

# 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

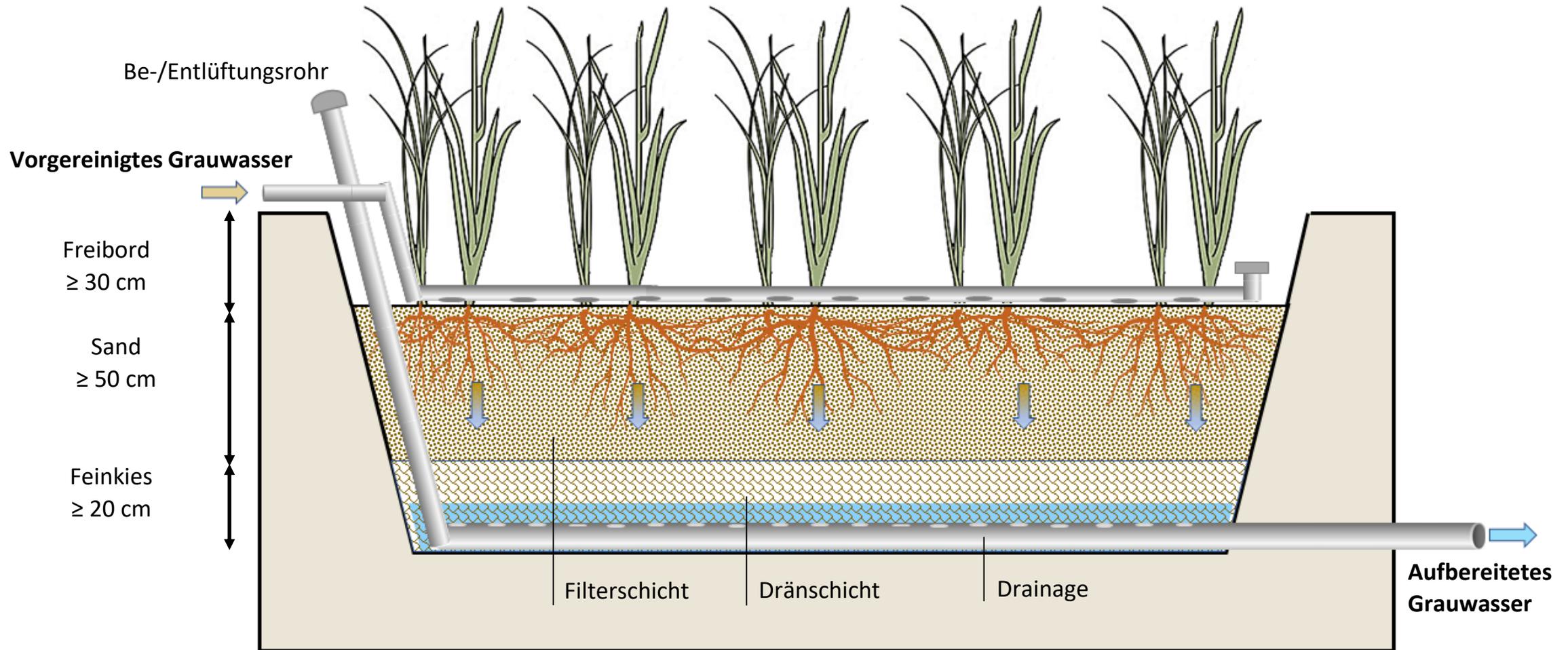
WASCH-  
MASCHINE

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

