

Abschlussbericht

Retentionsbodenfilter als weitergehendes Verfahren zur Spurenstoffelimination in der Abwasserbehandlung „Soil4pur“

Projektlaufzeit: 15.12.2021 bis 31.12.2022 – Verlängert bis 31.05.2023

Zuwendungsempfänger: Abwasserverband Braunschweig

Antrags-Nr. ZW2-80160613

gefördert durch:



**Niedersächsisches Ministerium
für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz**



Inhalt

Abkürzungsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	III
1 Inhalt und Aufgabenstellung	1
2 Durchführung	3
2.1 Aufbau der Bodenfilter	3
2.1.1 Umbaumaßnahmen	5
2.1.2 Ozonanlage des FlexTreat Projektes	6
2.2 Messumfang und Probenahme	6
3 Ergebnisse Arbeitspaket 1	7
3.1 Überwachungsparameter Abwasser	8
3.2 Untersuchung der Reinigungsleistung bezüglich Spurenstoffe und Krankheitserreger	10
3.2.1 Übersicht Bodenfilter und Rieselfeld	11
3.2.2 Rieselfelder	13
3.2.3 Bodenfilter 1	15
3.2.4 Bodenfilter 2	17
3.2.5 Bodenfilter 3	19
3.2.6 Bodenfilter 4	21
3.2.7 PFAS	22
3.2.8 Antibiotika-Resistenzgene	25
3.2.9 Bodenuntersuchungen	28
3.2.10 Pflanzenuntersuchungen	29
3.3 Zusammenfassung Arbeitspaket 1	29
4 Ergebnisse Arbeitspaket 2	30
4.1 Übertragbarkeit auf Kläranlagen der Größenklasse 2 und 3	31
4.1.1 Kenndaten Modell-Kläranlage	32
4.1.2 Technische Komponenten Horizontal-Bodenfilter-Anlage zur Spurenstoffelimination	33
4.1.3 Dimensionierung Horizontal-Bodenfilter für Referenz-Kläranlage	36
4.1.4 Kostenschätzung Bau Bodenfilter-Anlage für Referenz-Kläranlage	37
4.2 Übertragbarkeit auf das Braunschweiger Rieselfeld	38
4.2.1 Braunschweiger Rieselfeld	38
4.2.2 Bodenfilter im Braunschweiger Rieselfeld	40
4.3 Zusammenfassung Arbeitspaket 2	41
5 Fazit und Ausblick	41

6	Literaturverzeichnis.....	43
7	Anhang.....	44

Abkürzungsverzeichnis

AFS	Abfiltrierbare Stoffe
AOF	Adsorbierbares organisch gebundenes Fluor
BF	Bodenfilter
BG	Bestimmungsgrenze
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
DOC	Gelöster organisch gebundener Kohlenstoff (engl.: <i>dissolved organic carbon</i>)
GN2	Graben-Nord-2 im Rieselfeld
GOW	Gesundheitlicher Orientierungswert des Umweltbundesamtes für Trinkwasser
KW	Klärwerk
MPN	wahrscheinlichste Anzahl (engl.: <i>most probable number</i>)
PFAS	Per- und polyfluorierte Alkylverbindungen (engl.: <i>per- and polyfluoroalkyl substances</i>)
TOP-Assay	Test zur Bestimmung von Vorgängerverbindungen von PFAS (engl.: <i>total oxidisable precursor assay</i>)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht Pilotanlage	3
Abbildung 2: Aufbau von zwei Bodenfiltern mit Vorlagebehälter	4
Abbildung 3: Maße der Bodenfilter sowie Schichtung der Aktivkohle in den Bodenfiltern 2 und 4	4
Abbildung 4: Foto der bepflanzten Bodenfilter	5
Abbildung 5: Ergebnisse der Wasserqualitätsparameter	8
Abbildung 6: Trübung der untersuchten Proben	9
Abbildung 7: Ergebnisse der Untersuchung einer Drainage im Rieselfeld.....	9
Abbildung 8: Werte der Routineüberwachung des Ablaufs Klärwerk und des Rieselfelds	10
Abbildung 9: Konzentrationen der Spurenstoffe im Zulauf zu den Bodenfiltern (entspricht in etwa Ablauf Nachklärung).....	11
Abbildung 10: Reinigungsleistung der Bodenfilter gemittelt über alle Spurenschadstoffe (PFAS und mikrobiologische Parameter wurden hier nicht berücksichtigt).....	12
Abbildung 11: E.coli Konzentrationen [MPN/100 mL] in den Bodenfiltern und im Rieselfeld; Ablauf Bodenfilter 3 im Aug 22 ist <1 MPN/100 mL.....	12
Abbildung 12: Elimination [%] von Spurenschadstoffen im Rieselfeld	14
Abbildung 13: Zeitverlauf der Eliminationsleistung des Rieselfelds	15
Abbildung 14: Elimination [%] von Spurenschadstoffen im Bodenfilter 1 (Sandfilter).....	16
Abbildung 15: Zeitverlauf der Eliminationsleistung von Bodenfilter 1	17
Abbildung 16: Elimination [%] von Spurenschadstoffen im Bodenfilter 2 (Sandfilter mit Aktivkohle)	18
Abbildung 17: Zeitverlauf der Eliminationsleistung von Bodenfilter 2	19
Abbildung 18: Elimination [%] von Spurenschadstoffen im Bodenfilter 3 (Ozon + Sandfilter).....	20
Abbildung 19: Zeitverlauf der Eliminationsleistung von Bodenfilter 3	20
Abbildung 20: Elimination [%] von Spurenschadstoffen im Bodenfilter 4 (Ozon + Sandfilter mit Aktivkohle).....	21
Abbildung 21: Zeitverlauf der Eliminationsleistung von Bodenfilter 4	21
Abbildung 22: Darstellung der Konzentrationen ausgewählter PFAS bei sechs verschiedenen Messstellen zu den verschiedenen Probenahmezeitpunkten: Blau (Juni), Orange (Juli), Grau (Dezember); die gelbe Linie gibt die Bestimmungsgrenze an; alle Werte <BG wurden auf ½ BG gesetzt	24
Abbildung 23: ausgewählte PFAS im Rieselfeld bei drei verschiedenen Messstellen zu den verschiedenen Probenahmezeitpunkten: Blau (Juni), Orange (Juli), Grau (Dezember); die gelbe Linie gibt die Bestimmungsgrenze an; alle Werte <BG wurden auf ½ BG gesetzt	24
Abbildung 24: Übersicht zu den Ergebnissen der Analyse der Resistenzgene.....	26
Abbildung 25: Ergebnisse der Untersuchung auf Beta-Laktam-Resistenzen	27
Abbildung 26: Konzentration von Sulfamethoxazol an den Probenahmestellen	28
Abbildung 27: Elimination [%] von Spurenschadstoffen bis zur Probenahmestelle innerhalb Bodenfilter 2 (Sandfilter mit Aktivkohle).....	30
Abbildung 28: Zeitverlauf der Eliminationsleistung bis zur Probenahmestelle innerhalb des Bodenfilter 2.....	31
Abbildung 31: EW-Belastung und Jahresabwassermenge der 15 niedersächsischen Kläranlagen mit höchster Abwasserbelastung der jeweiligen Vorfluter [NLWKN, 2021; NLWKN, 2016].....	33
Abbildung 32: Längsschnitt Horizontal-Bodenfiltereinheit entlang Fließstrecke	35
Abbildung 33: Draufsicht einzelnes Horizontal-Bodenfiltersegment mit einer Anströmbreite von 75 m	36

Abbildung 34: Draufsicht Gesamt-Anlage Horizontal-Bodenfilter für 15.000 EW zur Spurenstoffelimination.....	37
Abbildung 35: Braunschweiger Rieselfeld.....	39
Abbildung 36: Aufbau der Bodenfilter für das Rieselfeld.....	40

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Herstellerangaben zur Aktivkohle	5
Tabelle 2: Einstellungen der Ozonanlage	6
Tabelle 3: Parameterumfang untersuchte Spurenschadstoffe	7
Tabelle 4: Ergebnisse der Legionellenbestimmung ab Oktober 2022.....	13
Tabelle 5: Vergleich von Wasser und Bodenproben aus dem Bodenfilter 1 vom Oktober 2022	29
Tabelle 6: E. coli Bestimmungen im Bodenfilter 2	31
Tabelle 7: Kenndaten Referenz-Kläranlage für Dimensionierung Horizontal-Bodenfilteranlage	33
Tabelle 8: Kennwerte Filtereinheit spezifisch	35
Tabelle 9: Exemplarische Kostenschätzung Bau Horizontal-Bodenfilteranlage 15.000 EW	37
Tabelle 10: Zulaufmengen zum Rieselfeldbetrieb im Jahr 2022	40

1 Inhalt und Aufgabenstellung

Verfahrenstechniken zur Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen waren und sind Gegenstand zahlreicher Untersuchungen. Insbesondere die Behandlung mit Aktivkohle sowie die Ozonung haben sich als effiziente und wirtschaftliche Verfahrenstechniken herausgestellt und sind daher bereits als großtechnische Umsetzungen auf größeren Kläranlagen etabliert (UBA, 2015). Gleichzeitig führen die genannten Verfahrenstechniken jedoch zu einem deutlich erhöhten Betriebs- und Energieaufwand für die Kläranlagenbetreiber. Zudem wurde nachgewiesen, dass die Ozonung des Kläranlagenablaufs zu keiner signifikanten Reduktion an PFAS führt (Appleman *et al.*, 2014).

Vor diesem Hintergrund gab es in den letzten Jahren vermehrt Untersuchungen zu naturnahen und weniger energieintensiven Verfahrenstechniken zur Spurenstoffelimination. Dabei stellen bepflanzte Bodenfilteranlagen eine vielversprechende Option zur Nachbehandlung von Kläranlagenabläufen hinsichtlich von Spurenschadstoffen dar. Durch Filtrations- und Sorptionsprozesse werden Spurenschadstoffe im Bodenfilter zurückgehalten, wodurch sie bio-chemischen Abbauprozessen unterliegen.

Untersuchungen an einem Versuchs-Retentionsbodenfilter angereichert mit granulierter Aktivkohle ergaben Eliminationsraten von über 90 % im Median hinsichtlich organischer Spurenschadstoffe (Brunsch *et al.*, 2018). Bepflanzte Versuchs-Vertikalbodenfilter, welche mit Pflanzenkohle angereichert worden waren, zeigten ebenfalls sehr gute Eliminationsleistungen von bis zu 90 % bzgl. ausgewählter Spurenschadstoffe (Brunhoferova *et al.*, 2019). Neben dem Einsatz als Stand-alone-Lösung sind bepflanzte Bodenfilter im halbtechnischen Maßstab auch als einer Ozonung nachgeschalteten Behandlungsstufe erprobt worden, wobei im erhöhten Umfang auch Spurenschadstoffe zurückgehalten wurden, welche durch die Ozonung nur im geringen Umfang eliminiert wurden (Brunsch *et al.*, 2018). Ferner konnte nachgewiesen werden, dass bepflanzte Bodenfilter hinsichtlich der Reduktion von PFAS bzw. PCAS Eliminationsraten zwischen 35 % und 90 % erreichen können (Zhang *et al.*, 2021). Offene Fragestellungen ergeben sich insbesondere hinsichtlich der langfristigen Konstanz des Reinigungsvermögens der Bodenfilter. Die bisherigen Untersuchungen, welche sich hauptsächlich auf vertikal beschickte Bodenfilteranlagen beschränkten, ergaben ferner, dass mit erhöhter Aufenthaltszeit des Abwassers im Bodenfilter die Eliminationsleistung steigt.

Demgegenüber waren horizontal-betriebene Bodenfilter, welche sich durch eine deutlich erhöhte Aufenthaltszeit gegenüber Vertikalfilter auszeichnen, bisher kaum Untersuchungsgegenstand zur naturnahen Spurenstoffelimination. Untersuchungen an Horizontalfiltern, welche mit mechanisch gereinigtem Abwasser beschickt worden waren, zeigten das Potential zur Spurenstoffelimination auf (Carranza *et al.*, 2014). Untersuchungen zu Horizontalbodenfiltern als Nachbehandlungsstufe hinter einer Ozonungsanlage fehlen bis dato weitestgehend.

Für die Kläranlage Braunschweig-Steinhof ist zu erwarten, dass zukünftig die Elimination von anthropogenen Spurenstoffen gefordert werden wird. Darüber hinaus ist für eine landwirtschaftliche Wasserwiederverwendung auch die Elimination von Keimen erforderlich. Nach der EU-Verordnung 2020/741 muss für das aktuelle Bewässerungsregime mindestens die Wassergüteklasse D, zur Bewässerung von Industrie- und Energiepflanzen eingehalten werden, d.h. die Keimzahl von *Escherichia coli* muss $\leq 10.000 E. coli/100 \text{ mL}$ sein. Eine mögliche naturnahe Abwasserbehandlung, bei der die Braunschweiger Rieselfelder (teilweise) umgestaltet werden, bietet Vorteile gegenüber rein technischen Verfahren. Ein niedrigerer Betriebs- und Energieaufwand, der Einsatz von regenerativen Stoffen und die CO₂-Bilanz sind ein großer Anreiz naturnahe Verfahren in Betracht zu ziehen. In einer halbtechnischen Pilotanlage werde daher vier verschiedene horizontal durchströmte Bodenfilter

untersucht und die Übertragbarkeit auf die Braunschweiger Rieselfelder sowie auf andere Kläranlagen werden ermittelt.

Die übergeordnete Zielstellung ist die Erprobung einer naturnahen Abwasserbehandlung in Form eines bepflanzten Horizontal-Bodenfilters zur Spurenstoffelimination. Mit der Entwicklung eines naturnahen Abwasserbehandlungskonzepts zur Spurenstoffelimination könnten insbesondere für Kläranlagen der Größenklasse (GK) 2 und 3 die Energieverbräuche und Betriebsmitteleinsätze einer 4. Reinigungsstufe im Vergleich zu großtechnischen Lösungen wie Ozonung und Aktivkohlefiltration bzw. -zugabe reduziert werden.

2 Durchführung

Der Abwasserverband Braunschweig nutzt zur weiteren biologischen Nachbehandlung des Kläranlagenablaufs ein Rieselfeld. Ferner werden im Rahmen des BMBF-Projekts „FlexTreat“ auf dem Klärwerk bis Mitte 2023 flexible Wasseraufbereitungstechnologien mit einer Pilot-Ozonungsanlage als Hauptelement erprobt. „Soil4pure“ wird an beide Rahmenbedingungen anknüpfen und die Reinigungsleistung von horizontalen Bodenfiltern hinsichtlich Spurenschadstoffen sowohl als „Stand-alone-Lösung“ als auch als der Ozonung nachgeschalteten Verfahrensvariante untersuchen. Ferner soll auch die Eliminationsleistung der Bodenfilter hinsichtlich der mikrobiellen Belastung des Abwassers untersucht werden. Die auf dem Gelände des Klärwerk Steinhofs getestete Pilotanlage besteht wie in Abbildung 1 dargestellt aus vier horizontalen Bodenfiltern:

- Bodenfilter 1: Sandfilter;
- Bodenfilter 2: mit Aktivkohle angereicherter Sandfilter;
- Bodenfilter 3: Sandfilter mit Ozonvorbehandlung;
- Bodenfilter 4: mit Aktivkohle angereicherter Sandfilter mit Ozonvorbehandlung.

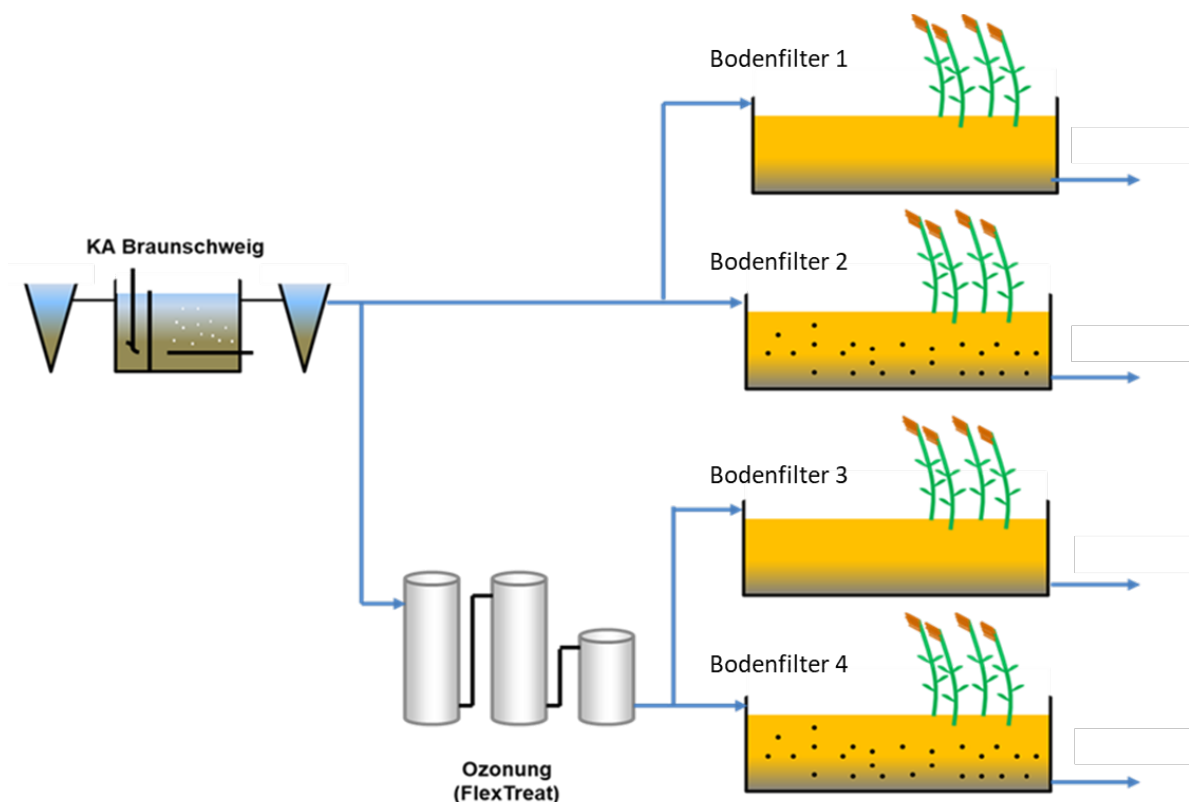


Abbildung 1: Übersicht Pilotanlage

2.1 Aufbau der Bodenfilter

Die Bodenfilter bestehen aus Betonsteinen in L-Form, die mit Geotextil und PE-Folie (1,5 mm) ausgekleidet sind. Aus den Vorlagebehältern (IBC-Container, 1000 l) wird das vorgereinigte Abwasser in die Filter gefördert. Nach der Horizontal-Passage des Bodenfilters wird es am gegenüber liegendem Ende drainiert und fließt anschließend im freien Gefälle in Pumpenschächte. Von dort wird das Wasser zurück in den Ablauf der Kläranlage gefördert. Ein Vorlagebehälter wird mit dem Ablauf der Kläranlage beschickt, der andere mit Ablauf aus der Ozonanlage, die im BMBF geförderten Projekt „Flexible und zuverlässige Konzepte für eine nachhaltige Wasserwiederverwendung in der Landwirtschaft“

(FlexTreat) verwendet wird und direkt neben der halbtechnischen Soil4pur Pilotanlage steht. Der Aufbau der Horizontal-Bodenfilter ist in Abbildung 2 dargestellt.

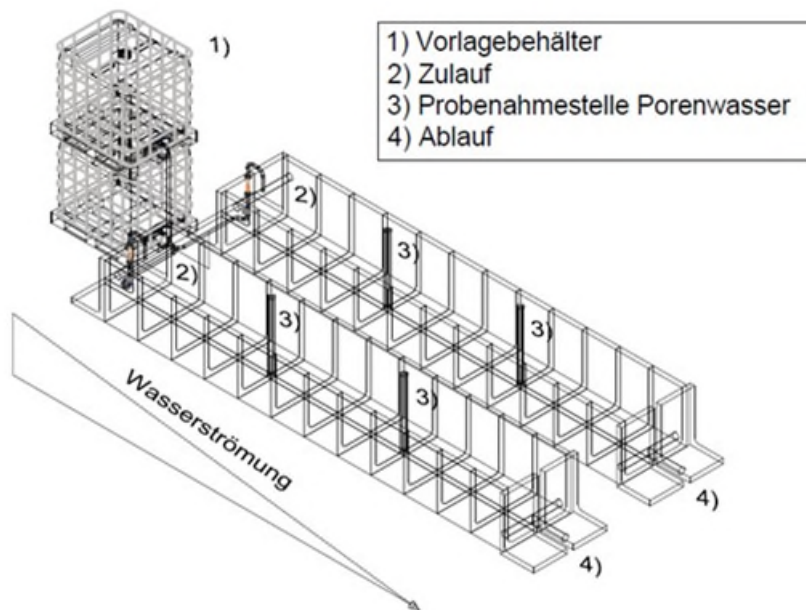


Abbildung 2: Aufbau von zwei Bodenfiltern mit Vorlagebehälter

Als Filtermaterial wird gewaschener Sand mit der Körnung 0-2 mm verwendet. Zwei der Bodenfilter sind zusätzlich mit granulierter Aktivkohle angereichert. Der Schichtenaufbau der beiden Bodenfilterarten ist in Abbildung 3 zu sehen.

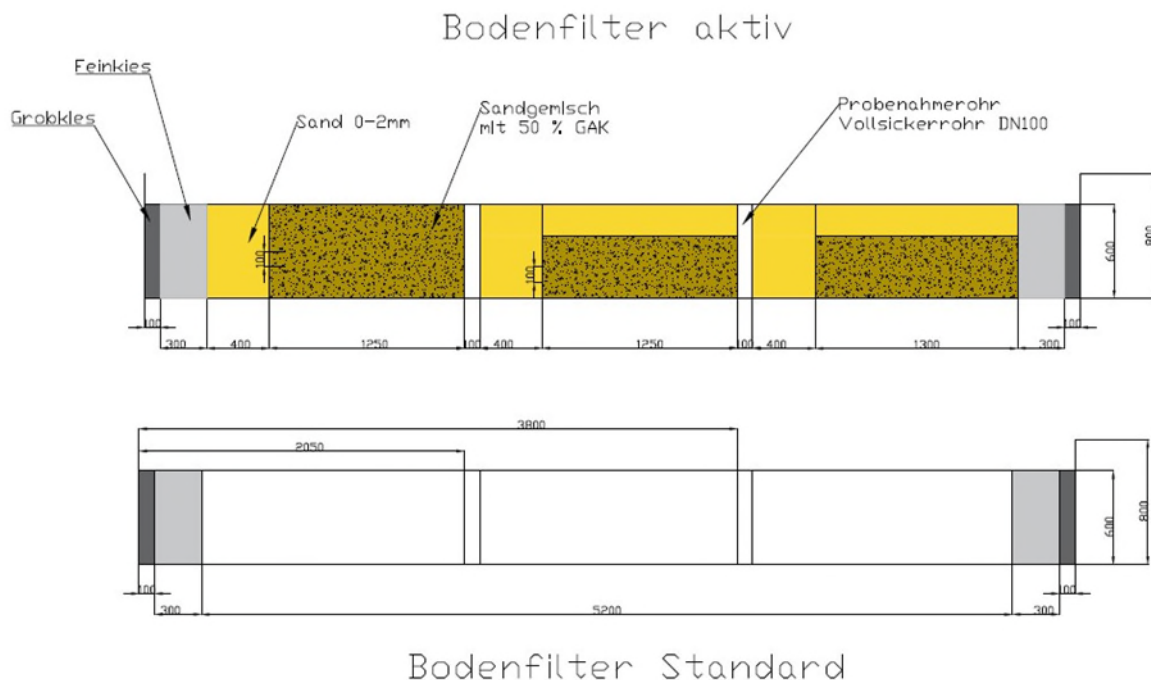


Abbildung 3: Maße der Bodenfilter sowie Schichtung der Aktivkohle in den Bodenfiltern 2 und 4

Ausführung der Bodenfilter:

- Anströmfläche: 0,6 m²
- Länge: 6 m

- Höhe: 0,8 m
- Zulaufmenge: 50 l/h
- Filtermaterial: Filtersand, 0-2 mm
- Menge Filtermaterial: 3 m³
- Anreicherung des Filters mit 0,875 m³ granulierter Aktivkohle
- Aufenthaltszeit des Wassers im Filter ca. 6 h

Die verwendete granulいたe Aktivkohle stammt von der Firma CSC, die Herstellerangaben sind in der Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Herstellerangaben zur Aktivkohle

Produkt	CSC-Aktivkohle HCFB1000
Spezifische Oberfläche	1000 m ² /g
Jodzahl	1000 mg/g
Körnung	0,6 – 2,5 mm
Schüttdichte	400 kg/m ³
Wassergehalt	<5 %
Aschegehalt	<14 %
Flüchtige Bestandteile	< 4 %



Abbildung 4: Foto der bepflanzen Bodenfilter

Die Bodenfilter wurden gleichmäßig mit Sumpfesgen (*Carex acutiformis*) bepflanzt (3 Stk/m²). Die Bepflanzung erfolgte im April 2022.

2.1.1 Umbaumaßnahmen

Im Laufe des Projektes gab es Optimierungsarbeiten an den Bodenfiltern. Ein unvorhergesehenes Problem stellten Kaninchen dar. Diese haben die Bodenfilter durchwühlt und Aktivkohle, die eigentlich unten im Bodenfilter sein sollte nach oben gebuddelt. Besonders der Bodenfilter 4 war davon betroffen. Zum Schutz vor Kaninchen wurden Tierverschrecker aufgestellt.

