

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Eine Initiative des Bundesministeriums  
für Bildung und Forschung

**WavE**

Wassertechnologien: Wiederverwendung



# *Point of Use Reuse (PU<sub>2</sub>R): Prozessoptimierung für dezentrale landwirtschaftliche Wasserwiederverwendung und Risiken für Boden und Grundwasser*

Aaron Bauer [aaron.bauer@uba.de](mailto:aaron.bauer@uba.de)

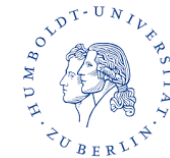
Mogens Thalmann [m.thalmann@tu-braunschweig.de](mailto:m.thalmann@tu-braunschweig.de)



**MANN+  
HUMMEL**



FH MÜNSTER  
University of Applied Sciences

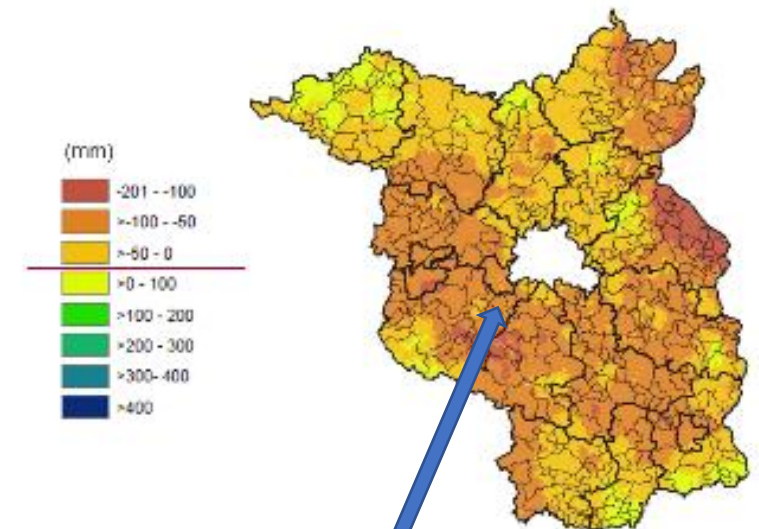
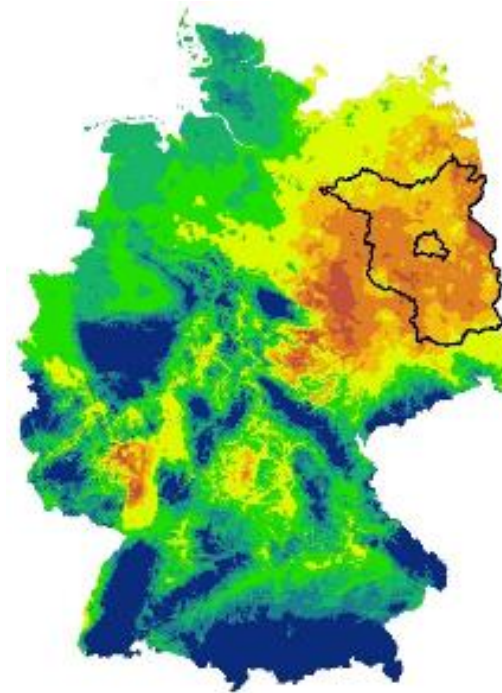


**UFZ** HELMHOLTZ  
Zentrum für Umweltforschung



# Aktuelle Situation in Brandenburg

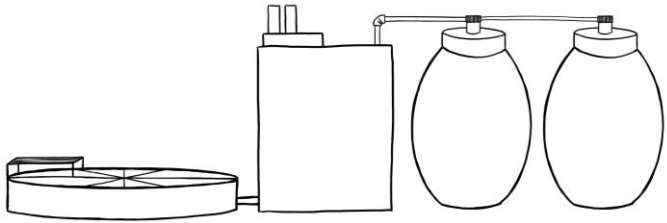
- Negative klimatische Wasserbilanz, -52 mm jährlich (1991-2021)
- Extreme Dürreperioden in den letzten Sommern
- 46% landwirtschaftliche Fläche
- Sandige Böden
- 11 % ohne Anschluss an das Abwassernetz
  - Senkgruben und Klärgruben



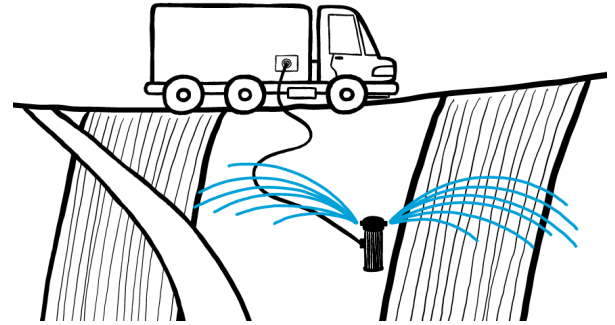
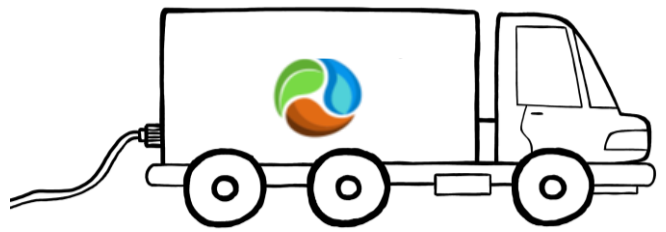
„real lab“ in Fresdorf