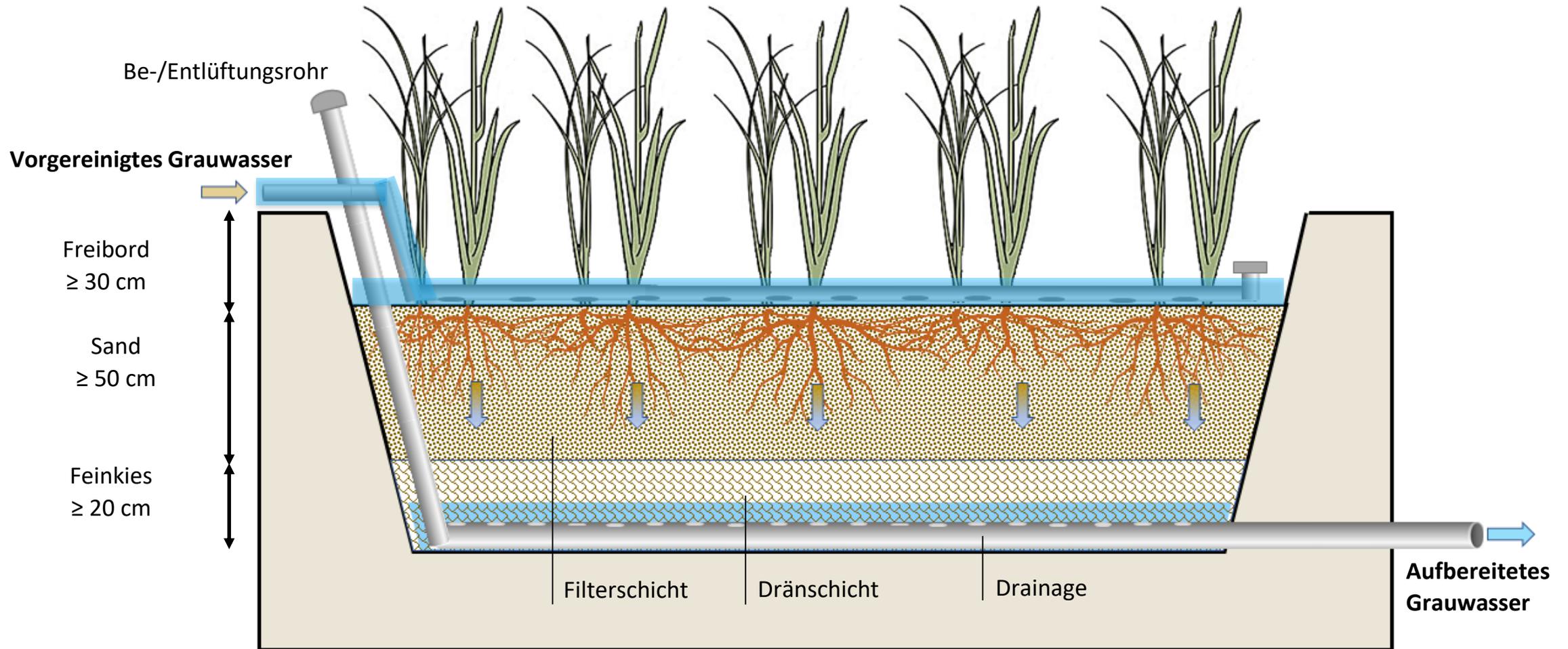
BAD, DUSCHE

HAND-  
WASCH-  
BECKEN

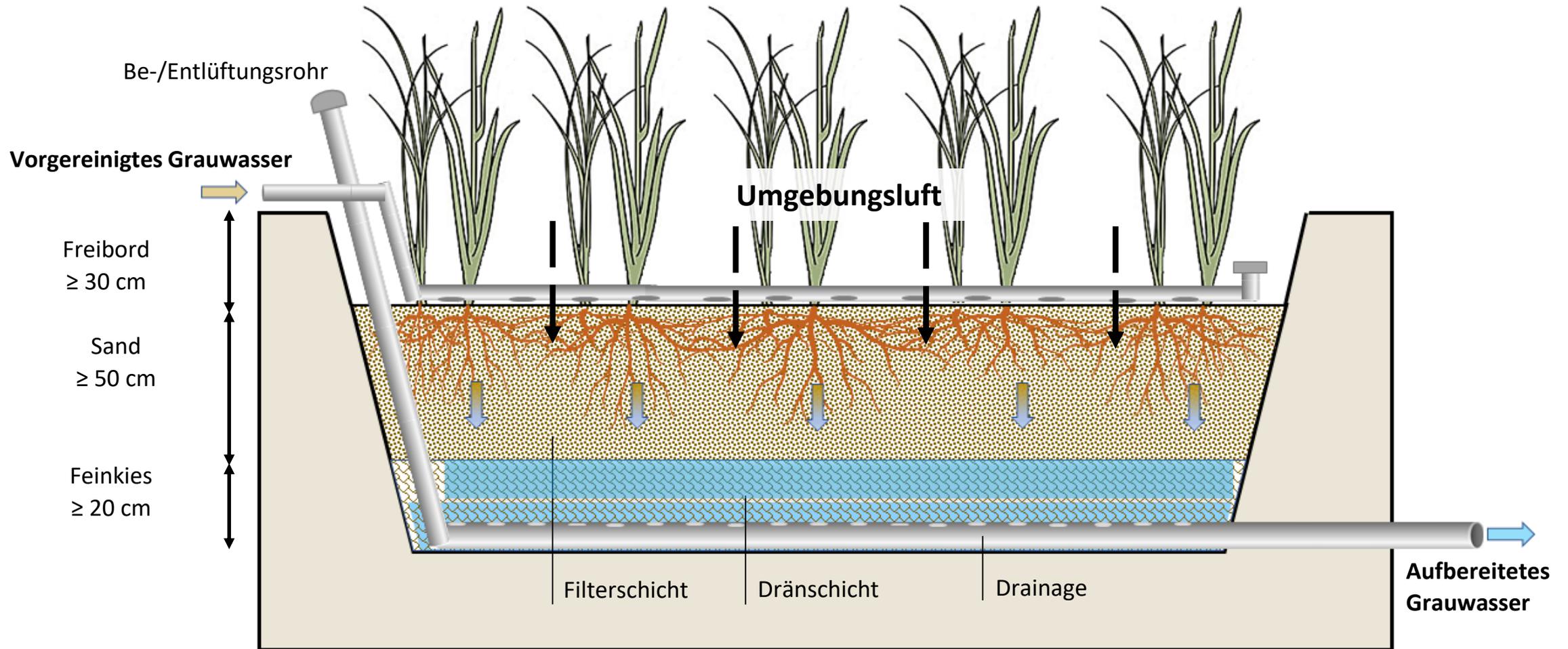
# Vertikal durchflussener Bodenfilter



# 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?