Während des Betriebs der Bodenfilter gab es immer mal wieder Schlammabtrieb seitens des Klärwerks, wodurch das Ventil das den Zulauf zu den Bodenfiltern regelt, verstopft war. Um einen dauerhaften Zufluss zu den Bodenfiltern zu gewährleisten wurden daher Pumpen installiert.

2.1.2 Ozonanlage des FlexTreat Projektes

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projektes FlexTreat wird eine Pilotanlage auf dem Gelände des KW Steinhof betrieben. Dabei kommt auch eine Ozonanlage zum Einsatz. Da der Volumenstrom durch die Ozonanlage mit max. 15 m³/h größer als der der anschließenden Filteranlage (1,8 m³/h) ist, kann ein Teil des Wassers für die Soil4pur Anlage verwendet werden.

Im FlexTreat Projekt werden zwei Verschiedene Einstellungen der Ozonanlage betrachtet:

1. Ozondosis bei ΔSAK_{254} 34 % $\approx 0,4 \text{ mgO}_3/\text{mgDOC}$
2. Ozondosis bei ΔSAK_{254} 47 % $\approx 0,7 \text{ mgO}_3/\text{mgDOC}$

In der Tabelle 2 sind die Einstellungen der Ozonanlage an den Probenahmetagen aufgelistet.

Tabelle 2: Einstellungen der Ozonanlage

Datum	ΔSAK_{254} [%]
14.06.2022	34
05.07.2022	47
09.08.2022	34
20.09.2022	47
18.10.2322	47
15.11.2022	47
06.12.2022	47
17.01.2023	Ausfall der Ozonanlage
25.04.2023	47

2.2 Messumfang und Probenahme

Die Proben wurden an den unterschiedlichen Probenahmestellen in Form von Stichproben genommen. Im Rieselfeld wurde ein Ablauf aus einer Drainage, ein Graben (Graben Nord 2) sowie der Ablauf des Aue-Oker-Kanals, der in den Vorfluter fließ, beprobt. Die Zulaufproben zu den Bodenfiltern wurden jeweils direkt im Ablauf des Vorlagebehälters genommen, die Proben innerhalb der Bodenfilter wurden mithilfe einer Handpumpe aus den Vollsickerrohren entnommen. Da mehr Volumen für die Wasserprobe pro Probenahmestelle benötigt wurde als erwartet, konnte nur an einer Stelle im Bodenfilter Proben entnommen werden. Der Ablauf wurde einem Auffangbehälter nach den Bodenfiltern entnommen.

Es wird davon ausgegangen, dass die Aufenthaltszeit im Vorlagebehälter nur einen geringen Effekt auf die Konzentration der Spurenschadstoffe hat, weshalb der Zulauf zu den Bodenfiltern dem Ablauf der Nachklärung entspricht. Die Aufenthaltszeit kann jedoch die Anzahl an Mikroorganismen beeinflussen, weshalb die Anzahl an Mikroorganismen im Zulauf zu den Bodenfiltern nicht mit dem Ablauf der Kläranlage gleichzusetzen ist.

Die untersuchten Parameter sind in

Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Parameterumfang untersuchte Spurenschadstoffe

Eurofins	<p>Spurenschadstoffe: Atenolol, Bezafibrat, Celiprolol, Clofibrinsäure, Fenofibrinsäure, Ibuprofen, Naproxen, Oxypurinol, Phenazon, Primidon, Propyphenazon, Sotalol, Trimethoprim, Diatrizoat (Amidotrizoat), lomeprol, Iopamidol, Iopromid, Decabromdiphenylether, Acesulfam, Tebuconazol, Thiocloprid</p> <p>PFAS: AOF, TOP-Assay, Perfluorbutansäure (PFBA), Perfluorbutansäure (PFBA), Perfluorpentansäure (PFPeA), Perfluorhexansäure (PFHxA), Perfluorheptansäure (PFHpA), Perfluoroctansäure (PFOA), Perfluornonansäure (PFNA), Perfluordecansäure (PFDeA), Perfluorundekansäure (PFUnA), Perfluordodekansäure (PFDoA), Perfluortridekansäure (PFTrA), Perfluortetradekansäure (PFTA)</p> <p>Perfluorbutansulfonsäure (PFBS), Perfluorpentansulfonsäure (PFPeS), Perfluorhexansulfonsäure (PFHxS), Perfluorheptansulfonsäure (PFHpS), Perfluoroctansulfonsäure (PFOS), Perfluoroctansulfonamid (PFOSA), Perfluordecansulfonsäure (PFDS), 1H,1H,2H,2H-Perfluorhexansulfonsäure (4:2 FTS), 1H,1H,2H,2H-Perfluordecansulfonsäure (8:2FTS), 1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonsäure (H4PFOS), 2H,2H,3H,3H-Perfluorundekansäure (H4PFUnA), 2H,2H-Perfluordecansäure (H2PFDA), 7H-Dodekanfluorheptansäure (HPFHpA), Perfluor-3,7-dimethyloktansäure (PF-3,7-DMOA), Capstone Produkt A, Capstone Produkt B, 1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonsäure (H4PFOS)</p> <p>Mikrobiologische Parameter: <i>E. coli</i>, Legionellen</p>
Bundesanstalt für Gewässerkunde	<p>Spurenschadstoffe: Carbamazepin, Sulfamethoxazol, Diclofenac, Candesartan, Olmesartan, Irbesartan, Valsartan, Valsartan-COOH, Benzotriazol, 5-Methyl-1H-Benzotriazol, Clarithromycin, Gabapentin, Metoprolol, Tramadol, Hydrochlorothiazid, Chlorothiazid</p>
TU Dresden	Antibiotika Resistenzen
SE BS Labor	<p>Wasserqualitätsparameter: Abfiltrierbare Stoffe, Chemischer Sauerstoffbedarf, gelöster organischer Kohlenstoff, Ammonium, Nitrit, Nitrat, Trübung, Phosphor</p>

3 Ergebnisse Arbeitspaket 1

In Arbeitspaket 1 wurde der IST-Zustand des Rieselfelds als weitergehende Reinigungsstufe ermittelt. Des Weiteren wurden die vier Bodenfilter errichtet, siehe Kapitel 2.1, um Ausbaumöglichkeiten des Rieselfelds zu ermitteln. Darauf aufbauend wurde im Arbeitspaket 2 die Übertragbarkeit der Bodenfilter auf das Rieselfeld erarbeitet. Im Folgendem werden die Ergebnisse aus den Arbeitspaketen vorgestellt.

3.1 Überwachungsparameter Abwasser

Zur Überwachung der Wasserqualität wurden verschiedene abwasserübliche Parameter im Labor der SEBS analysiert. Zur Darstellung der Ergebnisse wurde der Median ermittelt und das 10 %-Perzentil sowie das 90%-Perzentil werden durch die Fehlerbalken dargestellt.

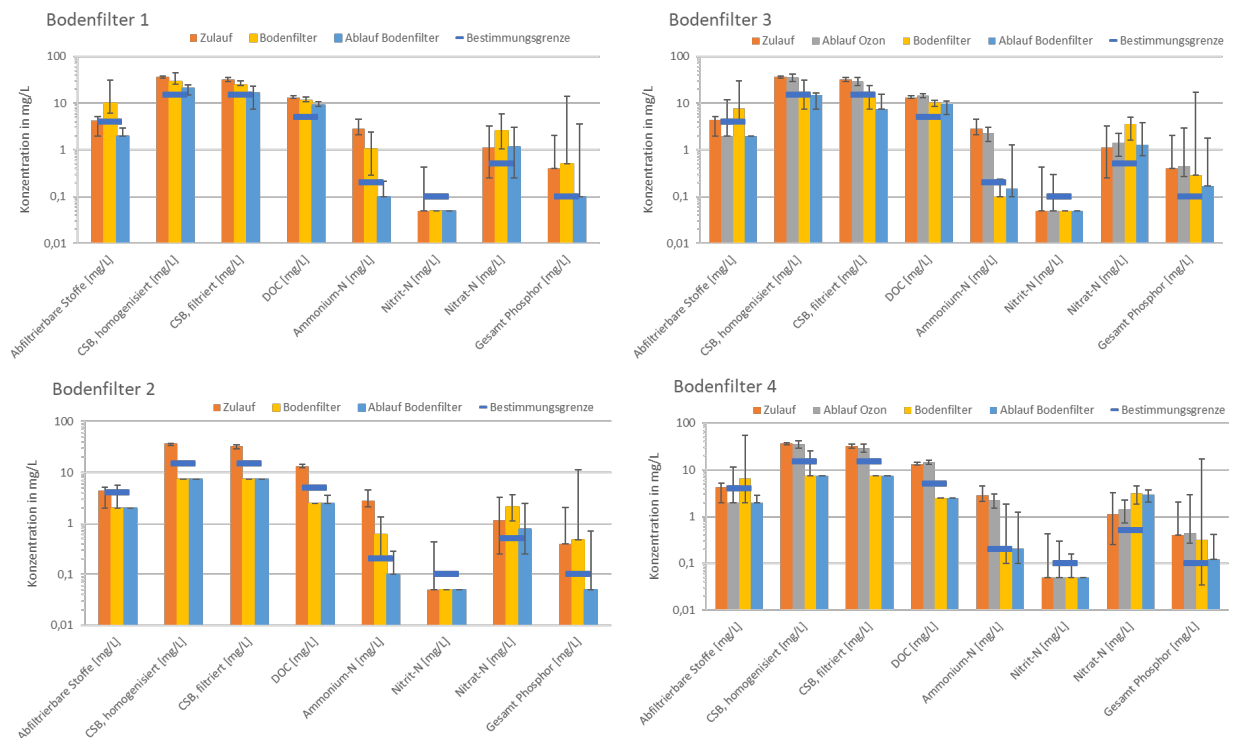


Abbildung 5: Ergebnisse der Wasserqualitätsparameter

In der Abbildung 5 ist zu erkennen, dass alle Bodenfilter die Wasserqualität verbessern und somit eine reinigende Wirkung haben. Besonders die Bodenfilter 2, 3 und 4 zeigen im Ablauf eine deutliche Verbesserung. Der CSB-Wert sinkt bis größtenteils unter die Bestimmungsgrenze, Ammonium wird über Nitrit zu Nitrat abgebaut und auch der Phosphor Gehalt sinkt. Am Beispiel des Stoffes Nitrat zeigte sich, dass sowohl oxidierende als auch reduzierende Bedingungen im Bodenfilter vorherrschen. So stieg die Nitrat-Konzentration in allen Bodenfiltern durch die Oxidation von Ammonium zunächst an. In der weiteren Bodenfilter-Passage hingegen wird Nitrat wiederum abgebaut, sodass sich Zulauf- und Ablauf-Konzentration von Nitrat auf gleichem Niveau befinden.

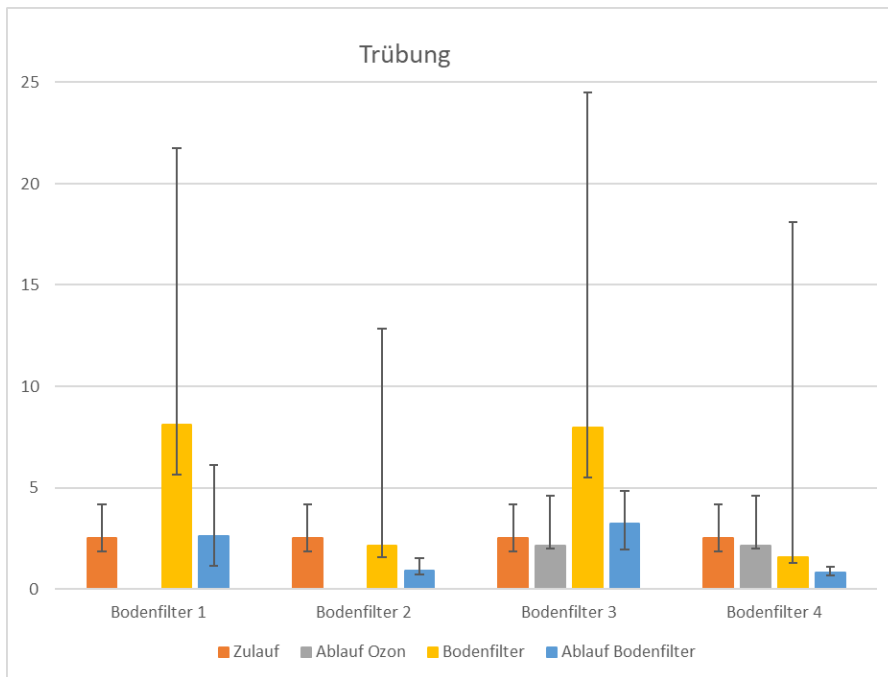


Abbildung 6: Trübung der untersuchten Proben

In der Abbildung 6 fällt auf, dass die Proben aus den Bodenfiltern im Vergleich zu den Proben im Ablauf und Zulauf sehr trüb sind. Dies liegt daran, dass die Proben aus den Bodenfiltern gepumpt wurden wobei auch kleinere (Sand-/Aktivkohle-) Partikel mit angesaugt wurden, die sich sonst im Bodenfilter absetzen und nicht in den Ablauf gelangen. Die augenscheinliche Trübung korrespondiert mit den im Labor gemessenen AFS-Werten. Im Ablauf der Bodenfilter liegt der AFS-Wert überwiegend unterhalb der Bestimmungsgrenze.

Für das Rieselfeld werden im Folgenden zunächst die Werte aus dem Ablauf einer Drainage gezeigt, da angenommen wird, dass die Ergebnisse mit dem Bodenfilter 1 vergleichbar sind.

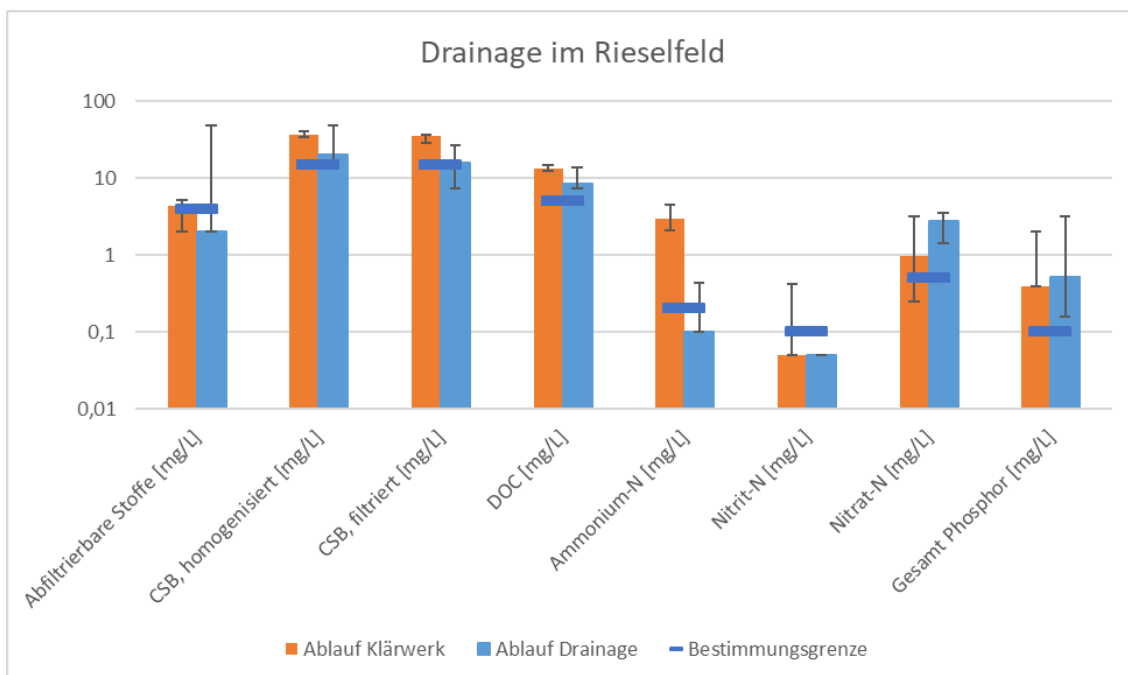


Abbildung 7: Ergebnisse der Untersuchung einer Drainage im Rieselfeld

Aus Abbildung 7 und Abbildung 5 wird deutlich, dass sich die Annahme größtenteils bestätigt. Unterschiede zeigen sich im Ammonium- und Phosphorgehalt im Ablauf. Während im Ablauf des Bodenfilters 1 ein Wert unterhalb der Bestimmungsgrenze erreicht wird, ist eine Reduktion im Rieselfeld nicht zu erkennen.

Die anderen im Projekt gewählten Probenahmestellen werden durch das Labor der SEBS routinemäßig überwacht. Die Ergebnisse von Januar 2022 bis inkl. Mai 2023 umfassen viel mehr Messwerte und sind in Abbildung 8 dargestellt.

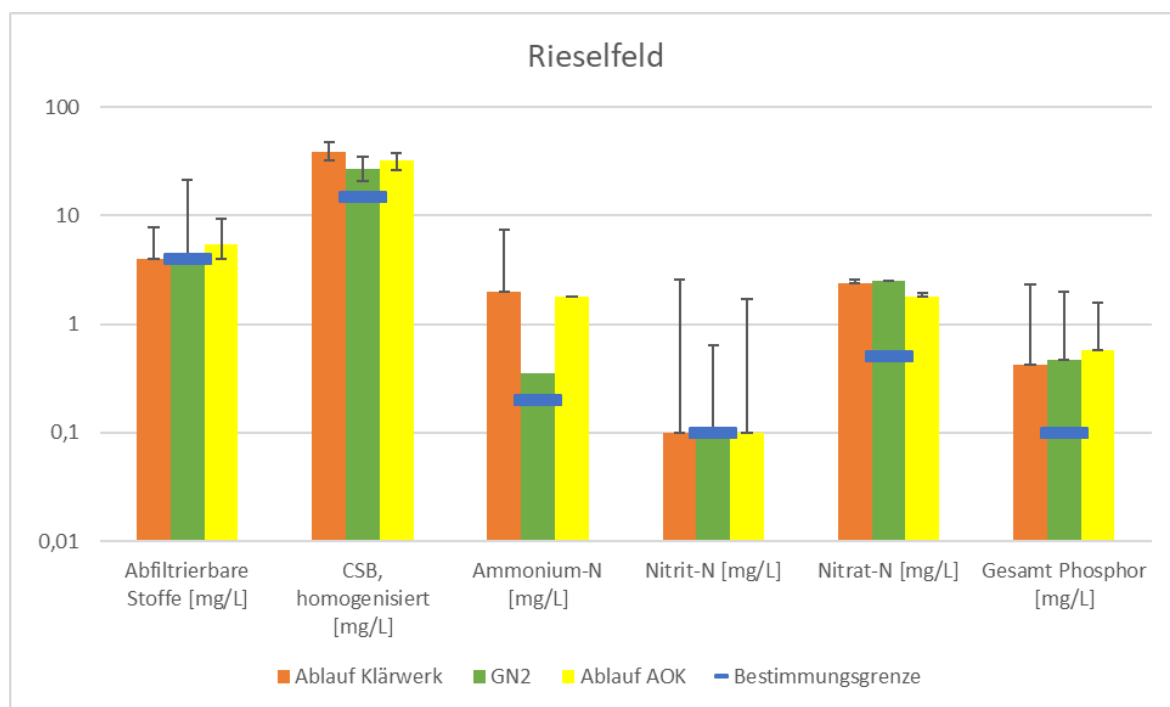


Abbildung 8: Werte der Routineüberwachung des Ablaufs Klärwerk und des Rieselfelds

Im Ablauf AOK finden sich auch Direktabschläge des Klärwerkes, daher eignet sich diese Probenahmestelle nicht um den Bodenfilter 1 mit dem Rieselfeld zu vergleichen. Der Ablauf AOK fließt in den Vorfluter Oker, weshalb es dennoch eine interessante Probenahmestelle ist, da hier die genehmigten Ablaufgrenzwerte eingehalten werden müssen.

3.2 Untersuchung der Reinigungsleistung bezüglich Spurenstoffe und Krankheitserreger

Zur Ermittlung der Reinigungsleistung der Bodenfilter sowie des Rieselfelds bzgl. Spurenstoffe und Keimbelastung wurden monatlich Stichproben genommen. Diese wurden an die Bundesanstalt für Gewässerkunde in Koblenz gesendet und zum Analytiklabor Eurofins in Peine gebracht. Der Parameterumfang ist in Kapitel 2.2 aufgeführt.

Die Elimination in % errechnet sich aus dem Konzentrationsdelta zwischen Zulauf zur Anlage und Ablauf Bodenfilter. Wenn Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze (BG) lagen, wurde zur Berechnung ein Wert $0,5 \cdot BG$ angenommen. In den folgenden Abbildungen ist die vertikale Achse auf -20 % bis 120 % skaliert worden, um die Vergleichbarkeit zu vereinfachen. Dadurch werden einzelne Extremwerte nicht abgebildet. Im Anhang sind die entsprechenden Abbildungen mit erweiterter Achsenskalierung zu finden, so dass zum einen alle Werte erfasst werden und zum anderen Balken, die sonst sehr klein sind, größer dargestellt werden.

Im August konnten im Rieselfeld keine Proben genommen werden, da dieses zu trocken dafür war.

3.2.1 Übersicht Bodenfilter und Rieselfeld

Die Proben für den Zulauf zu den Bodenfiltern wurden aus dem Ablauf des IBC-Containers genommen und nicht direkt im Ablauf der Nachklärung. Unter der Annahme, dass innerhalb des IBCs keine Anreicherung oder Abbau der Spurenstoffe stattfinden, können diese Werte später für die Beschreibung der Ausgangssituation für eine weitergehende Reinigungsstufe herangezogen werden. Die hier beschriebenen Ergebnisse sollen zunächst eine grundsätzliche Aussage zu den Reinigungsleistungen ermöglichen, während eine detailliertere Auswertung in den nachfolgenden Kapiteln erfolgt.

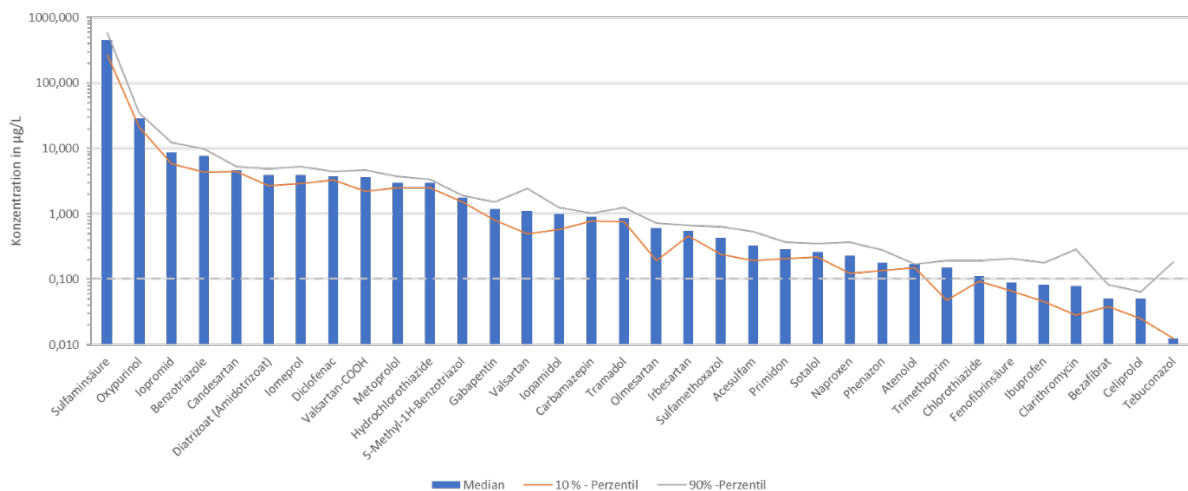


Abbildung 9: Konzentrationen der Spurenstoffe im Zulauf zu den Bodenfiltern (entspricht in etwa Ablauf Nachklärung)

Im Zulauf zu den Bodenfiltern ist besonders die Konzentration der Sulfaminsäure aufgefallen. Allerdings wurden auch die meisten anderen untersuchten Stoffe oberhalb des vom Umweltbundesamt entwickelten Gesundheitlichen Orientierungswert (GOW) von 0,1 µg/L für Trinkwasser gefunden.

Tebuconazol hat im Median mit 0,013 µg/L eine sehr geringe Konzentration, wobei des 90 %-Perzentil bei 0,183 µg/L liegt. Dies wird darauf zurückgeführt, dass Tebuconazol ein Pflanzenschutzmittel ist und nur zu bestimmten Jahreszeiten zum Einsatz kommt.

Zum Vergleich der einzelnen Bodenfilter und des Rieselfelds wurden alle berechneten Eliminationsleistungen in % in einer Kastengrafik zusammengefasst. Dabei ist zu erkennen, dass der Bodenfilter 1 (Sandfilter) geringere Werte im Vergleich zum Rieselfeld erzielt. Der Median liegt bei 35 % für Bodenfilter 1 und bei 77 % für das Rieselfeld. Dies lässt sich mit einer deutlich höheren Aufenthaltszeit im Rieselfeld vom mehreren Tagen gegenüber den 6 Stunden im Bodenfilter erklären. Die beiden Bodenfilter (BF 2 und BF 4), die mit Aktivkohle angereichert sind, erreichen jeweils Medianwerte von 99 %. Beim Endergebnis zeigt sich bisher kein Unterschied, ob das Wasser vorher mit Ozon behandelt wurde oder nicht. Die Ozonanlage für sich (ohne Bodenfilter) erreicht eine Elimination von 68 % im Median, in Kombination mit einem Sandfilter (Bodenfilter 3) wird ein Medianwert von 83 % erreicht.

