

Additive Reinigungsstufen für die Elimination von Mikroschadstoffen

Handlungsanleitung



Interreg-Programm Großregion

Das Projekt CoMinGreat ist Teil des 5. Projektaufrufs für das Interreg-Programm Großregion (2014-2020).

Seit über 30 Jahren unterstützt das Interreg-Programm Großregion die grenzüberschreitende Zusammenarbeit zwischen lokalen und regionalen Partnern in der Großregion.

Umgesetzt wird es von 11 Programmpartnern aus verschiedenen Regionen Belgiens, Luxemburgs, Deutschlands und Frankreichs.

Das Projekt wird zu 60 % vom Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) und durch Beteiligung lokaler Akteure finanziert.



Lokale Kofinanzierer



Projekt CoMinGreat

Konzeption einer Mikroschadstoff-Plattform für die Großregion

PARTNER

Entsorgungsverband Saar (EVS, Deutschland),
Belgisches Zentrum für Wasserstudien
und -dokumentation) (CEBEDEAU, Belgien),
Technische Universität Kaiserslautern (Deutschland),
Universität Luxemburg (Luxemburg),
Nationales Zentrum für wissenschaftliche Forschung
(Centre national de recherche scientifique, Frankreich)
und HYDREOS (Frankreich)



Technischer Leitfaden für die Elimination von Mikroschadstoffen

INHALTSÜBERSICHT

Projekt CoMinGreat	8
Mikroschadstoffe	10
Auswahl der Mikroschadstoffe	14
Demonstrationsstandort & Versuchsdurchführung	
Demonstrationsstandort	18
Versuchsdurchführung	22
Probenaufbereitung	24
Datenauswertung	25
Betriebsergebnisse der Demonstrationsanlage	
Granulierte Aktivkohle	29
Ozon und granulierte Aktivkohle	34
Bepflanzte Bodenfilter	38
Photo-Fenton mit nachgeschalteten bepflanzten Bodenfiltern	42
Synergieeffekte - Phosphor	53
Synergieeffekte - Keime	54
Behandlungstechnologien (Übersichtstabelle und Effizienz)	57
Quellennachweis	60

Projekt CoMinGreat

Mit dem Projekt CoMinGreat sollen die Kenntnisse zum Thema Mikroschadstoffe in der Großregion gesammelt und harmonisiert werden (Wallonien – Belgien, Luxemburg, Saarland und Rheinland-Pfalz – Deutschland und Lothringen – Frankreich).

Das Projekt umfasst mehrere Maßnahmen:

- Situationsanalyse zu Mikroschadstoffen in der Großregion
- Planung und Betrieb einer Demonstrationsanlage für 4 Technologien zur Behandlung von Mikroschadstoffen
- Modellierung des Verbleibs von Mikroschadstoffen in der Kläranlage
- Modellierung der aktuellen chemischen Qualität von Fließgewässern anhand von Emissions- und Immissionsdaten zu Mikroschadstoffen (Einzugsgebiet der oberen Blies).

Die Ergebnisse dieser Maßnahmen sind auf der Online-Plattform verfügbar.

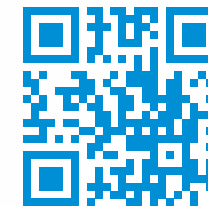
In diesem Leitfaden werden die additiven Reinigungsstufen für die Kläranlagen (vorwiegend mit kleinerer bis mittlerer Kapazität) in der Großregion vorgestellt. Grundlage hierfür sind die Versuche im Zuge des Projekts und die wissenschaftliche Literatur.



Weitere Informationen auf der Website des Projekts

www.comingreat.eu

oder über folgenden QR-Code



Mikroschadstoffe

Als Mikroschadstoffe (auch anthropogene Spurenstoffe) werden Verbindungen bezeichnet, die in geringer Konzentration in der Umwelt vorkommen (in der Größenordnung von „Mikrogramm pro Liter“) und die eine schädliche Wirkung (chronisch oder akut) auf Organismen oder Ökosysteme insgesamt oder auf Teile davon haben.

Die Stoffe können über industrielle oder kommunale Abwässer eingebracht werden. Stoffe, die an der kommunalen Kläranlage ankommen, stammen entweder von einer direkten Einleitung (z. B. Urin, Exkremente) oder einer indirekten Einleitung (z. B. Bodenauslaugung). Die Aufbereitung kommunaler Abwässer erfolgt derzeit hauptsächlich biologisch (Belebtschlammverfahren) und hat eine begrenzte Wirkung hinsichtlich der Verringerung dieses Schadstoff-Cocktails.

Ein Teil davon ist in den Schlämmen (durch Adsorption) oder im Abwasser zu finden (Stoffe, die durch die herkömmlichen Behandlungsstufen nicht abgebaut werden). Ihre Konzentration in der natürlichen Umwelt kann eine Verweiblichung von Wassertieren oder die Entwicklung antibiotikaresistenter Bakterien (ARB) zur Folge haben und sie können Adsorptionsträger für andere Stoffe sein, die für Wassertiere giftig sind (Mikroplastik und Metalle).

Deshalb ist es überaus wichtig, sich mit dieser Problematik zu beschäftigen und unsere Kläranlagen aufzurüsten, um den Eintrag dieser Verbindungen in unsere Umwelt weitestgehend zu verringern.

Quelle

European Watch List

Richtlinie 2008/105/EG (Überarbeitung C(2020) 5 205)

Moleküle

Metaflumizon, Amoxicillin, Azithromycin, Ciprofloxacin, Clarithromycin, Erythromycin, Sulfamethoxazol, Trimethoprim, Venlafaxin, O-Desmethylvenlafaxin, Clotrimazol, Fluconazol, Miconazol, Imazalil, Ipconazol, Metconazol, Penconazol, Prochloraz, Tebuconazol, Tetraconazol, Famoxadon, Dimoxystrobin.

Umweltqualitätsnorm

Moleküle

Alachlor, Anthracen, Atrazin, Benzol, polybromierte Diphenylether, Kadmium, Tetrachlormethan, C10-13 Chloralkane, Chlorfenvinphos, Chlorpyrifos (Chlorpyrifos-ethyl), Aldrin, Dieldrin, Endrin, Isodrin, Gesamt-DDT, Para-para-DDT, 1,2-Dichlorethan, Dichlormethan, Bis(2-ethylhexyl)phthalat (DEHP), Diuron, Endosulfan, Fluoranthen, Hexachlorbenzol, Hexachlorbutadien, Hexachlorcyclohexan, Isoproturon, Blei, Quecksilber, Naphthalin, Nickel, Nonylphenol (4-Nonylphenol), Octylphenol, Pentachlorbenzol, Pentachlorphenol, Benzo(a)pyren, Benzo(b)fluoranthen, Benzo(k)fluoranthen, Benzo(g,h,i)-perylene, Indeno(1,2,3-cd)-pyren, Simazin, Tetrachlorethylen, Trichlorethylen, Trichlorbenzole, Trichlormethan, Trifluralin.

Projekt EmiSûre

Moleküle

AMPA, Atenolol, Benzotriazol, Bezafibrat, Carbamazepin, Carbendazim, Ciprofloxacin, Clarithromycin, Cyclophosphamid, DEET, Diclofenac, Diuron, Erythromycin, Glyphosat, Isoproturon, Ketoprofen, Lidocain, MCPP, Metoprolol, PFOA, PFOS, Propranolol, Sulfamethoxazol, Acetyl-Sulfamethoxazol, TCIPP, Terbutryn, Tolyltriazol.

Änderungsvorschlag EU

Kommunalabwasserrichtlinie (10/2022)

Moleküle

Amisulprid, Carbamazepin, Citalopram, Clarithromycin, Diclofenac, Hydrochlorothiazid, Metoprolol, Venlafaxin, Benzotriazol, Candesartan, Irbesartan, 4+5-Methylbenzotriazol.

Schweiz

Moleküle

Diclofenac, Carbamazepin, Clarithromycin, Benzotriazol, Amisulprid, Candesartan, Citalopram, Hydrochlorothiazid, Irbesartan, Metoprolol, Venlafaxin, 4+5-Methylbenzotriazol.

Auswahl der Mikroschadstoffe

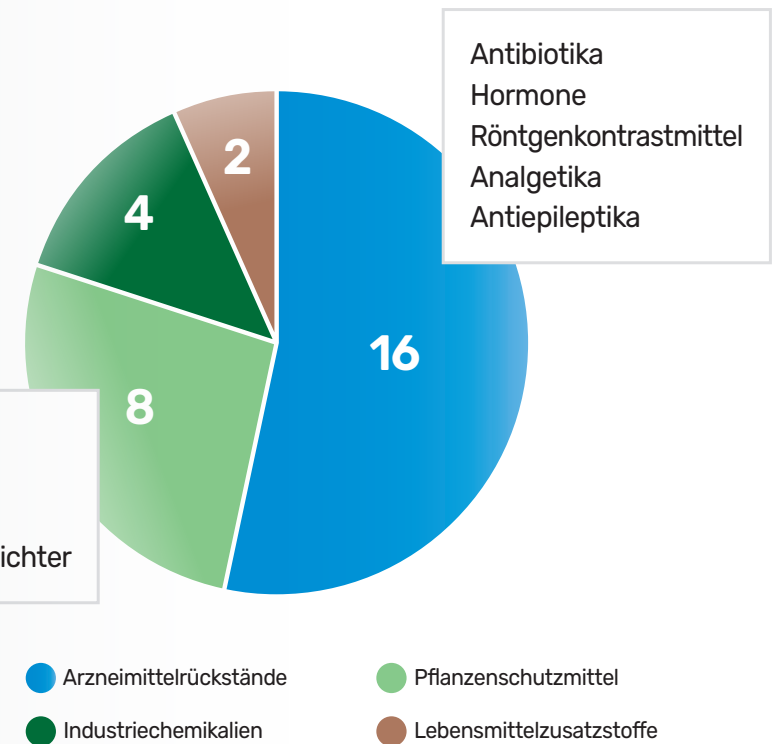
Die Auswahl der Mikroschadstoffe basiert:

- auf den verschiedenen Rechtsdokumenten der Großregion und der EU, den UQN (Umweltqualitätsnormen),
- der europäischen Beobachtungsliste (European Watch List)
- und den einzelnen bereits umgesetzten Projekten in der Region (EmiSûre, Stoffflussmodellierung der Gesamtemissionen an Spurenstoffen im Einzugsgebiet der Blies ...).

Aus den Rechtsdokumenten und Projekten wurden dreißig Moleküle ausgewählt, die im Rahmen des Projekts betrachtet werden.