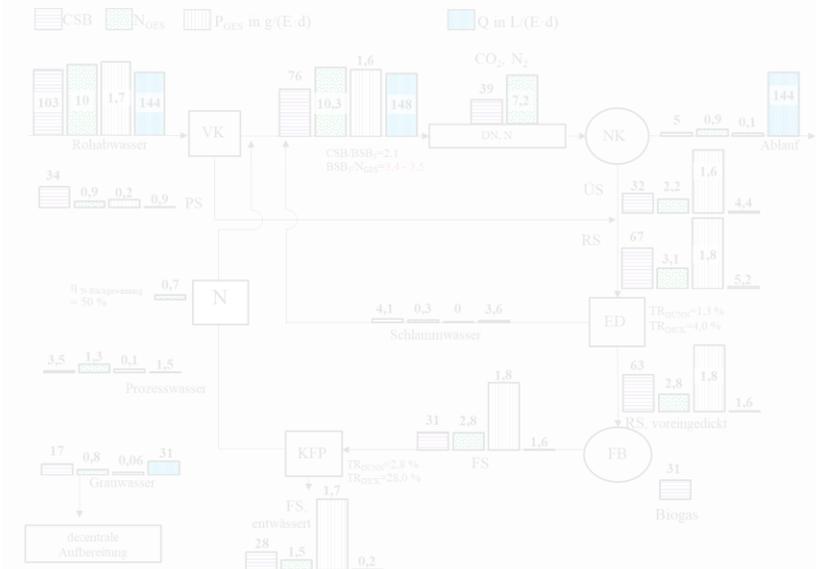
# Inhalte der Arbeit

## Technologieanpassung



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

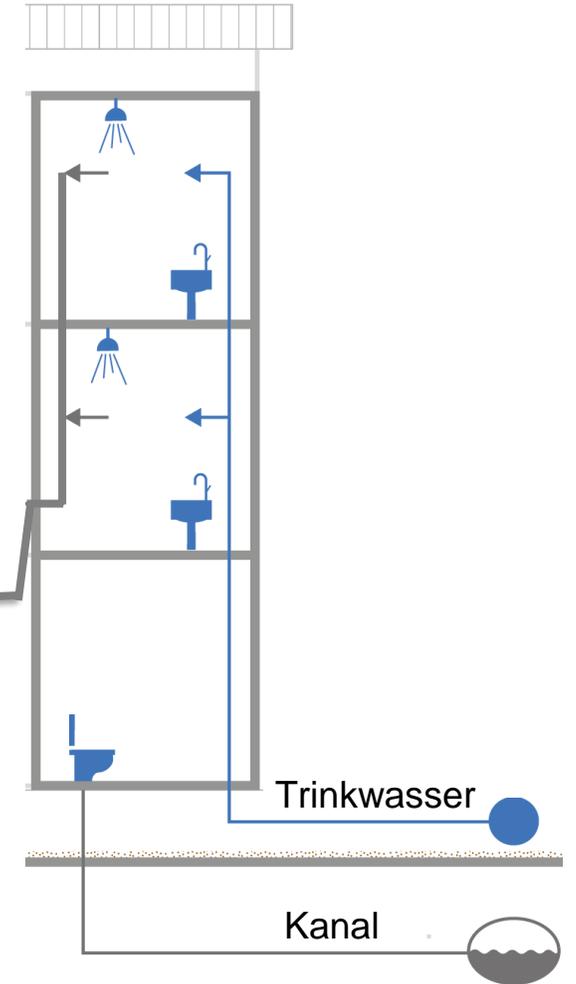