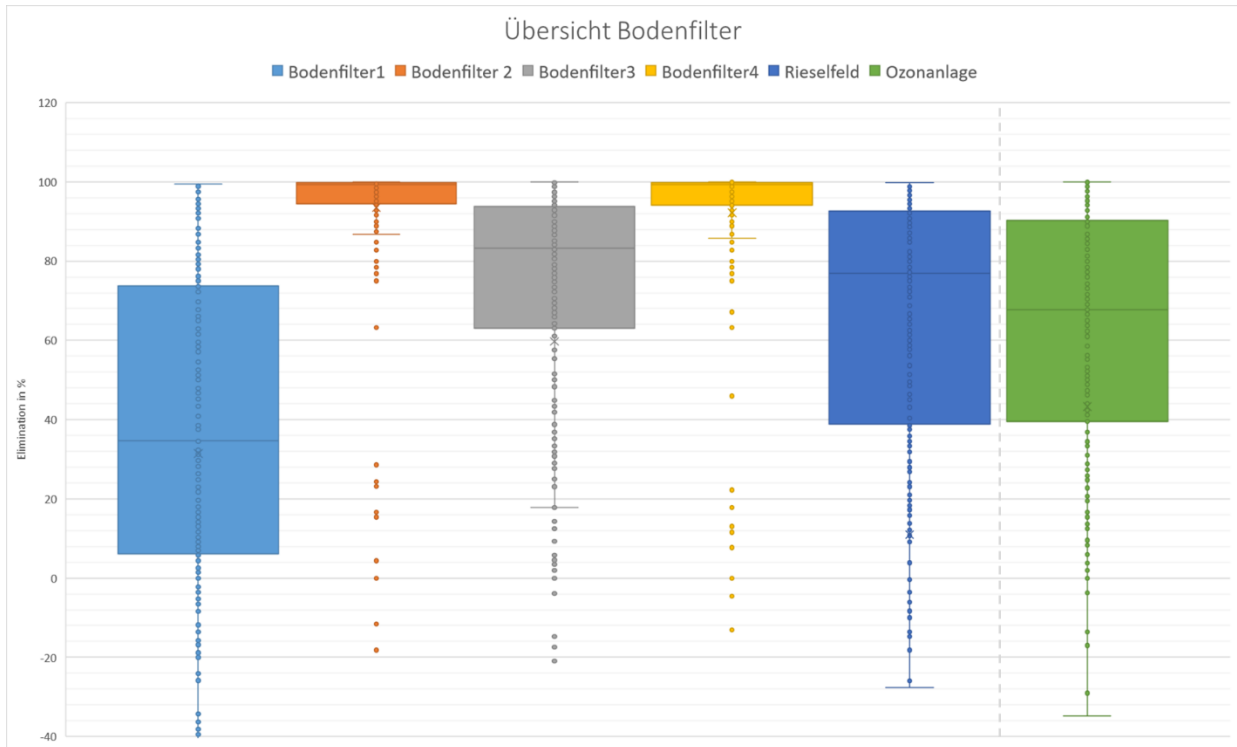


Abbildung 10: Reinigungsleistung der Bodenfilter gemittelt über alle Spurenschadstoffe (PFAS und mikrobiologische Parameter wurden hier nicht berücksichtigt)
 blau (Bodenfilter1 - Sandfilter), orange (Bodenfilter2 – Sandfilter mit Aktivkohle), grau (Bodenfilter3 – Ozonanlage + Sandfilter), gelb (Bodenfilter 4 – Ozonanlage + Sandfilter mit Aktivkohle), dunkelblau (Rieselfeld Drainage), grün (Ozonanlage ohne Filter)

Zur Ermittlung der Lebendzellzahl von *Escherichia coli* wurde die wahrscheinlichste Anzahl (MPN, engl. *most probable number*) bestimmt. In der Abbildung 11 ist zu erkennen, dass der Zulauf zu den Bodenfiltern mit durchschnittlich ca. 62.400 MPN/100 mL die Anforderungen an die Güteklasse D (siehe Kapitel 1) von *E. coli* ≤ 10.000 MPN/100 mL nicht erfüllt. Jedoch lagen alle Messwerte in den vier Bodenfiltern sowie im Rieselfeld unterhalb dieser Grenze und erreichen somit eine Wasserqualität die zur Bewässerung der Energie- und Industriepflanzen im Verbandsgebiet des Abwasserverbandes geeignet wäre.

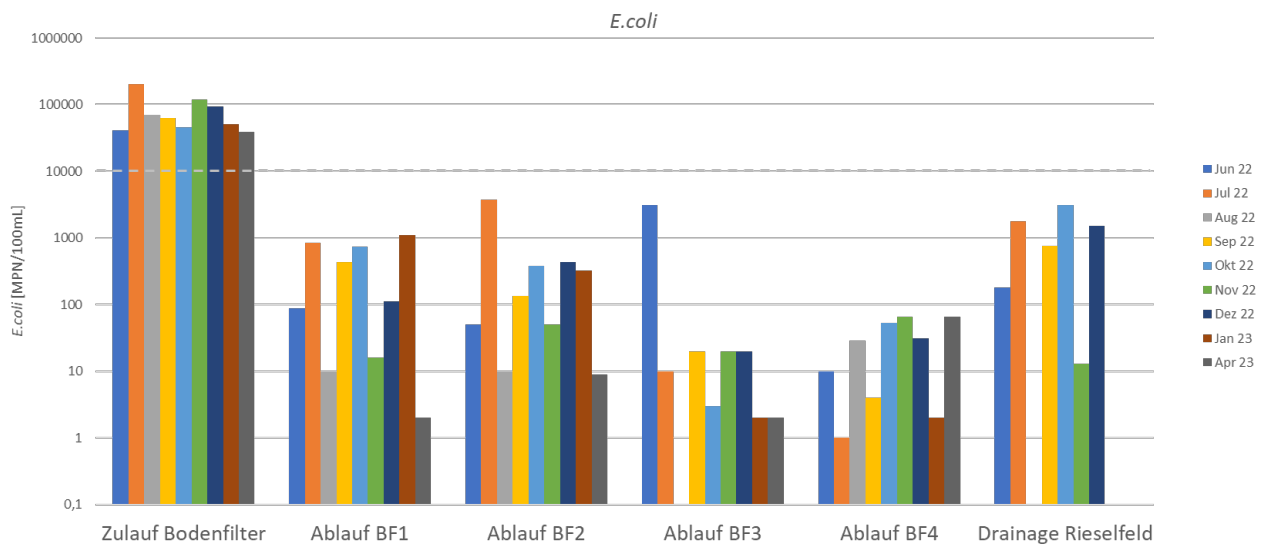


Abbildung 11: *E.coli* Konzentrationen [MPN/100 mL] in den Bodenfiltern und im Rieselfeld; Ablauf Bodenfilter 3 im Aug 22 ist <1 MPN/100 mL.

Im Median konnten folgende Werte für die Bodenfilter und das Rieselfeld erreicht werden:

- Bodenfilter 1 (Sandfilter): 111 MPN/100 mL
- Bodenfilter 2 (Sandfilter mit Aktivkohle): 136 MPN/100 mL
- Bodenfilter 3 (Ozon + Sandfilter): 15 MPN/100 mL
- Bodenfilter 4 (Ozon + Sandfilter mit Aktivkohle): 29 MPN/100 mL
- Rieselfeld: 1125 MPN/100 mL

Bei der Legionellen-Bestimmung bestand das Problem, dass zu viele andere Mikroorganismen das Auswerten der Proben erschwert haben. Die im Labor verwendete Methode ist für Trinkwasser geeignet und es zeigte sich, dass diese nicht auf (gereinigtes) Abwasser übertragbar ist. Ab Oktober 2022 wurde eine andere Methode verwendet, mit der sich Messergebnisse erzielen ließen. Bei dieser Methode ist allerdings die Bestimmungsgrenze sehr hoch, so dass nur Aussagen <1000 oder <100 KBE/100 mL getroffen werden konnten.

Tabelle 4: Ergebnisse der Legionellenbestimmung ab Oktober 2022

Legionellen [KBE/100 mL]						
	Zulauf Bodenfilter	Ablauf BF1	Ablauf BF2	Ablauf BF3	Ablauf BF4	Ablauf Rieselfeld
Oktober	<1000	<1000	<1000	<1000	<1000	<100
November	<1000	<1000	<1000	<1000	<1000	<100
Dezember	<1000	<100	<100	<100	<1000	<100
Januar	< 1000	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
April	< 1000	< 100	< 100	< 1000	< 100	< 100

In der Tabelle 4 sind die Ergebnisse ab Oktober aufgeführt. Es zeigt sich, dass keine sichere Aussage über die Einhaltung des Grenzwertes laut EU-Verordnung von Legionellen < 1.000 KBE/L (bzw. < 100 KBE/100 mL) getroffen werden kann. Die vom Labor verwendete Methode ist ungeeignet um Legionellen im Abwasser zu bestimmen.

3.2.2 Rieselfelder

Das Braunschweiger Rieselfeld wurde untersucht, um den IST-Zustand hinsichtlich der Eliminationsleistung von Spurenstoffen und pathogenen Keimen zu ermitteln. Dies dient als Basis für den Vergleich der Reinigungsleistungen mit den Bodenfiltern und darauf aufbauend wird im Arbeitspaket 2 der Ausbau der Rieselfelder als weitergehende Reinigungsstufe diskutiert. In Kapitel 3.2.1 ist zu erkennen, dass das Rieselfeld (Drainage) im Median 77 % der Spurenstoffe eliminieren kann

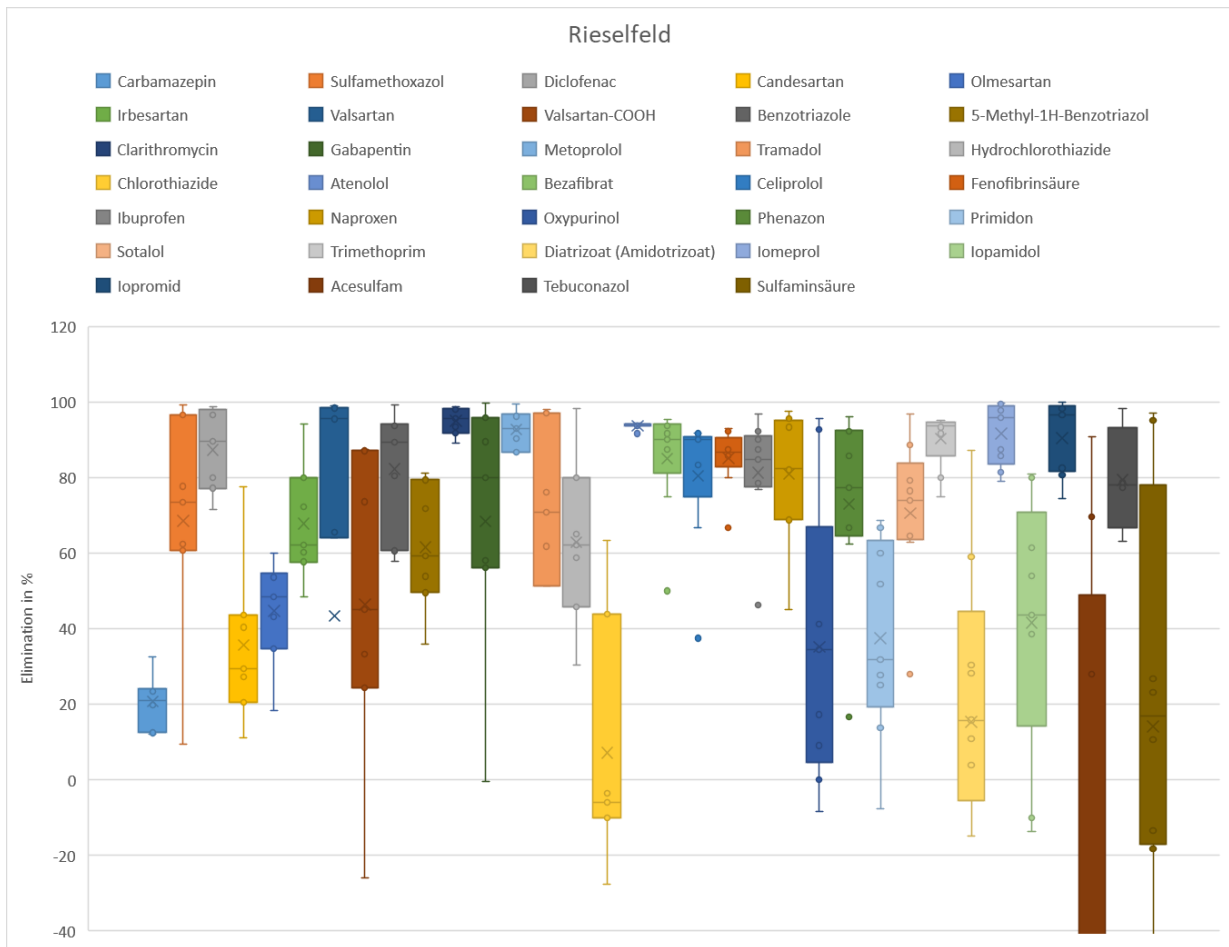


Abbildung 12: Elimination [%] von Spurenschadstoffen im Rieselfeld (Drainage)

In Abbildung 12 fällt auf, dass für einige Spurenstoffe eine negative Elimination bestimmt wird. So wird für Chlorothiazid eine negative Elimination von -6 % ermittelt. Für Acesulfam wird sogar eine negative Elimination von -132 % im Median errechnet (siehe Anhang). Dies lässt sich damit erklären, dass Stichproben genommen wurden und Abwasser nicht homogen durchmischt ist. Besonders gut (> 90 %) werden dagegen die Spurenschadstoffe Valsartan mit 96 %, Clarithromycin mit 96 %, Metoprolol mit 93 %, Atenolol mit 94 %, Iomeprol mit 96 %, Iopromid mit 97 % und Trimethoprim mit 94 % im Median eliminiert.

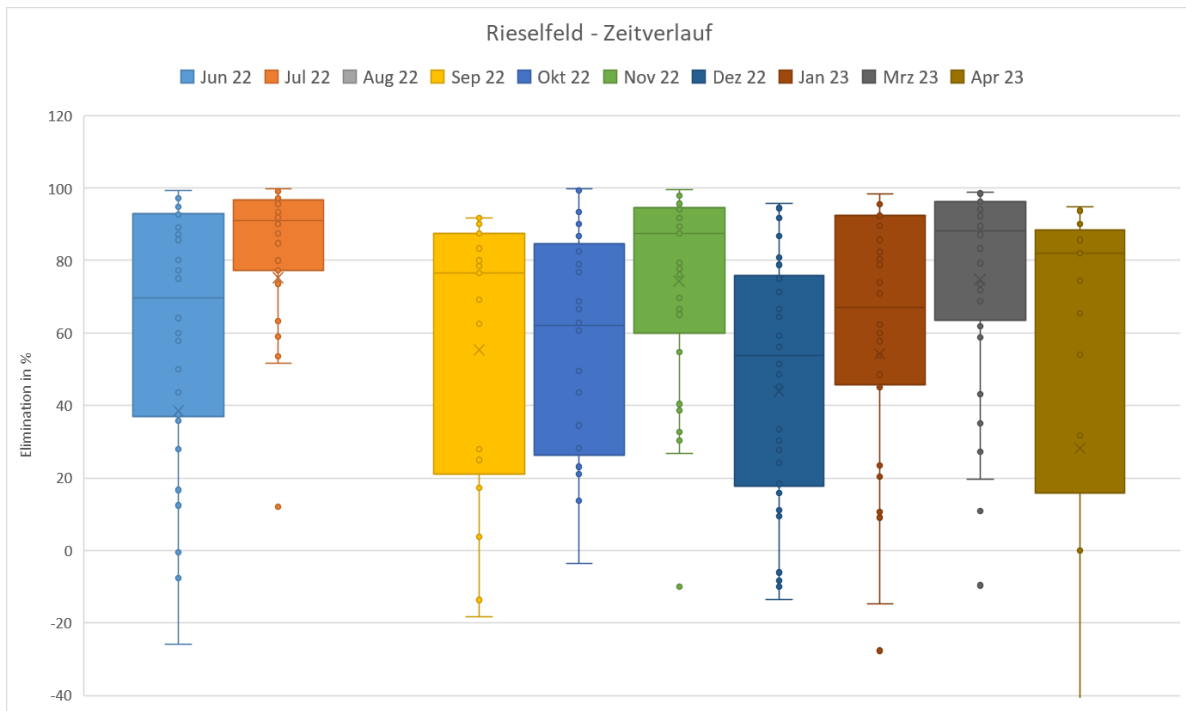


Abbildung 13: Zeitverlauf der Eliminationsleistung des Rieselfelds

In Abbildung 13 ist deutlich zu erkennen, dass das Rieselfeld in den wärmeren Monaten eine höhere Reinigungsleistung erbringt. Im Juli, November, März und April beträgt die Reinigungsleistung >80 %, wogegen im Dezember im Median nur 54 % der Spurenstoffe eliminiert werden. In den Sommermonaten ist kaum Wasser in den Rieselfeldern da das Wasser für die Verregnung gebraucht wird, weshalb im August auch keine Proben genommen werden konnten. Die Reinigungsleistung des Rieselfeldes könnte saisonalen Schwankungen unterliegen. Wie groß hierbei der tatsächliche Einfluss der Temperatur, der Sonneneinstrahlung oder auch die kürzere Aufenthaltszeit im Winter ist (im Dezember und Januar wird der gesamte Kläranlagenablauf über die Rieselfelder geschickt), bedarf weiterer Untersuchungen.

3.2.3 Bodenfilter 1

Der Bodenfilter 1 ist wie in Kapitel 2.1 beschrieben ein bepflanzter Sandfilter ohne Aktivkohle. Mit diesem Filter sollte das Rieselfeld nachgebildet werden. In Abbildung 10 in Kapitel 3.2.1 ist zu erkennen, dass sich die Reinigungsleistung ähnelt, das Rieselfeld jedoch im Median eine höhere Reinigungsleistung erbringt. Diese lässt sich auf die Aufenthaltszeit des Abwassers im Bodenfilter erklären, die geringer ist im Vergleich zum Rieselfeld. Die Elimination der einzelnen Spurenschadstoffe ist in der Abbildung 14 dargestellt. Auf die Entfernung von PFAS wird in Kapitel 3.2.7 eingegangen, daher sind diese hier nicht mit aufgeführt.

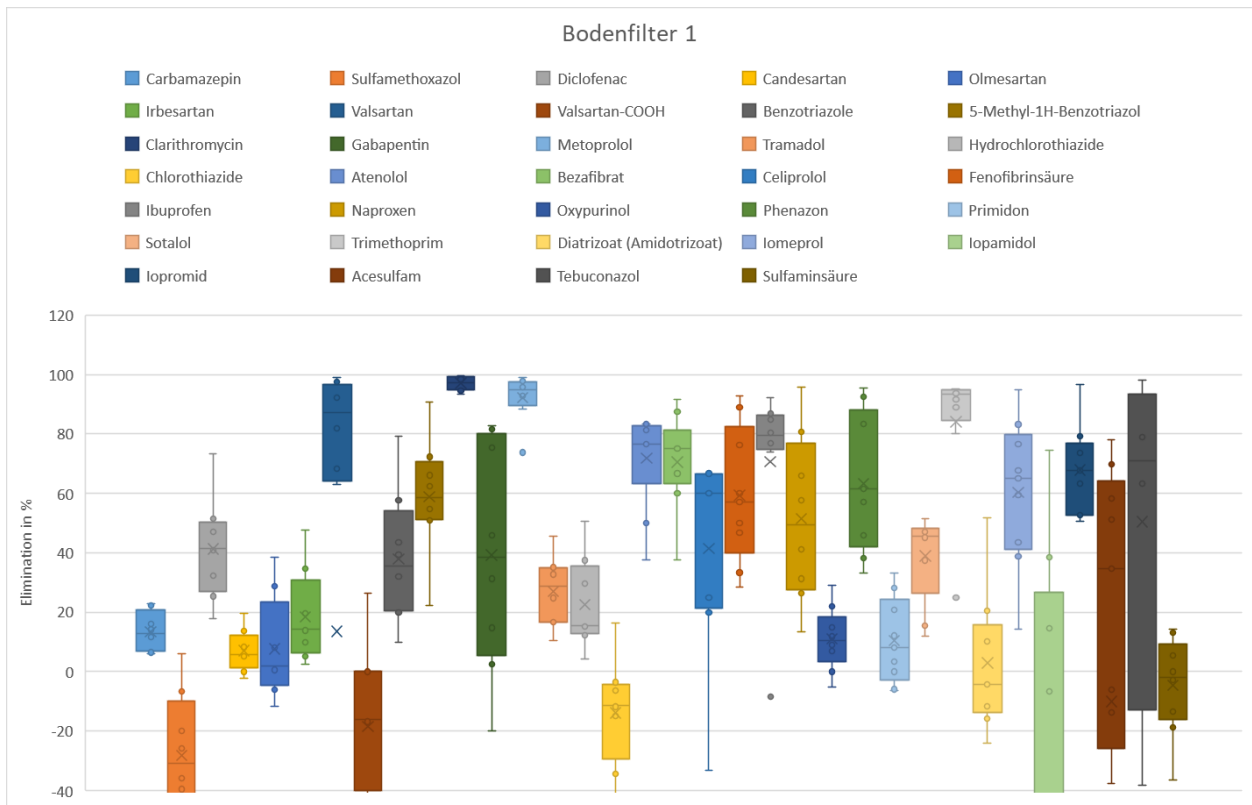


Abbildung 14: Elimination [%] von Spurenschadstoffen im Bodenfilter 1 (Sandfilter)

In Abbildung 14 fällt der Spurenschadstoff Iopamidol (Kontrastmittel, hellgrüner Balken) auf, der sowohl entfernt (positive Werte) wird, als auch im Ablauf der Bodenfilter in höherer Konzentration vorliegt als im Zulauf zur Anlage. Clarithromycin (Antibiotika, dunkelblauer Balken) hingegen wird mit einem Median von 97 % sehr gut eliminiert, ähnlich wie im Rieselfeld. Die Werte weisen die gleichen Tendenzen wie die es Rieselfelds auf, z.B. fällt Chlorothiazid mit einem negativen Medianwert (-6% im Rieselfeld und -11 % im Bodenfilter 1) auf.

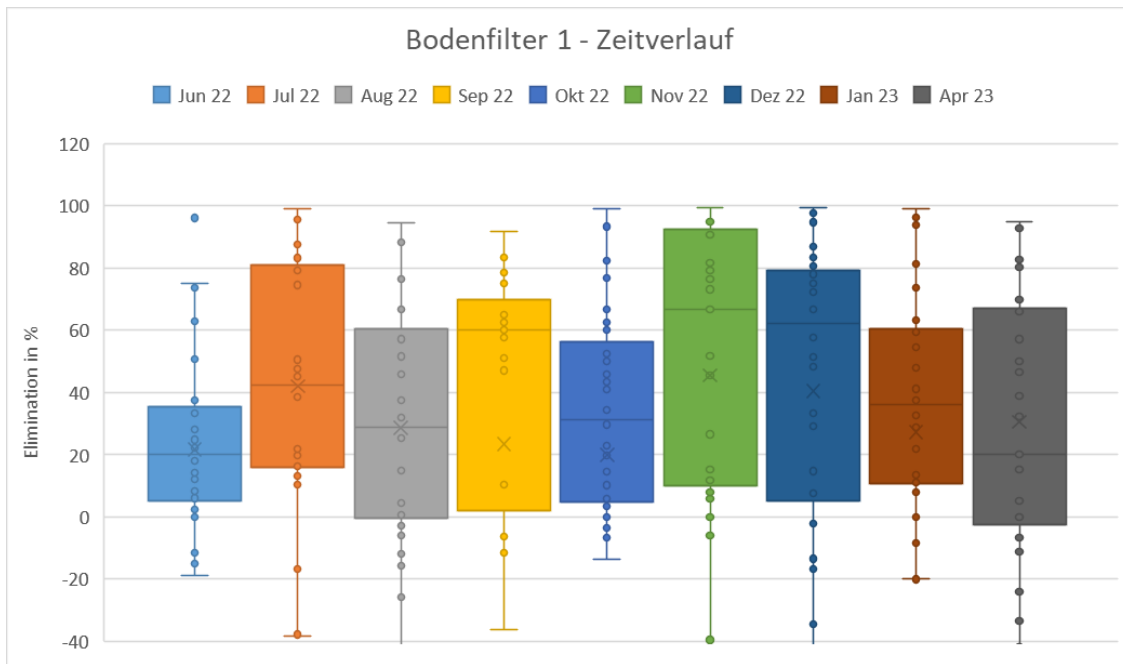


Abbildung 15: Zeitverlauf der Eliminationsleistung von Bodenfilter 1

Bei der Betrachtung der Eliminationsleistung im Zeitverlauf ist zu erkennen, dass im Juni eine geringe Elimination mit 20 % im Median erzielt wurde. Dies könnte sich damit erklären lassen, dass die Pflanzen und vor allem die Mikrofauna einen Beitrag zur Elimination der Spurenstoffe leisten und zu diesem Zeitpunkt den Sandfilter noch nicht durchwurzelt hatten bzw. sich die Mikrofauna noch nicht aufgebaut hatte. Im Medianwert ist ein Unterschied im Zeitverlauf zu erkennen, bei der Betrachtung des oberen und unteren Quartils und der Whisker ergibt sich ein verhältnismäßig ähnliches Bild, ein Durchbruch ist nicht deutlich zu erkennen. Im Dezember wird ein Median von 62 % erzielt, d.h. die Reinigungsleistung ist höher als zu Beginn und entspricht den Werten von September (60 %) und November (67 %). Im Januar und April nimmt die Reinigungsleistung im Median wieder ab, allerdings ist auch im Oktober deutlich geringer als im November. Eine Betrachtung über einen längeren Zeitraum wäre hier nötig. Ein Einfluss der Umgebungstemperatur ist nicht zu erkennen. Dies könnte daran liegen, dass das Wasser aus dem Klärwerk direkt in den Bodenfilter gepumpt wird und dort nur eine Aufenthaltszeit von ca. 6 Stunden hat und daher nicht so stark auskühlt wie im Rieselfeld.