# Vision

Konventionell



PU<sub>2</sub>R

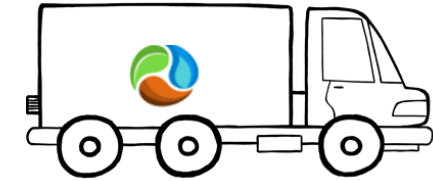


Amina El-Attman

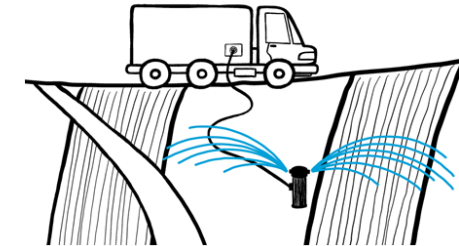
# Untersuchungsrahmen des Forschungsprojekts



Reinigung von Abwasser für einen landwirtschaftlichen Re-Use



Bewässerungstechnik



Weg von Boden ins Grundwasser

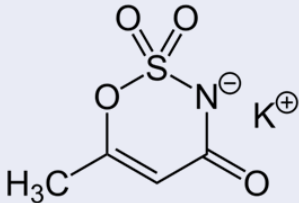
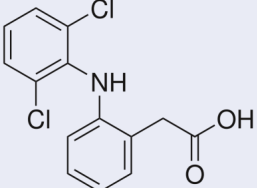
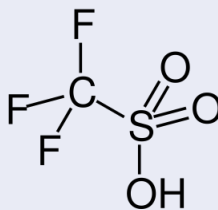


Wirkungspfad Boden zur Pflanze

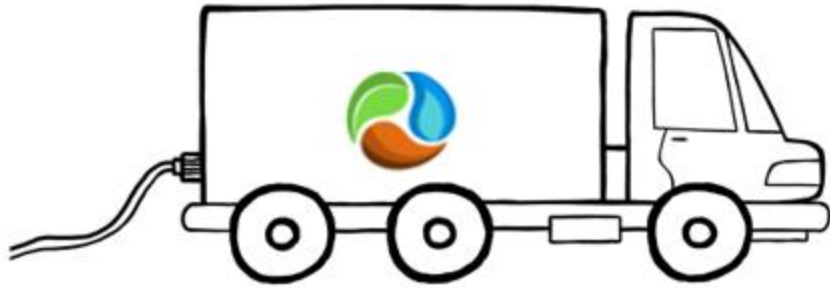


# Organische Spurenstoffe

- Abwasser kann org. Spurenstoffe aus verschiedenen Quellen enthalten
- Spurenstoffe können persistente und mobile (ggf. auch toxische) Eigenschaften besitzen
- **Potenzielles Risiko bei einer Wasserwiederverwendung für den Konsumenten, Grundwasser und Boden**
- Messung von 24 persistenten und mobilen Stoffen

	Acesulfam (ACE)	Diclofenac (DFN)	Trifluormethansulfonsäure (TFMSA)
Herkunft und Anwendung	Süßstoff	Schmerzmittel	PFAS
Log D-Wert bei 8,2	-1,49 (hydrophil)	1,37 (lipophil)	-1,23 (hydrophil)
Molare Masse (g/mmol)	201,24	296,15	150,08
Strukturformel			