## Konzeptentwicklung



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

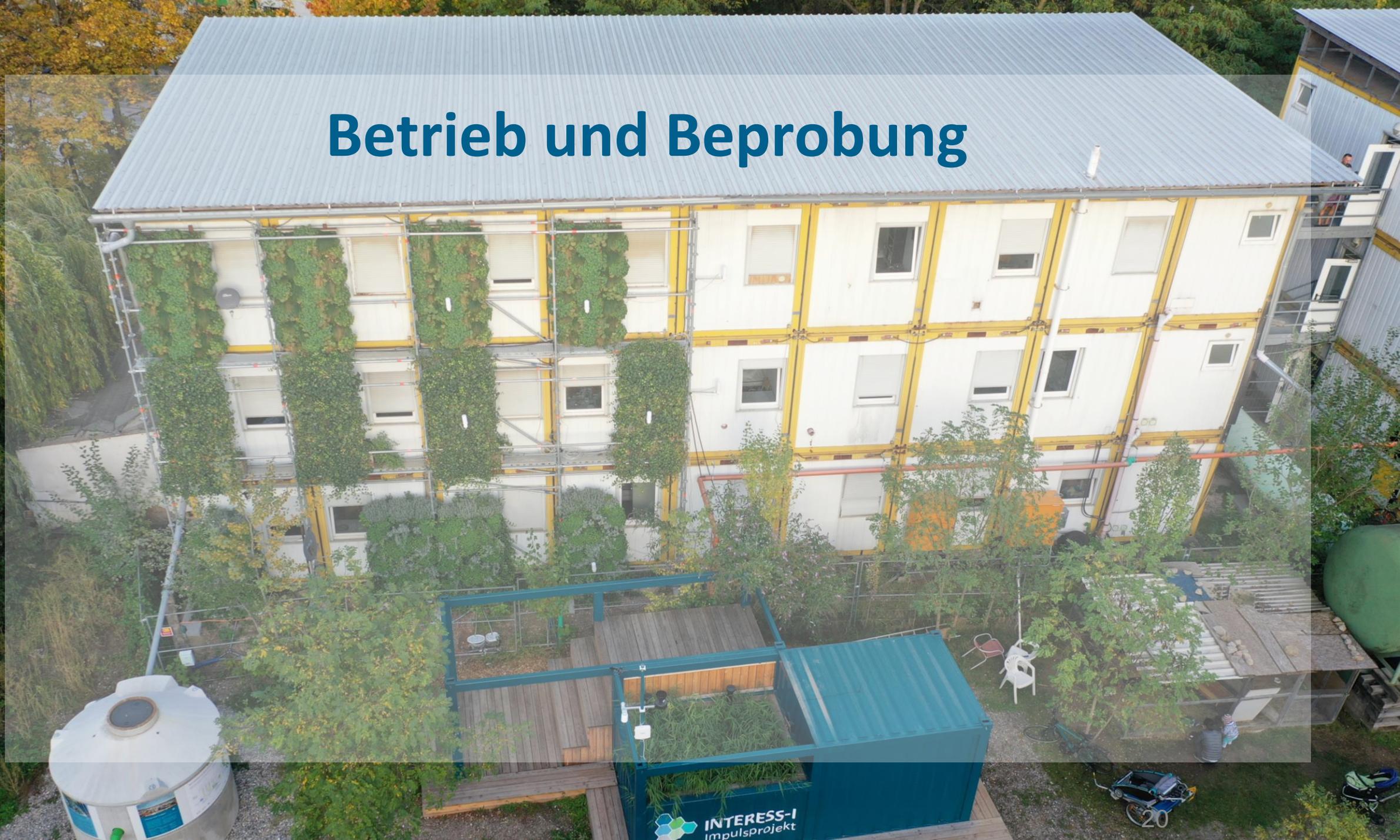


© Julian Rettig

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.  $32 \text{ g CSB}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$

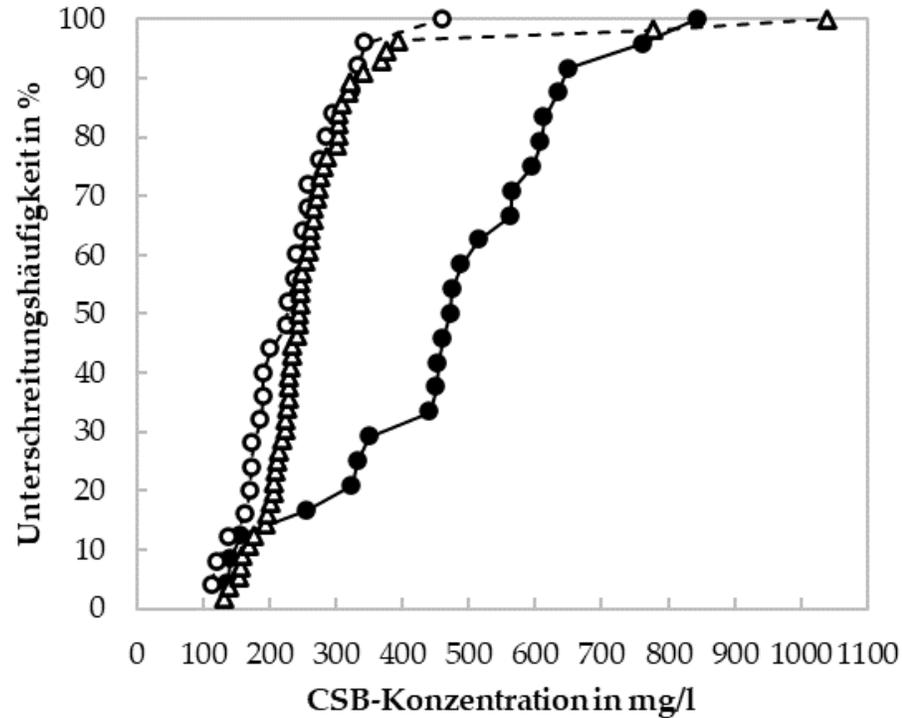
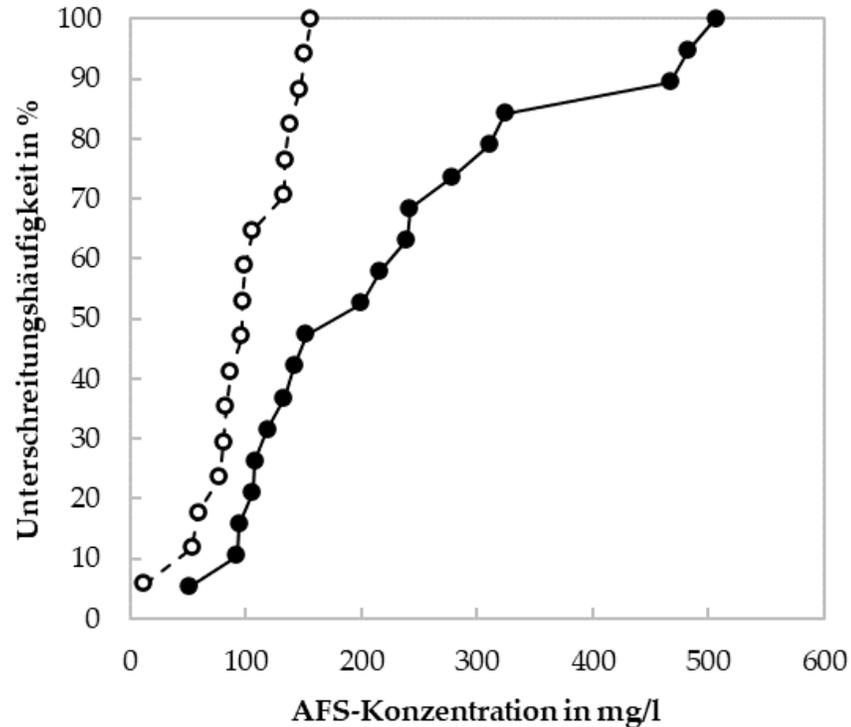
# Ergebnisse