Stoffgruppen

- Arzneimittelrückstände: Antibiotika (führen zur Bildung antibiotikaresistenter Bakterien), Hormone (Feminisierung von Arten), Röntgenkontrastmittel, Analgetika und Antiepileptika
- Pflanzenschutzmittelrückstände
- Lebensmittelzusatzstoffe
- Industriechemikalien



An aerial photograph of a wastewater treatment plant. In the foreground, two large circular clarifiers are visible, with a central mechanical structure in each. To the right of the clarifiers, there are several brick buildings with grey roofs, a parking lot with several cars, and a blue truck. Further back, there's a larger building with a red roof and a white van. The plant is surrounded by green fields and bare trees. In the background, a town with red-roofed houses is visible, followed by rolling hills and a large body of water under a cloudy sky. Wind turbines are scattered across the landscape.

Demonstrationsstandort & Versuchsdurchführung

Demonstrationsstandort

Die Demonstrationsanlage wurde am Standort der Kläranlage in Bliesen (D) eingerichtet, die kommunale Abwässer und das Betriebsabwasser einer Bäckerei aufbereitet.

Die Kläranlage liegt in einer ländlichen Umgebung, dementsprechend können Chemikalien aus der Landwirtschaft anfallen.

Von den 30 überwachten Verbindungen erfüllten 20 die vorgegebenen Anforderungen mit einer Konzentration im Zulauf der Kläranlage von über 50 ng/l und einer Wiederfindungsrate < 100 %.

Die Effizienz der Verfahren wurde demnach bei folgenden Stoffen nicht ermittelt: Diuron, Flufenacet, Beta-Estradiol, Estron, Ethinylestradiol, Isoproturon und PFOS.

Kläranlage Bliesen

Anlagenkapazität : 13 000 EW

Primäre
(mechanische)
Reinigungsstufe

Sekundäre
(biologische)
Reinigungsstufe
mit
Belebungsverfahren

Biologische
Gesamtstick-
stoffelimination

Chemisch-
physikalische
Phosphor-
elimination

**Wasserqualität hinsichtlich
Makroschadstoffen im Auslauf der
Kläranlage während des Betriebs der
Demonstrationsanlage**

Auslauf Kläranlage (mg/l)	Mittel- wert	Max
DCO / TOC	18 / 5,3	25/7,6
Absetzb. Stoffe	4,2	16
NH ₄	0,76	2,3
NO ₃	1,9	3,6
PGES - PO ₄ -P	0,4/0,3	0,7/0,6

Überwachte Mikroschadstoffe beim Betrieb der Demonstrationsanlage auf der Kläranlage in Bliesen (Deutschland).

Wert am Ablauf der Kläranlage (=Zulauf der Demonstrationsanlage)

Verbindungen	Wiederfindungsrate (%)*	Mittlere Konzentration (ng/l)	Anzahl der Werte
Amidotrizoessäure	100%	720	12
AMPA	100%	481	13
Atenolol	100%	134	13
Benzotriazole	100%	1376	13
Beta-Estradiol	0%	50	12
Bezafibrat	100%	231	13
Koffein	100%	141	12
Carbamazepin	100%	65	13
Carbendazim	85%	62	13
Ciprofloxacin	62%	53	13
Clarithromycin	100%	123	13
DEET	100%	790	13
Diclofenac	100%	18	13
Diuron	85%	38	13

* Anteil Proben mit einer Konzentration über der Bestimmungsgrenze (BG)

Composés	Occurrence (%)*	Concentration moyenne (ng/l)	Nombre de données
Estron	50%	3	12
Ethinylestradiol	0%	44	12
Flufenacet	67%	30	12
Glyphosat	100%	124	13
Ibuprofen	75%	82	12
Iomeprol	83%	559	13
Isoproturon	85%	10	13
Lidocain	100%	122	13
Metoprolol	100%	1517	12
PFOS	23%	10	13
Sucralose	100%	11277	12
Sulfamethoxazol	92%	32	13
Acetyl-Sulfamethoxazol	100%	16	13
T CPP	100%	3343	13
Terbutryn	100%	29	13
Tolyltriazol	100%	322	13

* Anteil Proben mit einer Konzentration über der Bestimmungsgrenze (BG)

Versuchsdurchführung

Die Demonstrationsanlage wurde von November 2021 bis Oktober 2022 betrieben.

Im Laufe dieses Jahres wurden 13 Effizienzmesskampagnen nach folgendem Probenahmeprotokoll durchgeführt:

Probenahme an Kläranlage

24 bzw. 72 h Mischproben zeitproportional mit 24-stündigem Versatz zwischen Zu- und Ablauf der Kläranlage zur Berücksichtigung der hydraulischen Verweilzeit in der Anlage.

Probenahme an additiven Reinigungslinien

Bodenfilter: 24 bzw. 72 h Mischproben

Photo-Fenton: qualifizierte Stichproben

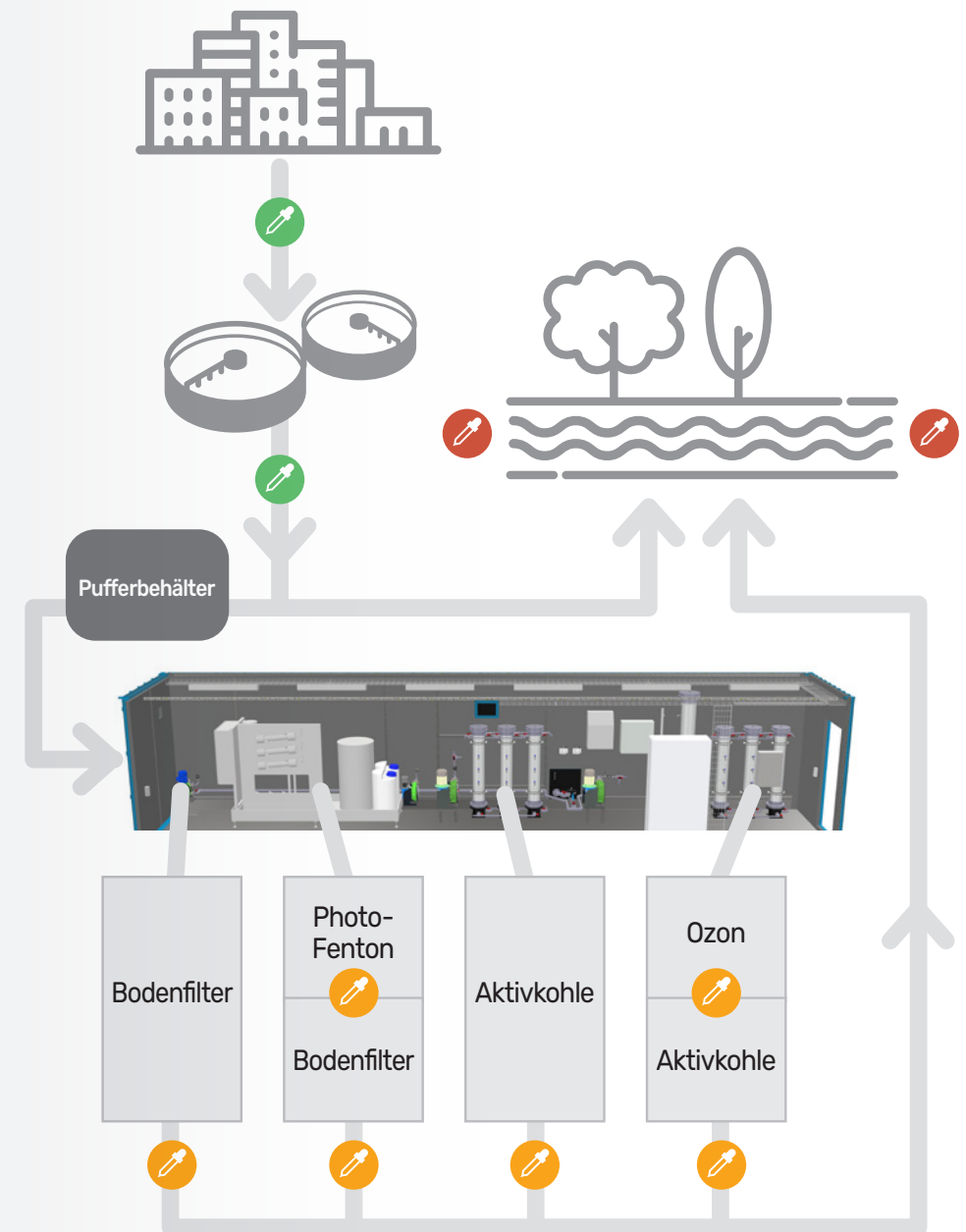
Aktivkohle: 24 bzw. 72 h Mischproben zeitproportional

Ozon und Aktivkohle: 24 bzw. 72 h Mischproben zeitproportional.

Probenahme im Vorfluter

Tägliche qualifizierte Stichproben über 3 Tage, vereinigt mit konstantem Volumen; 24-stündiger Versatz zwischen erster Probe stromaufwärts und erster Probe stromabwärts von der Einleitstelle der Kläranlage

Referenzprobenahme mindestens 100 m vor und nach der Einleitstelle der Kläranlage



Probenaufbereitung

Zur Analyse der Mikroschadstoffe

- Leitungen und Sammelbehälter aus Kunststoff (PE)
- Zugabe von Rinder-Katalase (Bovine liver catalase) zur Vermeidung der oxidativen Wirkung der H_2O_2 -Rückstände in das Probengefäß
- Lagerung der Rohprobe in einer Braunglasflasche (einfrieren, falls Entnahme nicht innerhalb von 24 h erfolgt)

Für Makroschadstoffe

- Probenahme in PE-Flasche
- Probe wird während Probenahme auf 4 °C gehalten
- Probenkonservierung je nach zu untersuchenden Parametern

Für Keime

- Lagerung in bakteriologischer Flasche (mit Natriumthiosulfatpulver)
- Zytometrie: Rohprobe, schnellstmögliche Analyse (< 24 h) – nicht einfrieren
- qPCR/Metagenetik: Einfrieren der Proben, wenn Analysefrist > 24 h

Datenauswertung

Bei Mikroschadstoffen

- Für eine möglichst konservative Vorgehensweise werden Werte unter der Bestimmungsgrenze (BG) durch den BG-Wert ersetzt.
- Anwendung einer Relevanzbedingung: Die Eliminationsrate wird ausschließlich dann ermittelt, wenn der Mittelwert der Konzentration im Zulauf der Kläranlage über 50 ng/l liegt.