# Abwasserbehandlung



Betriebliche Optimierung  
des „kleines“ Pilot-MBRs

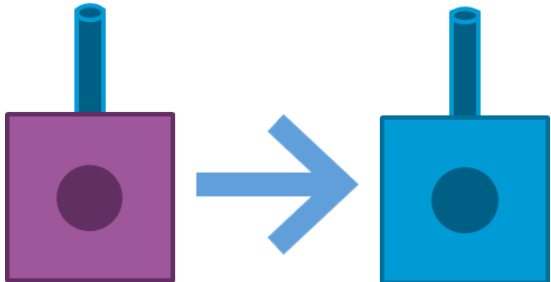


biolog. Reinigungs-  
prozess & Spuren-  
stoffelimination



Mikrobiologischer  
Rückhalt &  
Wiederverkeimung

Chem. Reinigung & DNP

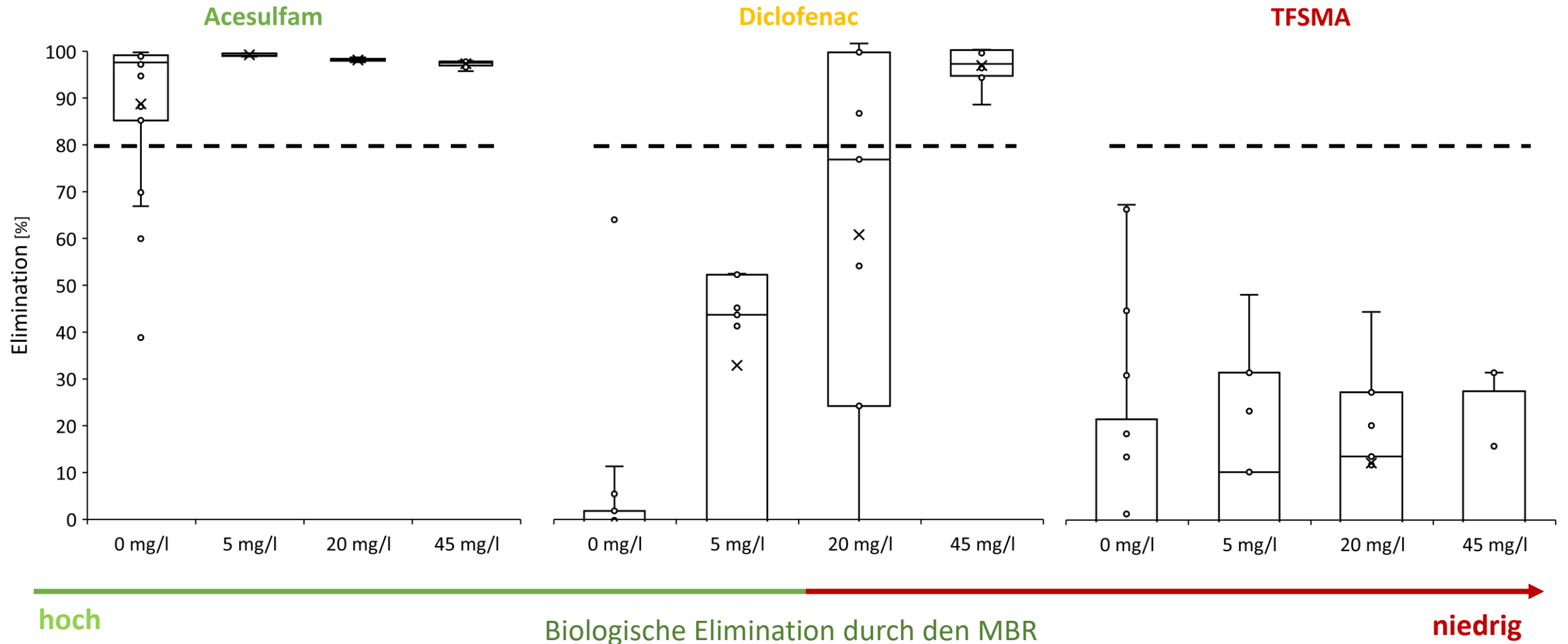


Bau & Programmierung des „großen“  
Pilot-MBRs

**Welche Spurenstoffe sind schwer zu eliminieren?**



# Spurenstoffelimination weiterer PM-Stoffe





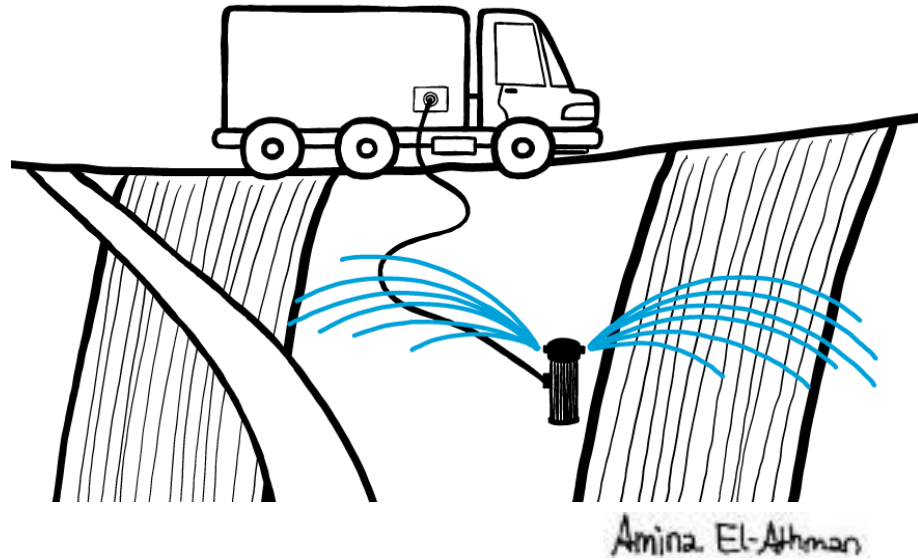
# PM-Stoffe Übersicht

## 24 Indikator-Spurenstoffe

- 3 PM-Stoffe in sehr geringen Konzentration bzw. nicht detektierbaren Konzentrationen im Feed vorhanden
- Ohne PAK:
  - 6 Spurenstoffe > 80 % eliminiert
- 5 mg/L PAK:
  - 7 Spurenstoffe > 80 % eliminiert
- 20 mg/L PAK:
  - 10 Spurenstoffe > 80 % eliminiert
- 45 mg PAK/L Feed:
  - 13 Spurenstoffe > 80 % eliminiert
- AAMPS, DCA, MPSA, TFMSA (und VSA ) sind schlecht adsorbierbar
- Verbesserung der Spurenstoffelimination durch Zugabe und Erhöhung der PAK-Konzentration

