

Anpassung des Bodenfilterverfahrens zur nutzungsorientierten Grauwasseraufbereitung

Dr.-Ing. Carlo Morandi

Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau

Preisverleihung Umweltpreis Wasser

18.06.2024, Donaueschingen

Struktur des Vortrags

- Veranlassung und Problemstellung
- Forschungsfragen
- Inhalte der Arbeit
- Materialien und Methoden
- Ergebnisse
- Fazit und Ausblick

Veranlassung und Problemstellung

Niedriger Wasserstand durch Dürre

Versunkene Dörfer im Edersee tauchen wieder auf

BESSERER HOCHWASSERSCHUTZ GEPLANT

**Kaiserslautern kämpft
gegen Hochwasser**

**Polizei-Wasserwerfer im Einsatz gegen
Hitze und Dürre**

Nach Dürre in Baden-Württemberg

Bauern müssen Mais noternten

Düsseldorf trocknet aus Landwirte klagen, Hafen
leer, Feuerwehr löscht Baum-Durst

**Trockenheit und Hitze machen
Gewässern zu schaffen**

Gewässer trocknen aus

**Hochwasser in Ahrweiler:
Dreistellige Zahl an Toten**

HITZESOMMER

Die trockenste Periode seit 1881

Niedriger Wasserstand durch Dürre

Versunkene Dörfer im Edersee tauchen wieder auf

BESSERER HOCHWASSERSCHUTZ GEPLANT

Kaiserslautern kämpft
gegen Hochwasser

Polizei-Wasserwerfer im Einsatz gegen
Hitze u

DEUTSCHLAND BRAUCHT EINE WASSERSTRATEGIE

Düsseldorf
leer, Feuerv

ternten

tze machen

Gewässern zu schaffen

Gewässer trocknen aus

Hochwasser in Ahrweiler:
Dreistellige Zahl an Toten

HITZESOMMER

Die trockenste Periode seit 1881



- Klimawandel mit steigender Hitzebelastung in Städten
 - Wassermangel im Boden und für Stadtgrün
 - Konkurrenz um verfügbares Wasser – nicht mehr alle Bedarfe gedeckt
- **Ausbau blau-grüner Infrastrukturen**
- **Erschließung neuer urbaner Wasserressourcen**