Betriebsergebnisse
der
Demonstrationsanlage

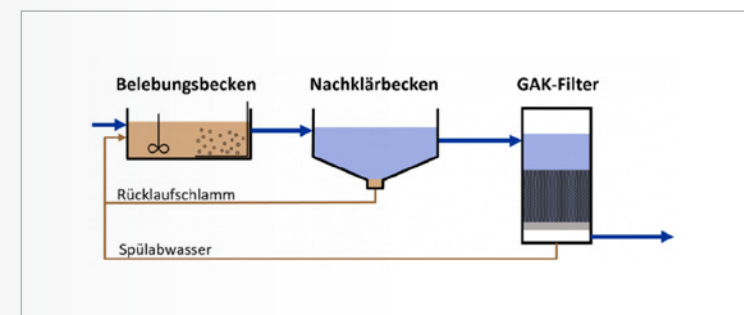
Granulierte Aktivkohle

Die granulierte Aktivkohle befindet sich in einem Behälter (teilweise mit GAK als Adsorptionsmittel gefüllt), durch den das zu behandelnde Abwasser läuft. Um die Lebensdauer der Filter zu verlängern, muss die CSB-Fracht im zu behandelnden Wasser durch Optimierung der biologischen Reinigungsstufe der Kläranlage so weit wie möglich reduziert werden.

Die Behälter können als geschlossene Druckfilter oder als offene Filter ausgeführt und kontinuierlich oder diskontinuierlich betrieben werden. Wie ein herkömmlicher Filter wird der GAK-Filter regelmäßig rückgespült.

Die GAK bleibt bis zur Sättigung der Adsorptionsplätze im Filter. Nach Reaktivierung der GAK durch Wärmebehandlung kann sie dem System wieder zugeführt werden.

GAK-Filter werden, wie die anderen Verfahren, hinter der Nachklärung angeordnet und sind schon auf diversen Kläranlagen beispielsweise in Nordrhein-Westfalen und Baden-Württemberg in Betrieb.



Wasserqualität vor GAK-Behandlung

Maximale Reduzierung :

- der absetzbaren und abfiltrierbaren Stoffe, um ein Verstopfen des GAK-Filters und damit verbundene Rückspülungen zu vermeiden;
- des CSB, um die Lebensdauer der GAK zu verlängern (Sättigung der Adsorptionsplätze).

Dimensionierungsparameter

- Kontaktzeit: > 20 Minuten
- Filterbetthöhe: 1,5 bis 2,5 m
- Durchströmgeschwindigkeit: 4 bis 7 m/h

Bei der Auswahl der Aktivkohle sind folgende Parameter zu beachten :

- Die Korngröße ist von der Qualität des zu behandelnden Wassers abhängig (abfiltrierbare Stoffe);
- Dimensionierung der Filtersäule/des Filterbeckens;
- Einen Freiraum zum Ausdehnen nach der ersten Spülung (~15 %) und zum Ausdehnen für wirksame Rückspülungen (~25 %) über der GAK-Säule lassen (~25%).

Funktionsweise

Mindestens 4 Filterzellen sollten installiert werden (3 + 1 Reserve).

Der Filter kann ab- oder aufsteigend durchströmt werden (Schwerkraft oder Druck).

Es wird empfohlen, eine Filterdüse zur Verteilung des Wasserflusses zu verwenden und ein System zur Schwebstoffabtrennung vorzuschalten, um ein Verstopfen und zu häufige Spülzyklen zu vermeiden.

Rückspülzyklen sollten entweder in regelmäßigen Abständen oder abhängig vom Druck durchgeführt werden. Dies kann durch Zugabe von Wasser (Rückspülwasser, das zur Kläranlage zurückgeleitet wird) oder Luft erfolgen (Vorsicht: stärkerer Abrieb, härtere GAK verwenden).

VORTEILE

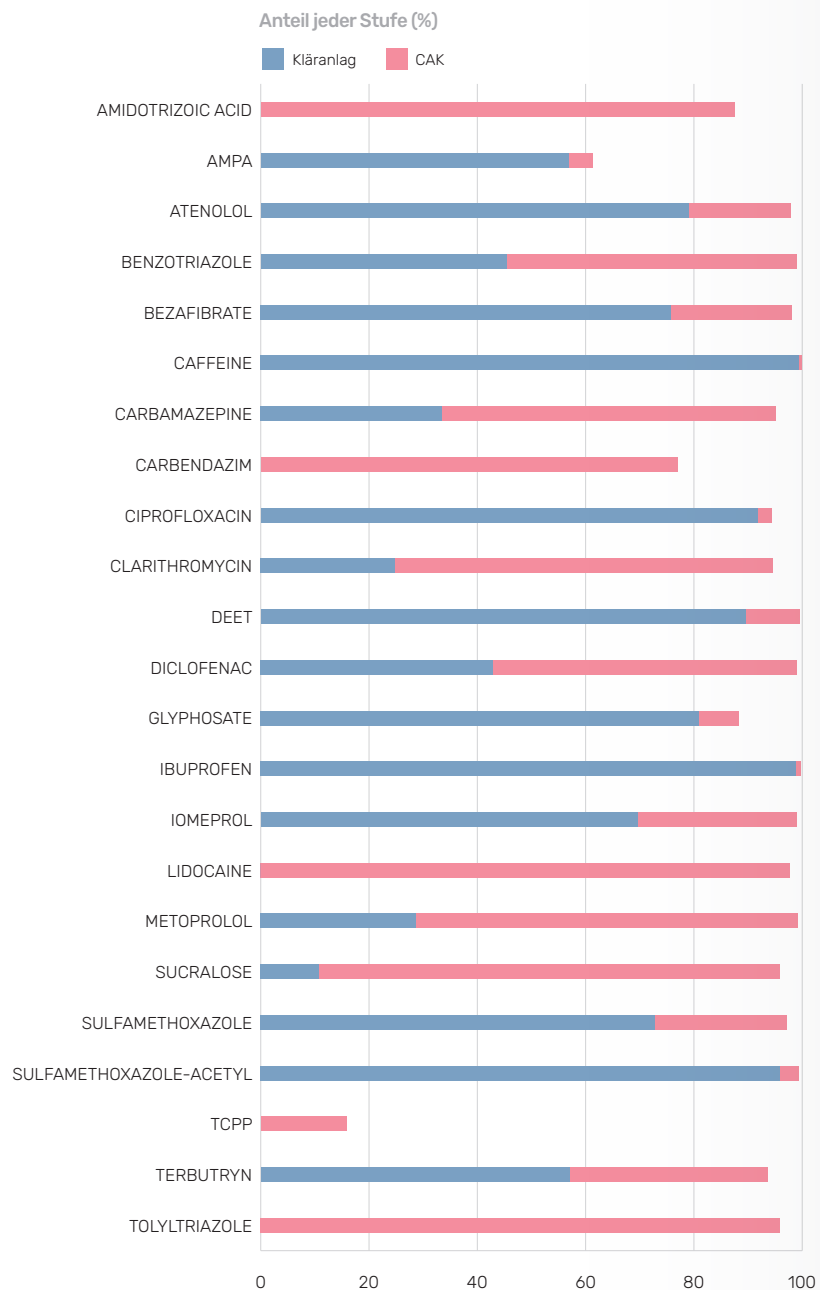
Hohe Effizienz bei einem breiten Spektrum von Mikroschadstoffen
Einfacher Betrieb, bewährte Technik.

NACHTEILE

Problem des Zusetzens, Platz erforderlich
Bei starken Durchsatzschwankungen ungeeignet
Kosten für Regeneration der Aktivkohle



Effizienz der Mikroschadstoffelimination bei der Adsorption an granulierter Aktivkohle (Demonstrationsanlage auf der Kläranlage in Bliesen, Deutschland)



BETRIEBSZEITRAUM

November 2021
bis Oktober 2022

ANZAHL DER DURCHGEFÜHRTEN KAMPAGNEN

12

BETRIEBS-PARAMETER

DGF 8x30 GL von
Carbotech

IODZAHL
900 mg/g

PARTIKELGRÖSSEN-
VERTEILUNG
0,6 - 2,36 mm (90%)

BETRIEBS-PARAMETER

KONTAKTZEIT
60 minuten

FILTERBETTHÖHE
1,25 m

GESCHWINDIGKEIT
3,7 m/h

EINZUGSGEBIET
(VERSUCHSENDE):
5 381

EFFIZIENZ

Makroschadstoffe

CSB/N/P:

Keine red gemessen, wert stabil

Mikroschadstoffe

(6/22) Mikroschadstoffen zu > 80 % eliminiert (Kläranlage): Koffein, Ciprofloxacin, DEET, Glyphosat, Ibuprofen, Acetyl-Sulfamethoxazol.

(19/22) Mikroschadstoffen zu > 80 % eliminiert (Kläranlage + GAK):

Amidotrizoesäure, Atenolol, Benzotriazol, Bezafibrat, Carbamazepin, Clarithromycin, Diclofenac, lomeprol, Lidocain, Metoprolol, Sucralose, Sulfamethoxazol, Terbutryn, Tolyltriazol.

Abbauresistente Mikroschadstoffe

AMPA, Carbendazim, TCPP.

ANMERKUNGEN

Trotz einer langen Kontaktzeit im Filter wurden AMPA, Carbendazim und TCPP durch die zusätzliche Reinigungsstufe nicht aus dem aufbereiteten Abwasser eliminiert.

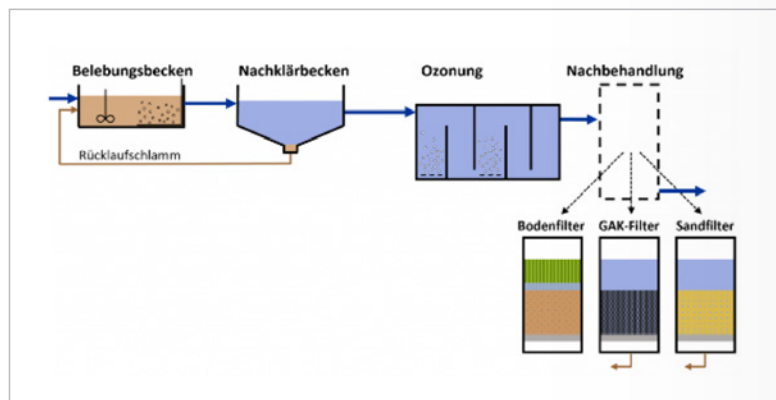
Ozon und granulierte Aktivkohle

Bei der Ozonung erfolgt die Oxidation durch die Zugabe von Ozon (O_3) zum Abwasser. Ozon ist sehr instabil und muss daher vor Ort aus Sauerstoff (Luft oder Reinsauerstoff) erzeugt und direkt verwendet werden.