Indikator-/Leitsubstanz* (Ø-Feed-Konz. [mg/L])	Eliminationsleistungen [%]				
	Versuchsphase [PAK/L Feed]	ohne PAK	(Median)		
			5 mg	20 mg	45 mg
AAMPS (0,04/0,04/0,03/0,04)		-6	-17	-11	3
ACE (50,29/59,88/51,28/66,77)		98	99	98	97
ATA (0,16/0,12/0,12/0,16)		-31	-5	11	58
BDMA (1,46/0,77/1,08/2,13)		90	98	98	98
BETMAC (<BG/<BG/<BG/<BG)		x	x	x	x
BTA (10,85/10,26/11,72/14,08)		52	76	91	97
CBM (0,81/0,86/0,79/0,78)		-10	69	90	98
CG (2,68/1,75/2,5/3,37)		-4	61	59	64
DCA (5,52/4,49/5,54/6,93)		-7	-28	18	6
DFN (4,39/4,25/3,97/4,46)		-13	41	73	95
DIOTOG (0,01/0,01/0,01/0,01)		x	x	x	x
DMBSA+XSA (18,2/16,3/19,6/20,5)		89	95	93	95
DPG (1,07/1,07/0,51/0,36)		46	83	90	98
HHTMP (6,32/2,63/1,61/1,34)		86	91	83	79
MAPMA (0,11/0,03/<BG/<BG)		x	x	x	x
MEL (1,62/3,33/5,96/4,58)		3	39	58	89
MPSA (0,03/0,03/0,02/0,03)		1	-13	-9	38
OXI (29,2/20,3/20,1/20,2)		-43	32	70	91
PRI (0,31/0,25/0,26/0,26)		-19	21	44	83
PTSS (12,3/14,9/20,6/26,64)		97	98	99	99
SAC (40,8/44,9/41,7/46,24)		97	94	99	99
SMX (1,63/1,30/1,11/1,28)		45	61	83	93
TFMSA (0,01/0,01/0,02/0,01)		13	0	0	-22
VSA (0,58/0,56/0,60/0,72)		-685	-545	-788	-36

# Ausgangspunkt Bodenauswirkungen



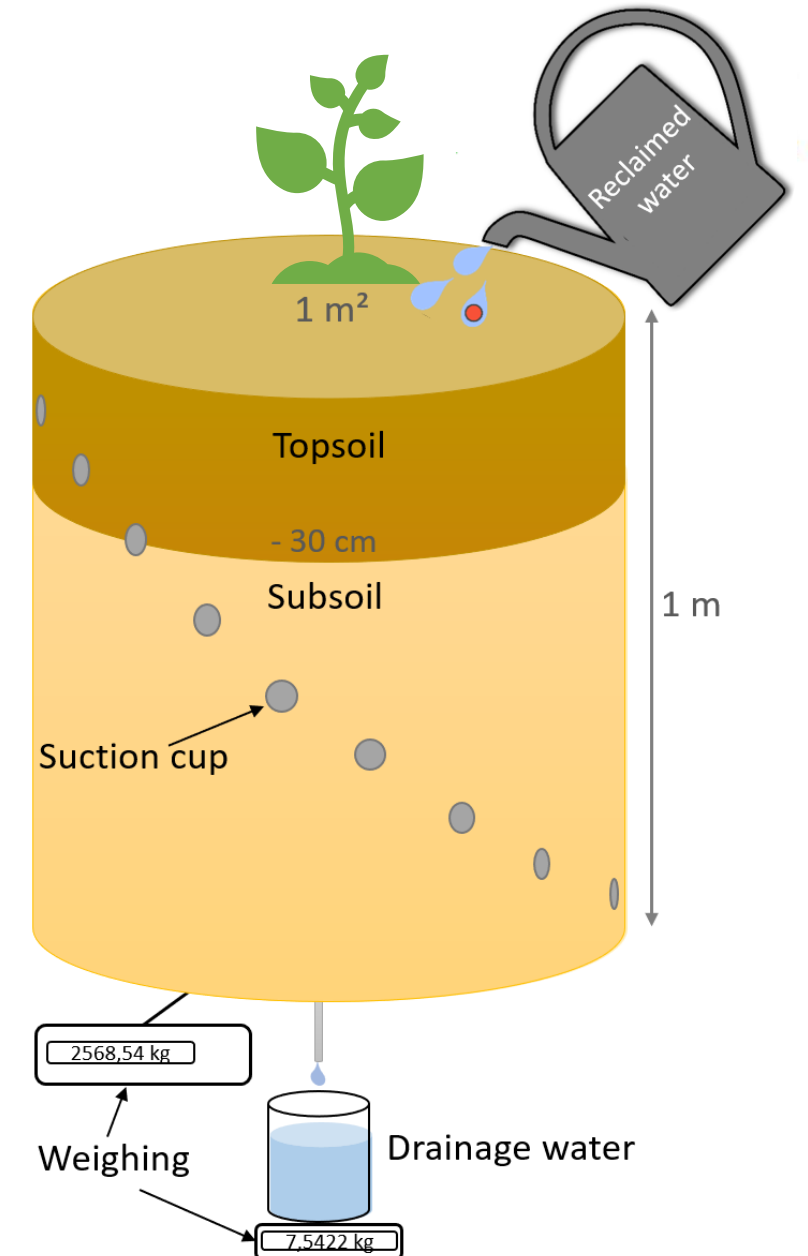
- Transport der im aufgereinigten Abwasser enthaltenen Spurenstoffe im Fressdorfer Ackerboden.
  - **Risiko einer Grundwasserkontamination?**