3.2.4 Bodenfilter 2

Der Bodenfilter 2 ist wie in Kapitel 2.1 beschrieben ein bepflanzter Sandfilter der mit granulierter Aktivkohle angereichert ist. Eine Anreicherung mit Aktivkohle ist eine mögliche Option, um das Rieselfeld als zusätzliche Reinigungsstufe zu verbessern, daher soll hier der Vergleich zu Bodenfilter 1 gezogen werden. Im Vergleich zu Abbildung 10 in Kapitel 3.2.1 ist zu erkennen, dass sich die Reinigungsleistung gegenüber Bodenfilter 1 deutlich verbessert hat, von 35 % auf 99 % im Median.

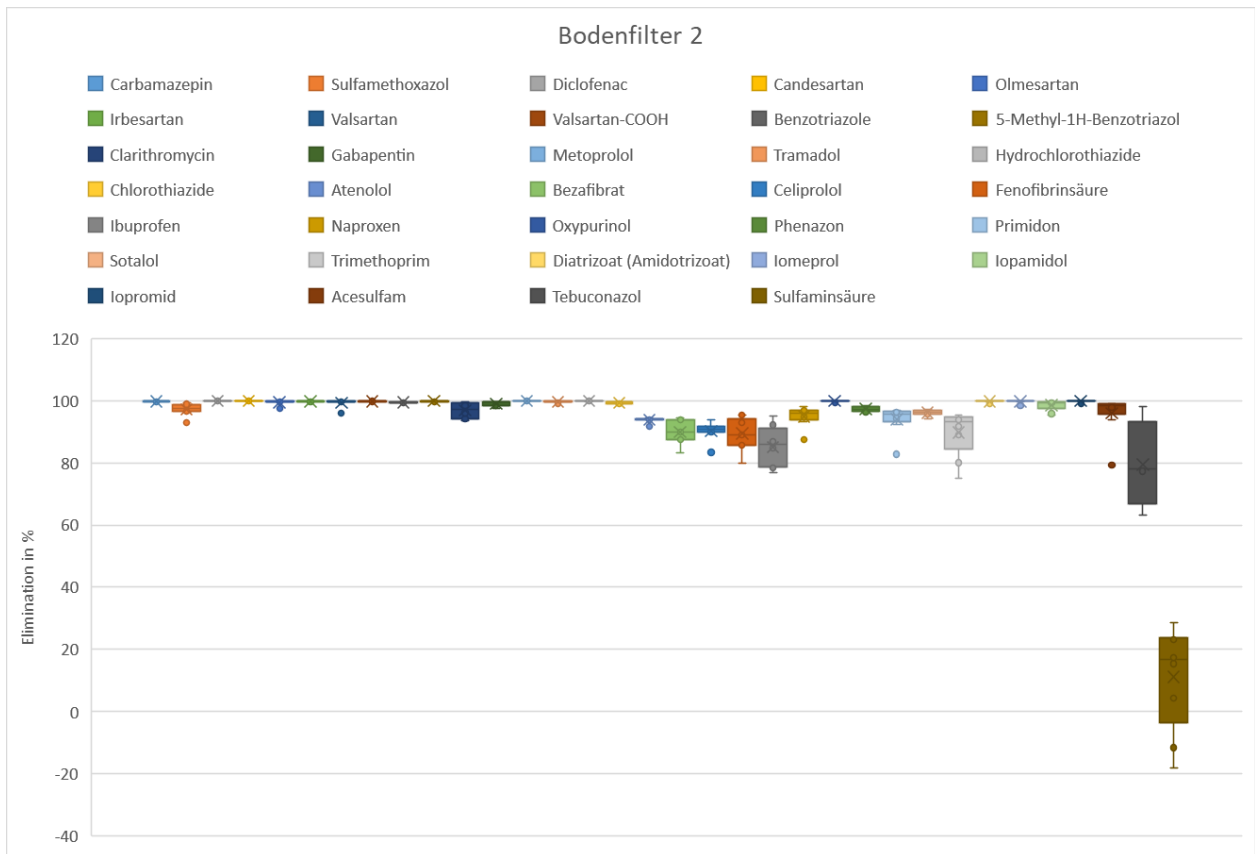


Abbildung 16: Elimination [%] von Spurenschadstoffen im Bodenfilter 2 (Sandfilter mit Aktivkohle)

Bei den einzelnen Spurenstoffen in Abbildung 16 ist zu erkennen, dass beim Großteil eine Elimination > 80 % erzielt werden kann. Jedoch gibt es Ausnahmen: Bei Ibuprofen liegt der niedrigste Wert bei 77 %, bei Trimethoprim bei 75 %, bei Acesulfam bei 79 % und bei Tebuconazol bei 63 %. Die Medianwerte liegen jedoch fast immer > 80 %, außer bei Tebuconazol mit 63 % (Werte siehe Tabellen im Anhang). Einzig die Sulfaminsäure wird fast gar nicht eliminiert bzw. erreicht sogar negative Werte.

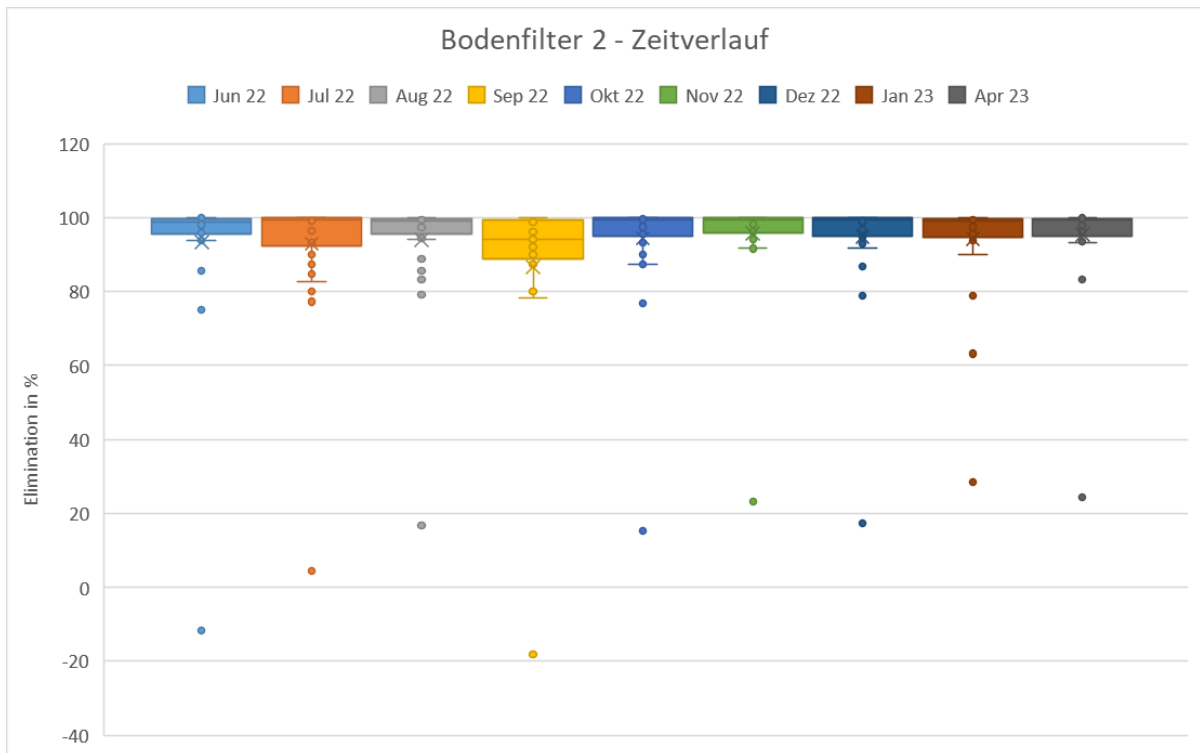


Abbildung 17: Zeitverlauf der Eliminationsleistung von Bodenfilter 2

Der in Abbildung 17 dargestellte Zeitverlauf zeigt, dass der Bodenfilter 2 von Beginn an im Median eine Reinigungsleistung von 99 % hat. Ein Durchbruch ist nicht zu erkennen.

3.2.5 Bodenfilter 3

Der Bodenfilter 3 ist wie in Kapitel 2.1 beschrieben ein bepflanzter Sandfilter ohne Aktivkohle mit vorgeschalteter Ozonanlage. Die Vorbehandlung des Abwassers mit Ozon wird auf dem Braunschweiger Klärwerk im Rahmen eines andere Forschungsprojektes, s. o., derzeit getestet. Die Oxidation mit Ozon ist grundsätzlich eine Möglichkeit für eine zusätzliche Reinigungsstufe. Im Vergleich zu Bodenfilter 1 konnte eine Erhöhung der Reinigungsleistung im Median von 35 % auf 83 % erzielt werden, siehe Abbildung 10 in Kapitel 3.2.1.

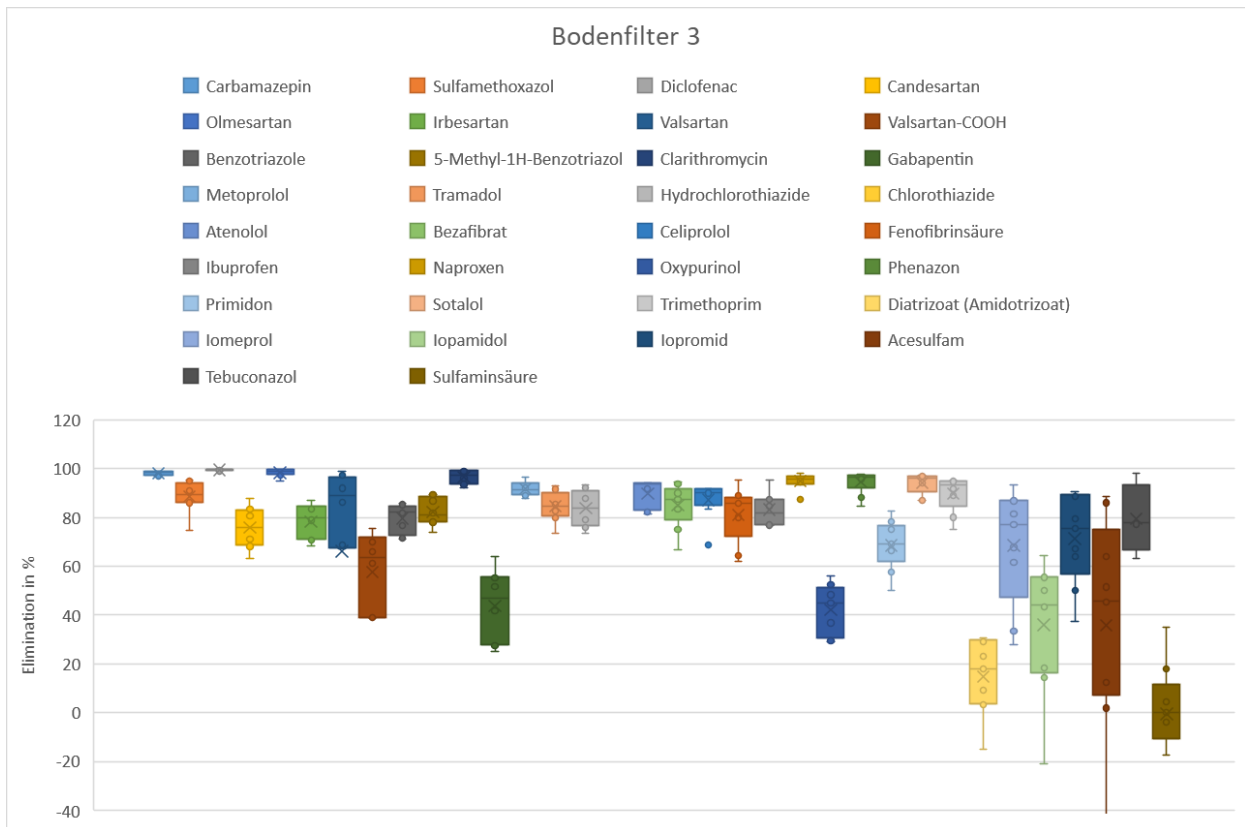


Abbildung 18: Elimination [%] von Spurenschadstoffen im Bodenfilter 3 (Ozon + Sandfilter)

Bei der Betrachtung der einzelnen Spurenstoffe wird deutlich, dass sich die Konzentration von Chlorothiazid im Ablauf des Bodenfilters 3 erhöht. Auch im Bodenfilter 1 (siehe Abbildung 14) liegen die meisten Werte für die Elimination im negativen Bereich, jedoch im Median bei -11 % wogegen der Median bei Bodenfilter 3 bei -392 % liegt (siehe Anhang).

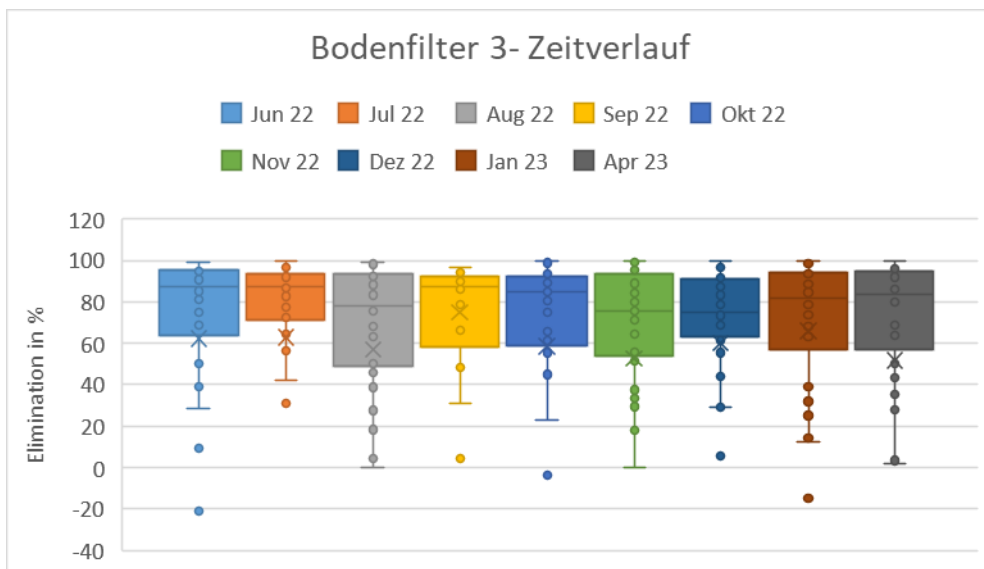


Abbildung 19: Zeitverlauf der Eliminationsleistung von Bodenfilter 3

In Abbildung 19 wird deutlich, dass auch hier im zeitlichen Verlauf kein Nachlassen der Reinigungsleistung festgestellt wird.

3.2.6 Bodenfilter 4

Der Bodenfilter 4 ist wie in Kapitel 2.1 beschrieben ein bepflanzter Sandfilter der mit granulierter Aktivkohle angereichert ist und eine vorgeschaltete Ozonanlage hat. Der Bodenfilter 4 erreicht wie Bodenfilter 2 im Median eine Reinigungsleistung von 99 %, siehe Abbildung 10 in Kapitel 3.2.1.

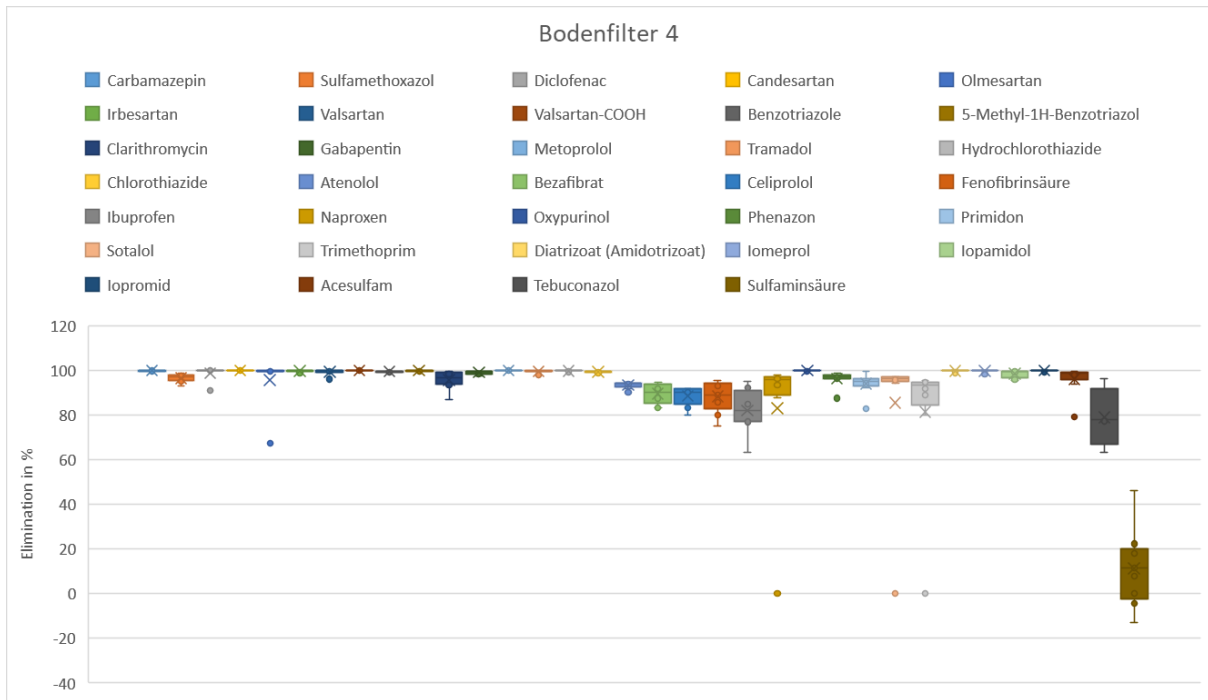


Abbildung 20: Elimination [%] von Spurenschadstoffen im Bodenfilter 4 (Ozon + Sandfilter mit Aktivkohle)

In der Abbildung 20 ist zu erkennen, dass im Vergleich zu Bodenfilter 2 in Abbildung 16 vereinzelt Werte < 80 % erreichen. Es gibt einen größeren Verteilungsbereich der Messwerte im Vergleich zu Bodenfilter 2. Die Medianwerte sind jedoch mit Ausnahme von Tebuconazol (78 %) größer als 80 %. Die Sulfaminsäure wird mit einem Medianwert von 17 % eliminiert.

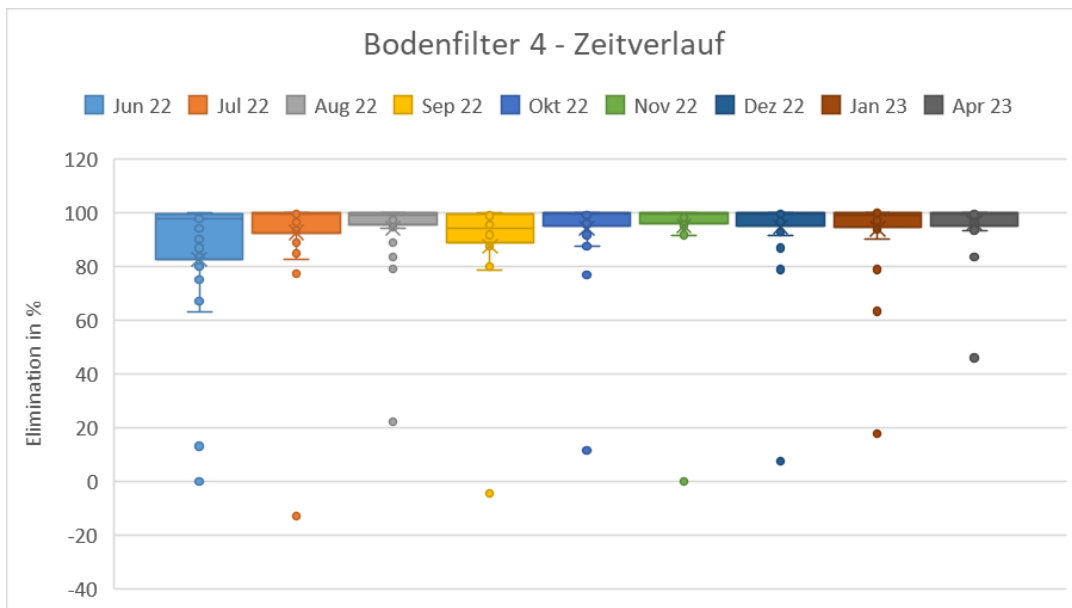


Abbildung 21: Zeitverlauf der Eliminationsleistung von Bodenfilter 4

In Abbildung 21 wird deutlich, dass wie schon in den anderen Bodenfiltern im zeitlichen Verlauf kein Nachlassen der Reinigungsleistung sowie zu unterschiedlichen Jahreszeiten festgestellt wird.

3.2.7 PFAS

Per- und polyfluorierte Alkylverbindungen (PFAS, engl.: *per- and polyfluoroalkyl substances*) sind definiert als fluorierte Stoffe, die mindestens ein vollständig fluoriertes Methyl- oder Methylen-Kohlenstoffatom (ohne daran gebundene H/Cl/Br/I-Atome) enthalten. PFAS kommen in der Natur nicht vor, sondern werden industriell hergestellt.

Bei früheren Untersuchungen im Rahmen des NextGen Projektes im November 2021 wurde in der ersten 24h-Mischprobe 1H,1H,2H,2H-Perfluorooctansulfonsäure mit 0,04 µg/L (BG = 0,01 µg/L) im Zulauf der Kläranlage gefunden. In einer weiteren Mischprobe im Abstand von einer Woche konnten keine PFAS nachgewiesen werden. Die Analysen umfassten 35 verschiedene PFAS. Da damals wenig bis keine PFAS im Zulauf zur Kläranlage nachgewiesen werden konnten, waren im Rahmen des Soil4pur Projektes zunächst zwei Probenahmen im Sommer vorgesehen. Später wurde dann noch eine Probenahme im Dezember ergänzt. Als Summenparameter wurde absorbierbares organisch gebundenes Fluor (AOF) bestimmt, sowie ein TOP (totale oxidisable precursor) -Assay durchgeführt, um Vorläufersubstanzen zu ermitteln.

Im Juni wurden im Ablauf der Kläranlage folgende PFAS gefunden:

- Ablauf Kläranlage
 - o AOF
 - o TOP-Assay: Perfluorbutansäure (PFBA)
- Ablauf Bodenfilter 1
 - o Alle Werte waren < BG
- Ablauf Bodenfilter 3
 - o Perfluorpentansäure (PFPeA), Perfluorhexansäure (PFHxA), 1H,1H,2H,2H-Perfluorooctansulfonsäure (H4PFOS), Perfluorheptansäure (PFHpA)
 - o TOP-Assay: Perfluorbutansäure (PFBA), Perfluorpentansäure (PFPeA), Perfluorhexansäure (PFHxA)

Die Analyse im Juli kam zu folgendem Ergebnis:

- Ablauf Kläranlage
 - o AOF
 - o Perfluorooctansäure (PFOA), 1H,1H,2H,2H-Perfluorooctansulfonsäure (H4PFOS)
 - o TOP Assay: Perfluorbutansäure (PFBA), Perfluorpentansäure (PFPeA), Perfluorhexansäure (PFHxA), Perfluorooctansäure (PFOA)
- Ablauf Bodenfilter 1
 - o AOF
 - o Perfluorpentansäure (PFPeA),
 - o TOP-Assay: Perfluorbutansäure (PFBA), Perfluorpentansäure (PFPeA), Perfluorhexansäure (PFHxA)
- Ablauf Bodenfilter 3
 - o Perfluorhexansäure (PFHxA), 1H,1H,2H,2H-Perfluorooctansulfonsäure (H4PFOS), Capstone Produkt B
 - o TOP-Assay: Perfluorbutansäure (PFBA), Perfluorpentansäure (PFPeA), Perfluorhexansäure (PFHxA).

Im Dezember wurden folgende PFAS detektiert:

- Ablauf Kläranlage
 - o Perfluorhexansäure (PFHxA), 1H,1H,2H,2H-Perfluorooctansulfonsäure (H4PFOS)
 - o TOP Assay: Perfluorbutansäure (PFBA), Perfluorpentansäure (PFPeA), Perfluorhexansäure (PFHxA).
- Ablauf Bodenfilter 1
 - o Perfluorhexansäure (PFHxA), Capstone Produkt B,
 - o TOP-Assay: Perfluorbutansäure (PFBA), Perfluorpentansäure (PFPeA), Perfluorhexansäure (PFHxA)
- Ablauf Bodenfilter 3
 - o Perfluorhexansäure (PFHxA), 1H,1H,2H,2H-Perfluorooctansulfonsäure (H4PFOS), Capstone Produkt B
 - o TOP-Assay: Perfluorbutansäure (PFBA), Perfluorpentansäure (PFPeA), Perfluorhexansäure (PFHxA), Perfluorooctansäure (PFOA)

Im Ablauf von Bodenfilter 2 und 4 wurden keine PFAS detektiert.

Die PFAS wurden in relativ geringen Mengen nachgewiesen, teilweise knapp oberhalb der Bestimmungsgrenze. Da sie nur vereinzelt auftreten, wurde davon abgesehen die Eliminationsleistung zu bestimmen. Daher werden im Folgenden für ausgewählte PFAS sowie AOF die Konzentrationen dargestellt. Für Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze wurde der Wert auf 0,5*BG gesetzt.