Ozon reagiert auch mit den organischen (zum Beispiel CSB, DOC) und mit den anorganischen Abwasserinhaltsstoffen (zum Beispiel Nitrit). Da Ozon sowie die entstehenden Hydroxyl-Radikale unselektiv mit den Abwasserinhaltsstoffen reagieren, ist eine möglichst weitgehende Reduktion der oxidierbaren Abwasserinhaltsstoffe (N, C) in der biologischen Stufe der Kläranlage erforderlich.

Es ist vorteilhaft, eine Oxidations- und eine Adsorptionsstufe zu kombinieren, um sowohl die erforderliche Ozonmenge zu verringern (Verminderung der Gefahr der Bromatbildung) als auch die Lebensdauer der GAK zu verlängern.

Die Kombination der beiden Verfahren ist baulich bislang auf wenigen Anlagen realisiert. Für zahlreiche Kläranlagen befindet sich jedoch eine solche Kombi-Anlage in Planung.



Wasserqualität vor Behandlung

Maximale Reduzierung von abfiltrierbaren Stoffen und CSB, um eine Überdosierung von Ozon und eine vorzeitige Verstopfung/Sättigung der GAK zu vermeiden.

Besondere Vorsicht ist bei Vorhandensein von Bromid ($> 100 \mu\text{g/l}$) oder Nitrosamin ($> 50 \text{ ng/l}$) geboten, da die Gefahr der Bildung giftiger Nebenprodukte besteht. Suche nach Verursacher(n).

Dimensionierungsparameter

Ozonung

Dosierung

- 0,005 bis 0,007 g O_3 /l
- 0,5 bis 0,7 g O_3 /g CSB (mehr bei Vorhandensein von $NO_2 \rightarrow 1,1 \text{ g } O_3/\text{g } NO_2$)

Kontaktzeit: ~ 10 min

Granulierte Aktivkohle

- Kontaktzeit: > 10 Minuten
- Filterbetthöhe: 1,5 bis 2,5 m
- Steiggeschwindigkeit: 4 bis 7 m/h

VORTEILE

Durch die Kombination O_3 /GAK können die giftigen Nebenprodukte der Ozonung adsorbiert werden.

Verringerung der Kosten für Regeneration der GAK

Bessere Gesamteffizienz

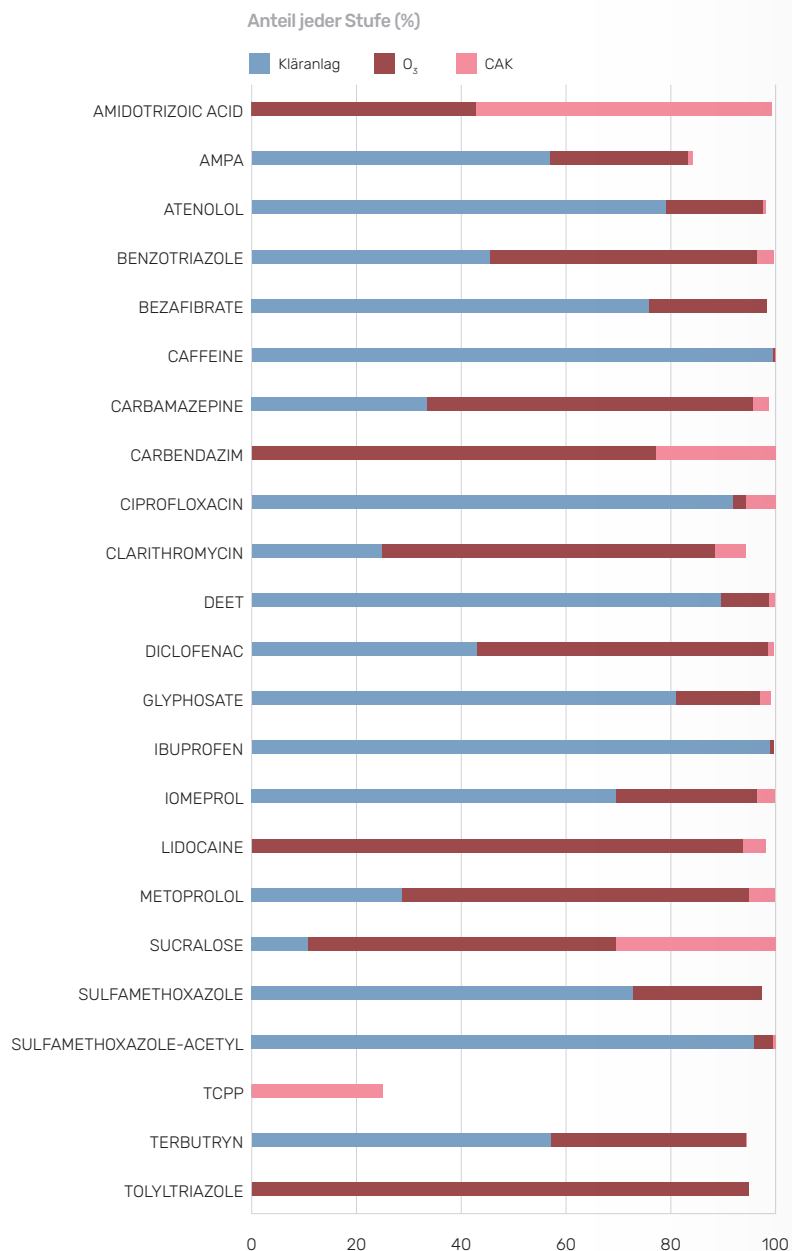
NACHTEILE

Höhere Investitions- und Betriebskosten

Komplexerer Betrieb



Ergebnisse der Mikroschadstoffelimination bei der Kombination von Ozonung + Adsorption an granulierter Aktivkohle



BETRIEBSZEITRAUM

November 2021
bis Oktober 2022

ANZAHL DER DURCHFÜHRTEN KAMPAGNEN

12

BETRIEBS-PARAMETER

Ozonung

DOSIERUNG

0,012 g O₃/l
0,688 g O₃/g CSB

KONTAKTZEIT

34 min

Aktivkohle

KONTAKTZEIT

60 Minuten

FILTERBETTHÖHE

1,25 m

GESCHWINDIGKEIT

3,7 m/h

BETT VOLUMINEN

(VERSUCHSENDE)

4 584

EFFIZIENZ

Makroschadstoffe

CSB/N/P:

Keine red gemessen, wert stabil

Mikroschadstoffe

(6/23) Mikroschadstoffen zu > 80 % eliminiert (Kläranlage): Koffein, Ciprofloxacin, DEET, Glyphosat, Ibuprofen, Acetyl-Sulfamethoxazol.

(19/23) Mikroschadstoffen zu > 80 % eliminiert (Kläranlage + O₃): AMPA, Atenolol, Benzotriazol, Bezafibrat, Carbamazepin, Clarithromycin, Diclofenac, Iomeprol, Lidocain, Metoprolol, Sulfamethoxazol, Terbutryn, Tolyltriazol.

(22/23) Mikroschadstoffen zu > 80 % eliminiert (Kläranlage + O₃/GAK): Sucralose, Carbendazim, Amidotrizoesäure.

Abbauresistente Mikroschadstoffe

TCCP.

ANMERKUNGEN

TCCP (Tris(2-chlorisopropyl)phosphat) ist ein Flammenschutzmittel mit einer vollständig oxidierten Molekülstruktur. Die Ozonbehandlung erweist sich bei diesem Molekül als unwirksam.

Durch Ergänzung einer oxidativen Vorbehandlung können 22 von 23 überwachten quantifizierbaren Mikroschadstoffen eliminiert und eine höhere Effizienz als mit Aktivkohle allein erzielt werden.

Bepflanzte Bodenfilter

Bepflanzte Bodenfilter werden derzeit hauptsächlich als Retentionsbodenfilter zur weitergehenden Mischwasserbehandlung eingesetzt. Aus diversen Untersuchungen ist jedoch bekannt, dass auch Mikroschadstoffe zurückgehalten werden können.

Insbesondere für kleine Kläranlagen im ländlichen Raum stellt der bepflanzte Bodenfilter aufgrund seines geringen Betriebsaufwands eine Alternative zu technischen Verfahren dar.



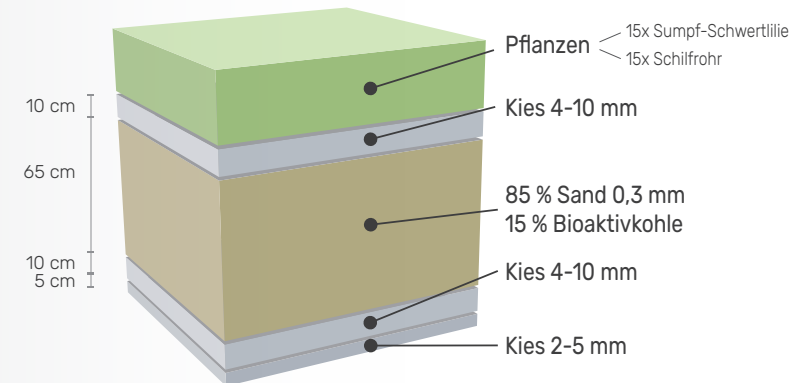
Diese Technologie ist eine naturnahe Basisbehandlung, bei der mehrere Mechanismen in Synergie zusammenarbeiten, um die Mikroschadstoffe zu eliminieren (Venditti et al., 2022).

Zum Einsatz kommen folgende Verfahren: Phytodegradation mit speziellen Arten, biologischer Abbau durch Mikroorganismen, die sich im Boden an den Pflanzenwurzeln entwickeln, und die Adsorption am Substrat.



Die Bodenfilter wurden nach der besten Substratzusammensetzung gebaut, die im vorhergehenden Interreg-Projekt EmiSûre ermittelt wurde.

Sie haben ein Volumen von 1 m³ und die Filterschicht ist eine Mischung aus 85 % Sand und 15 % aktivierter Biokohle. Der Aufbau ist in der folgenden Abbildung dargestellt.