# 4 Lysimeter aus Fresdorf (2 gestochen, 2 gepackt)



# Überblick Lysimeter

- Abbildung des Gesamtsystems **Atmosphäre-Boden-Pflanze**.
  - Untersuchung des Wasser- und Stofftransports unter **feldnahen** Bedingungen.
- Bilanzierung der Wasser- und Stoffflüsse:
  - Erfassung der Volumen und PM-Konzentrationen im Bewässerungs- und Drainagewasser.
- PM-Stoffverteilung:
  - Beprobung des Sickerwassers mit 9 Saugkerzen



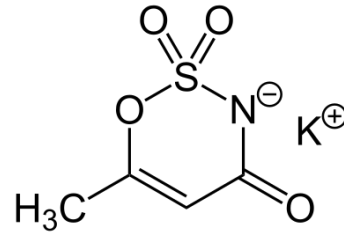
# Versuchsdurchführung

- Fortlaufender Versuch über 3 Jahre:
  - Juli 2021 bis August 2024
- **Bepflanzung:**
  - Vegetationsperioden 2021/2022: Sommerbraugerste
  - Vegetationsperiode 2023: Hafer
- **Bewässerung:**
  - Aufgereinigtes Wasser vom Klärwerk Ruhleben
  - Bedarfsgerechte Bewässerung während Vegetationsperiode
  - Simulierte Grundwasseranreicherung Winter 2022/23



Lysimeter mit Hafer 2023

# Acesulfam



• Synthetischer Süßstoff

Transport:

• Immobil: Rückhalt im Oberboden

Prozesse:

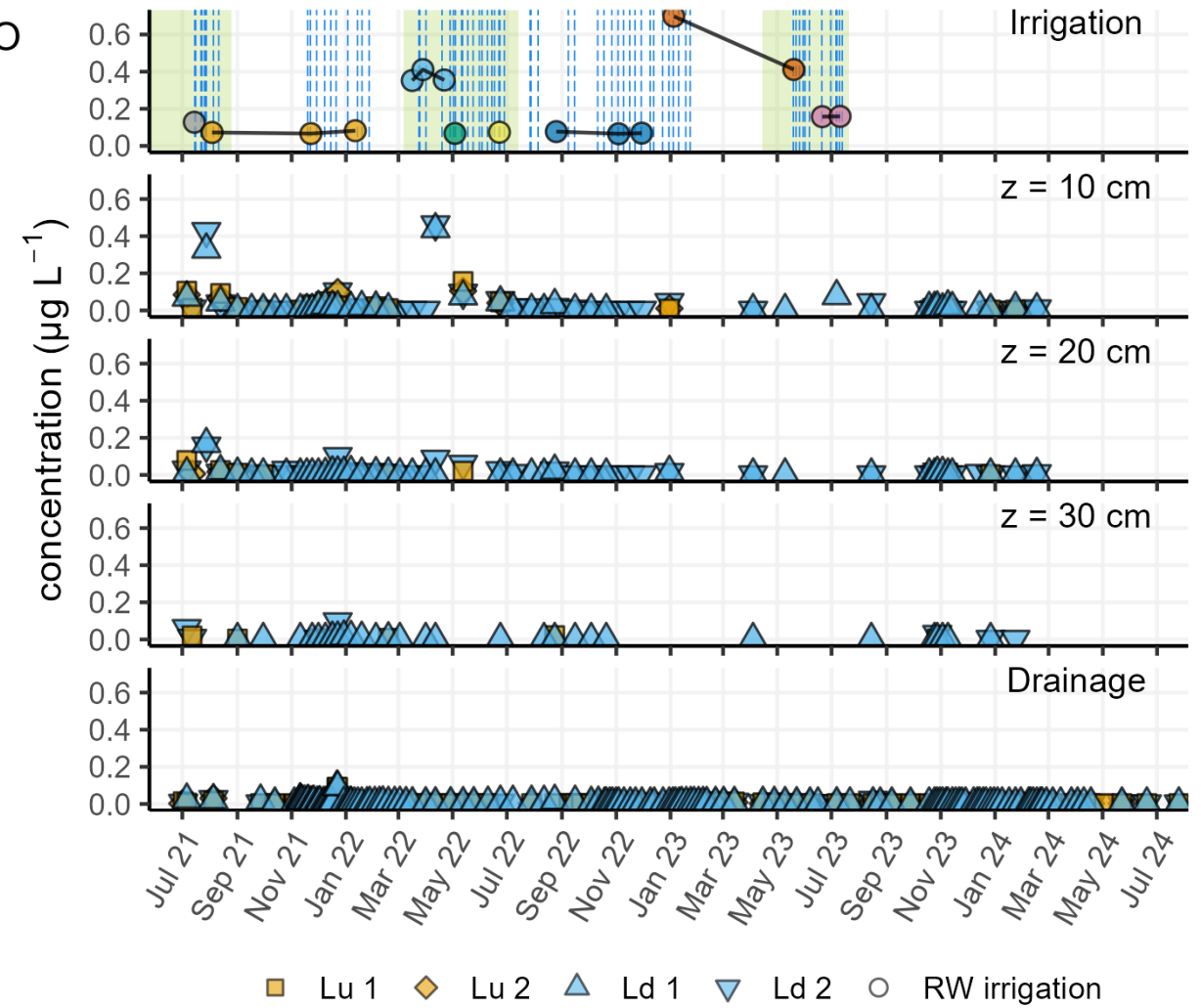
• Schneller Abbau

• Keine Sorption

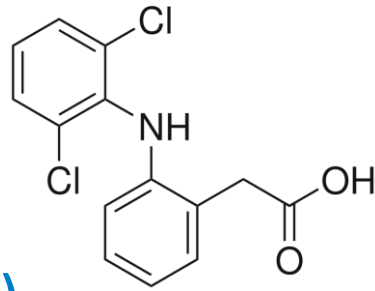
Massenbilanz:

• < 2.5 % Austrag am unteren Rand

➤ Keine Gefahr fürs Grundwasser



# Diclofenac



- Schmerzmittel (Voltaren)

## Transport:

- Immobil: Kompletter Rückhalt im Oberboden

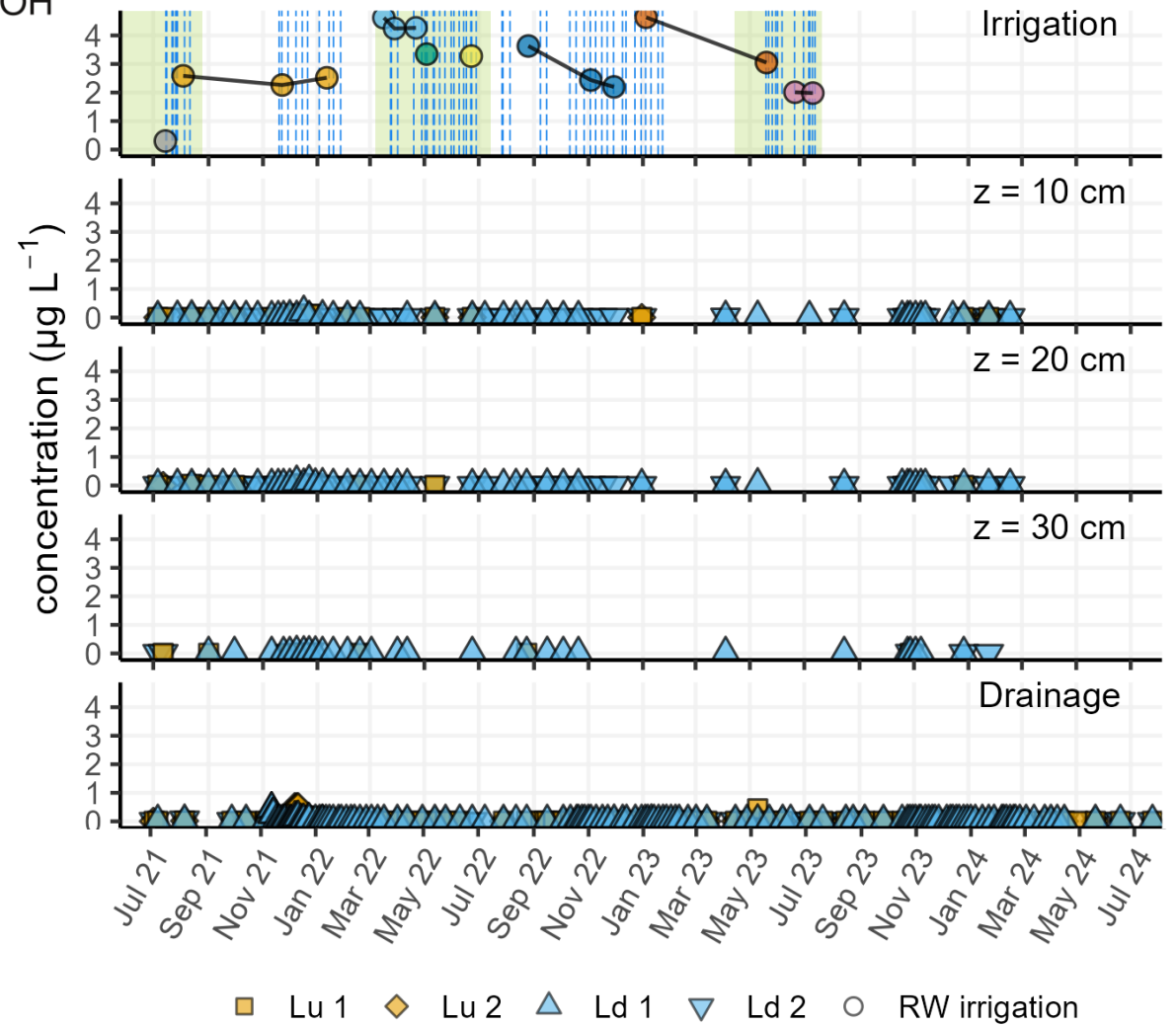
## Prozesse:

- Schneller Abbau
- Starke Sorption

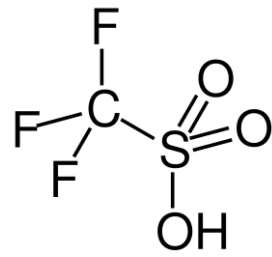
## Massenbilanz:

- < 0.6 % Austrag am unteren Rand

➤ Keine Gefahr fürs Grundwasser



# TFSMA



## Kurzkettiger PFAS

### Transport:

- Sehr mobil: Tracer-artiger Transport
- Aufkonzentrierung während Vegetationsperiode und Transport im Winter