HÄUSLICHES SCHMUTZWASSER

SCHWARZWASSER

GELBWASSER

URIN

**SPÜL-
WASSER**

BRAUNWASSER

FÄZES

**TOILETTEN-
PAPIER/
SPÜL-
WASSER**

GRAUWASSER

**STARK
BELASTET**
mit ca. 29 L/(E·d)

**KÜCHEN-
SPÜLE,
GESCHIRR-
SPÜLER**

**WASCH-
MASCHINE**

**SCHWACH
BELASTET**
mit ca. 46 L/(E·d)

BAD, DUSCHE

**HAND-
WASCH-
BECKEN**

HÄUSLICHES SCHMUTZWASSER

SCHWARZWASSER

GELBWASSER

URIN

SPÜL-
WASSER

BRAUNWASSER

FÄZES

TOILETTEN-
PAPIER/
SPÜL-
WASSER

GRAUWASSER

**STARK
BELASTET**
mit ca. 29 L/(E·d)

KÜCHEN-
SPÜLE,
GESCHIRR-
SPÜLER

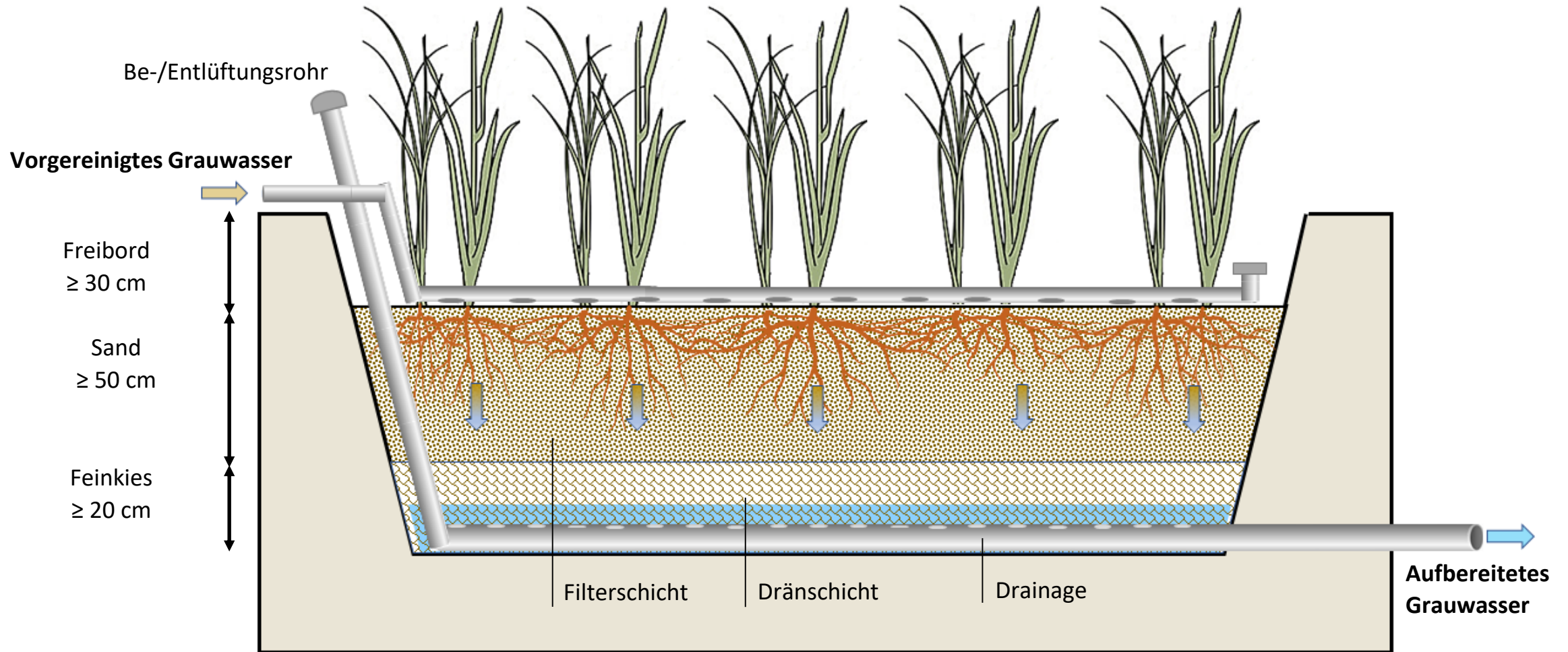
WASCH-
MASCHINE

**SCHWACH
BELASTET**
mit ca. 46 L/(E·d)

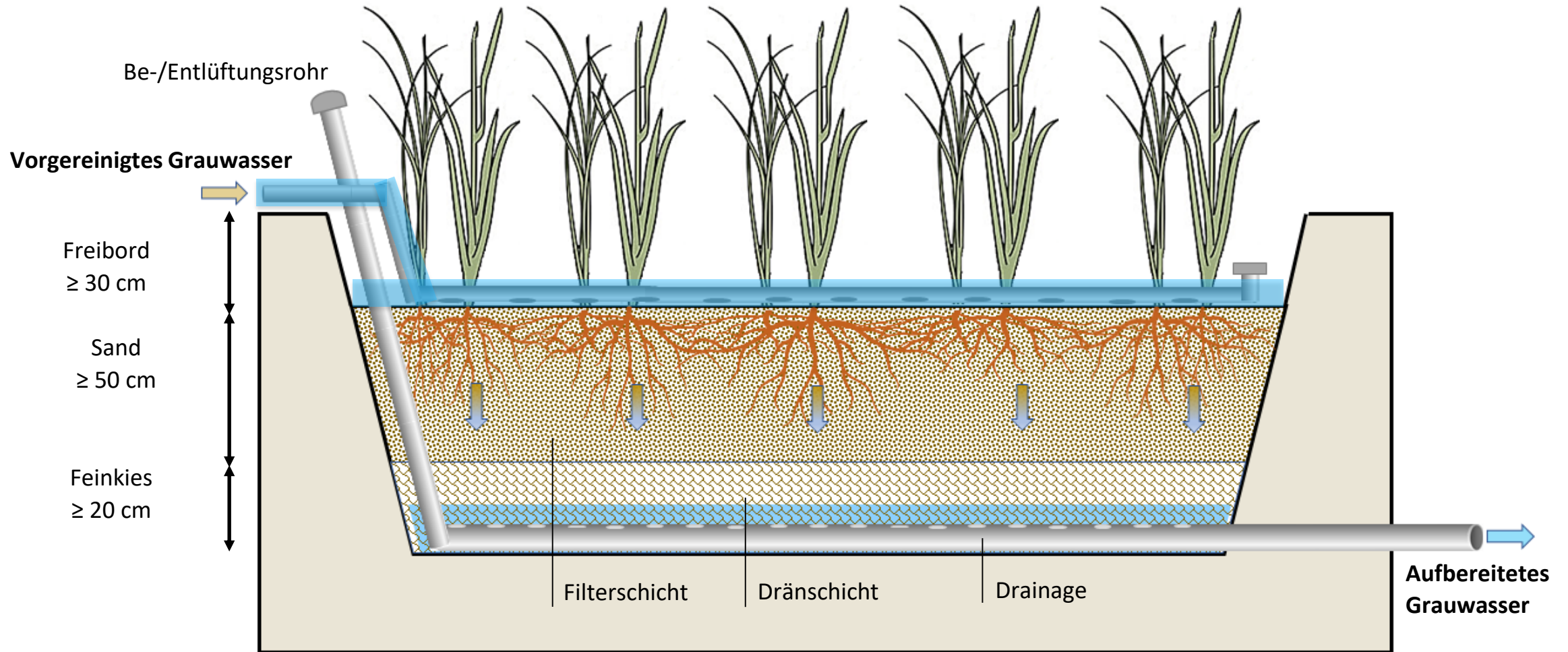
BAD, DUSCHE

HAND-
WASCH-
BECKEN

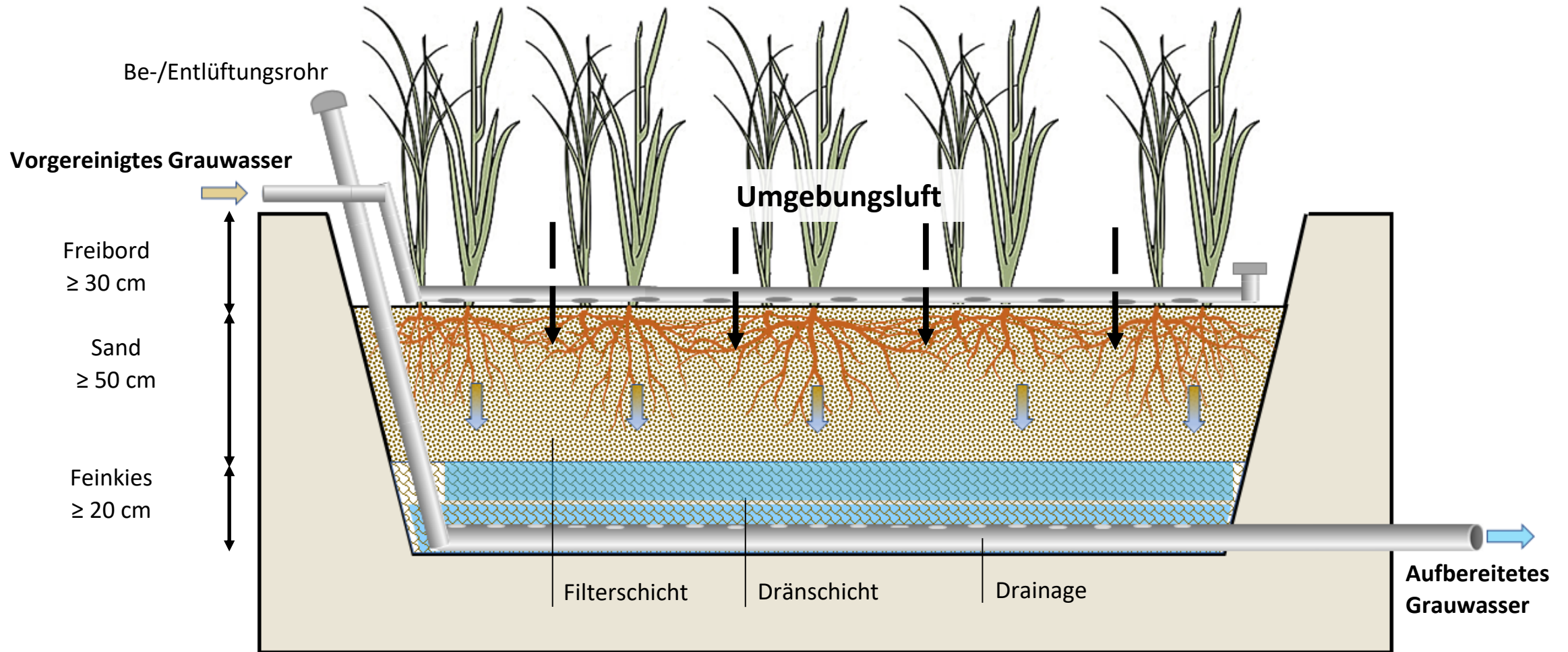
Vertikal durchflussener Bodenfilter



Vertikal durchflussener Bodenfilter