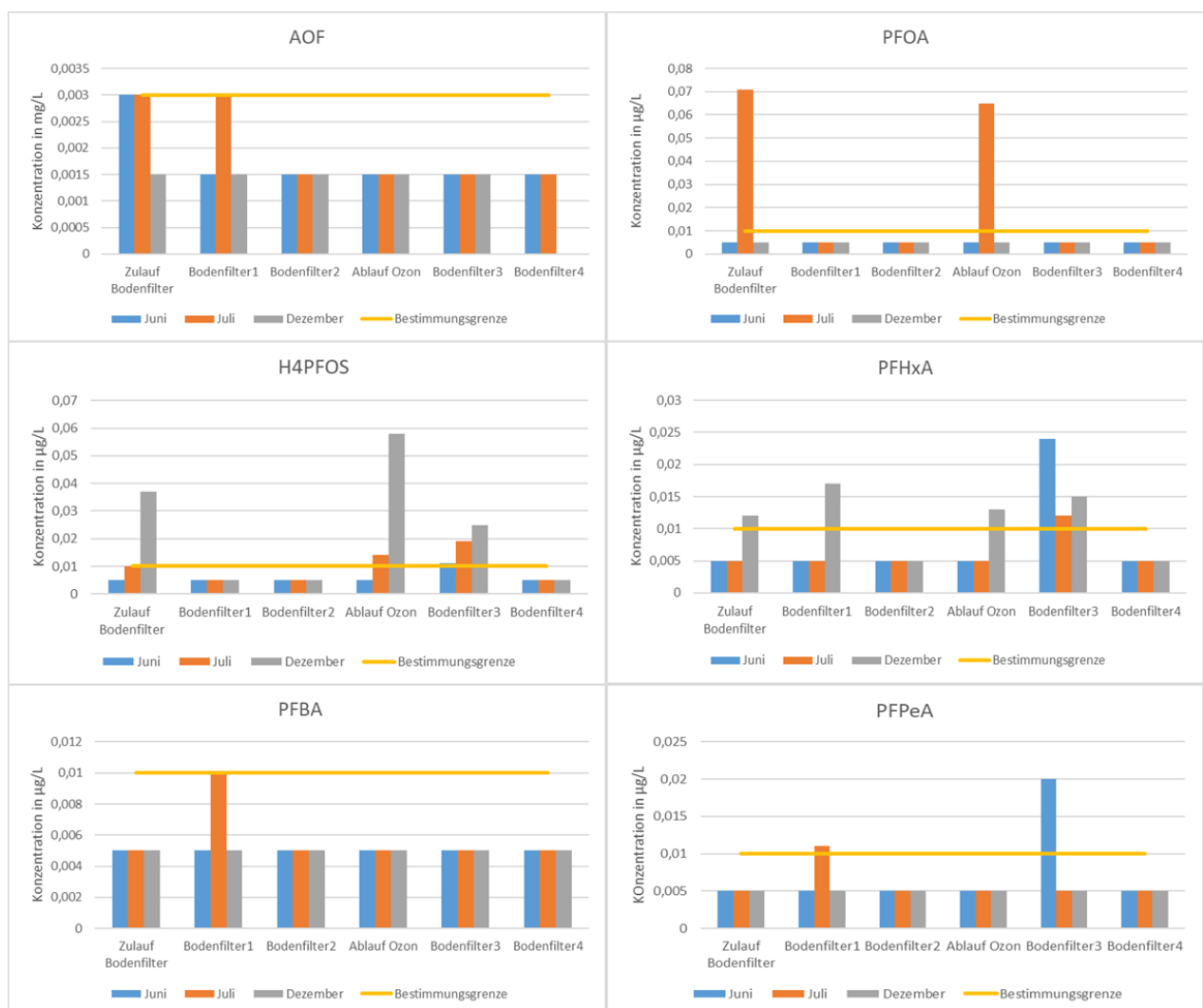


Abbildung 22: Darstellung der Konzentrationen ausgewählter PFAS bei sechs verschiedenen Messstellen zu den verschiedenen Probenahmezeitpunkten: Blau (Juni), Orange (Juli), Grau (Dezember); die gelbe Linie gibt die Bestimmungsgrenze an; alle Werte <BG wurden auf ½ BG gesetzt

In der Abbildung 22 ist zu erkennen, dass der AOF Wert nur in den Sommermonaten überhaupt die Bestimmungsgrenze erreicht hat (Ablauf KW sowie im Ablauf des Bodenfilters 1). Im Ablauf der Ozonung wurden auch PFAS detektiert, d. h. ggf. werden PFAS von der Ozonanlage nicht zerstört.

Die Tatsache, dass im Ablauf von Bodenfilter 2 und 4 keine PFAS detektiert wurden, lässt darauf schließen, dass diese an Aktivkohle adsorbieren.

Im Rieselfeld konnten an den verschiedenen Messtellen folgende PFAS ermittelt werden:

- Perfluorbutansäure (PFBA), Perfluorpentansäure (PFPeA), Perfluorhexansäure (PFHxA), Perfluorheptansäure (PFHpA), Perfluoroctansäure (PFOA), Perfluorbutansulfonsäure (PFBS), Perfluoroctansulfonsäure (PFOS), 1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonsäure (H4PFOS)
- TOP-Assay: Perfluorbutansäure (PFBA), Perfluorpentansäure (PFPeA), Perfluorhexansäure (PFHxA), Perfluorheptansäure (PFHpA), Perfluoroctansäure (PFOA), Perfluorbutansulfonsäure (PFBS), Perfluoroctansulfonsäure (PFOS)

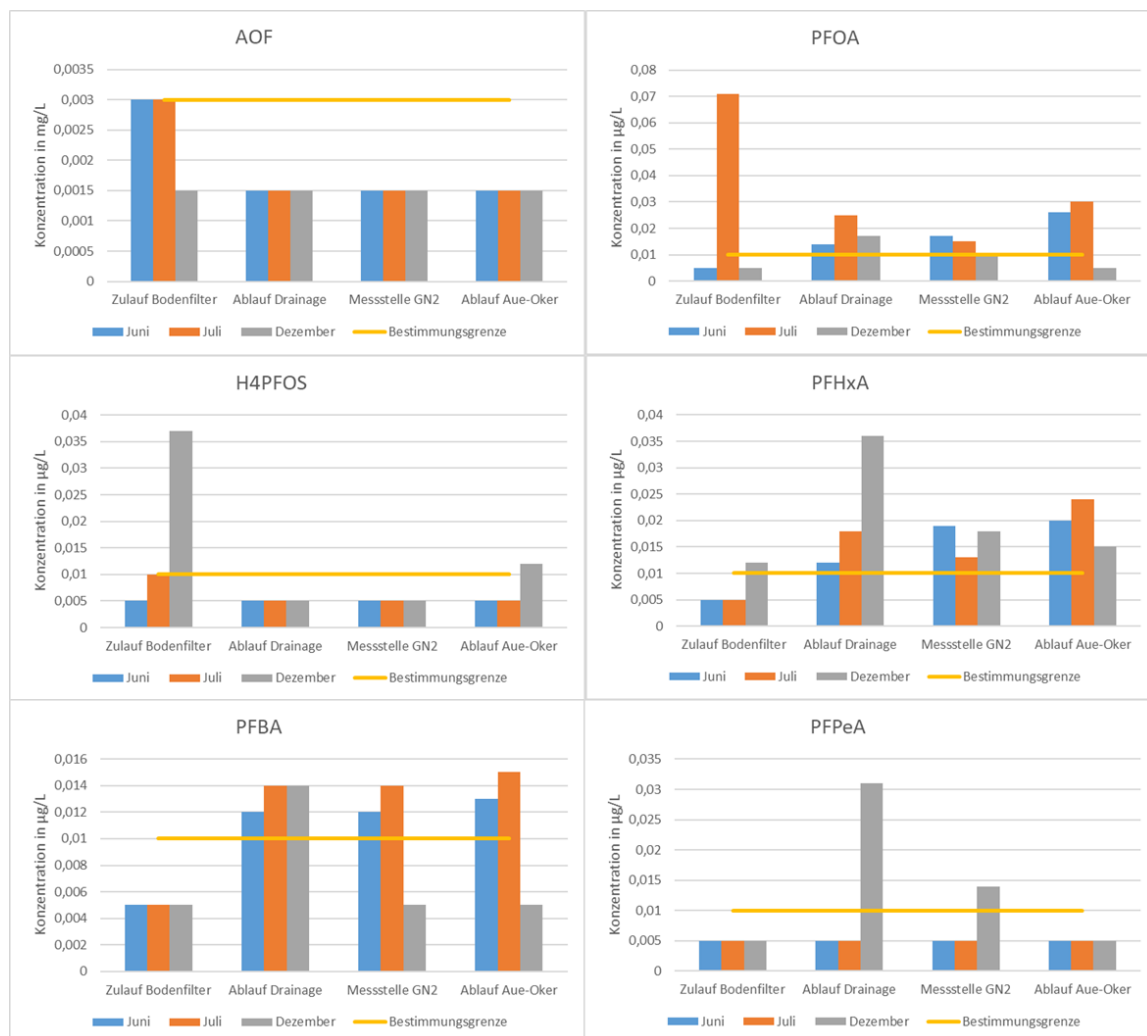


Abbildung 23: ausgewählte PFAS im Rieselfeld bei drei verschiedenen Messstellen zu den verschiedenen Probenahmezeitpunkten: Blau (Juni), Orange (Juli), Grau (Dezember); die gelbe Linie gibt die Bestimmungsgrenze an; alle Werte <BG wurden auf ½ BG gesetzt

Im Rieselfeld wurde zu keinem der drei Probenahme-Zeitpunkten AOF detektiert, wie in Abbildung 23 zu sehen ist. Von den weiteren PFAS finden sich einige im Rieselfeld wieder, selbst wenn im Ablauf der Kläranlage keine zu finden sind. Hier fehlt allerdings die direkte Vergleichbarkeit durch die zeitgleiche Probenahme. Das Wasser hat eine Aufenthaltszeit von mehreren Tagen im Rieselfeld.

3.2.8 Antibiotika-Resistenzgene

Im Abwasser treffen Rückstände von Antibiotika auf Bakterien, die durch Mutation Resistenzen gegen diese Wirkstoffe aufbauen können. Einmal erworbene Resistenzen (d.h. die Information für die Herstellung eines Proteins welches die Wirkung des Antibiotikums hemmt) können in Form von Genen von einem Bakterium zum anderen weitergegeben werden. Immer mehr Bakterien sind resistent gegenüber gängigen Antibiotika und werden damit eine Gefahr für die menschliche Gesundheit. Im Folgenden werden die Resistenzen gegenüber bestimmten Wirkstoffgruppen, wie Sulfonamide, Glykopeptide und Beta-Laktam-Antibiotika diskutiert. Es gibt unterschiedliche Gene die die Information zur Resistenz enthalten, diese werden mit Buchstaben abgekürzt, wie z.B. sul1 und blaCTX-M.

Die Antibiotika-Resistenzgene werden mit einer Chip-basierten Resistenzdiagnostik quantitativ ermittelt. Erste Ergebnisse zeigen, dass sowohl Ozon als auch Aktivkohle die Anzahl an Resistenzgenen reduziert. Dies ist besonders bei den Sulfonamiden und auch Glykopeptiden gut zu erkennen, siehe Abbildung 24. Es ist deutlich zu sehen, dass der Wert aus dem Ablauf des Klärwerks (lila Balken) höher ist im Vergleich zu dem Ablauf der Ozonanlage (rosa Balken). Auch die Werte aus dem Ablauf der mit Aktivkohle angereicherten Bodenfilter (grüner Balken; hellgrüner Balken) zeigen eine Reduktion der Resistenzgene. In den Braunschweiger Rieselfeldern zeigen die Sulfonamide den höchsten Wert im Ablauf des Aue-Oker-Kanals, während der höchste Wert an Glykopeptid-Resistenzen im Ablauf der Drainage detektiert wurde. Generell sind die detektierten Werte für die Sulfonamid Resistenzen sehr niedrig, welches ungewöhnlich ist; insbesondere da die Werte für das Intl1 Gen (ein Indikator für die Mobilität der Resistenzen) höher liegt und dies normalerweise gut mit Sul1 korreliert. Um Aussagen zu den Taxonomischen Markern treffen zu können sind weitere Untersuchungen notwendig.

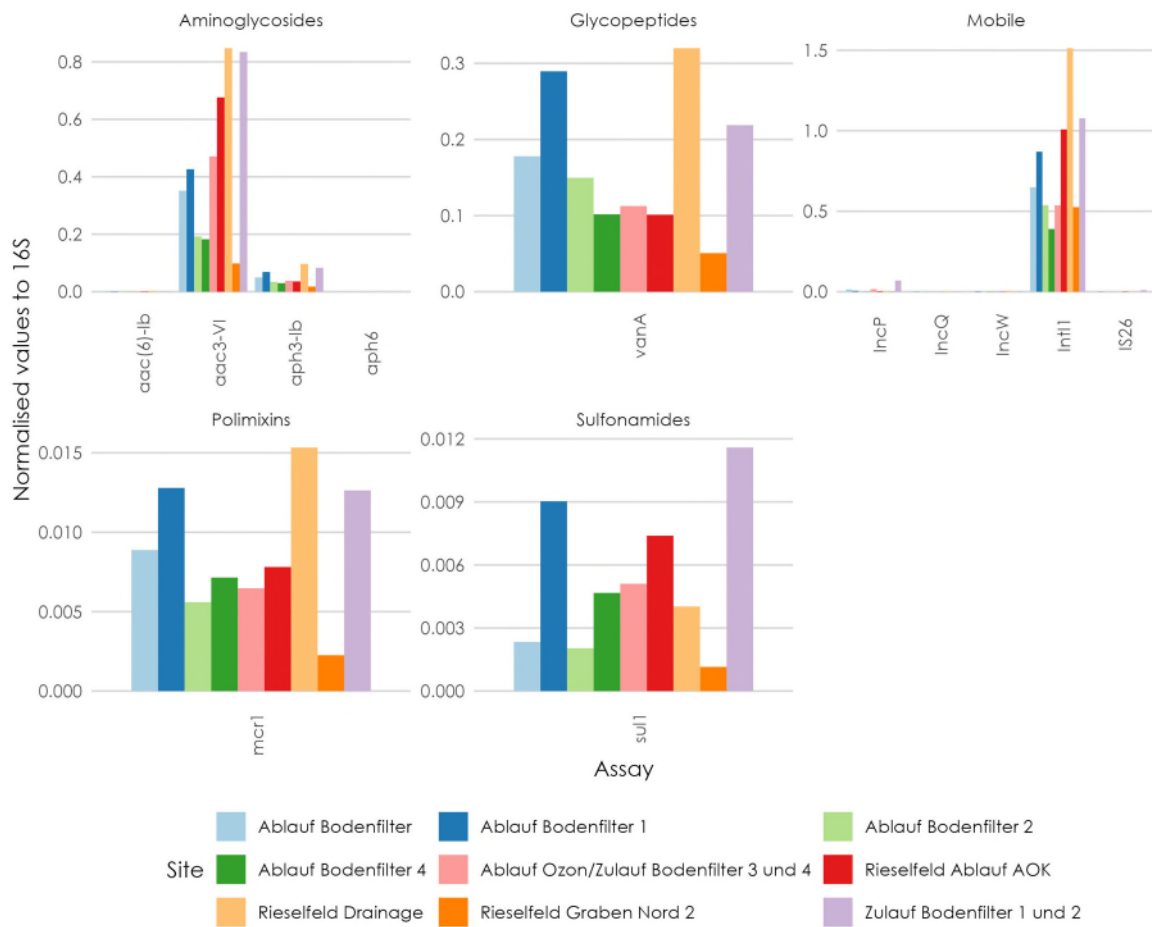


Abbildung 24: Übersicht zu den Ergebnissen der Analyse der Resistenzgene

Bei den Glykopeptiden fällt auf, dass die Werte vom Ablauf des Bodenfilters 1 (blauer Balken) und im Ablauf der Drainage im Rieselfeld (helloranger Balken) höher sind im Vergleich zum Ablauf des Klärwerks. Dies zeigt deutlich, dass eine Behandlung mit Ozon und/oder Aktivkohle hilft um eine Anreicherung/Vervielfachung an andere Stelle vorzubeugen.

In der Abbildung 25 ist das Balkendiagramm aus der Abbildung 24 zu den Beta-Laktam-Resistenzgenen vergrößert dargestellt. Das Muster, das sich bei den Glykopeptiden zeigt, findet sich auch hier wieder.

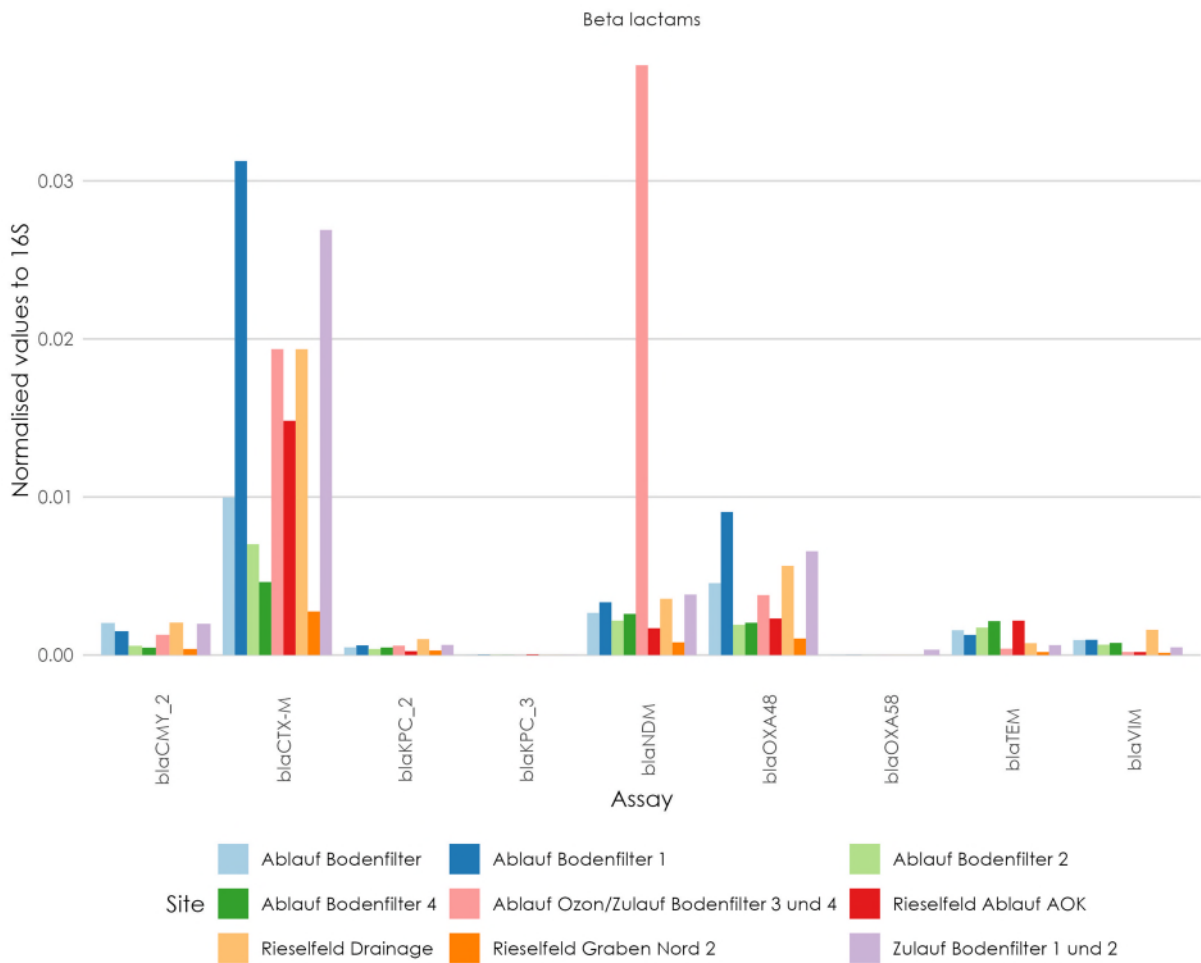


Abbildung 25: Ergebnisse der Untersuchung auf Beta-Laktam-Resistenzen

Besonders das Gen blaCTX-M ist für weitere und detailliertere Untersuchungen interessant, da dieses in den höchsten Konzentrationen vorliegt.

In der Abbildung 25 zeigt sich bei dem Gen blaNDM ein unverhältnismäßig hoher Wert im Ablauf der Ozonanlage, der sich so nicht erklären lässt. Es zeigt sich, dass weitere Untersuchungen notwendig sind. Diese wurden zum Teil schon veranlasst, die Ergebnisse stehen noch aus. Besonders die hier diskutierten Resistenzen gegen Sulfonamide, Glykopeptid- und Beta-Laktam-Antibiotika sind für weitere Untersuchungen gut geeignet, im Gegensatz zu den Tetrazyklin-Resistenzen.

Zusätzlich wurden weitere Untersuchungen mithilfe einer real-time q-PCR (Echtzeit-Polymerase-Kettenreaktion zur Quantifizierung von Erbgut) durchgeführt, um die zeitliche Variabilität zu erfassen und die Konzentrationen zu verifizieren. Die geringen Sul1 Konzentrationen konnten hier bestätigt werden. Ebenso war die Konzentration nach der Ozonierung meist gering, wenngleich eine starke zeitliche Variabilität beobachtet werden konnte, insbesondere für die weiteren Kompartimente des Systems. Diese Daten legen weitere und genauere Untersuchungen nahe, wenngleich die ersten Resultate dieses Systems erfolgsversprechend sind.

In der Spurenstoffanalytik wurden die Antibiotika Clarithromycin (Makrolid-Antibiotikum) und Sulfamethoxazol (Sulfonamid-Antibiotikum) betrachtet. In der Abbildung 26 sind die Konzentrationen an den Probenahmestellen abgebildet.

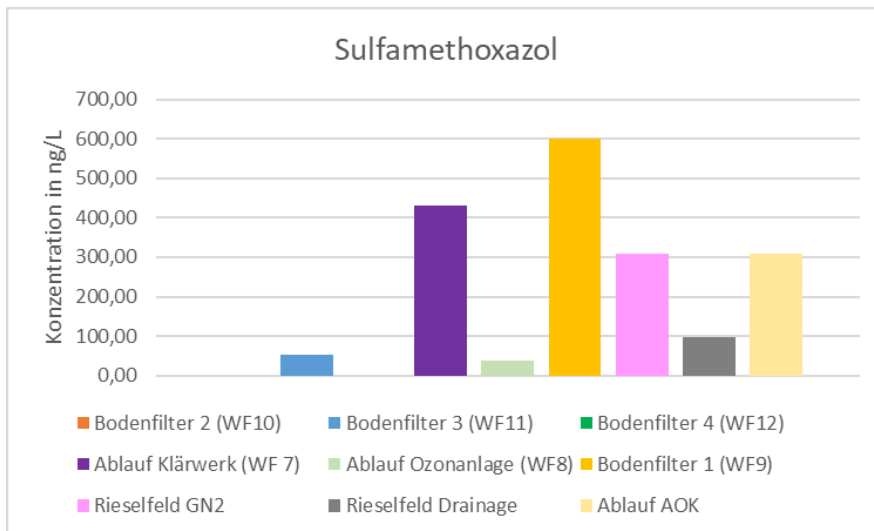


Abbildung 26: Konzentration von Sulfamethoxazol an den Probenahmestellen

Beim Vergleich der Abbildung 24 und Abbildung 26 zeigt sich, dass die Konzentration von Sulfamethoxazol nicht mit den Werten der Sulfonamid-Resistenzen korrelieren. Der höhere Wert im Ablauf des Bodenfilters 4 lässt sich dadurch erklären, dass Stichproben und keine Mischproben genommen wurden und das Abwasser nicht einen konstanten Gehalt an Spurenschadstoffen hat. Die Tatsache, dass ein Sulfonamid-Antibiotikum im Wasser detektiert werden, könnte auch erklären warum sich Sulfonamid-Resistenzen finden lassen. Resistenzen entstehen, wenn Mikroorganismen Kontakt zu dem entsprechenden Stoff haben. Für die Entfernung des Sulfamethoxazol eignet sich vor allem Aktivkohle. Da eine geringere Anzahl an Resistenzen auch mit der Aktivkohle korrelieren deutet dies darauf hin, dass Aktivkohle eine gute Wahl ist, wenn es darum geht nachhaltig Resistenzen zu verringern.

3.2.9 Bodenuntersuchungen

Von den Bodenproben bzw. Boden-Aktivkohle-Proben konnten nur geringe Mengen an Spurenschadstoffen eluiert werden. Die Spurenschadstoffe scheinen nicht an den Sandpartikeln und der Aktivkohle zu haften (bzw. wurden wieder abgebaut) oder sie haften so stark, dass diese sich nicht eluieren lassen.

Eine Beispielrechnung von den Proben aus Oktober 2022 zeigt, dass die ermittelten Spurenstoffe aus dem Wasseranteil der Proben stammen. Nach der Methode DIN EN 12457-4: 2003-01 wird ein 10: 1 Schüttel eluat der Probe für die Analyse auf Spurenstoffe hergestellt. Dabei wird für die Elution die ungetrocknete Originalprobe verwendet und diese mit destilliertem Wasser versetzt, so dass sich ein Verhältnis von 10 L pro 1 kg Trockenmasse ergibt (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2002). In dem Beispiel würden also zu 100 g der Probe 221018_BF1 mit einer Trockenmasse von 82,2 % noch 804,2 mL hinzugegeben werden, wenn man von einer Dichte des Wassers von 1 kg/L ausgeht.