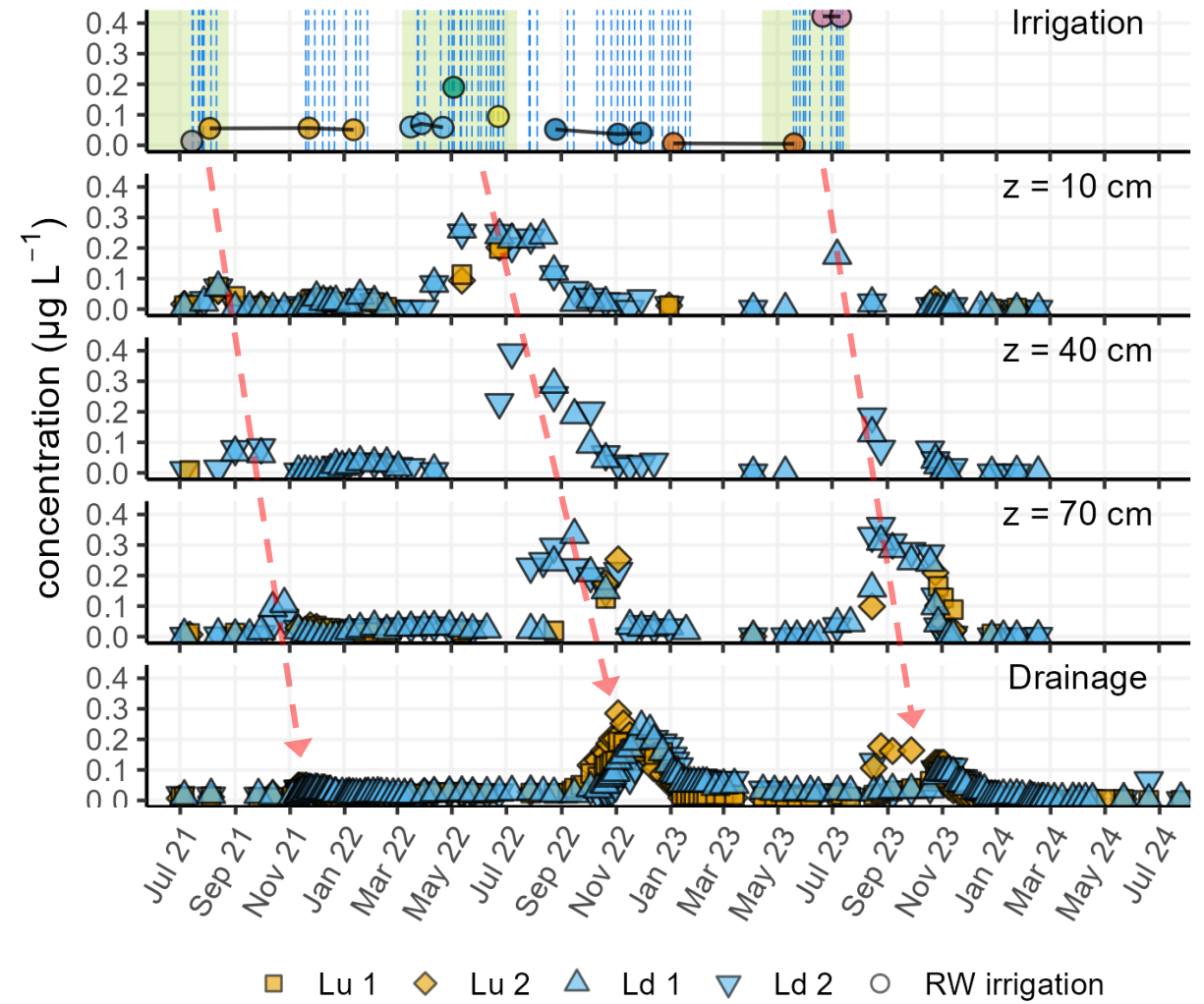
### Prozesse:

- Kein Abbau, keine Sorption
- Aufnahme in Pflanzen möglich

### Massenbilanz:

- > 70 % Austrag am unteren Rand

➤ Gefahr fürs Grundwasser!





# Fazit

## Eliminationsleistung

Stoff	MBR (Abbau)	PAK (Sorption)	Boden
Acesulfame	Green	Yellow	Green
Diclofenac	Red	Green	Green
TFMSA	Red	Red	Red
Legende	Niedrig	Mittel	Hoch

- Multibarrieren System MBR+PAK und Boden-Passage
  - Elimination der meisten PM-Stoffe
  - Boden als zusätzliche Schutzbarriere
    - Sehr Standort-/Bodenspezifisch
- Wenige Stoffe weder in Aufbereitung (MBR+PAK) noch während Boden-Passage eliminiert (z.B. TFMSA, DZA)
  - Kontamination des Grundwassers wahrscheinlich
  - Verfahrenstechnische Nachjustierung für diese Stoffe und Monitoring notwendig

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Eine Initiative des Bundesministeriums  
für Bildung und Forschung

**WavE**

Wassertechnologien: Wiederverwendung



Vielen Dank!