VORTEILE

Stärkere Reduzierung des BSB und der suspendierten Feststoffe

Nitrifikationsfähigkeit bei entsprechender Verfügbarkeit von Sauerstoff
Hohe P-Elimination

Geringe Betriebskosten

NACHTEILE

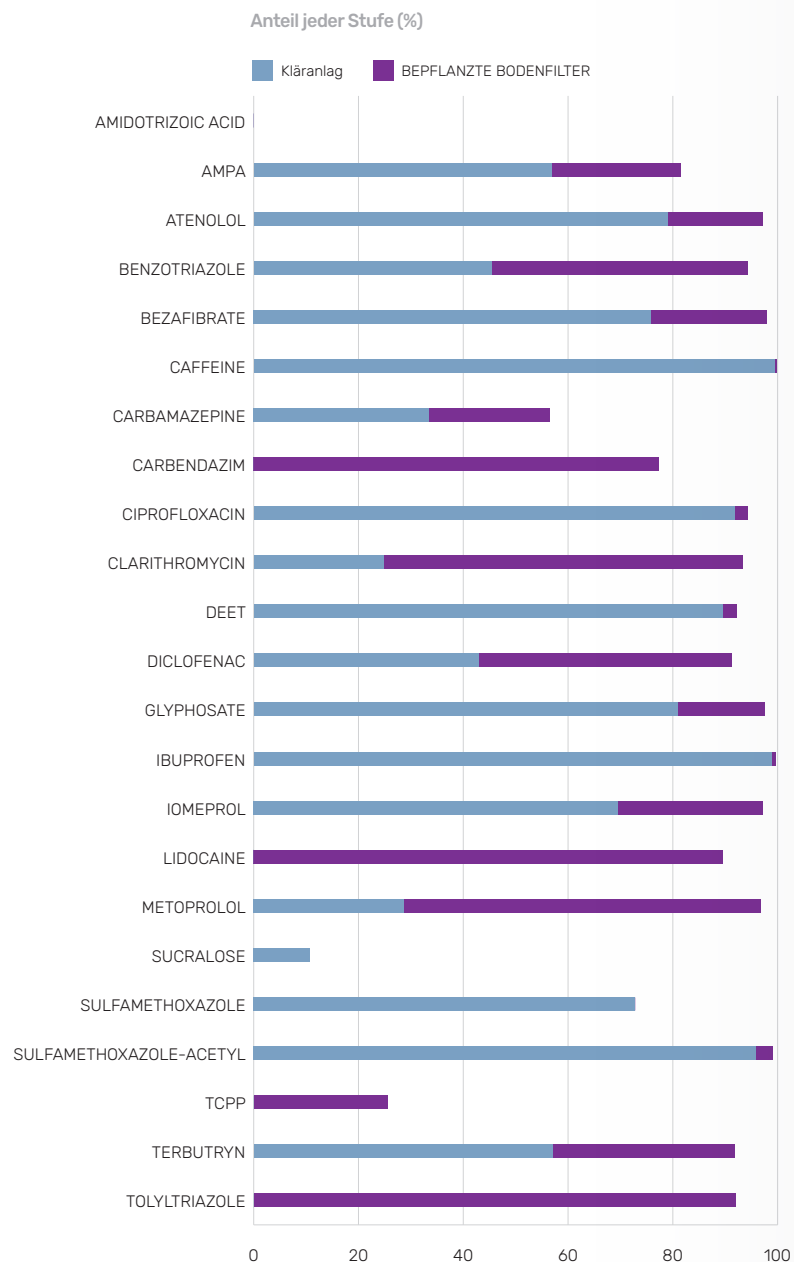
Spezielle Bauweise und Baumsetzung erforderlich, insbesondere beim Bewässerungssystem

Hohe Anforderungen hinsichtlich der Fläche

Lange Anlaufzeit bis zum Erreichen der vollen Kapazität



Ergebnisse der Mikroschadstoffelimination bei den bepflanzten Bodenfiltern

**BETRIEBSZEITRAUM**

November 2021
bis Oktober 2022

ANZAHL DER DURCHGEFÜHRTEN KAMPAGNEN

12

BETRIEBS-PARAMETER

405 l/m²
täglich

Versorgung für
30 Minuten mit 4,5 l/min in
8-stündigem Intervall.

EFFIZIENZ**Makroschadstoffe****CSB**

Reduzierung gemessen, jedoch nicht signifikant

N/P : nitrifizierende mikrobielle Aktivität
vorhanden, signifikante Reduzierung von Phosphor

Mikroschadstoffe

(6/23) Mikroschadstoffen zu > 80 % eliminiert (Kläranlage): Koffein, Ciprofloxacin, DEET, Glyphosat, Ibuprofen, Acetyl-Sulfamethoxazol.

(17/23) Mikroschadstoffen zu > 80 % eliminiert (Kläranlage + Bodenfilter): AMPA, Atenolol, Benzotriazol, Bezafibrat, Clarithromycin, Diclofenac, Iomeprol, Lidocain, Metoprolol, Terbutryn, Tolyltriazol.

Abbauresistente Mikroschadstoffe

Amidotrizoesäure, Carbamazepin, Carbendazim, Sucralose, Sulfamethoxazol, TCPP.

ANMERKUNGEN

Diclofenac ist in Bezug auf die Adsorptionsprozesse ein besonders resistenter Mikroschadstoff. Wie in der Abbildung zu sehen ist, ist die Elimination bei Betriebsbeginn gering, allerdings nimmt mit dem Wachstum der Pflanzen und der Mikroorganismen die Eliminationsfähigkeit zu. Es dauert ungefähr 6 Monate, bis eine Eliminationsrate von über 80 % erreicht wird.

Bezüglich der Gesamtergebnisse wird mit der herkömmlichen Behandlung in der Kläranlage nur bei 6 der 23 relevanten Verbindungen eine Elimination von 80 % erreicht, mit den Bodenfiltern steigt diese Zahl auf 17. Tatsächlich werden Lidocain und Tolyltriazol lediglich in Feuchtzonen eliminiert. Amidotrizoesäure wird hingegen nicht eliminiert.

Elimination von Diclofenac

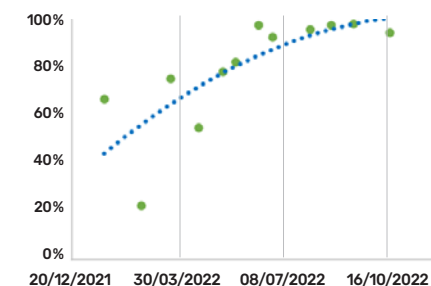
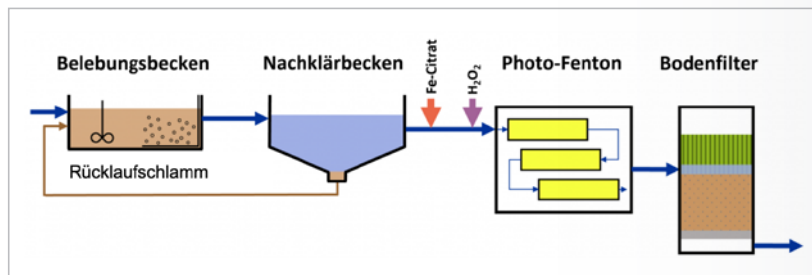


Photo-Fenton mit nachgeschalteten bepflanzten Bodenfiltern

Der Photo-Fenton-Prozess zählt zu den Advanced Oxidation Processes (AOP). Dabei wird das Hydroxyl-Radikal zur Desinfektion und Dekontamination des Wassers verwendet.

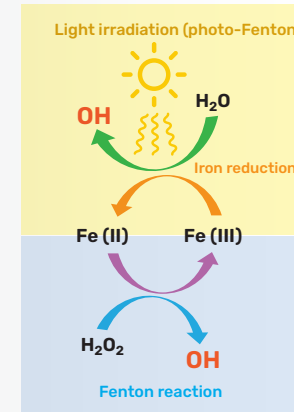
Kurz zusammengefasst wird dabei dem zu behandelnden Wasser Eisen (Fe) und Wasserstoffperoxid (H_2O_2) zugesetzt, die miteinander reagieren, um Hydroxyl-Radikale zu bilden, die am stärksten oxidativ wirkenden Radikale nach Flussspat. Diese Radikale sind in der Lage, persistente und nicht biologisch abbaubare organische Moleküle aufzuspalten, in einigen Fällen bis zu ihrer vollständigen Mineralisierung in CO_2 und H_2O .

Bei Einsatz einer UV-VIS-Strahlenquelle kann das verwendete Fe regeneriert werden und steht wieder für die Reaktion mit H_2O_2 zur Verfügung. Darüber hinaus entstehen bei diesem Regenerationsprozess auch weitere OH-Radikale, was die Oxidationsfähigkeit der Behandlung deutlich erhöht.



Die bepflanzten Bodenfilter entsprechen in ihrem Aufbau der Variante, die sich im vorherigen Interreg-Projekt EmiSüre als am besten erwiesen hat.

Sie haben ein Volumen von 1 m^3 und die Filterschicht besteht aus einer Mischung von 85% Sand und 15% aktivierter Biokohle.



VORTEILE

Sehr wirkungsvolle Technologie.

Unselektive Reaktion mit Mikroschadstoffen.

NACHTEILE

Konstante Dosis der Reagenzien erforderlich.

Hoher Energieverbrauch.