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) <sup>(1)</sup> (DWA 2015)

<sup>(1)</sup> 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)



- Rohrgrauwater
- Grauwasser gesiebt
- △ Grauwasser gesiebt, Arbeiterunterkünfte

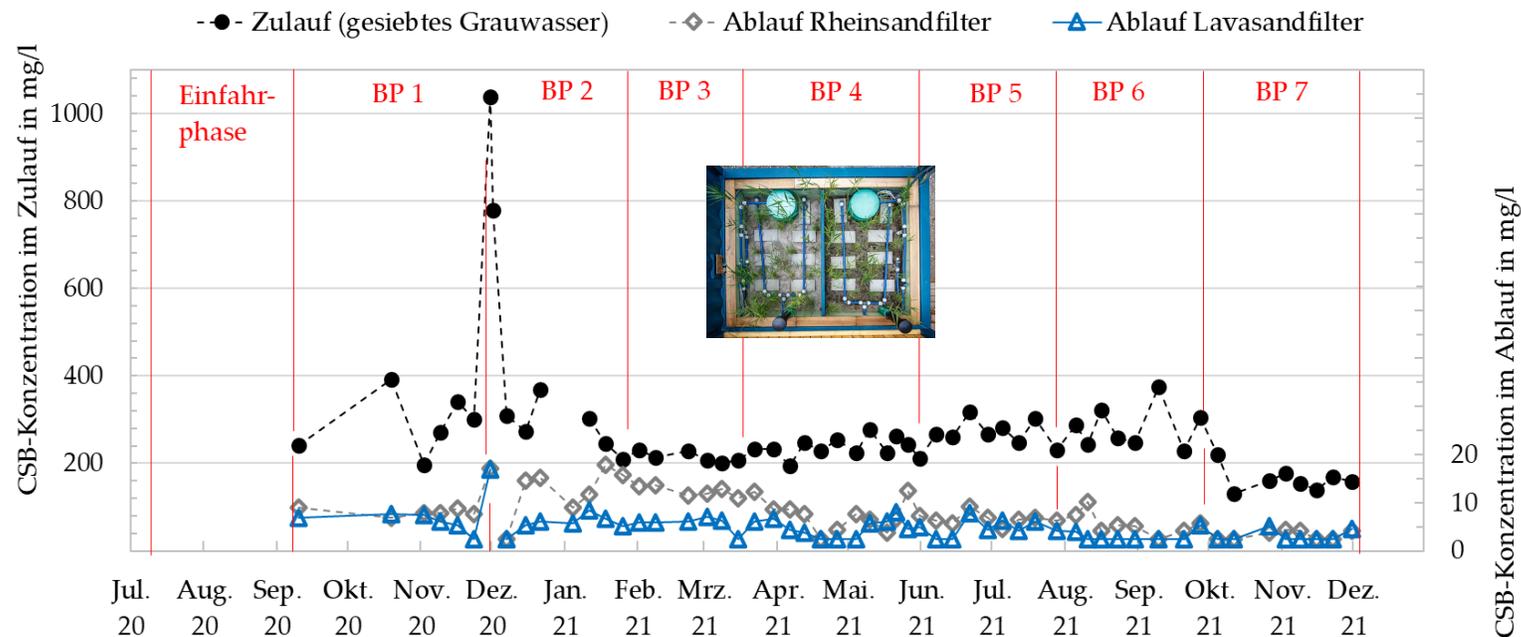
- AFS und CSB zu 40 – 45 % durch Feinsiebung (1,3 mm MW) entfernt
- ➔ **Siebung: Ausgleich der Schwankungen/Beschaffenheit**
- ➔ **Werte aus kommunalem Abwasser nicht auf Grauwasser übertragbar**