Vertikal durchflossener Bodenfilter



Forschungsfragen

- Lässt sich der Bodenfilter in **innerstädtischen Gebieten** einsetzen?
- Welche **Reinigungsleistung** wird im Ganzjahresbetrieb erzielt?
- Sind **flexible Ablaufqualitäten** erreichbar?
- Welche Rolle spielt die **Vorbehandlung**? Absetzbecken erforderlich?
- Welche Rolle spielt das **Bodenfiltermaterial** für die Reinigungsprozesse?
- Welche **Bemessungswerte und -ansätze** sind sinnvoll?
- Gibt es relevante **Klimaeffekte** im Bodenfilter?

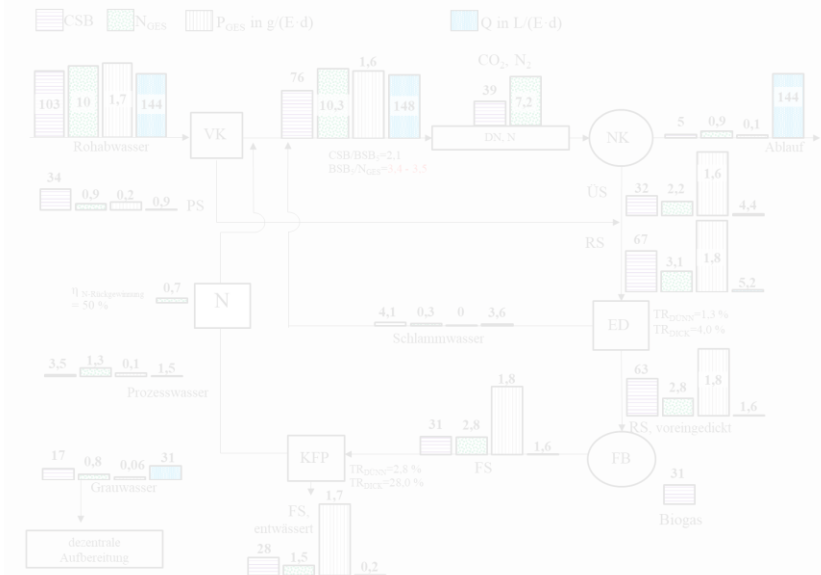
Inhalte der Arbeit

Technologieanpassung



Untersuchung von 2 Pilotanlagen und 6 Vertikalfiltersäulen im kleintechnischen Maßstab zur Grauwasseraufbereitung

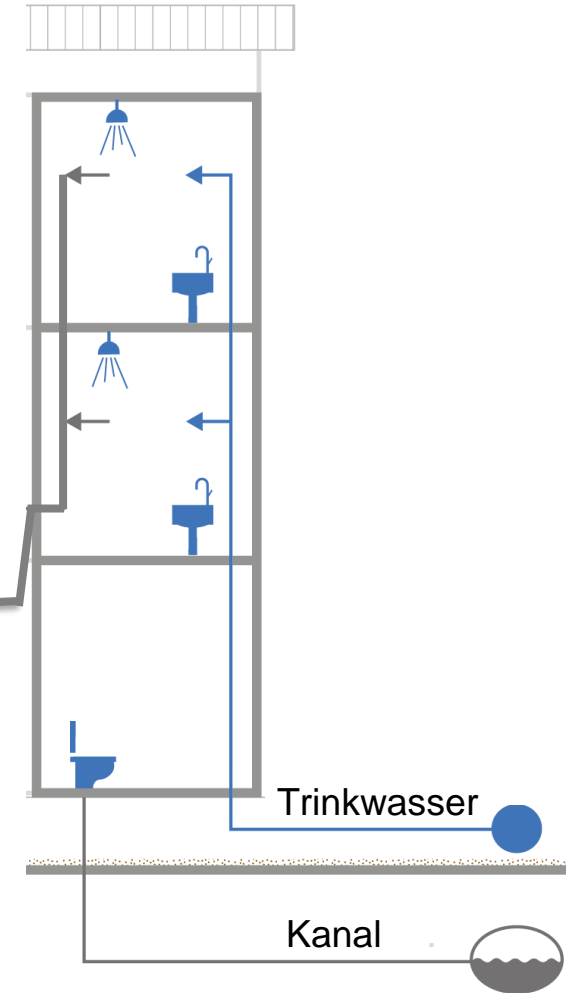
Konzeptentwicklung



Auswirkungen einer fortschreitenden Grauwasserabkoppelung auf herkömmliche Kläranlagen