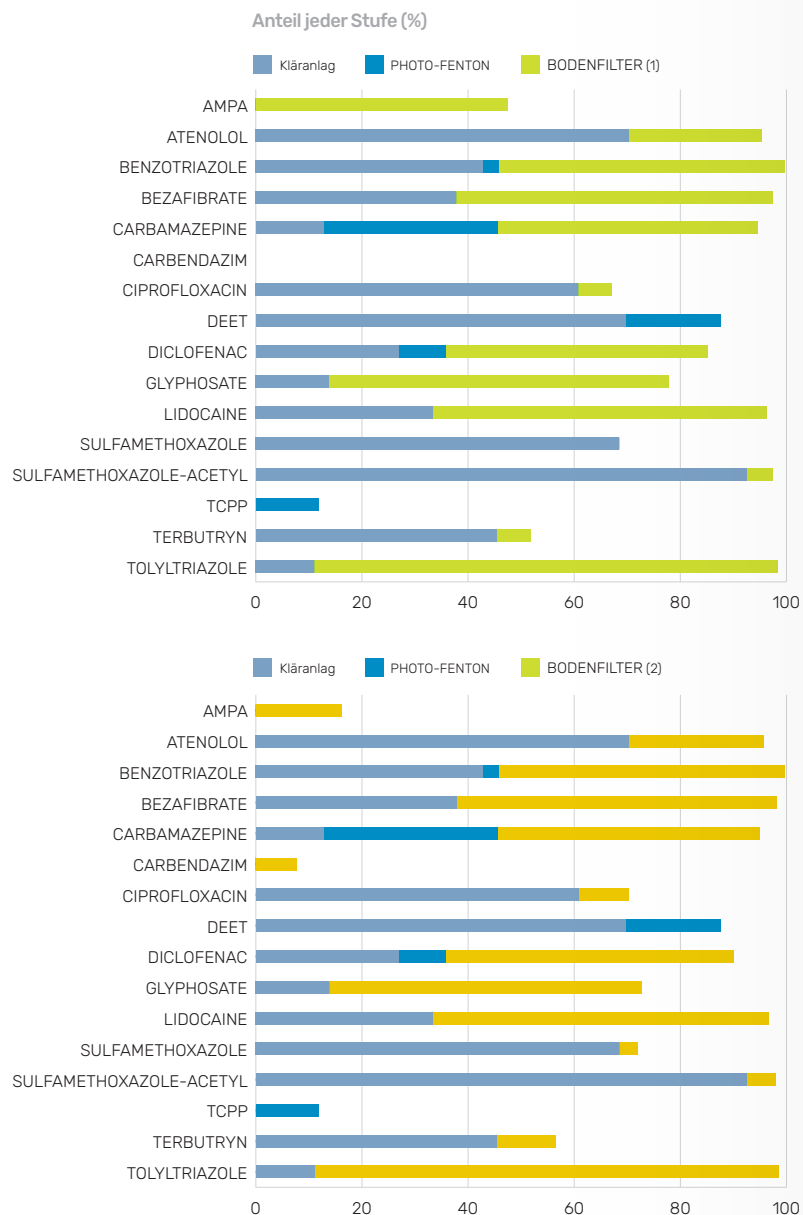
Betrieb mit saurem pH-Wert oder mit Chelatbildner aufgrund der Fe-Löslichkeit erforderlich.

Ziel der Kombination der Behandlungen:

- Reduzierung der Reagenzien und der Behandlungszeit der ersten Stufe der weitergehenden Oxidation.
- Verringerung des Flächenbedarfs pro Einwohnerwert bei Bodenfiltern.
- Elimination möglicher Abbauebenprodukte des Photo-Fenton-Prozesses.
- Elimination von Mikroschadstoffen, die von den Bodenfiltern allein nicht eliminiert werden.



Ergebnisse der Mikroschadstoffelimination bei der Kombination Photo-Fenton (Fe/NTA Verhältnis 1:1) + Bodenfilter. (oben) Bodenfilter 1 – (unten) Bodenfilter 2



BETRIEBSZEITRAUM

Januar 2022

ANZAHL DER DURCHFÜHRTEN KAMPAGNEN

1

BETRIEBS-PARAMETER

Photo-Fenton

Eisen : 1,5 mg/l

Fe-NTA
Molverhältnis 1:1

H₂O₂ : 20 mg/l

UV: effektive Leistung
der Lampe von 16 W,
Gesamtenergie von 48 W

Durchsatz : 19m³/Tag

Bodenfilter

405 l/m²*d mit drei
Beschickungen pro Tag,
an einem von zwei Tagen.

Beschickung mit 4,5 l/min für
60 Minuten in 8-stündigem
Intervall, danach 24 h Pause.

EFFIZIENZ

Makroschadstoffe

CSB

Reduzierung gemessen, jedoch nicht signifikant.

N/P

Nitrifizierende mikrobielle Aktivität vorhanden,
signifikante Reduzierung von Phosphor.

Mikroschadstoffe

Wiederholbarkeit zwischen Bodenfiltern: Nicht relevant.

(1/15) Mikroschadstoffen zu > 80 % eliminiert (Kläranlage): Acetyl-Sulfamethoxazol.

(2/15) Mikroschadstoffen zu > 80 % eliminiert (Kläranlage + PF): DEET.

(8/15) Mikroschadstoffen zu > 80 % eliminiert (Kläranlage + PF + Bodenfilter): Atenolol, Benzotriazol, Carbamazepin, Bezafibrat, Diclofenac, Lidocain.

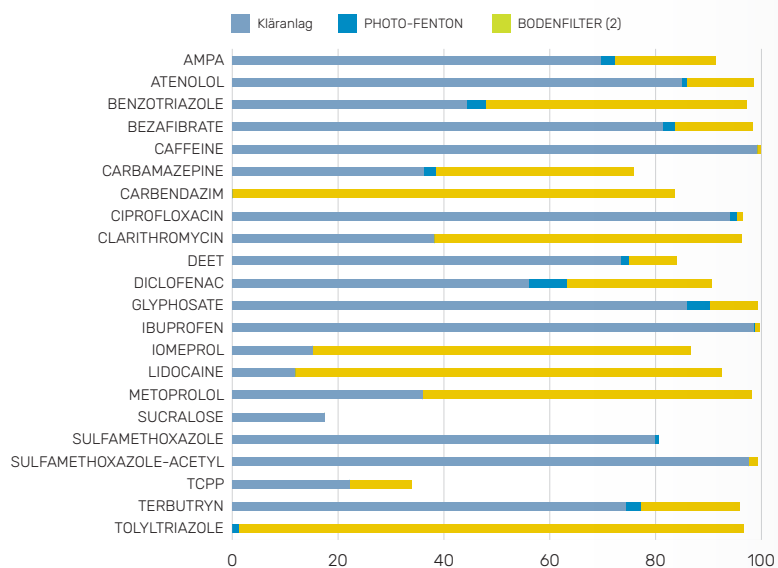
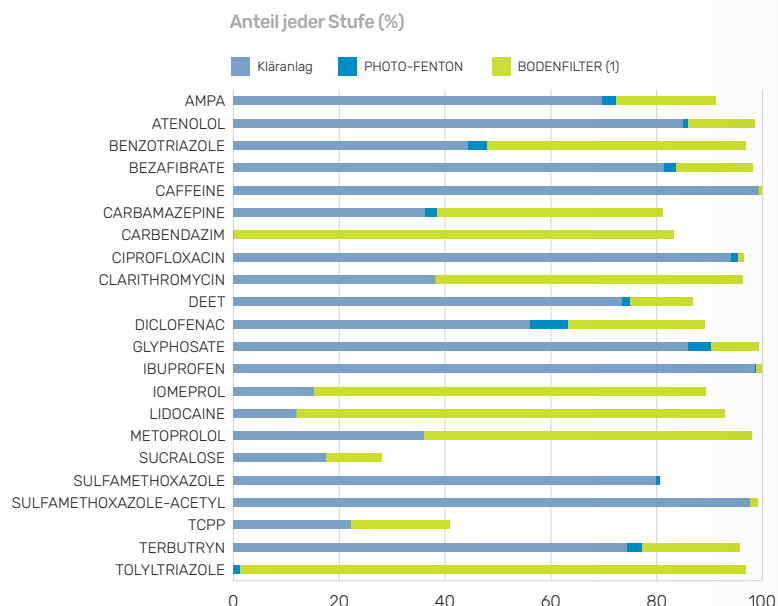
Abbauresistente Mikroschadstoffe

AMPA, Carbendazim, Ciprofloxacin, Glyphosat, Sulfamethoxazol, TCPP, Terbutryn.

ANMERKUNGEN

Eine hohe Elimination der Mikroschadstoffe wurde am Ende des gesamten Prozesses erzielt, die Hauptfunktion hatten jedoch die Bodenfilter. Der Photo-Fenton-Prozess wies eine geringere als die in der Literatur beschriebene Wirksamkeit auf, hauptsächlich aufgrund der Verwendung von Reagenzien in technischer anstelle von Reagenzien in Analysenqualität. Darüber hinaus wurde die Verwendung von NTA wegen der geringen Stabilität des Komplexes mit Eisen aufgegeben, dessen Fällung nach wenigen Stunden beginnt und zur vollständigen Blockierung des Dosiersystems sowie zur Verunreinigung der Lampen führt.

Ergebnisse der Mikroschadstoffelimination bei der Kombination Photo-Fenton
(Fe/Zitronensäure Verhältnis 1:1) + Bodenfilter. (oben) Bodenfilter 1 –(unten) Bodenfilter 2

**BETRIEBSZEITRAUM**

Februar bis Juli 2022

EFFIZIENZ**Makroschadstoffe****CSB**

Reduzierung gemessen, jedoch nicht signifikant.

N/P

Nitrifizierende mikrobielle Aktivität vorhanden, signifikante Reduzierung von Phosphor.

Mikroschadstoffe**Wiederholbarkeit zwischen Bodenfiltern** : ja.**(8/23) Mikroschadstoffen zu > 80 % eliminiert****(Kläranlage):** Atenolol, Bezafibrat, Koffein, Ciprofloxacine, Glyphosat, Ibuprofen, Sulfamethoxazol, Acetyl-Sulfamethoxazol.**(8/23) Mikroschadstoffen zu****> 80 % eliminiert (Kläranlage + PF) : /.****(19/23) Mikroschadstoffen zu > 80 % eliminiert****(Kläranlage + PF + Bodenfilter):** AMPA, Benzotriazol, Carbendazim, Clarithromycin, DEET, Diclofenac, Iomeprol, Lidocain, Metoprolol, Terbutryn, Tolytriazole**Abbauresistente Mikroschadstoffe**

Amidotrizesäure, (Carbamazepin), TCPP, Sucralose.

ANMERKUNGEN

Der Chelatbildner wurde durch Zitronensäure ersetzt, die Wirksamkeit des Photo-Fenton-Systems war aber noch geringer. In diesem Fall ist der Komplex bei der Lagerung sehr stabil, allerdings vermutlich nicht im eigentlichen Prozess. Das Eisen war nicht für die Reaktion mit H_2O_2 verfügbar und sein Ausfällen verhindert außerdem den Durchgang der Strahlung durch die Lösung.

Zu den Mikroschadstoffen

Das chemische Molekül mit der höchsten Eliminationsrate beim Photo-Fenton-Prozess war Diclofenac mit ca. 7%.

Die Bodenfilter leisteten nach wie vor den Hauptbeitrag zum Erreichen von 80% Elimination. Die Amidotrizesäure konnte in keiner der Stufen eliminiert werden.