# 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 %



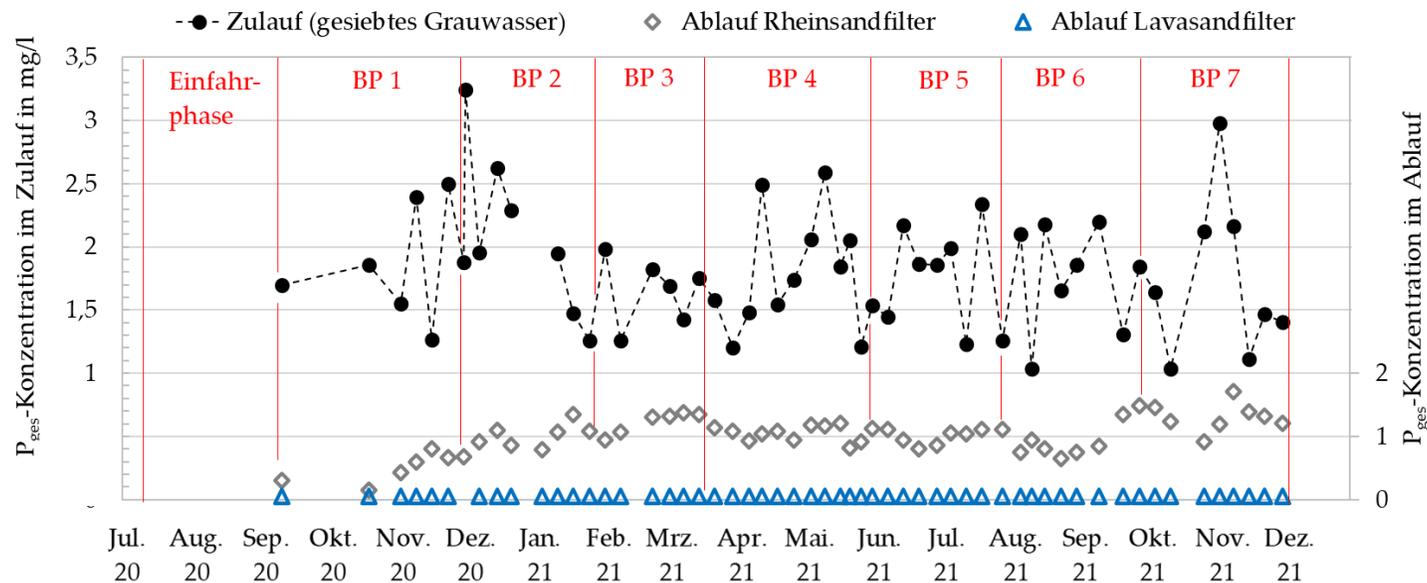
**Nitrifikation = Umwandlung von  $\text{NH}_4^+$  zu  $\text{NO}_3^{2-}$**