Materialien und Methoden

Bodenfilter im Pilotmaßstab



Schwach belastetes Grauwasser aus Duschen und Handwaschbecken aus temporären Arbeiterunterkünften in Stuttgart

April 2020



Oktober 2020

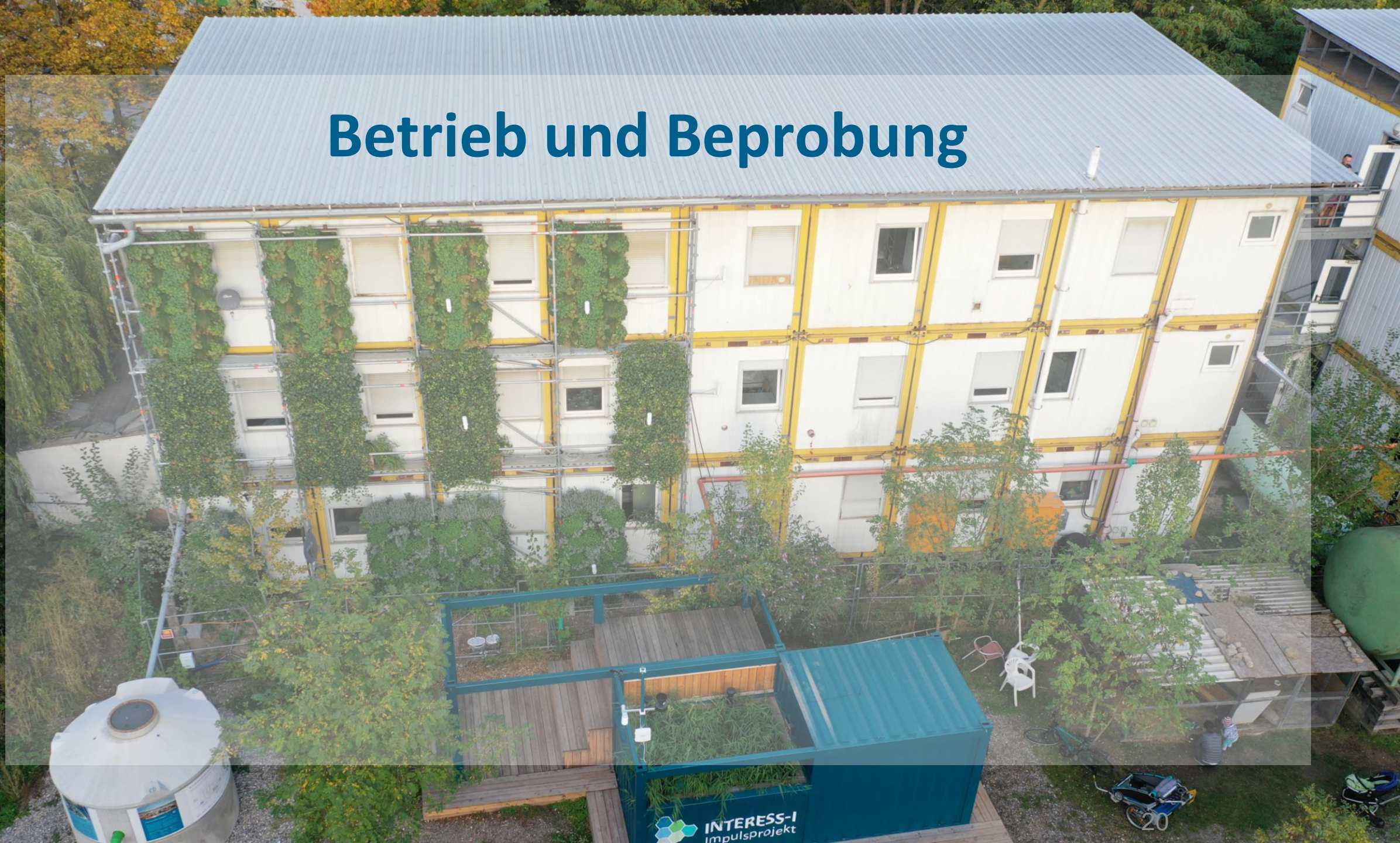


© Julian Rettig

August 2021



Betrieb und Beprobung



Betrieb und Beprobung

- Betriebszeitraum: 507 d
- Füllmaterial: zwei unterschiedlich gefüllte Kammern:
 - Rheinsand 0 – 2 mm, $A_F = 2,5 \text{ m}^2$; $H = 75 \text{ cm}$
 - Lavagestein 0 – 4 mm, $A_F = 2,5 \text{ m}^2$; $H = 75 \text{ cm}$
- Beprobungsstrategie
 - Zulauf und getrennt Abläufe des Bodenfilters auf C, N, P, Tenside, Ionen, SAR, vereinzelt Hygiene und Spurenstoffe (Mehrtaages-MP Zulauf, 24 h-MP Ablaufschächte)
 - Zusätzlich Wirkung UV-Anlage zur Hygienisierung
- Variation der hydraulischen Flächenbelastung (Anschluss 10 E)
 - bis max. $110 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ und der CSB-Flächenbelastung bis max. $32 \text{ g CSB}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$