- 100g Probe (82,2 g Feststoff + 17,8 g Flüssigkeit)
 - 10 L /kg Trockenmasse: 822 mL /82,2 g
 - 17,8 g Flüssigkeit entsprechen 17,8 mL
- ➔ Zu 100 g Probe wird 804,2 mL (822 mL – 17,8 mL) deionisiertes Wasser zugegeben.

Nach der Fest-/Flüssigtrennung liegen dann 822 mL Probevolumen vor, wovon 17,8 mL aus der Probe kommen und 804,2 mL deionisiertes Wasser sind. Hochgerechnet auf 1 L wären dies 0,978 L deionisiertes Wasser und 0,022 L Flüssigkeit aus der Probe, d.h. 2,2 % der Spurenschadstoffe kommen aus dem Wasseranteil. Was dies bedeutet wird in der Tabelle 5 dargestellt. Dabei muss bedacht

werden, dass es sich um Stichproben handelt die nicht zeitgleich genommen wurden und auch nur an ähnlichen Stellen, nicht an der exakt gleichen Stelle, wodurch sich eine Abweichung ergibt.

Tabelle 5: Vergleich von Wasser und Bodenproben aus dem Bodenfilter 1 vom Oktober 2022

Röntgenkontrastmittel	Ergebnis der Wasserprobe 221018_WF1 [µg/L]	2,2 % der Wasserprobe	Ergebnis der Bodenprobe 221018_BF1 [µg/L]
Diatrizoat (Amidotrizoat)	3,50	0,077	0,09
Iomeprol	2,30	0,050	0,04
Iopamidol	0,87	0,019	< 0,03
Iopromid	7,90	0,174	0,08

Die Ergebnisse der Bodenproben lassen sich damit erklären, dass die gemessenen Spurenstoffe überwiegend aus dem Wasseranteil der im Labor abgegebenen Probe kommen. Des Weiteren liegt der Großteil der Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze, was sich auch innerhalb der Projektlaufzeit nicht ändert. Aussagen über eine Anreicherung der Spurenstoffe im Bodenfilter können daher nicht getroffen werden. Eine mögliche Erklärung dafür wäre, dass die Spurenstoffe zu stark an den Boden- bzw. Aktivkohle-Partikeln haften und die Labormethode nicht geeignet ist. Eine andere Erklärung wäre, dass die Spurenstoffe durch die Pflanzen und Mikroorganismen in den Bodenfiltern abgebaut werden. Die Analytik von möglichen Abbauprodukten wäre hier ein geeigneter Schritt um weitere Erkenntnisse zu gewinnen.

3.2.10 Pflanzenuntersuchungen

In den Pflanzenproben (Blättern) konnten nur wenige Spurenschadstoffe oberhalb der Bestimmungsgrenze ermittelt werden. Einzig Primidon, Carbamazepin, Chlorothiazid, Oxypurinol, Tramadol und Metoprolol konnten gemessen werden. Insgesamt zeigt sich kein Zusammenhang zwischen der Elimination der Spurenschadstoffe in den Wasserproben der verschiedenen Bodenfilter und dem Spurenschadstoffgehalt in den Pflanzen. Vermutlich sind die Konzentrationen in den Pflanzenproben zu gering um aussagekräftige Rückschlüsse zu ziehen. Des Weiteren wurden nur stichpunktartig Pflanzen entnommen. Eine Betrachtung der Pflanzen über den kompletten Bodenfilter würde vermutlich zu aussagekräftigeren Ergebnissen führen. Dies ist jedoch nicht so einfach umsetzbar, da die Menge an Probenmaterial zu groß ist um diese zu bearbeiten und der Bodenfilter danach nicht mehr wie geplant weiter betrieben werden könnte.

3.3 Zusammenfassung Arbeitspaket 1

In dem Arbeitspaket hat sich gezeigt, welche Reinigungsleistung das Rieselfeld in seinem IST-Zustand leistet und schon jetzt die Wasserqualität deutlich verbessert. Dieser IST-Zustand konnte durch den Bodenfilter 1 hinreichend gut abgebildet werden, sodass ein Vergleich zwischen den Bodenfiltern Aufschluss über eine mögliche Übertragbarkeit liefern kann. Des Weiteren hat sich gezeigt, dass die Bodenfilter einen positiven Effekt auf die Wasserqualität haben, der auch innerhalb der Laufzeit nicht nachgelassen hat. Besonders die mit Aktivkohle angereicherten Filter verbessern die Wasserqualität, entfernen Spurenschadstoffe und reduzieren Resistenzen. Es zeigt sich, dass zur Elimination der Spurenschadstoffe Ozon nicht notwendig ist, da vor allem die Aktivkohle die Spurenschadstoffe reduziert, größtenteils bis unterhalb der Bestimmungsgrenze. Auch die Anzahl an *E. coli* wird zuverlässig bis unterhalb des von der EU vorgegebenen Grenzwertes von 10.000 *E. coli*/ 100 mL reduziert. Hier zeigt sich, dass der Einsatz von Ozon die Reduktion an *E. coli* noch verbessert.

Jedoch ist die Laufzeit des Projektes zu kurz um Aussagen über eine langfristige Wirkung treffen zu können. Die Langlebigkeit ist von besonderem Interesse, da diese Information vermutlich den Ausschlag geben wird, ob Bodenfilter in einem größeren Maßstab auf Kläranlagen als weiterführende Reinigungsstufe eingesetzt werden oder nicht. Daher werden die Bodenfilter beim Abwasserverband weiterhin auf eigene Kosten mit reduziertem Messprogramm betrieben und eine Veröffentlichung der Ergebnisse zur Langlebigkeit angestrebt.

4 Ergebnisse Arbeitspaket 2

Im Arbeitspaket 2 wird die Übertragbarkeit der halbtechnischen Versuchsanlage für großtechnische Umsetzungen untersucht. Basierend auf dem Arbeitskapitel 1 wird zunächst eine Variante ausgewählt, die dann im Hinblick auf eine Übertragbarkeit auf Kläranlagen der Größenklasse 2 und 3 sowie als mögliche Optimierung der Braunschweiger Rieselfelder diskutiert wird.

Die Ergebnisse im Kapitel 3.2 bzw. 3.2.4 zeigen, dass ein mit Aktivkohle angereicherter Bodenfilter durchschnittlich 99 % der Spurenschadstoffe eliminieren kann, auch ohne eine vorgeschaltete Ozonanlage. Daher wird der Bodenfilter 2 als Basis für die Übertragbarkeit genauer betrachtet. Im Rahmen der Probenahmen wurden auch innerhalb der vier Bodenfilter nach ca. 2 m (1,25 m Passage durch Aktivkohle/Sand) Proben genommen. Diese Ergebnisse sind für den Bodenfilter 2 in der Abbildung 27 und Abbildung 28 dargestellt.

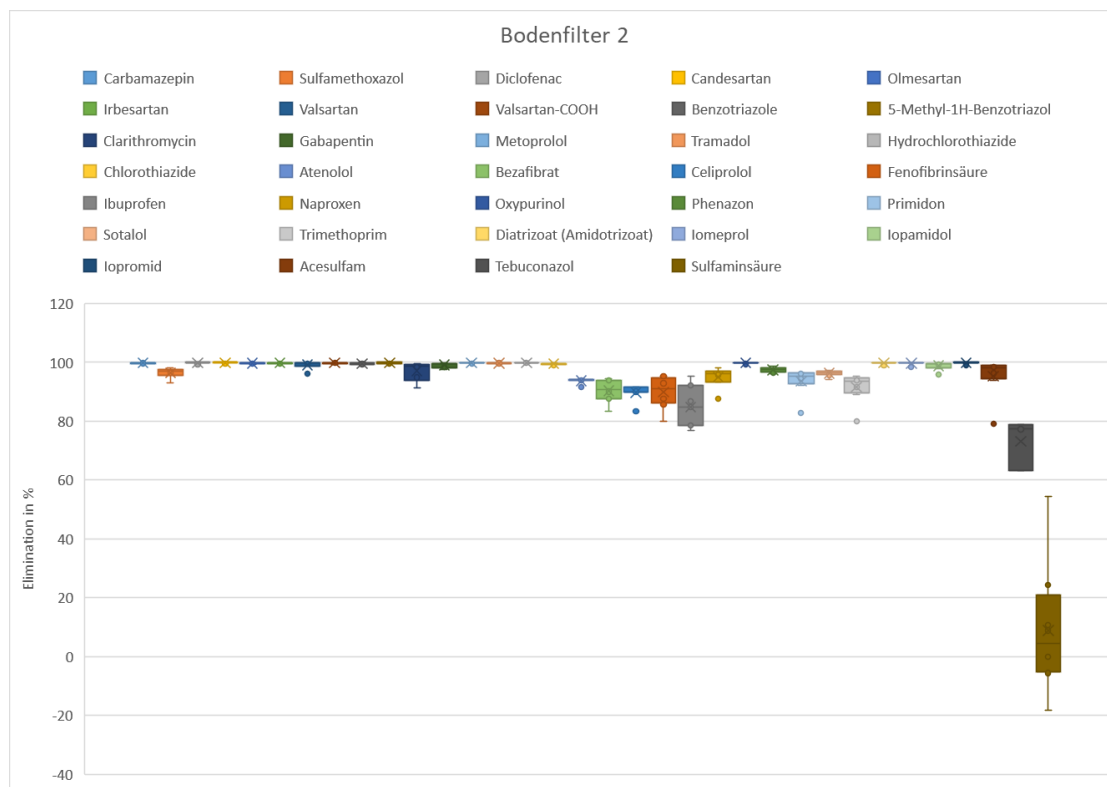


Abbildung 27: Elimination [%] von Spurenschadstoffen bis zur Probenahmestelle innerhalb Bodenfilter 2 (Sandfilter mit Aktivkohle)

Die Ergebnisse sind nahezu identisch zu denen im Ablauf des Bodenfilters 2 in Abbildung 16. Abbildung 16: Elimination [%] von Spurenschadstoffen im Bodenfilter 2 (Sandfilter mit Aktivkohle)

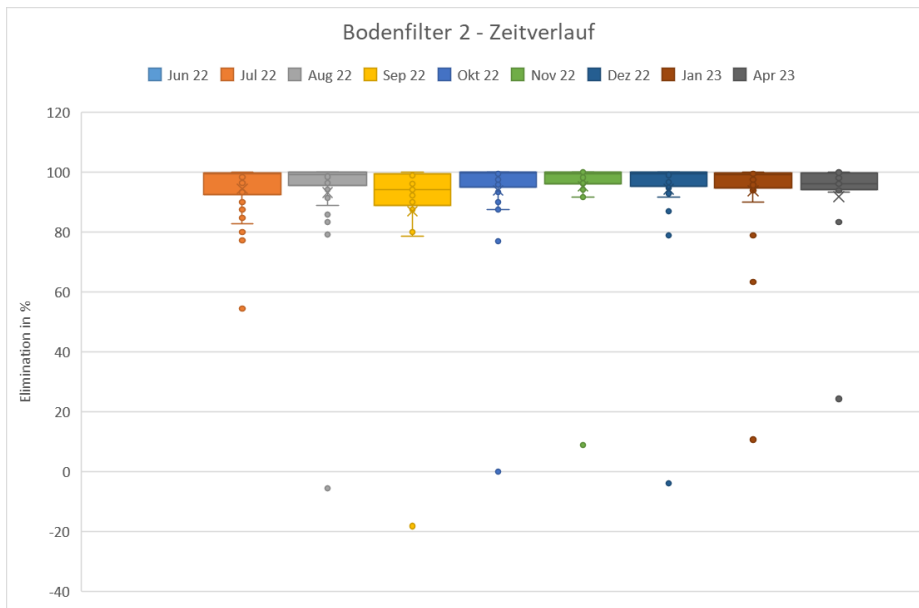


Abbildung 28: Zeitverlauf der Eliminationsleistung bis zur Probenahmestelle innerhalb des Bodenfilter 2

Im zeitlichen Verlauf ist kein Nachlassen der Reinigungsleistung bis zu der Probenahmestelle zu erkennen.

Tabelle 6: *E. coli* Bestimmungen im Bodenfilter 2

	Zulauf [<i>E. coli</i> MPN/100 mL]	Bodenfilter nach ca. 2m [<i>E. coli</i> MPN/100 mL]	Ablauf [<i>E. coli</i> MPN/100 mL]
Jun 22	40600		50
Jul 22	200500	45300,00	3690
Aug 22	69700	2000,00	10
Sep 22	62400	2000,00	136
Okt 22	45300	1000	375
Nov 22	118400	144500	50
Dez 22	94500	27100,00	435
Jan 23	50400	10910	320
Apr 23	38400	124	9

In der Tabelle 6 sind die Ergebnisse der *E. coli* Bestimmungen für den Bodenfilter 2 aufgelistet. Die EU-Vorgabe von < 10.000 *E. coli* /100 mL kann nach der kurzen Passage noch nicht sicher eingehalten werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass auch ein kürzerer Bodenfilter die Spurenschadstoffe gut eliminieren würde. Nur die Anzahl an *E. coli* wird nicht ausreichend reduziert. Um für den großtechnischen Ansatz die benötigte Fläche zu minimieren, könnte im Anschluss an die Bodenfilter eine UV-Anlage installiert werden. So kann eine Desinfektion durch UV sichergestellt werden, während eine Entfernung der Spurenstoffe durch die mit Aktivkohle angereicherten Bodenfilter erfolgt. Die Desinfektion des Abwassers in Braunschweig erfolgt an anderer Stelle, weshalb auch hier die Spurenstoffentfernung im Fokus steht und eine kürzere Passage durch die Bodenfilter als ausreichend angesehen wird.

4.1 Übertragbarkeit auf Kläranlagen der Größenklasse 2 und 3

Die Umsetzbarkeit von Horizontalbodenfiltern als weitergehende Behandlungsstufe hinsichtlich Spurenschadstoffen wird für Kläranlagen der Größenklasse 2 und 3 im Rahmen einer Modellstudie

betrachtet. Dabei werden verschiedene Parameter wie beispielsweise Wirtschaftlichkeit, Flächenbedarf, Reinigungsleistung, Betriebsmittel- und Personalbedarf sowie Regelbarkeit für eine Modell-Kläranlage im Hinblick auf die Integration eines Bodenfilters als weitergehende Reinigungsstufe ermittelt und näher analysiert.

In dem Abschlussberichts „Belastung der Fließgewässer Niedersachsens mit Human-Pharmaka“ (2016) im Auftrag des NLWKN weisen 30 % der Fließgewässer im Untersuchungszeitraum 2004 - 2014 eine Belastung in unterschiedlichem Maße auf, wobei rund die Hälfte davon sehr gering bzw. gering belastet ist. Insbesondere im Raum Hannover-Braunschweig wurden hingegen erhöhte bzw. hohe abwasserbürtige Belastung der Fließgewässer ermittelt. Niedersachsenweit wurden für den Untersuchungszeitraum erhöhte bzw. hohe Belastungen an insgesamt 6 % aller betrachteten Fließgewässerslänge ermittelt.

4.1.1 Kenndaten Modell-Kläranlage

Zur Auswahl der Kenndaten für die Modell-Kläranlage wird sich an den bereits erwähnten NLWKN-Berichten orientiert. In Abbildung 29 ist zu erkennen, dass der Großteil der kommunalen Kläranlagen, welche nach der NLWKN-Studie niedersachsenweit die höchsten Abwasserbelastungen für die jeweiligen Vorflutern besitzen, eine Auslastung zwischen 10.000 und 20.000 EW aufweist. Die zehn aufgeführten Kläranlagen bewegen sich in diesem Auslastungsbereich. Sollen Kläranlagen dieser Größenklasse mit einer zusätzlichen Reinigungsstufe ausgestattet werden, bedarf es eines robusten und wenig störanfälligen Verfahrens, das insgesamt wenig Betriebsaufwand erzeugt. Vor dem Hintergrund weiter steigender Reinigungsanforderungen auf europäischer Ebene und zunehmenden Fachkräftemangel sollten zusätzliche Reinigungsstufen für kommunale Kläranlagen unter 20.000 EW gewährleisten, dass einerseits die erhöhten Reinigungsanforderungen sicher eingehalten werden und andererseits die Kapazitäten des Betriebspersonals geschont werden. Im Rahmen des Arbeitspakets 1 konnte nachgewiesen werden, dass Horizontal-Bodenfilter, welche mit Aktivkohle angereichert sind, zusätzliche Reinigungsanforderungen hinsichtlich ausgewählter Spurenschadstoffe und pathogener Keime einhalten können und zudem geringen Betriebsmittelaufwand erzeugen.

Vor diesem Hintergrund soll im Folgenden eine Horizontal-Bodenfilteranlage in Hinblick auf eine Nachbehandlung des Kläranlagenablaufs mit dem Ziel der erweiterten Elimination bzw. Rückhalt von Spurenschadstoffen und pathogenen Keimen für eine kommunalen Kläranlage mit einer Auslastung von 15.000 EW konzipiert werden.

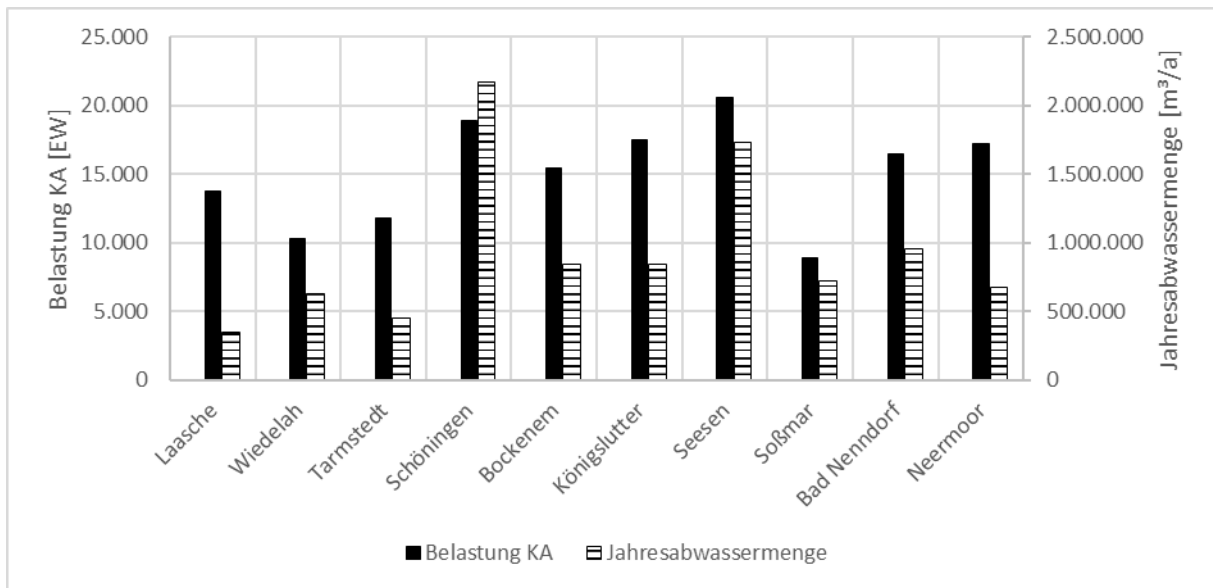


Abbildung 29: EW-Belastung und Jahresabwassermenge der niedersächsischen Kläranlagen mit höchster Abwasserbelastung der jeweiligen Vorfluter [NLWKN, 2021; NLWKN, 2016]

Tabelle 7 listet die Kenndaten der Referenz-Kläranlage zur Konzipierung der Horizontal-Bodenfilteranlage auf.

Tabelle 7: Kenndaten Referenz-Kläranlage für Dimensionierung Horizontal-Bodenfilteranlage

Auslastung [EW]	15.000
Verfahren biologische Abwasserreinigung	Belebtschlammverfahren
Personalaufwand KA-Betrieb [h]	4.000
Jahresabwassermenge [m³/a]	850.000
Schmutzwasseranteil [%]	95
Std. Max. Trockenwetterabfluss [m³/h]	221
CSB KA-Ablauf [mg/l]	20,5
Nges KA-Ablauf [mg/l]	4,0
Pges KA-Ablauf [mg/l]	0,5

4.1.2 Technische Komponenten Horizontal-Bodenfilter-Anlage zur Spurenstoffelimination
 Aus dem Betrieb der Horizontal-Bodenfilter-Pilotanlage auf dem Klärwerk Braunschweig konnten wertvolle Erkenntnisse zur Dimensionierung und technischen Gestaltung einer großtechnischen Anlage gewonnen werden. Im Folgenden sollen die Merkmale der einzelnen technischen Komponenten der großtechnischen Anlage basierend auf den Erkenntnissen des Pilotanlagenbetriebs erläutert werden.

a. Zulaufbauwerk und Verteilung

Nach Durchlauf der Nachklärbecken fließt der biologisch gereinigte Abwasserstrom der Horizontal-Bodenfilteranlage zu. Die Beschickung der einzelnen Horizontalfilter-Segmente kann kontinuierlich in Relation zum Abwasseranfall auf der Kläranlage erfolgen, sofern die Dimensionierung der Anströmfläche der Horizontalfilter ausgehend vom max. Trockenwetterabfluss der Kläranlage erfolgt. Während des Pilotanlagenbetriebs hat sich eine unterirdische Verteilung des Abwassers im Anströmbereich der Horizontalfilter bewährt. Der Anströmbereich der Horizontalfilter sollte aus

grobkörnigen Kiesmaterial bestehen (z.B. 16-32 mm), um eine rasche gleichmäßige Verteilung des Abwassers auf die Filter-Anströmfläche sicherzustellen.

Während des Pilotanlagenbetriebs trat bisweilen Schlammabtrieb aus den vorgeschaltete Nachklärbecken auf, was zu einer verringerten hydraulischen Durchlässigkeit der Filteranlage führte. In Hinblick auf möglichen Schlammabtrieb aus den Nachklärbecken sollte eine Bypass-Leitung zur Zulaufleitung zur Horizontalfilteranlage vorgesehen werden. Um die hydraulische Durchlässigkeit der Filterkörper durchgängig zu gewährleisten ist eine Bypass-Leitung notwendig, sodass kein Schwimmschlamm die Filterkörper verstopft.

b. Aktivkohleeinheit

Wie im Kapitel 3 dargestellt kommt der Aktivkohleeinheit, welche im Horizontalfilter integriert ist, eine entscheidende Bedeutung in Hinblick auf eine stabile und ausreichend hohe Spurenstoffelimination zu. Im Pilotanlagenbetrieb konnte nachgewiesen werden, dass Horizontalfilterkörper ausschließlich aus Filtersand bestehend eine geringere Reinigungsleistung hinsichtlich Spurenschadstoffe aufweisen. Ferner konnte beobachtet werden, dass bereits nach der ersten Aktivkohleeinheit (Fließstrecke: 1,25 m) eine weitestgehende Adsorption der Spurenschadstoffe erfolgte. Der zweiten und dritten Aktivkohleeinheit innerhalb des Pilotfilters kam vielmehr eine Sicherungsfunktion zu, sollte die erste Aktivkohleeinheit zu einem späteren Zeitpunkt voll beladen sein und es zu Durchbrüchen bestimmter Spurenschadstoffe kommen.

Auf die zweite und dritte Aktivkohleeinheit kann somit bei großtechnischen Anlagen insofern verzichtet werden, wenn gewährleistet wird, dass die aktuelle Beladungskapazität der verbauten Aktivkohle regelmäßig überwacht wird und bei Vollbeladung ausgetauscht wird. Durch die Bepflanzung der Bodenfilter wird ein Abbau der Spurenschadstoffe innerhalb der Bodenfilter erzielt und damit der Vollbeladung der Aktivkohle entgegengewirkt um eine längere Laufzeit zu ermöglichen. Um Arbeitsaufwand und Betriebskosten möglichst gering zu halten, sollte die Aktivkohleeinheit dahingehend gestaltet werden, dass ein Austausch der Aktivkohle ohne weitere Zerstörung des restlichen Filters möglich ist. Es wäre beispielsweise der Einsatz von durchströmbare Filterpatronen oder Filterkästen bestehend aus einem Aktivkohle-Sandgemisch (1:1 Volumenverhältnis) vorstellbar, welche aus dem Bodenfilter herausgezogen werden können. In Hinblick auf die Standzeit der Aktivkohle im Bodenfilter konnte im Arbeitspaket 1 keine Tendenz ermittelt werden. Nach rund einem Jahr Pilotanlagenbetrieb konnte noch kein Rückgang der Reinigungsleistung beobachtet werden. Hinsichtlich der Spezifikation der Aktivkohle hat sich die im Pilotbetrieb eingesetzte Aktivkohle bewährt; die Spezifikationen sind in der Tabelle 1 dargestellt.

c. Ablauf

Im Rahmen des Pilotbetriebs wurde das gereinigte Abwasser nach Durchlauf des Filterkörpers an der Sohle der Pilotanlage dräniert und über eine Gefälleleitung abgeführt. Der Ablauf der Bodenfilteranlage ist frostsicher zu gestalten, da nach Durchlauf des Filterkörpers insbesondere während Frostperioden das Risiko eines Zufrierens der Ablaufleitung besteht. Das Risiko eines Rückstaus in den Bodenfilter wird durch die frostsichere Verlegung des Ablaufanschlusses reduziert. Ferner empfiehlt es sich, eine Durchflussmessung am Ablauf nach der Horizontalfilteranlage vorzusehen, um Wasserverluste durch Evapotranspiration festzuhalten, die zu einer Aufkonzentrierung an Schadstoffen im Ablauf führen könnte.

d. Flächenbedarf und hydraulische Parameter

Die einzelnen Bodenfilter der Pilotanlage wurden für einen Durchfluss von 110 l/h bemessen und wiesen dabei eine Anströmfläche von rund 0,6 m² auf. Die Länge der Pilot-Bodenfilter betrug inklusive

Zulauf- und Ablaufbereich sowie drei Aktivkohleinheiten insgesamt 6,0 m. Der Filterkörper bestand aus gewaschenen Mittelsand mit einer Körnung von 0-2 mm. Die Grundfläche der Pilot-Bodenfilter betrug jeweils rund 6,0 m². Wie bereits dargestellt war bereits nach Passage der ersten Aktivkohleinheit eine weitestgehende Adsorption sämtlicher Spurenschadstoffe erreicht. Um den Flächenbedarf der Horizontal-Bodenfilter in Hinblick auf eine großtechnische Umsetzung weiter zu reduzieren, bei gleichzeitiger sicherer Spurenschadstoffelimination, soll die Länge der Bodenfilter verringert werden und die Länge der einzigen Aktivkohleinheit verlängert werden. Abbildung 30 zeigt den Längsschnitt eines solchen Filterkörpers für den großtechnischen Einsatz.