ANZAHL DER DURCHFÜHRTEN KAMPAGNEN

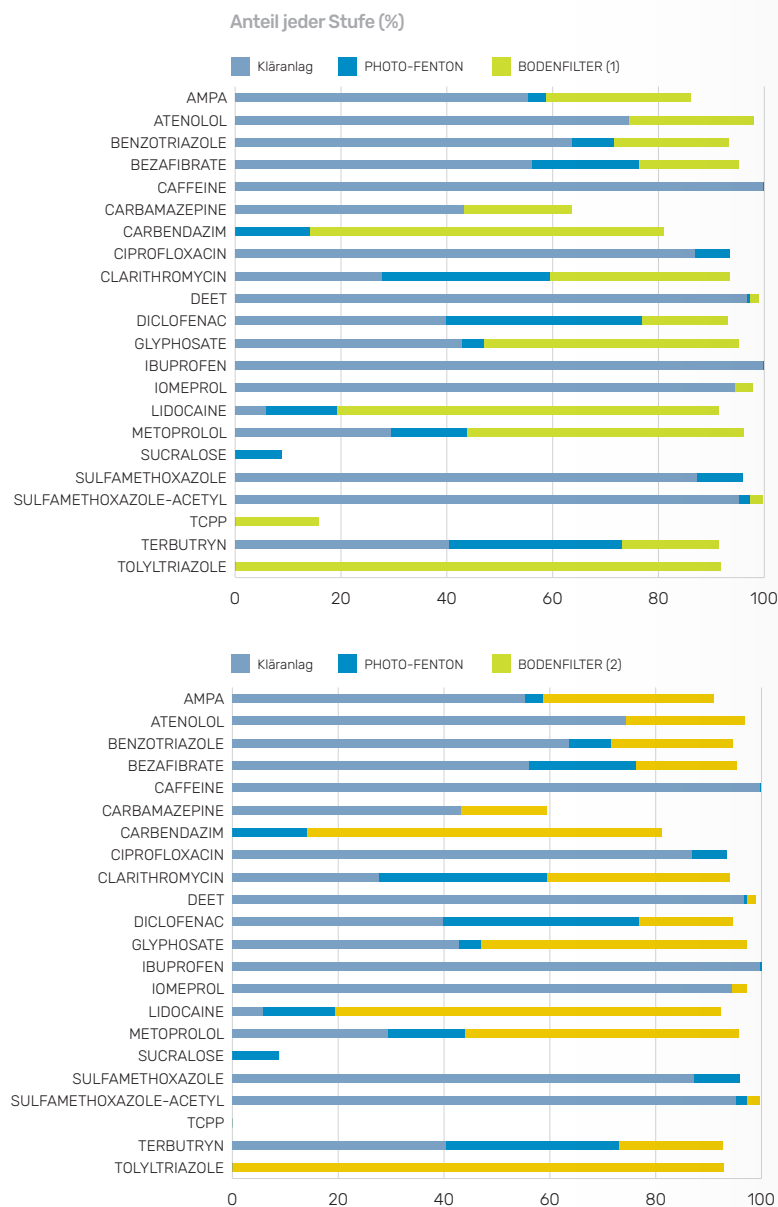
8 (davon 2 intensiv)

BETRIEBS-PARAMETER**Photo-Fenton**

Eisen : 1,5 mg/l

Fe/Zitronensäure
Verhältnis 1:1 H_2O_2 : 20 mg/lUV: effektive Leistung
der Lampe von 16 W,
Gesamtenergie von 48 WDurchsatz : 19m³/Tag**Bodenfilter**405 l/m²*d mit drei
Beschickungen pro Tag,
an einem von zwei Tagen.Beschickung mit 4,5 l/
min für 60 Minuten in
8-stündigem Intervall,
danach 24 h Pause.

Ergebnisse der Mikroschadstoffelimination bei der Kombination Photo-Fenton (Fe/Zitronensäure Verhältnis 1:2) + Bodenfilter. (oben) Bodenfilter 1 – (unten) Bodenfilter 2



BETRIEBSZEITRAUM

August 2022

ANZAHL DER DURCHFÜHRTEN KAMPAGNEN

1

BETRIEBS-PARAMETER

Photo-Fenton

Eisen : 1,5 mg/l

Fe-Zitronensäure
Molverhältnis 1:2

H₂O₂ : 20 mg/l

UV: effektive Leistung
der Lampe von 16 W,
Gesamtenergie von 48 W

Durchsatz : 19m³/Tag

Bodenfilter

405 l/m²*d mit drei
Beschickungen pro Tag,
an einem von zwei Tagen.

Beschickung mit 4,5 l/
min für 60 Minuten in
8-stündigem Intervall,
danach 24 h Pause.

EFFIZIENZ

Makroschadstoffe

CSB

Reduzierung gemessen, jedoch nicht signifikant.

N/P

Nitrifizierende mikrobielle Aktivität vorhanden, signifikante Reduzierung von Phosphor.

Mikroschadstoffe

Wiederholbarkeit zwischen Bodenfiltern : nicht relevant.

(7/23) Mikroschadstoffen zu > 80 % eliminiert

(Kläranlage): Koffein, Ciprofloxacin, DEET, Ibuprofen, Iomeprol, Sulfamethoxazol, Acetyl-Sulfamethoxazol.

(7/23) Mikroschadstoffen zu > 80 % eliminiert (Kläranlage + PF): /.

(19/23) Mikroschadstoffen zu > 80 % eliminiert

(Kläranlage + PF + Bodenfilter): AMPA, Atenolol, Benzotriazol, Bezafibrat, Carbendazim, Clarithromycin, Diclofenac, Glyphosat, Lidocain, Metoprolol, Terbutryn, Tolyltriazol.

Abbauresistente Mikroschadstoffe

Amidotrizoessäure, Carbamazepin, Sucralose, TCP.

ANMERKUNGEN

Durch die Erhöhung des Molverhältnisses des Chelatbildners wurde die Wirksamkeit des Photo-Fenton-Prozesses deutlich verbessert. Der Komplex war stabiler, das Eisen konnte gelöst bleiben und war für die Reaktion verfügbar; dementsprechend wurden mehr OH-Radikale gebildet.

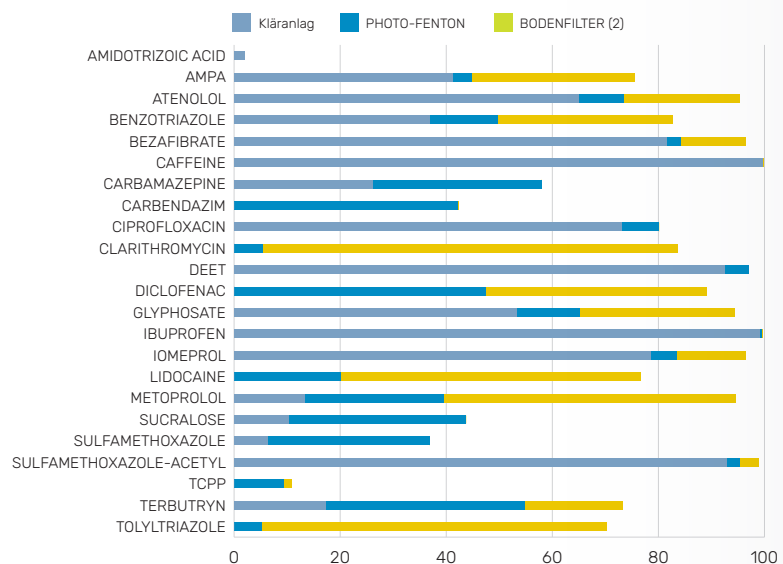
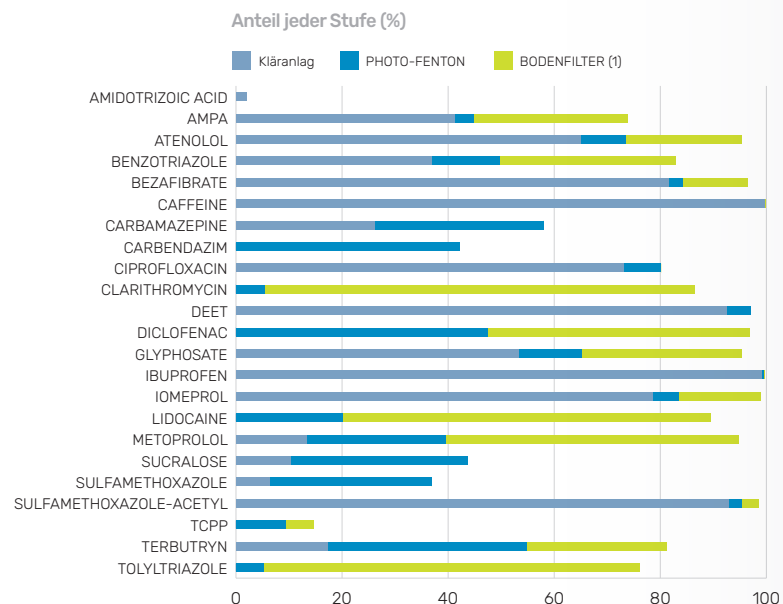
Zu den Mikroschadstoffen

Keine Elimination bei Amidotrizoessäure

Clarithromycin, Diclofenac und Terbutryn wurden grundsätzlich durch den Photo-Fenton-Prozess eliminiert (30 %).

Der Bodenfilter war von entscheidender Bedeutung für die Elimination von Carbendazim, Lidocain und Tolyltriazol.

Ergebnisse der Mikroschadstoffelimination bei der Kombination Photo-Fenton (UV/H₂O₂) + Bodenfilter. (oben) Bodenfilter 1 - (unten) Bodenfilter 2



BETRIEBSZEITRAUM

August bis Oktober 2022

ANZAHL DER DURCHGEFÜHRTEN KAMPAGNEN

4 (davon 2 intensiv)

BETRIEBS-PARAMETER

Photo-Fenton

H₂O₂ : 20 mg/l

UV: effektive Leistung
der Lampe von 16 W,
Gesamtenergie von 48 W

Durchsatz : 19m³/Tag

Bodenfilter

405 l/m²*d mit drei
Beschickungen pro Tag,
an einem von zwei Tagen.

Beschickung mit 4,5 l/
min für 60 Minuten in
8-stündigem Intervall,
danach 24 h Pause.

EFFIZIENZ

Makroschadstoffe

CSB

Reduzierung gemessen, jedoch nicht signifikant.

N/P

Nitrifizierende mikrobielle Aktivität vorhanden, signifikante
reduzierung von Phosphor.

Mikroschadstoffe

Wiederholbarkeit zwischen Bodenfiltern : ja.

(5/23) Mikroschadstoffen zu > 80 % eliminiert

(Kläranlage): Bezafibrat, Koffein, DEET, Ibuprofen, Acetyl-
Sulfamethoxazol.