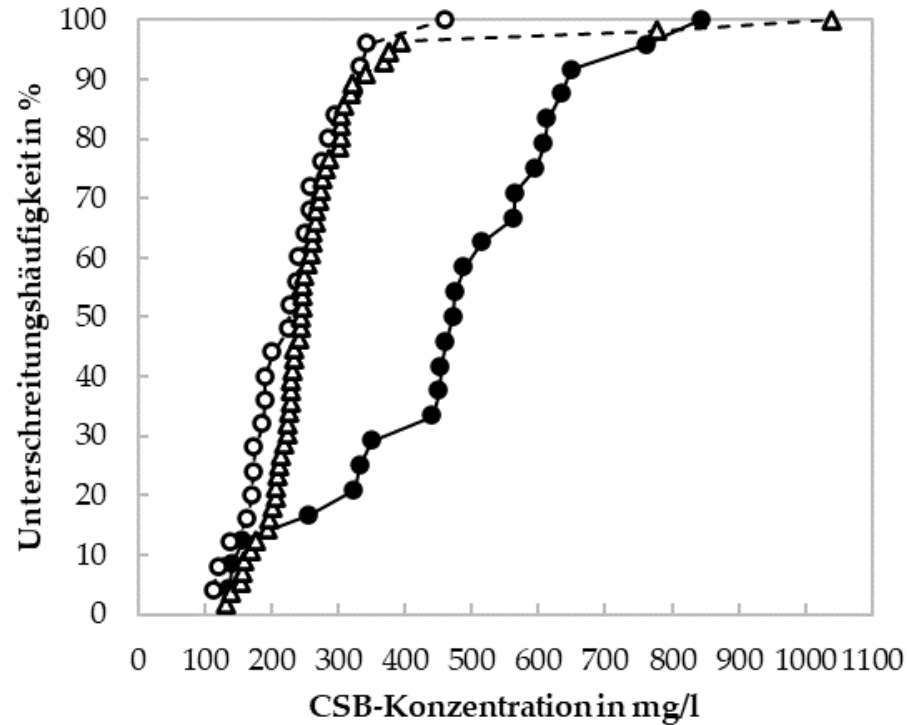
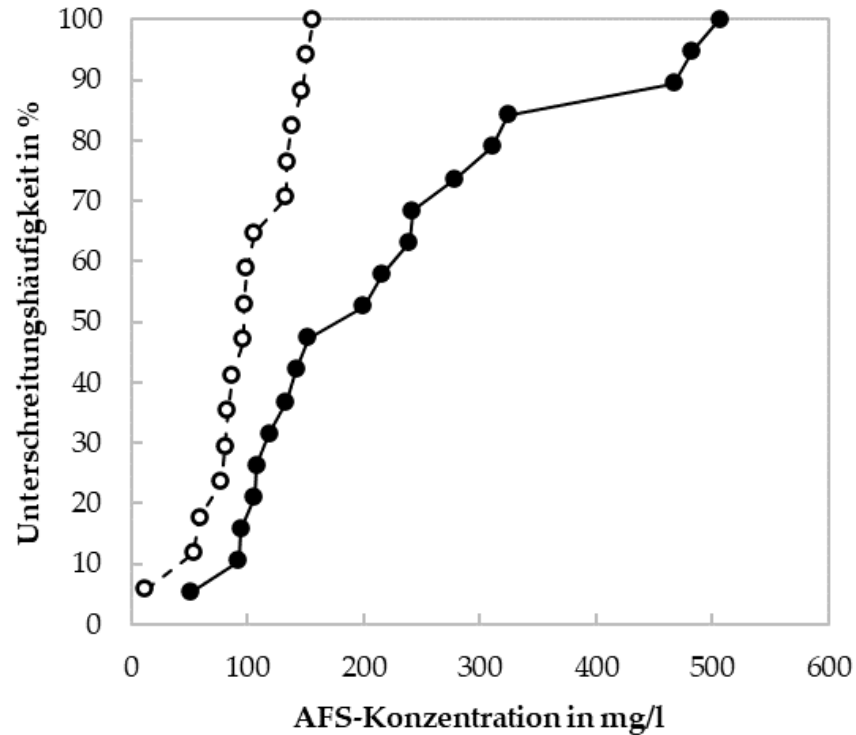
Ergebnisse

Parameter	Ermittelte Konzentrationen	Literaturangaben	Parameter	Ermittelte Frachten und Volumenströme	Literaturangaben
C_N	27,3 mg/l	>> 13 mg/l (Meinzinger and Oldenburg 2009)	$B_{d,N}$	1,6 g/(E·d)	>> 0,7 g/(E·d) (DWA 2015)
C_P	1,8 mg/l	<< 4,6 mg/l (Meinzinger and Oldenburg 2009)	$B_{d,P}$	0,11 g/(E·d)	~ 0,1 g/(E·d) ⁽¹⁾ (DWA 2015)

⁽¹⁾ n = 5; damit ist dieser Wert nur begrenzt verlässlich.