MANN+  
HUMMEL



# ANHANG

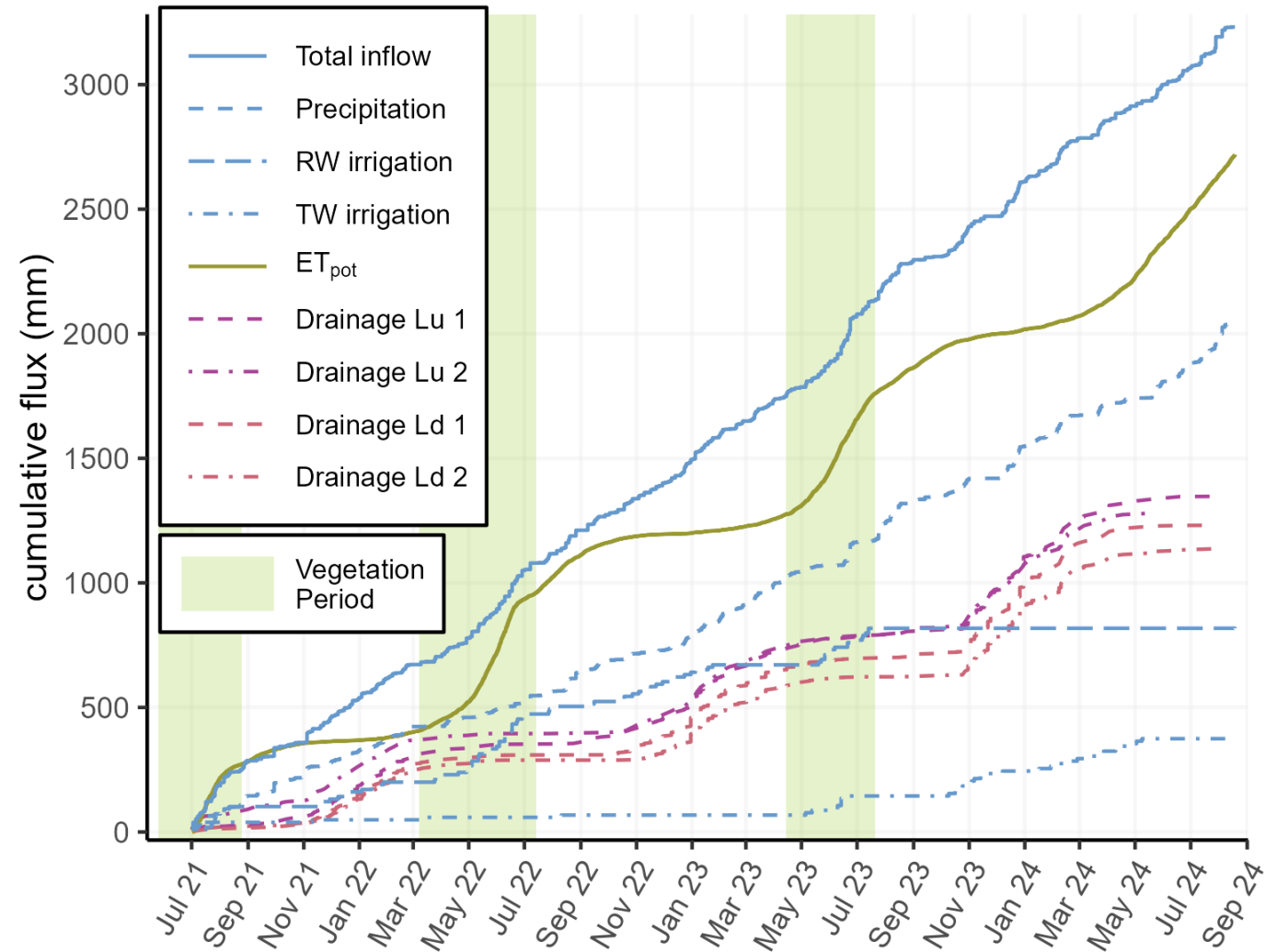
# Vergleich C-Elimination, Nitrifikation und Klarlauf Stahnsdorf



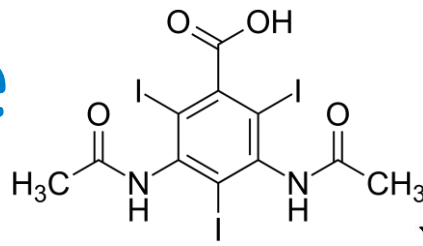
	C-Elimination	Nitrifikation	Ablauf KA Stahnsdorf
CSB-Elimination (%)	95	95	96
TOC-Elimination (%)	92	90	94
DOC-Elimination (%)	87	83	91
SAK-Elimination (%)	60	57	~ 66 (n = 2)
Ammonium-Reduktion (%)	18	89	99
Nitrat Permeat MP (mg/l)	0,7	43,7	11,3
Nitrit Permeat MP (mg/l)	0,8	-	-
Trübung Permeat MP (FNU)	0,5	0,2	~ 1,2 (n = 2)

# Randbedingungen Lysimeterversuche

- Mehr Zufluss als  $ET_{pot}$ :  
Überschussbewässerung
- Gestochene Lysis höherer  
Ausfluss als gepackte
  - Präferentielles Fließen



# Amidotrizoesäure



## Röntgenkontrastmittel

### Transport:

- Sehr mobil: Tracer-artiger Transport
- Aufkonzentrierung während Vegetationsperiode und Transport im Winter

### Massenbilanz:

- > 90 % Austrag am unteren Rand
- Gefahr fürs Grundwasser

