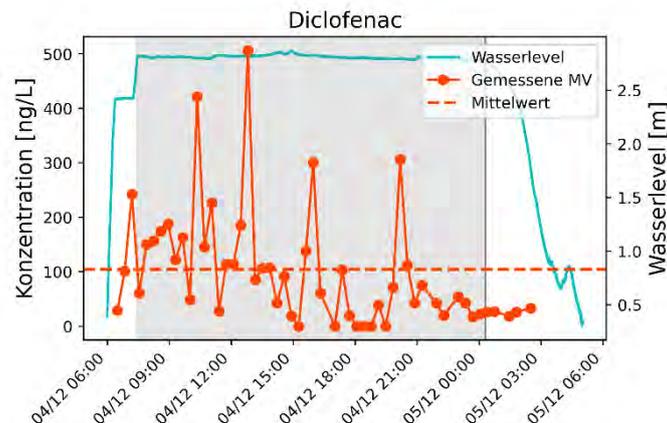


Abbildung 107. Gemessene Konzentration des Medikaments Diclofenac während eines Überlaufs (grau) mit 20 minütiger Auflösung verglichen zur zeitproportionalen mittleren Ereigniskonzentration.

Insgesamt untersuchten wir 120 verschiedene polare organische Zielsubstanzen aus unterschiedlichen Stoffgruppen wie Arzneimittel und Körperpflegeprodukte, Pestizide, Industrie- und Haushaltschemikalien sowie Strassenabwässer. Trotz des starken Matrixeffekts des Abwassers konnten Substanzen bis in den niedrigen ng/L-Bereich (10 ng/L bis 100 ng/L) nachgewiesen werden. Zusätzlich zum Target-Screening wurden mit dem MS²field auch datenunabhängige MS²-Spektren gemessen, die eine Analyse von Suspects und Non-Targets ermöglichen.

8 Schlussfolgerung

Das MS²field konnte erfolgreich an die Bedingungen angepasst werden, die typischerweise bei Mischwasserüberläufen zu erwarten sind. Der Messzyklus wurde mit Hilfe des Levelsensors automatisch gestartet und ein konstanter Durchfluss in der Bypass-Schleife konnte während des gesamten Überlaufereignisses aufrechterhalten werden. Bei den wenigen Verstopfungen, die aufgetreten sind, konnte die automatische Rückspülung die Verstopfung beseitigen. Organische Mikroverunreinigungen konnten trotz des starken Matrixeffekts analysiert werden. Abgesehen von den Wartungsarbeiten an einem Tag pro Woche (hauptsächlich für die Kalibrierung des MS und die Reinigung des Filters) arbeitete das MS²field vier Monate lang automatisch.

Um zu prüfen, ob die Auflösung von 20 Minuten ausreicht, um die Dynamik der MV-Konzentration zu erfassen, werden die mit dem MS²field erzielten Ergebnisse in einem nächsten Schritt mit Proben verglichen, die mit höherer zeitlicher Auflösung (3 und 10 Minuten) genommen und im Labor analysiert wurden. Sollten die 20-Minuten-Proben nicht ausreichen, könnte man erwägen, Mischproben zu erzeugen, indem man einen Tank mit 20 Minuten Verweilzeit einsetzt. Ein anderer Ansatz könnte darin bestehen, Stichproben mit höherer Frequenz zu erzeugen, indem die Analysezeit durch Hochdruckinjektion verkürzt wird.

9 Literatur

Launay, M.A., Dittmer, U. and Steinmetz, H. (2016) Organic micropollutants discharged by combined sewer overflows - Characterisation of pollutant sources and stormwater-related processes. *Water Research* 104, 82-92.

Madoux-Humery, A.S., Dorner, S., Sauve, S., Aboufadi, K., Galarneau, M., Servais, P. and Prevost, M. (2013) Temporal variability of combined sewer overflow contaminants: evaluation of wastewater micropollutants as tracers of fecal contamination. *Water Res* 47(13), 4370-4382.

- Madoux-Humery, A.S., Dorner, S.M., Sauve, S., Aboulfadl, K., Galarneau, M., Servais, P. and Prevost, M. (2015) Temporal analysis of E. coli, TSS and wastewater micropollutant loads from combined sewer overflows: implications for management. *Environ Sci Process Impacts* 17(5), 965-974.
- Masoner, J.R., Kolpin, D.W., Cozzarelli, I.M., Barber, L.B., Burden, D.S., Foreman, W.T., Forshay, K.J., Furlong, E.T., Groves, J.F., Hladik, M.L., Hopton, M.E., Jaeschke, J.B., Keefe, S.H., Krabbenhoft, D.P., Lowrance, R., Romanok, K.M., Rus, D.L., Selbig, W.R., Williams, B.H. and Bradley, P.M. (2019) Urban Stormwater: An Overlooked Pathway of Extensive Mixed Contaminants to Surface and Groundwaters in the United States. *Environ Sci Technol* 53(17), 10070-10081.
- Musolff, A., Leschik, S., Reinstorf, F., Strauch, G. and Schirmer, M. (2010) Micropollutant Loads in the Urban Water Cycle. *Environmental Science & Technology* 44, 4877-4883.
- Mutzner, L. (2019) Spatiotemporal variability of micropollutants in sewer overflows.
- Mutzner, L., Bohren, C., Mangold, S., Bloem, S. and Ort, C. (2020) Spatial Differences among Micropollutants in Sewer Overflows: A Multisite Analysis Using Passive Samplers. *Environmental Science & Technology* 54(11), 6584-6593.
- Mutzner, L., Vermeirssen, E.L.M., Mangold, S., Maurer, M., Scheidegger, A., Singer, H., Booij, K. and Ort, C. (2019) Passive samplers to quantify micropollutants in sewer overflows: accumulation behaviour and field validation for short pollution events. *Water Res* 160, 350-360.
- Schwarzenbach, R.P., Escher, B.I., Fenner, K., Hofstetter, T.B., Johnson, A.C., von Gunten, U. and Wehrli, B. (2006) The Challenge of Micropollutants in Aquatic Systems. *Science* 313, 1072-1077.
- Spahr, S., Teixidó, M., Sedlak, D.L. and Luthy, R.G. (2020) Hydrophilic trace organic contaminants in urban stormwater: occurrence, toxicological relevance, and the need to enhance green stormwater infrastructure. *Environmental Science: Water Research & Technology* 6(1), 15-44.
- Stravs, M.A., Stamm, C., Ort, C. and Singer, H. (2021) Transportable Automated HRMS Platform "MS2field" Enables Insights into Water-Quality Dynamics in Real Time. *Environmental Science & Technology Letters*.
- Wicke, D., Matzinger, A., Sonnenberg, H., Caradot, N., Schubert, R.-L., Dick, R., Heinzmann, B., Dünnbier, U., von Seggern, D. and Rouault, P. (2021) Micropollutants in Urban Stormwater Runoff of Different Land Uses. *Water* 13(9).

Korrespondenz:

Viviane Furrer
 Überlandstrasse 133, 8600 Dübendorf
 +41 (0)58 765 6419
 viviane.furrer@eawag.ch