- N_{ges} -Konzentrationen 110 % und N_{ges} -Frachten 130 % höher als in der Fachliteratur
→ **Kontamination mit Urin**
- P_{ges} -Konzentrationen mit < 2 mg/l ca. 60 % niedriger als bislang angenommen
→ **aufgrund gesetzlicher Bestimmungen ältere Literaturangaben für P nur begrenzt belastbar**

Feststoffe (AFS) und organischer Kohlenstoff (CSB)



- Rohrgrauwasser
- Grauwasser gesiebt Studierendenwohnheim
- △ Grauwasser gesiebt, Arbeiterunterkünfte

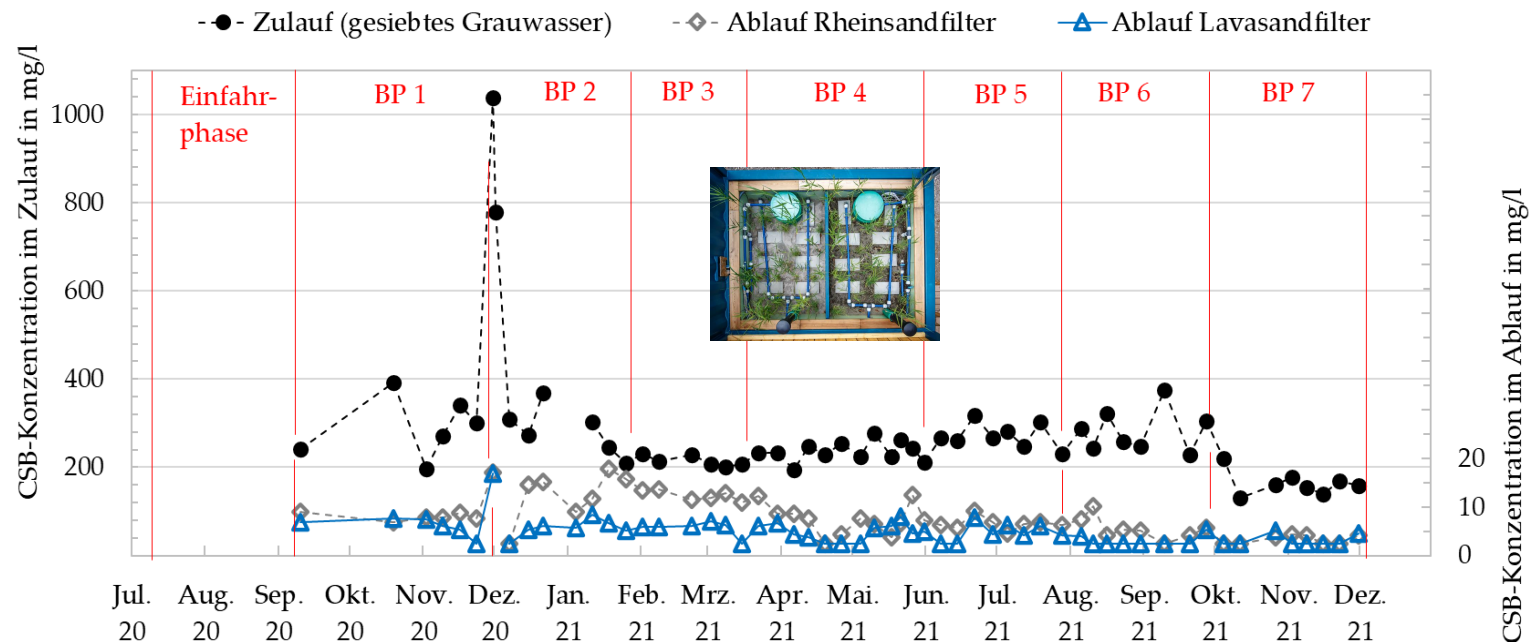
- AFS und CSB zu 40 – 45 % durch Feinsiebung (1,3 mm MW) entfernt
- ➔ **Siebung: Ausgleich der Schwankungen/Beschaffenheit**
- ➔ **Werte aus kommunalem Abwasser nicht auf Grauwasser übertragbar**



Reinigungsleistung im Bodenfilter

Feststoffe (AFS) und organischer Kohlenstoff (CSB)

- Abläufe nahezu feststofffrei (meist < 2 mg/l AFS, stets < 5 mg/l AFS); Eliminationen von überwiegend > 98 %
- CSB-Entfernung von überwiegend > 98 %



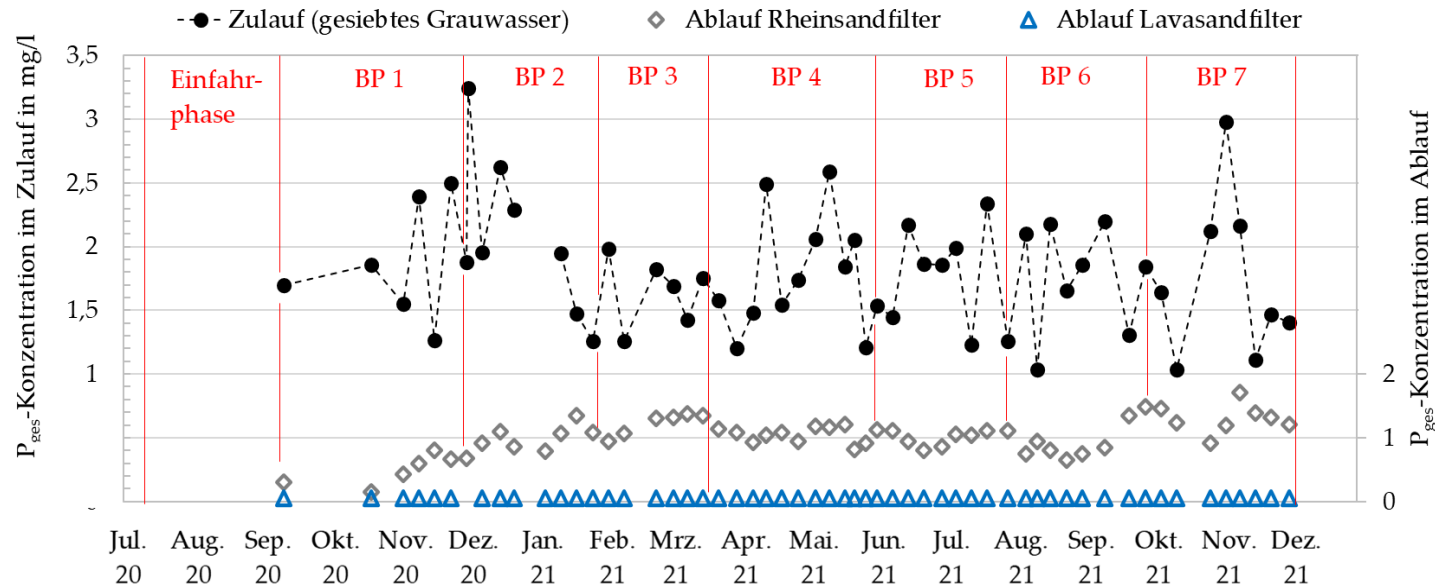
Nitrifikation = Umwandlung von NH_4^+ zu NO_3^{2-}