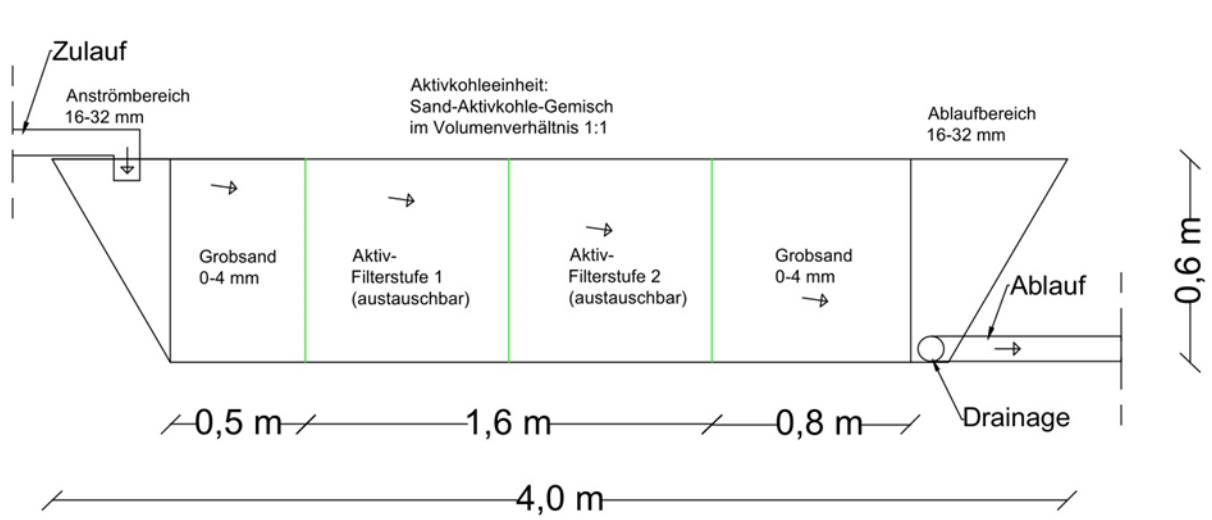


Abbildung 30: Längsschnitt Horizontal-Bodenfiltereinheit entlang Fließstrecke

Im Rahmen des Pilotbetriebs konnte beobachtet werden, dass die hydraulische Leistungsfähigkeit des Filterkörpers innerhalb des Untersuchungszeitraumes abnahm. Die Durchflussleistung von 110 L/h zur Inbetriebnahme sank innerhalb eines Jahres auf 60 L/h. Es wird angenommen, dass dies zu einem geringen Anteil auf die gesteigerte biologische Aktivität im Filterkörper und damit zusammenhängend auf das Aufwachsen eines Biofilms zurückzuführen ist. Ferner wird davon ausgegangen, dass insbesondere Schlammabtrieb aus den Nachklärbecken während des Untersuchungszeitraumes zu einer Kolmation bzw. Verstopfung der Anströmfläche führte. Um eine ausreichende hydraulische Leistungsfähigkeit im Langzeitbetrieb zu gewährleisten soll der Filterkörper zur großtechnischen Umsetzung aus Grobsand (z.B. mit Körnung 0-4 mm oder 0-8 mm) mit einem theoretischen Durchlässigkeitsbeiwert von 10^{-4} bis 10^{-3} m/s bestehen. Unter diesen Voraussetzungen kann mit einer mittleren hydraulischen Durchflussleistung von 110 L/h bei einer Anströmbreite von 1 m kalkuliert werden (siehe Tabelle 8). Es wird davon ausgegangen, dass auch bei einem Filtersand mit der Körnung 0-4 oder 0-8 statt mit der Körnung 0-2 mm die Kontaktzeit mit der Aktivkohle ausreichend lang ist, um eine weitestgehende Adsorption der Spurenschadstoffe an der Aktivkohle zu gewährleisten.

Tabelle 8: Kennwerte Filtereinheit spezifisch

Filtermaterial	Grobsand, 0-4 mm Körnung
Theo. Filterwiderstand Inbetriebnahme [m/s]	10^{-3}
Theo. Filterwiderstand langjähriger Betrieb [m/s]	10^{-4}
Nutzbares Porenvolumen [-]	23
Spez. Einlaufbreite [m]	1,00
Filtertiefe [m]	0,6
Einlaufhöhe [m]	0,6

Zuflussmenge [L/h]	110
Spez. Einlaufquerschnitt [m²]	0,61
Gesamt-Oberfläche spez. Filtereinheit [m²]	4

In Hinblick auf Regenwetter-Zuflüsse bei Mischwasserkanalisation sowie zur redundanten Gestaltung der großtechnischen Horizontalfilter-Anlage wird bezüglich der Flächenbelastung ein Sicherheitsfaktor von 1,5 angesetzt. Grundsätzlich können Horizontal-Bodenfilter kurzzeitig komplett eingestaut bzw. überstaut werden. Gleichzeitig stellt sich die Fragen inwiefern Horizontal-Bodenfilter als eine Art Retentionsbodenfilter zur Mischwasserentlastung vorgesehen werden können. Es ist davon auszugehen, dass es aufgrund der Anschwemmung von abfiltrierbaren Stoffen in den Anströmbereich des Filterkörpers kurzzeitig zu einer Reduktion der hydraulischen Durchlässigkeit der Filterkörper kommt, welche sich jedoch in Entlastungsphasen wiederherstellen könnte.

4.1.3 Dimensionierung Horizontal-Bodenfilter für Referenz-Kläranlage

Basierend auf den Kennwerten aus Tabelle 7 und Tabelle 8 sowie unter Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors von 1,5 ergibt sich ein Flächenbedarf für den Aufbau der Bodenfilter von rund 12.000 m² für die Referenz-Kläranlage von 15.000 EW. Unter Berücksichtigung von Zufahrtsflächen und dem Flächenbedarf für Rohrleitungen ergibt sich für die Bodenfilter-Anlage ein Gesamt-Flächenbedarf von 22.500 m², die sich aus mehreren Filtersegmenten zusammensetzt, wie in Abbildung 31 und Abbildung 32 dargestellt ist.

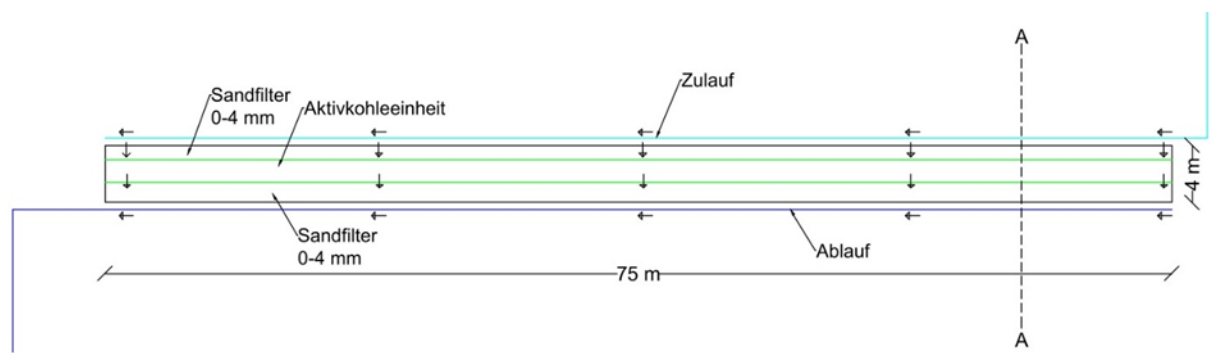


Abbildung 31: Draufsicht einzelnes Horizontal-Bodenfiltersegment mit einer Anströmbreite von 75 m

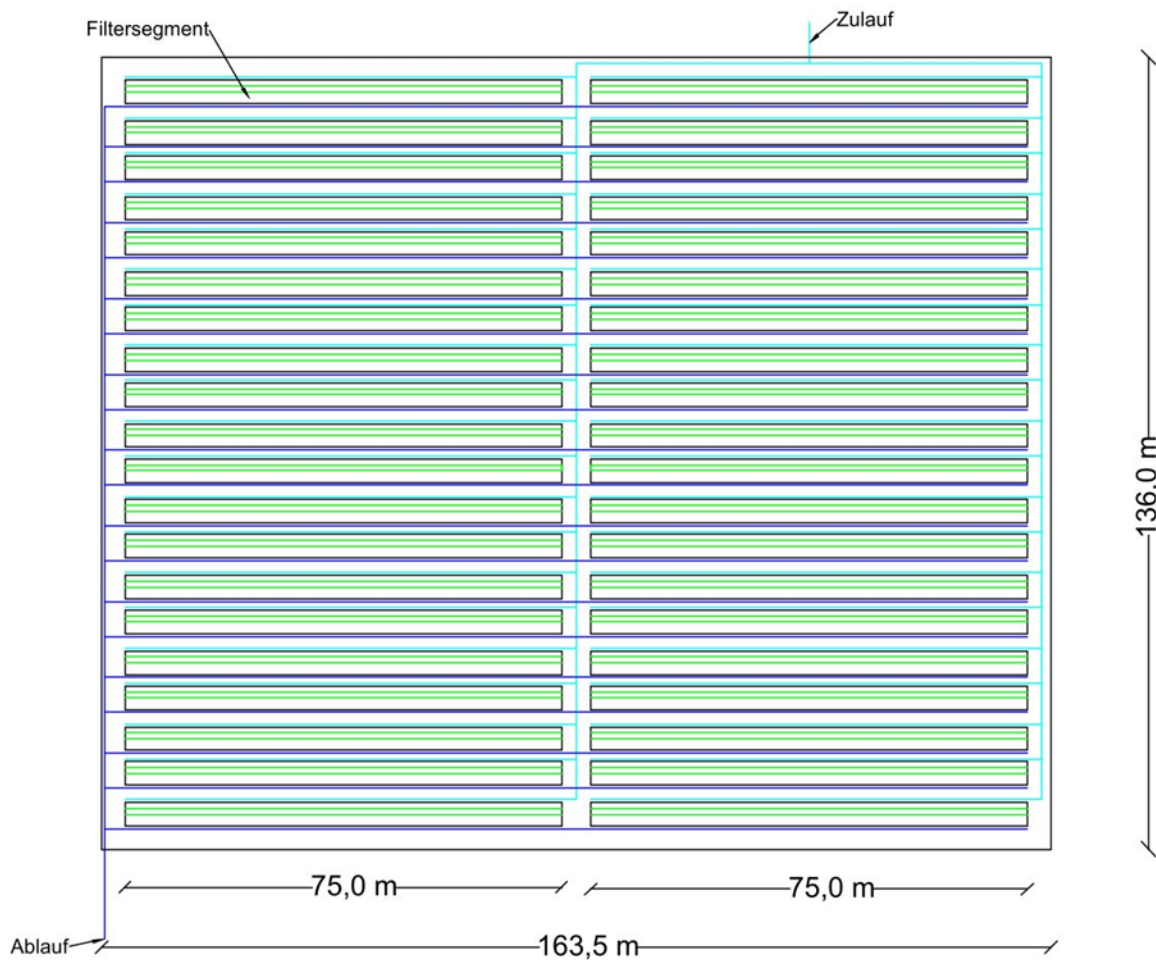


Abbildung 32: Draufsicht Gesamt-Anlage Horizontal-Bodenfilter für 15.000 EW zur Spurenstoffelimination

4.1.4 Kostenschätzung Bau Bodenfilter-Anlage für Referenz-Kläranlage

Im Folgenden bietet Tabelle 9 eine Übersicht zur Kostenstruktur zum Bau der Horizontal-Bodenfilteranlage für die Referenz-Kläranlage von 15.000 EW. Die ermittelten Bau- und Materialkosten basieren auf Schätzungen und aktuellen spezifischen Baupreisen Stand Juni 2023 und sollen einen ungefähren Kostenrahmen darstellen.

Tabelle 9: Exemplarische Kostenschätzung Bau Horizontal-Bodenfilteranlage 15.000 EW

Kostenposition	Spez. Kosten	Massen-ermittlung	Gesamtkosten
1. Flächenankauf		25.000 m ²	275.000 €
a. Bodenrichtwert	10 €/m ²		250.000 €
b. Nebenkosten	10 % pauschal		25.000 €
2. Erdarbeiten			875.000 €
a. Bodenaushub, seitlich lagern	10 €/m ³	8.000 m ³	80.000 €
b. Bodenentsorgung	25€/m ³	4.000 m ³	100.000 €
c. Gräben profilieren	2,50€/m	6.000 m	15.000 €
d. Verlegung PVC-U DN160	10€/m	6.000 m	60.000 €
e. Verlegung Dränrohr DN110	5€/m	3.000 m	15.000 €
f. Verlegung U-Kanal	250 €/m	300 m	75.000 €
g. Einbau Folie	30 €/m ²	15.000 m ²	450.000 €

h. Füllmaterial einbauen	10€/m ³	8.000 m ³	80.000 €
3. Materialkosten			1.285.000 €
a. Abdichtung			
i. Abdichtungsfolie+ Geotextil	20€/m ²	15.000 m ²	300.000 €
ii. Durchdringungsflansch	10€/Stk.	600 Stk.	6.000 €
b. Filtermaterial			
c. Drän-Kies, 16-32 mm	40€/to	1.000 to	40.000 €
d. Filtersand, 0-4 mm	30 €/to	6.100 to	183.000 €
e. Aktivkohle, granuliert	500 €/m ³	1440 m ³	720.000 €
f. Pflanzsetzlinge	1,50€/Setzling	24.000	36.000 €
g. Rohrleitungsmaterial			
i. PVC-U DN160	5€/m	6.000 m	30.000 €
ii. Vollsickerrohr DN110	6€/m	3.000 m	18.000 €
4. ESMR-Ausrüstung			100.000 €
5. Hebeanlage/Pumpstation			400.000 €
		Zwischen- summe	2.983.000 €
6. Planungskosten			298.300 €
	10 % Gesamtkosten pauschal		
SUMME			3.281.300 €

Bei Gesamtkosten für den Bau von rund 3,3 Mio. Euro beliefen sich die EW-spezifischen Kosten auf rund 219 Euro/EW.

4.2 Übertragbarkeit auf das Braunschweiger Rieselfeld

Die Möglichkeit der Betriebsoptimierung der Braunschweiger Rieselfelder zur gezielten Spurenstoffelimination durch Integration von mit Aktivkohle angereicherten Bodenfiltern wird im Folgenden diskutiert. Das Braunschweiger Rieselfeld in seinem aktuellen Zustand zeigt, wie im Kapitel 3.2.2 beschrieben, dass es auch ohne Umbaumaßnahmen schon eine gute Reinigungsleistung aufweist. Um diese zu intensivieren und steuerbarer zu gestalten, wird eine gezielte Anreicherung mit Aktivkohle gemäß Bodenfilter 2, siehe Kapitel 3.2.4, betrachtet. Im Folgenden wird zunächst das Braunschweiger Rieselfeld kurz beschrieben und anschließend auf die Dimensionierung und Platzierung der Filtersegmente eingegangen.

4.2.1 Braunschweiger Rieselfeld

Die technische Abwasserbehandlung auf dem Klärwerk Steinhof ist mit dem Ablauf des Abwassers aus den Nachklärbecken grundsätzlich beendet. Oft werden in einem weiteren Behandlungsschritt (z. B. eine Filtration) partikulärer Reststoffe entfernt oder der Kläranlagenablauf wird mit Hilfe von Speichern vergleichmäßig bzw. erfährt eine weitere Nachbehandlung. Durch die historische Entstehungsgeschichte bedingt, erfolgt ein solcher Schritt auf dem Klärwerk Steinhof durch natürliche Vorgänge bei der Verregnung sowie in den Rieselfeldern.

Die konventionelle Abgabe an das Rieselfeld erfolgt über das Rieselfeldpumpwerk, das das gereinigte Abwasser in ein weit verzweigtes Druckleitungsnetz mit 26 Abgabestellen geleitet. Die weitere gezielte

Verteilung folgt über offene Verteilerbauwerke, Rinnen und Steckschieber zu den Rieselflächen. Das so auf die Rieselflächen aufgebraute Klarwasser versickert in den bodennahen Schichten und gelangt über Drainagen in die zahlreichen Entwässerungsgräben, die das gesamte Rieselfeld durchziehen. Schließlich wird es durch den Aue-Oker-Kanal direkt zur Oker abgeleitet, wenn es nicht mit dem Pumpwerk Aue-Oker-Kanal zur Wasserwiederverwendung rückgeführt wird.

Die Rieselfläche beträgt rd. 150 ha und ist in Abbildung 33: Braunschweiger Rieselfeld Abbildung 33 dargestellt. Bei der Passage des Klarwassers durch den Boden erfolgt eine deutliche Nachreinigung durch Pflanzen und im Boden vorhandene Mikroorganismen.

Darüber hinaus stehen auf einer Fläche von weiteren rd. 70 ha ein Teichkaskadensystem (Bioteiche und Mäandersystem) und das Speichersystem Flutmulde/Rieselfeldspeicher mit einem Gesamtvolumen von etwa 250.000 m³ zur Verfügung. Im 1991 eingeführten Mäandersystem erfährt das Klarwasser eine biologische Nachreinigung indem es eine Horizontalpassage in einem mehreren Kilometern langen flussähnlichen Verlauf durchströmt. Dieses System ist in der Lage, eine gesamte Tageswassermenge aus der Kläranlage aufzunehmen und zwischen zu speichern, ohne Ableitungen in Richtung Abwasserverband oder Oker vornehmen zu müssen. Dadurch ist bei einer hydraulischen Überlastung der Nachklärung z. B. durch Starkregenereignissen dafür gesorgt, dass abgetriebener Schlamm weder in die Rieselfläche noch in zur Verregnung gelangen kann.

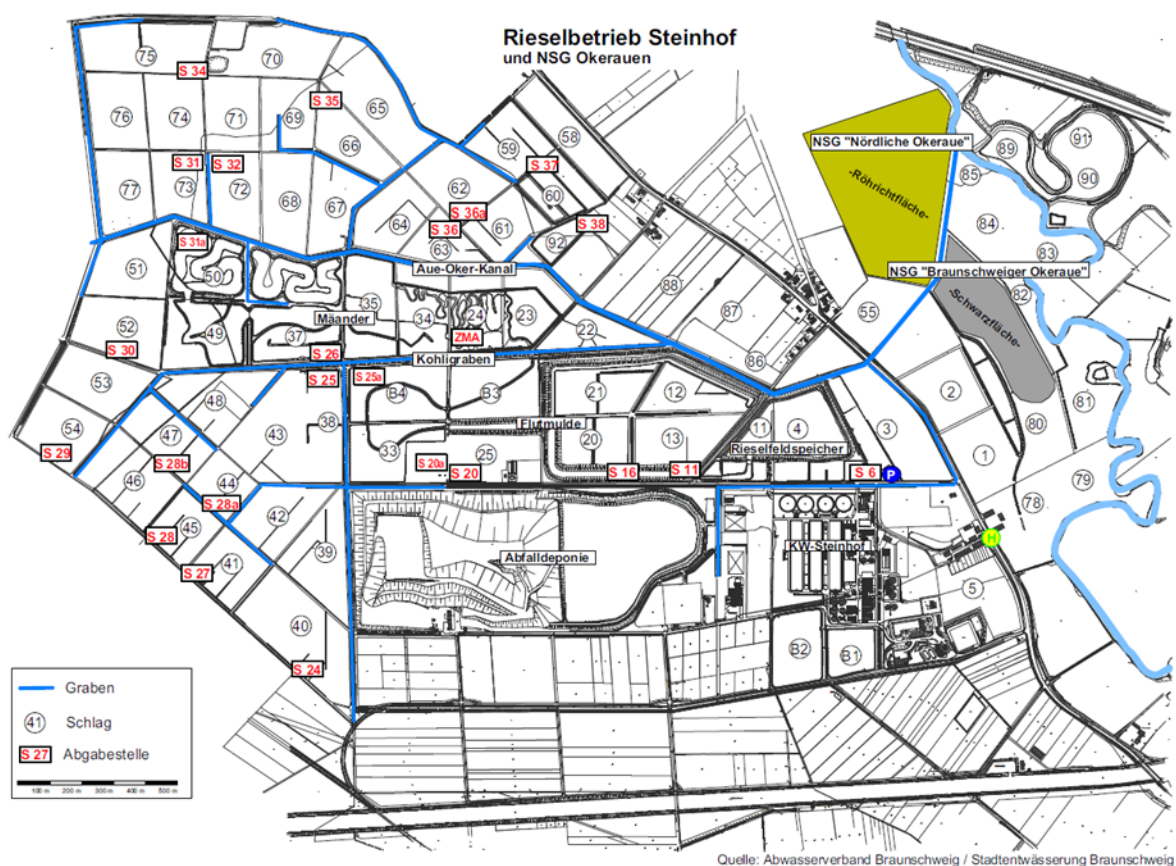


Abbildung 33: Braunschweiger Rieselfeld

Für die Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse auf die Rieselfeldsituation wurden die Zulaufmengen des Jahres 2022 als Referenz genommen. In der nachfolgenden Tabelle sind die Zulaufmengen zusammengestellt.

Tabelle 10: Zulaufmengen zum Rieselbetrieb im Jahr 2022

Monat	Zulauf [m ³]
Januar	1.530.900
Februar	1.349.400
März	969.100
April	610.400
Mai	163.000
Juni	100.100
Juli	90.500
August	72.600
September	224.200
Oktober	462.000
November	493.800
Dezember	1.447.000
SUMME	7.513.000

4.2.2 Bodenfilter im Braunschweiger Rieselfeld

Die im Laufe des Projektes gewonnenen Ergebnisse zeigen deutlich, dass die bepflanzten horizontal durchströmten Bodenfilter eine sehr gute Reinigungsleistung bezüglich der untersuchten Spurenstoffe aufweisen. Jedoch gehen die Filter mit einem gewissen Platzbedarf einher, der für einige Kläranlagen ein Hindernis darstellen könnte. Im Folgenden wird auf den Aufbau von horizontal durchströmten Filtern und den Platzbedarf im Braunschweiger Rieselfeld eingegangen.

Abweichend zur Abbildung 31 wird für das Rieselfeld ein Aufbau der Bodenfilter wie in Abbildung 34 dargestellt. Dies liegt darin begründet, dass der Austausch des Filtermaterials durch Ausheben des Filters mit einem Bagger als praktikabelste Lösung angesehen wird.

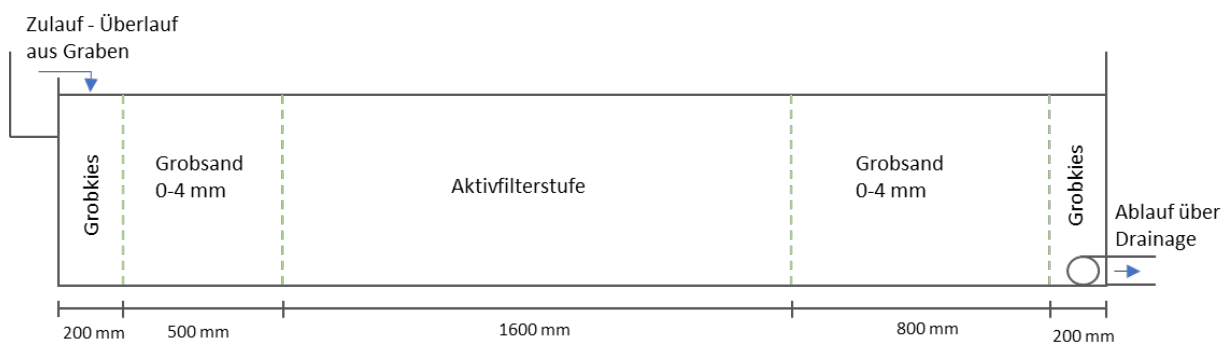


Abbildung 34: Aufbau der Bodenfilter für das Rieselfeld

Alle Filterbänke sollen einzeln absperrbar sein, so dass diese nach Bedarf mit Wasser versorgt werden. Die Pflanzen dürfen nicht vertrocknen, damit die Funktionalität des Filters erhalten bleibt. Weiterhin muss die anfallende Wassermenge auf den Filterbänken verteilt werden können und einzelne Filterbänke bei Bedarf erneuert werden.

Der Flächenbedarf für die Errichtung von horizontal durchströmten Bodenfiltern hängt von der zu behandelnden Wassermenge ab. Die maximale Tagesmenge im Ablauf des Klärwerks war im Jahr 2022 bei 87.500 m³. Für die Errichtung von horizontal durchströmten Filterbänken wird inklusive Zulaufgräben und Zufahrtswegen eine Fläche von ca. 165.000 m² benötigt. Es gibt viele Möglichkeiten

die Filterbänke im Rieselfeld zu errichten, so dass diese von den verschiedenen Abgabestellen mit Wasser versorgt werden, welches dann in die Gräben wieder abfließt. Aus den Gräben kann das Wasser dann entweder in die Oker fließen oder mithilfe des Pumpwerks-Aue-Oker-Kanal zur Bewässerung der Felder genutzt werden.