- 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  $5^\circ\text{C}$ 
  - $\text{NH}_4\text{-N} = 0,015$  (BG) – 0,5 mg/l (n=46) [Ablauf]
  - $\text{NO}_2\text{-N} = < 0,015$  mg/l (BG; n=6) [Ablauf]



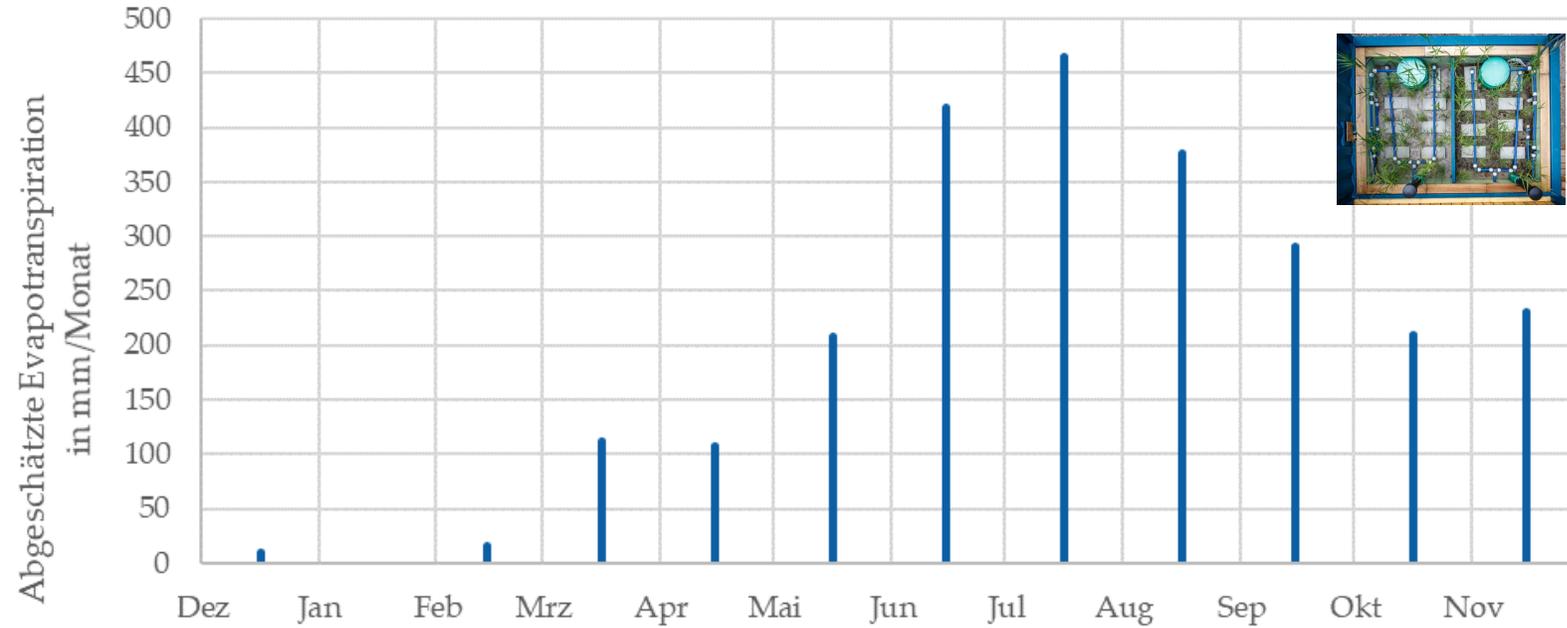
## Phosphorrückhalt



- P<sub>ges</sub>-Elimination im Rheinsandfilter  $44 \pm 24 \%$ ; Lavasandfilter  $> 98 \%$  (Ablaufwerte  $< 0,05$  mg/l BG)
- Lavasandfilter dem Rheinsandfilter überlegen (vgl. Fachliteratur - nach langjährigem Betrieb 55 – 80 % P<sub>ges</sub>-Elim bei 5,6 mg/l P<sub>ges</sub> 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 m<sup>2</sup>/E für leichtes Grauwasser (<< 2 m<sup>2</sup>/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 .
- Meinzinger, 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](mailto:carlo.morandi@rptu.de)