- Beim klassischen Rheinsandbodenfilter (0 – 2 mm)
Verslechterung der Nitrifikation bei $< 12^\circ\text{C}$
 - $\text{NH}_4\text{-N} = 0,92 \pm 1,40$ (n=50) [Ablauf]
 - $\text{NO}_2\text{-N} = 0,32 \pm 0,30$ mg/l (n=13) [Ablauf]

- Aufgeständerter Lavasandbodenfilter (0 – 4 mm)
geeignet für weitgehende Nitrifikation bereits ab 5°C
 - $\text{NH}_4\text{-N} = 0,015$ (BG) – 0,5 mg/l (n=46) [Ablauf]
 - $\text{NO}_2\text{-N} = < 0,015$ mg/l (BG; n=6) [Ablauf]



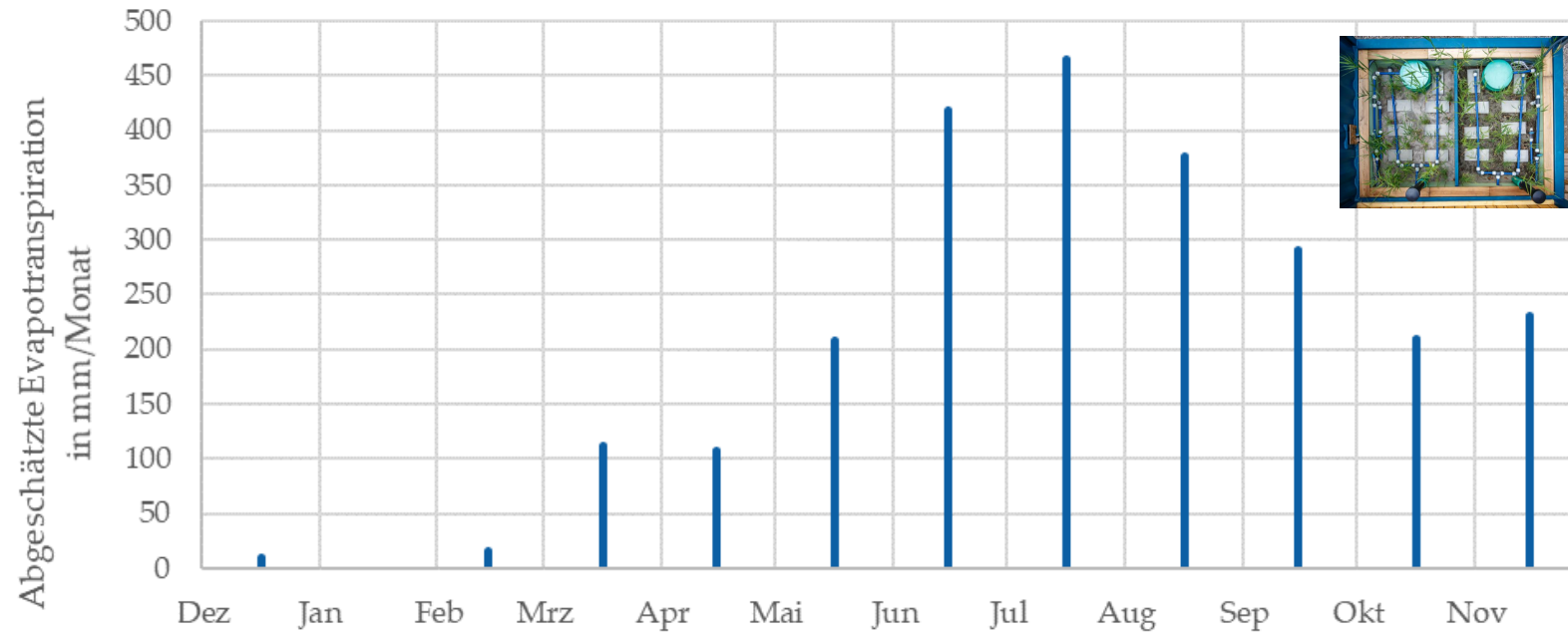
Phosphorrückhalt



- P_{ges} -Elimination im Rheinsandfilter $44 \pm 24 \%$; Lavasandfilter $> 98 \%$ (Ablaufwerte $< 0,05 \text{ mg/l BG}$)
- Lavasandfilter dem Rheinsandfilter überlegen (vgl. Fachliteratur - nach langjährigem Betrieb $55 - 80 \%$ P_{ges} -Elim bei $5,6 \text{ mg/l } P_{ges}$ im Zulauf; Bruch et al. 2011; Alewell et al. 2021)