Anstelle der Behandlung des gesamten Ablaufs des Klärwerks ist besonders eine Teilstrombehandlung, z.B. des Direktabschlags, eine interessante Option. Dabei würde sich die benötigte Fläche für den Bau nochmals reduzieren. Da sich gezeigt hat, dass auch eine kurze Passage durch den Filter ausreichend ist, wären auch vertikal durchströmte Filter eine alternative Option.

4.3 Zusammenfassung Arbeitspaket 2

Wie in Kapitel 3 und Kapitel 4 dargestellt wurde, stellen Horizontal-Bodenfilteranlagen, welche mit Aktivkohle angereichert sind, eine Option zur erweiterten Spurenstoffelimination nach dem Kläranlagenablauf dar. Insbesondere Kläranlagen der Größenklasse 2 und 3, die in abflussschwache Vorfluter einleiten, könnten mit dieser zusätzlichen Reinigungsstufe ausgerüstet werden. Es ist davon auszugehen, dass der Abwasseranteil der niedersächsischen Kläranlagen in den jeweiligen Vorflutern Klimawandel bedingt weiter ansteigen wird. Wie in Kapitel 4.1 gezeigt wurde, sind davon vermehrt Kläranlagen der Größenklasse 2 und 3 betroffen, welche in bereits jetzt abflussschwache Vorfluter einleiten. Horizontal-Bodenfilteranlagen als naturnahe zusätzliche Reinigungsstufe weisen gegenüber technischen Verfahren wie Ozonbehandlung oder Aktivkohlefiltration einen reduzierten Betriebsaufwand dar. Für eine Referenz-Kläranlage von 15.000 EW wurden überschlägig spezifischen Investitionskosten von 219 Euro/EW ermittelt, sowie ein Gesamtflächenbedarf von rund 2 ha.

Der erhöhte Flächenbedarf (rund 1,5 m²/EW) gegenüber technischen Verfahren hingegen lässt das naturnahe Verfahren insbesondere für Kläranlagen der Größenklasse 4 und 5 weniger attraktiv erscheinen. In Hinblick auf das Klärwerk Braunschweig mit einer Auslastung von 350.000 EW könnte jedoch das bereits vorhandene Rieselfeld genutzt werden, um eine naturnahe zusätzliche Reinigungsstufe zu integrieren. Das Braunschweiger Rieselfeld bietet genügend Platz und Möglichkeiten bepflanzte Bodenfilter zu errichten. Die konkrete Dimensionierung und technische Umsetzung ist dabei von der geplanten Sanierung der Belebungsstufe abhängig.

5 Fazit und Ausblick

Im Laufe des Projektes konnte gezeigt werden, dass das Rieselfeld in seinem IST-Zustand schon einen wesentlichen Beitrag leistet, Spurenschadstoffe im gereinigten Abwasser zu reduzieren. Als Fazit aus den Arbeitspaketen kann festgehalten werden, dass eine Kombination aus Sand und Aktivkohle auch ohne eine vorgeschaltete Ozonanlage sehr gute Ergebnisse liefert, d.h. die Errichtung von bepflanzten Bodenfiltern als „Stand-alone-Lösung“ ist eine sehr gute Wahl um eine effiziente Spurenstoffentfernung zu erzielen. Die Reduzierung von Mikroorganismen erfolgt ebenfalls bereits im aktuellen Rieselfeld und entsprechend weitergehend beim Durchfließen einer Kombination aus Sand und Aktivkohle. Je nach vorgesehener Güteklasse gemäß EU-Verordnung zur Wasserwiederverwendung empfiehlt sich zur sicheren Einhaltung der entsprechenden Grenzwerte die Kombination mit einer Desinfektion, wie z.B. UV-Strahlung oder Membrantechnologien.

Die in Kapitel 1 aufgeführten Werte aus der Literatur von einer Eliminationsleistung > 90 % im Median konnten während der Projektlaufzeit erzielt werden und somit auch die im Soil4pur-Projektantrag selbst gesetzte Zielvorgabe von > 80 %. Die Übertragbarkeit auf Kläranlagen der Größenklasse 2 und 3 sowie auf das Rieselfeld gehen mit einem großen Flächenbedarf einher. Diese Fläche ist in Braunschweig in den Rieselfeldern vorhanden, so dass aufgrund der positiven Ergebnisse dieses Projektes bepflanzte Bodenfilter eine Option sind, die weiterverfolgt werden wird. Dies könnte in Form einer Teilstrombehandlung im großtechnischen Maßstab sein. Ein bislang noch nicht ausreichend

betrachteter Punkt ist die Langzeitwirkung des Horizontalfilters. Um hier zu weiteren Erkenntnissen zu gelangen, soll die Anlage nach dem offiziellen Ende des Soil4pur Projektes aus Eigenmitteln und mit einem geringeren Analytik-Umfang weiter betrieben werden.

6 Literaturverzeichnis

Appleman *et al.*, 2014: Appleman, Timothy & Higgins, Christopher & Quinones, Oscar & Vanderford, Brett & Kolstad, Chad & Holady, Janie & Dickenson, Eric. (2013). Treatment of poly- and perfluoroalkyl substances in U.S. full-scale water treatment systems. *Water research*. 51.

Bayrisches Landesamt für Umwelt, 2002: Bayrisches Landesamt für Umwelt (2002), Merkblatt Nr 3.8/5: Untersuchung von Bodenproben und Eluatn bei Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen für die Wirkungspfade Boden - Mensch und Boden – Gewässer, Stand 21. April 2017, S. 21.

Brunhoferova *et al.*, 2019: Brunhoferova, Hana & Venditti, Silvia & Hansen, Joachim. (2019). Impact of operation mode for biochar and zeolite-based planted vertical flow wetlands: how to enhance the removal of 27 micropollutants in medium-sized WWTP. *Book of abstracts Micropol 2019*.

Brunsch *et al.*, 2018: Brunsch, Andrea & Beyerle, Luk & Knorz, Katharina & Brepols, Christoph & Dahmen, Heinrich & Christoffels, Ekkehard & Schäfer, Heinrich. (2018). Retention soil filter as post-treatment step to remove micropollutants from sewage treatment plant effluent. *Science of the Total Environment* 637–638, pp 1098–1107.

Carranza *et al.*, 2014: Carranza-Diaz, Otoniel & Schultze-Nobre, Luciana & Moeder, Monika & Nivala, Jaime & Kuschik, Peter & Köser, Heinz. (2014). Removal of selected organic micropollutants in planted and unplanted pilot-scale horizontal flow constructed wetlands under conditions of high organic load. *Ecological Engineering*.

NLWKN, 2016: Schlussbericht (2016). Belastung der Fließgewässer Niedersachsens mit Human-Pharmaka

NLWKN, 2021: NLWKN, Lagebericht (2021). Kommunale Kläranlagen Nds.

UBA, 2015: Umweltbundesamt. (2015). Organische Mikroverunreinigungen in Gewässern - Vierte Reinigungsstufe für weniger Einträge. UBA-Positionspapier. Dessau-Roßlau.

Zhang *et al.*, 2021: Zhang, Dongqing & Li, Xia & Wang, Mo & Xie, Wenyu. (2021). Occurrence and distribution of poly-and perfluoroalkyl substances (PFASs) in a surface flow constructed wetland. *Ecological Engineering*, Volume 169, 2021, 106291, ISSN 0925-8574.

7 Anhang

Im Anhang sind einige Abbildungen aus Kapitel 3 mit einer anderen Skalierung aufgegriffen, um alle Ergebnisse abbilden zu können.

Abbildung 5

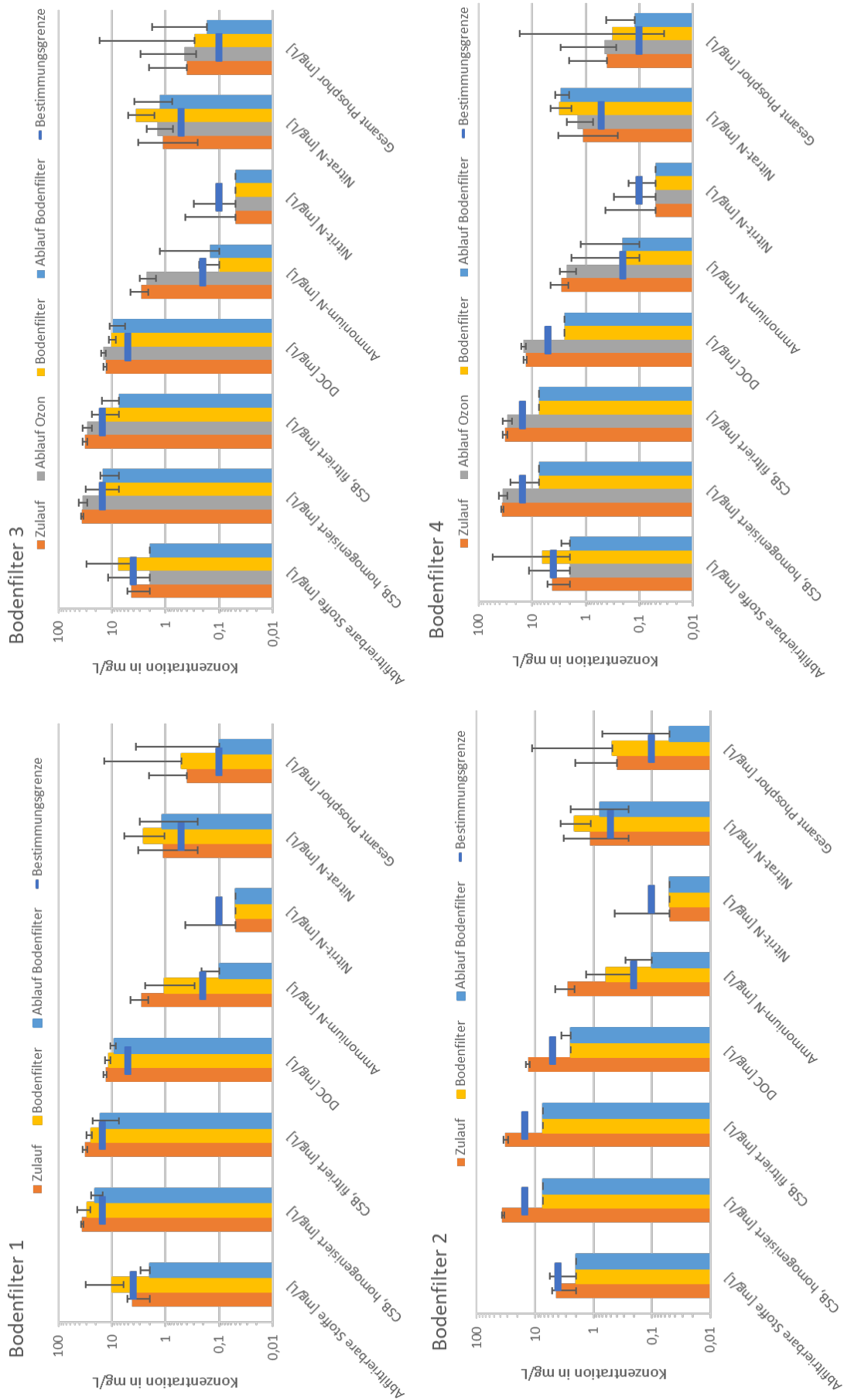


Abbildung 9

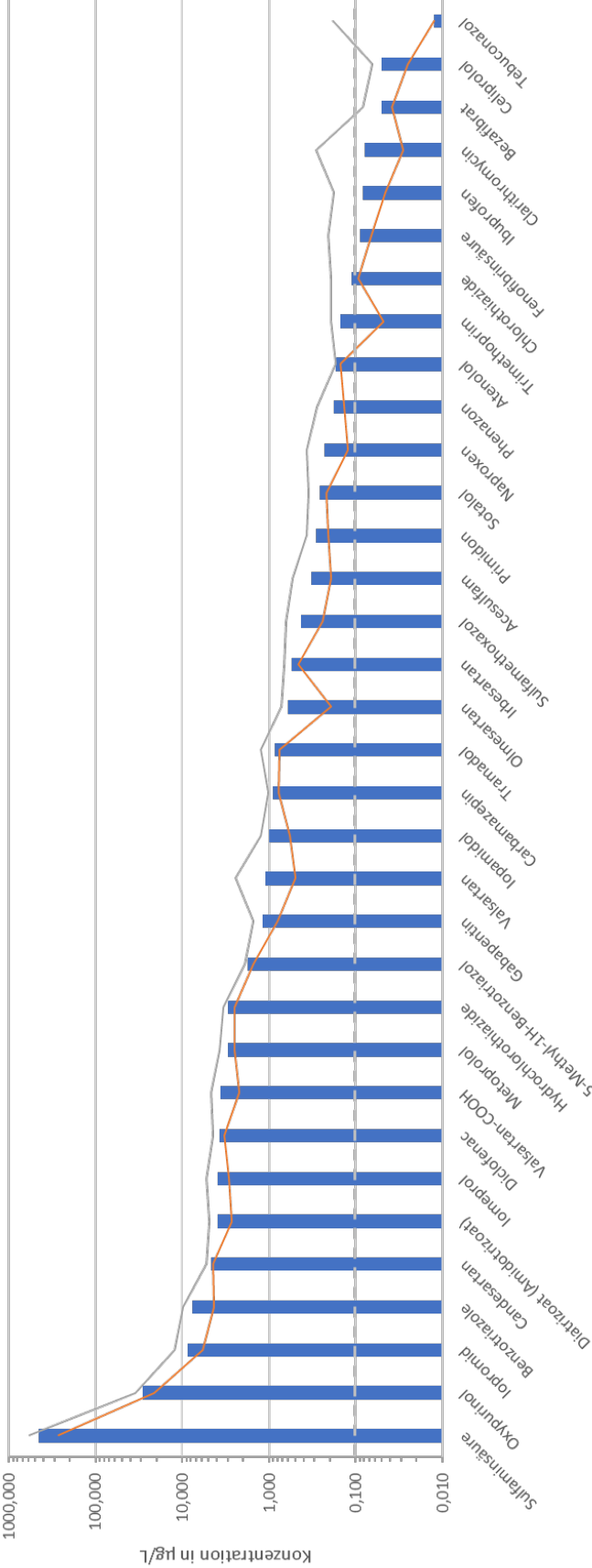


Abbildung 12

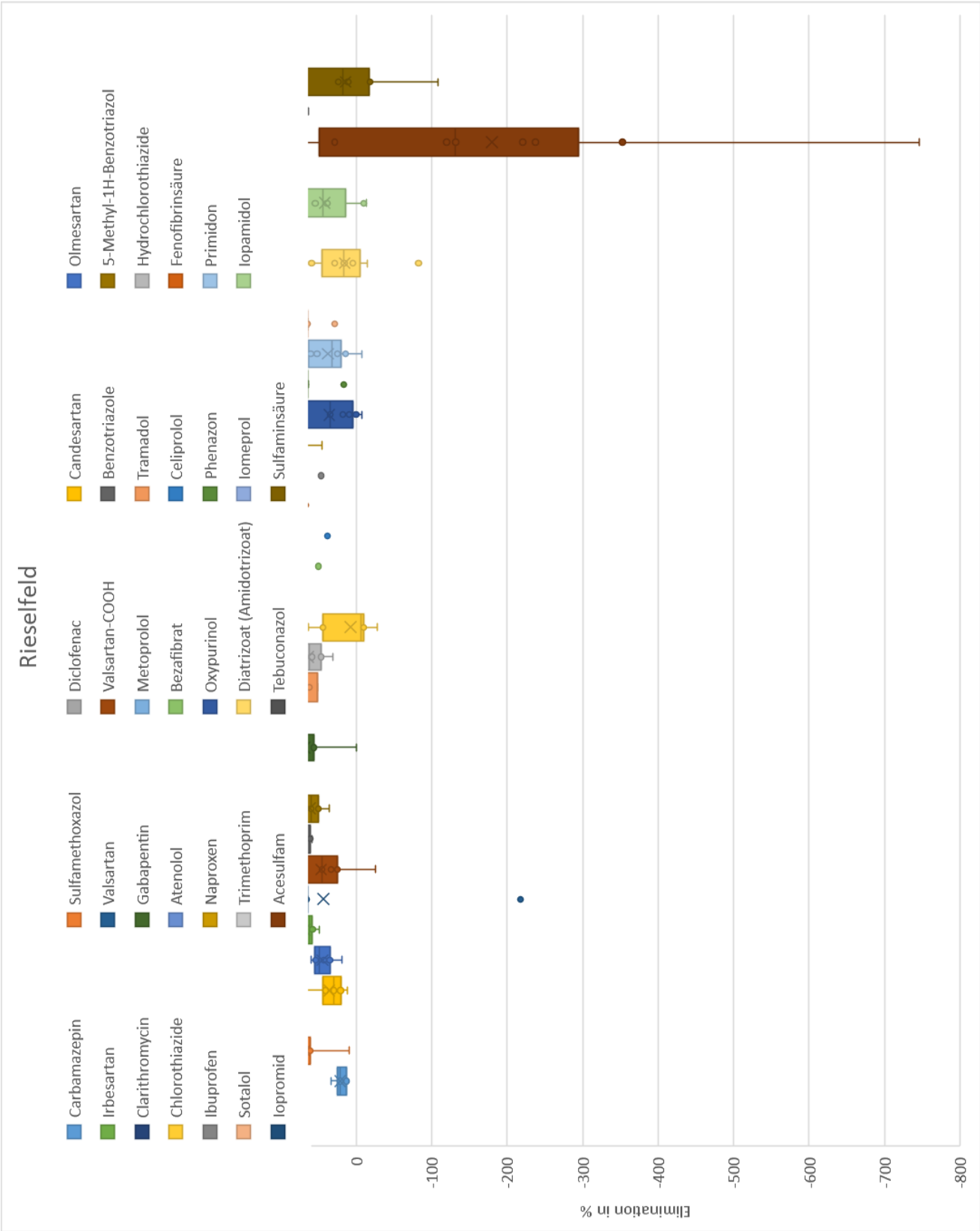


Abbildung 14

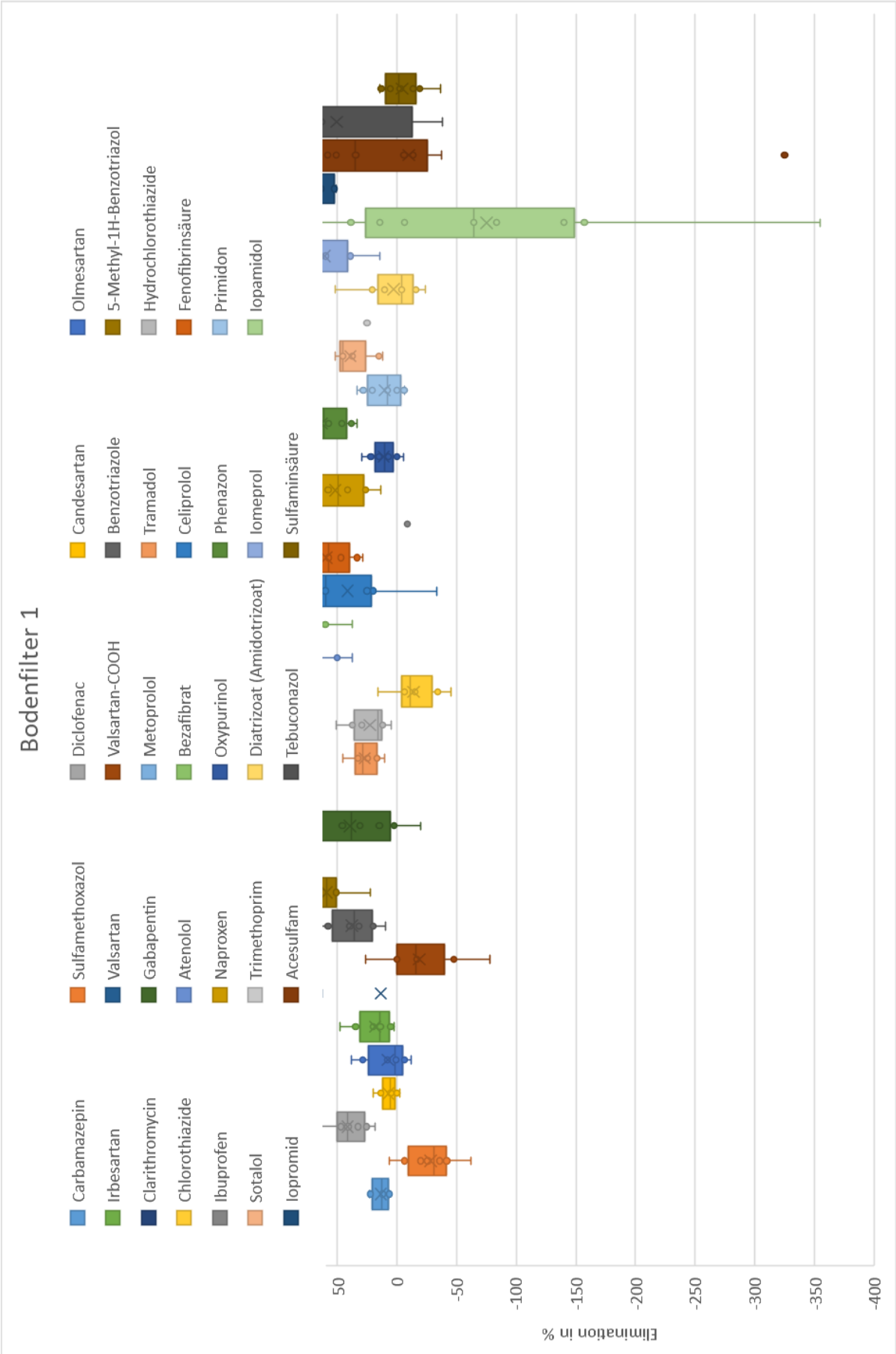


Abbildung 18

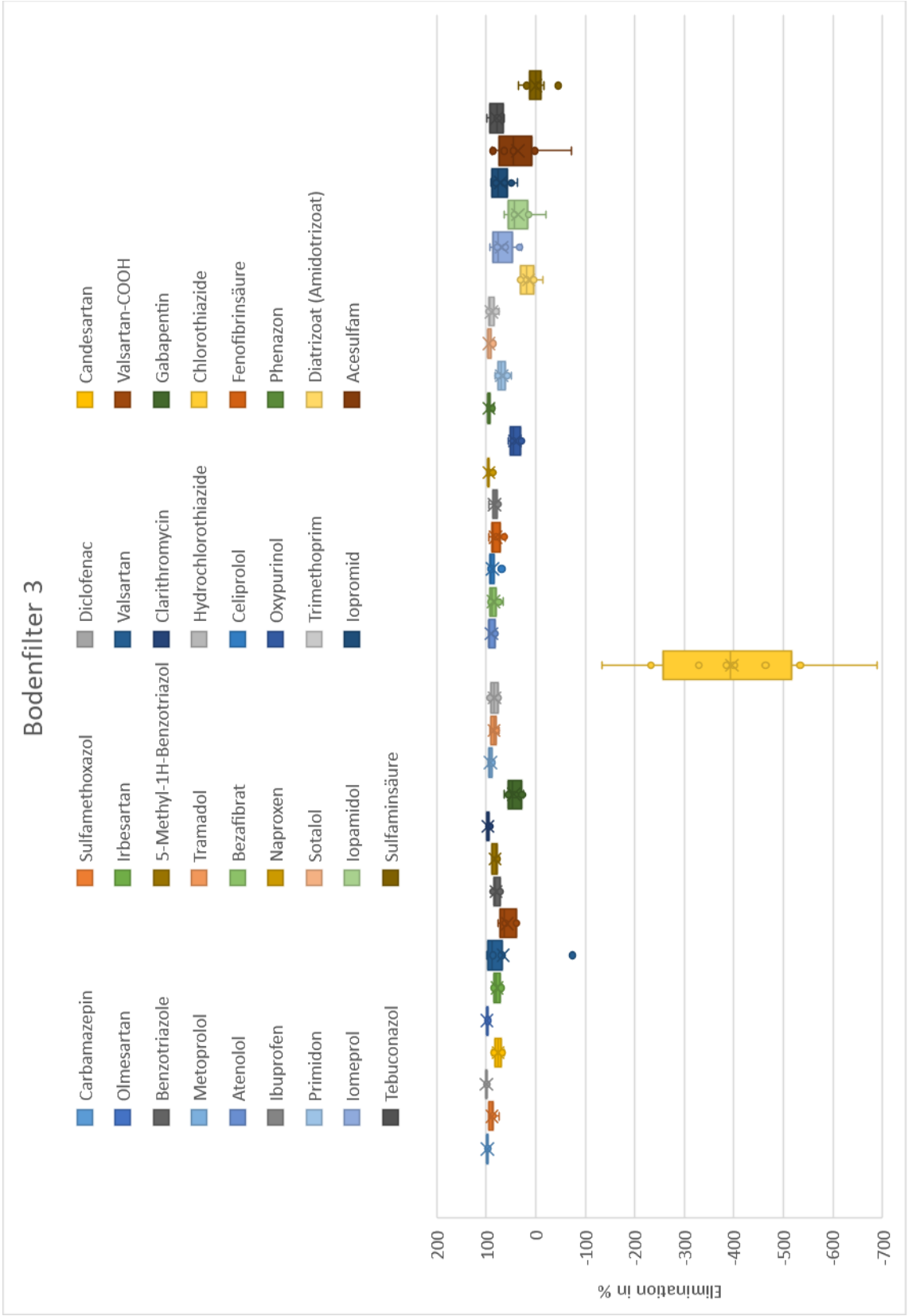


Abbildung 20