Tenside, Keime, Spurenstoffe

- Ganzjährige Entfernung von Tensiden
- Keimreduktion von mindestens 3 log-Stufen (*E. coli*, Enterokokken und Gesamtcoliforme) im Bodenfilter
- Hinweis auf Urineintrag in Grauwasser aufgrund von Ibuprofen und Ibuprofen-Metaboliten
- Eliminationen von org. Mikroschadstoffen von überwiegend > 85%, oft > 99 % oder nur geringe Konzentrationen im Ablauf
 - Tendenziell Lavasandfilter besser geeignet als Rheinsandfilter
→ **neue Filtermaterialien müssen untersucht werden!**



- 2400 mm/a für *P. australis* (ca. 9,4 % der Zulaufmenge); vgl. Evaporation freier Wasserflächen [ca. 700 mm/a; vgl. DWA-M 504-1, 2018]

→ **Eigenständiger Beitrag zur Verdunstung**

Fazit und Ausblick

- **Verbesserung der Datenverfügbarkeit** für Grauwasser erforderlich
- **Siebung** als Vorstufe für leichtes Grauwasser **ausreichend**
- **Äußerst geringe Feststoff- und Kohlenstoffkonzentrationen** im Ablauf
- (Aufgeständerter) **Lavasandfilter** zur weitergehenden **P-Elimination** und zur **vollständigen Nitrifikation** bei niedrigen Temperaturen geeignet
- Vertikalfilter zur **Keimreduktion, Tensid- und z. T. Spurenstoffentfernung geeignet**
- **Beitrag zur Verdunstung** durch bewachsenen Bodenfilter
- Erforderliche Filterfläche von 0,3 – 0,4 m²/E für leichtes Grauwasser (<< 2 m²/E für gesamtes Grauwasser, vgl. DWA-A 262, 2017)
- Verzicht auf Absetzbecken, aufgeständerte Bauweise und kleinere erforderliche Filterfläche → Förderung der urbanen Anwendbarkeit
- Angepasste Vertikalfilter → Beitrag zur sicheren Wasserwiederverwendung

- Alewell, C., Huang, J.-H., McLaren, T. I., Huber, L., & Bünemann, E. K. (2021). Phosphorus retention in constructed wetlands enhanced by zeolite- and clinopyroxene-dominated lava sand. *Hydrological Processes*. doi:10.1002/hyp.14040. BDEW (2022): 26. BDEW. (2022). Trinkwasserverwendung im Haushalt 2021: Durchschnittswerte bezogen auf die Wasserabgabe an Haushalte und Kleingewerbe – Anteile.
- Bruch, I., Fritsche, J., Bänninger, D., Alewell, U., Sendelov, M., Hürlimann, H., et al. (2011b). Improving the treatment efficiency of constructed wetlands with zeolite-containing filter sands. *Bioresource technology*, 102, 937–941. doi:10.1016/j.biortech.2010.09.041.
- 70. DIN 19650. (1999). Bewässerung - Hygienische Belange von Bewässerungswasser. Februar 1999. Deutsches Institut für Normung e. V.
- Dotro, G., Langergraber, G., Molle, P., Nivala, J., Puigagut, J., Stein, O., et al. (2017). *Biological Wastewater Treatment Series, Volume Seven: Treatment Wetlands*. Water Intelligence Online. doi:10.2166/9781780408774.
- DWA (2015): *Neuartige Sanitärsysteme. Begriffe, Stoffströme, Behandlung von Schwarz-, Braun-, Gelb-, Grau-, und Regenwasser, Stoffliche Nutzung*. Unter Mitarbeit von Weiterbildender Studiengang Wasser und Umwelt und Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. 2. Aufl. Kromsdorf: Bauhaus-Universitätsverlag als Imprint von VDG Weimar.
- DWA-A 262 (2017): *Grundsätze für Bemessung, Bau und Betrieb von Kläranlagen mit bepflanzten und unbepflanzten Bodenfiltern zur Reinigung häuslichen und kommunalen Abwassers*. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall.
- DWA-M 277 (2017): *Hinweise zur Auslegung von Anlagen zur Behandlung und Nutzung von Grauwasser und Grauwasserteilströmen*, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA), Hennef.

- DWA-M 504-1. (2018). Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen: Teil 1: Grundlagen, experimentelle Bestimmung, Gewässerverdunstung (2016th ed., DWA-Regelwerk, M 501,1). Hennef: DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall e.V.
- Eisenberg, B., Morandi, C., Richter, P., Well, F., Winker, M., Minke, R., et al. (2021). The Impulse Project Stuttgart— Stimulating Resilient Urban Development Through Blue-Green Infrastructure. In G. Hutter, M. Neubert, & R. Ortlepp (Eds.), Building Resilience to Natural Hazards in the Context of Climate Change (pp. 157–171, Studien zur Resilienzforschung). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- EU-WasserWVVO. (2020). Verordnung (EU) 2020/741 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Mai 2020 über Mindestanforderungen an die Wasserwiederverwendung: Verordnung über Mindestanforderungen an die Wasserwiederverwendung.
- GrwV. (2010). "Grundwasserverordnung vom 9. November 2010 (BGBl. I S. 1513), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 4. Mai 2017 (BGBl. I S. 1044) geändert worden ist .
- Meininger, F., & Oldenburg, M. (2009). Characteristics of source-separated household wastewater flows: a statistical assessment. *Water Science and Technology*, 59, 1785–1791.
- Morandi, C., & Steinmetz, H. (2019). How does greywater separation impact the operation of conventional wastewater treatment plants?. *Water Science and Technology*, 79(8), 1605-1615.
- TrinkwV. (2016). Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch - Trinkwasserverordnung (German: Ordinance on the quality of water intended for human consumption - Drinking Water Ordinance): TrinkwV .
- Well, F., & Ludwig, F. (2020). Blue–green architecture: A case study analysis considering the synergetic effects of water and vegetation. *Frontiers of Architectural Research*, 9, 191–202. doi:10.1016/j.foar.2019.11.001.130.

Vielen Dank!



carlo.morandi@rptu.de