**(7/23) Mikroschadstoffen zu > 80 % eliminiert (Kläranlage +
PF)**: Ciprofloxacin, Iomeprol

(13/23) Mikroschadstoffen zu > 80 % eliminiert

(Kläranlage + PF + Bodenfilter): Atenolol, Benzotriazol,
Clarithromycin, Diclofenac, Glyphosat, Metoprolol.

Abbauresistente Mikroschadstoffe

Amidotrizoesäure, AMPA, Carbamazepin, Carbendazim, (Lidocain),
Sucralose, Sulfamethoxazol, TCCP, (Terbutryn), Tolyltriazol

ANMERKUNGEN

Ohne Eisen ist die Wirksamkeit der Elimination höher als mit
Zitronensäure 1:1, aber geringer als mit Zitronensäure 1:2. Damit
bestätigt sich, dass das Verhältnis 1:1 nicht stabil ist und dass die
Fällung des Eisens den Prozess
behindert. Durch das Entfallen
der Eisenzugabe wurde der
Behandlungsvorgang vereinfacht
und auch die Kosten wurden
gesenkt.

Die Amidotrizoesäure wurde mit
UV/H₂O₂ geringfügig eliminiert,
damit wurde eine Elimination im
Bodenfilter möglich.

Auch hier: Die Filter spielten die
wichtigste Rolle.

Das Abwasser enthielt
eine große Menge an
Bikarbonaten (> 120 mg/l),
die OH-Radikalfänger
sind. Eine Möglichkeit zur
Steigerung der Wirksamkeit
wäre die Umsetzung des
Prozesses mit einem sauren
pH-Wert, durch den die
Karbonate reduziert und
die Löslichkeit des Eisens
gewährleistet werden.

Synergieeffekte – Phosphor

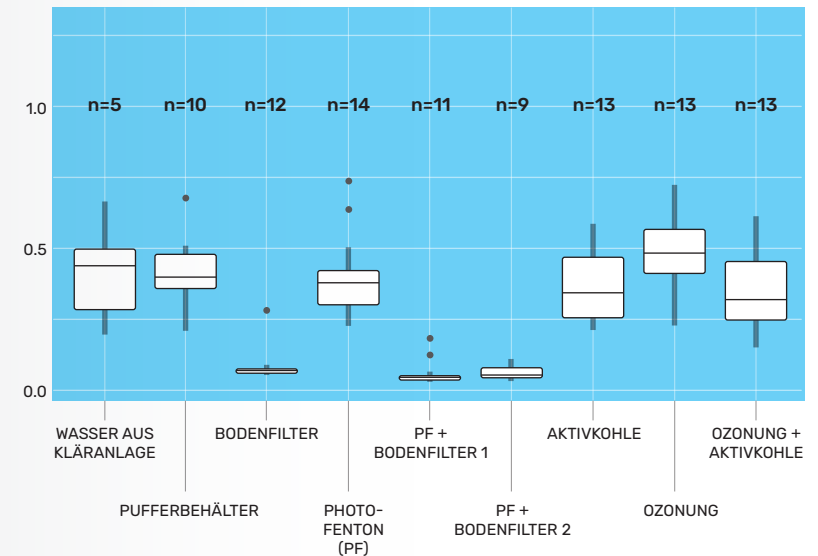
Die untersuchten Technologien ermöglichen nicht nur die Elimination der Mikroschadstoffe, sondern auch von Makroschadstoffen wie Phosphor und Stickstoff.

Während Ozon und GAK keine Wirkung zur Reduzierung dieser Makroschadstoffe zeigen, sorgen die Bodenfilter durch den Aufwuchs von Bakterien an den Wurzeln und das Filtersubstrat für eine Verbesserung der Qualität des Wassers, das in den Vorfluter eingeleitet wird.

Außerdem können bei allen untersuchten Technologien mit einer Nachfilterstufe Partikel und durch biologischen Abbau der lösliche Anteil der Verunreinigung entfernt werden (nur bei Anlagen mit Bodenfiltern gemessen).

Gesamtphosphor

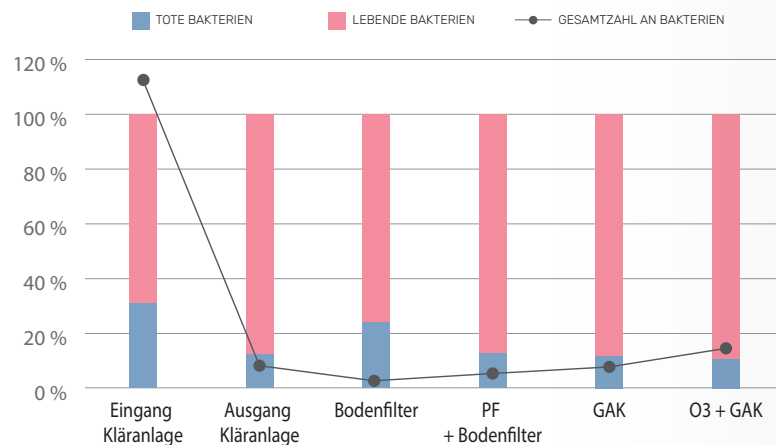
P-ges [mg/l]



Synergieeffekte – Keime

Der zweite untersuchte Effekt ist die Auswirkung auf die Keime bei der Behandlung des Wassers mit verschiedenen Technologien. Hierzu haben wir die Durchflusszytometrie und die qPCR eingesetzt.

Mit der Durchflusszytometrie kann die Gesamtzahl an Bakterien in einer Probe und der Anteil lebender und toter Bakterien ermittelt werden.



Die Bakterienmenge nimmt zwischen Zu- und Ablauf der Kläranlage stark ab, erwartungsgemäß mit einem größeren Anteil lebender Bakterien.

Durch eine Zusatzbehandlung ändert sich weder die Menge noch der Anteil lebender Bakterien vor der Einleitung in den Vorfluter in signifikantem Maße. Die Erhöhung der Gesamtzahl an Bakterien in den GAK-Stufen ist vermutlich eine Folge der frühzeitigen Bildung eines Biofilms auf der Aktivkohle (Ansammlung der Bakterien aus dem Abwasser der Kläranlage und keine Abdeckung der Säulen bei dem Test).

Bei der qPCR wurden sieben Resistenzgene für die sieben Haupt-Antibiotikaklassen ausgewählt (Fluorchinolon, Makrolid, Sulfonamid und Cyclin). Zur Bestimmung der Gesamtzahl an Bakterien wurde 16S rRNA in der Probe quantifiziert. Das Gen Intron 1a wurde ebenfalls bestimmt, um die Gentransferfähigkeit (auch von Resistenzgenen) zwischen Bakterien zu beurteilen.

Antibiotikum	Antibiotikaklasse	Resistenzgen
Amoxicillin	Penizilline → β -lactam	blaAmpC
Ciprofloxacin	Fluorchinolon	qnrA
Azithromycin	Makrolid	ermB
Clarithromycin		
Anhydro-Erythromycin A		
Erythromycin		
Sulfamethoxazol	Sulfonamid	sul1 et sul2
Tetracyclin	Cyclin	tetW

Im Betriebszeitraum der Demonstrationsanlage konnte mit den additiven Behandlungsstufen die Menge an Resistenzgenen in dem von der Kläranlage gereinigten Abwasser verringert werden (mit Ausnahme der Gene sul1 & 2 und int1 in der Linie nur mit Bodenfilter).

Das bedeutet, dass die additiven Reinigungsstufen unter den Testbedingungen die Entwicklung antibiotikaresistenter Bakterien nicht begünstigen.

Allerdings sollten die Keime unbedingt weiter überwacht werden, um die Effizienz über die gesamte Lebensdauer der Substrate hinweg zu beurteilen (Bodenfilter und Aktivkohle).

Behandlungstechnologien

Übersichtstabelle

	GAK	Ozon + GAK	Bodenfilter	Photo-Fenton + Bodenfilter
Marktreife der Technologie	Auf dem Markt erhältlich			In Entwicklung
Kapazität der Kläranlage	Mittelgroß bis groß		Klein bis mittelgroß	
Flächenbedarf	Gering	Gering	Hoch	Hoch
Spezielle Qualifikation des Personals	Nein	Ja	Nein	Ja
Komplexität des Betriebs	Einfach	Mittel	Einfach	Mittel bis hoch
Entstehung von Nebenprodukten	Nein	Ja	Nein	?
Investitionskosten (CAPEX)	(Vorfiltration) / Säulen / Pumpen / GAK / Drucksensor	(Vorfiltration) / Ozoneinheit (mit O ₃ -Generator, Reaktions säule, O ₃ -Vernichter, O ₃ -Sensor) / CAPEX GAK	Substrate / Pflanzen / Pumpen	Photo-Fenton-Einheit (mit Pumpen, Pufferbehälter, Lampen und Dosierstationen) + CAPEX Bodenfilter
Betriebskosten (OPEX)	Reaktivierung GAK / Strom / Wasser (BW)	Reinsauerstoff Strom Ozongenerator + OPEX (GAK)	/	Reagenzien (H ₂ O ₂ + Fe + Chelatbildner) / UV-Lampen

Effizienz

Makroschadstoffe

	GAK	Ozon + GAK	Bodenfilter	Photo-Fenton + Bodenfilter
CSB	Kein signifikanter Unterschied			
Stickstoff	Kein signifikanter Unterschied		Nitrifikation in Bodenfiltern – keine Elimination des Gesamtstickstoffs	
Phosphor	Kein signifikanter Unterschied		Elimination in Bodenfiltern	
Keime	Untersuchte Stufen begünstigen nicht die Entwicklung resistenter Bakterien (im Rahmen des Tests)			

Effizienz

Mikroschadstoffe

	GAK	Ozon + GAK	Bodenfilter	Photo-Fenton + Bodenfilter
Nicht quantifizierte Mikroschadstoffe in Rohwasser	Diuron, Beta-Estradiol, Estron, Ethinylestradiol, Flufenacet, Isoproturon, PFOS			
In Kläranlage eliminierte Mikroschadstoffe (> 80 %)	Koffein, Ciprofloxacin, DEET, Glyphosat, Ibuprofen, Acetyl-Sulfamethoxazol			Koffein, Ciprofloxacin, DEET, Ibuprofen, lomeprol, Sulfamethoxazol, Acetyl-Sulfamethoxazol
Durch Zusatzbehandlung eliminierte Mikroschadstoffe (> 80 %)	Amidotrizoessäure, Atenolol, Benzotriazol, Bezafibrat, Carbamazepin, Clarithromycin, Diclofenac, Iomeprol, Lidocain, Metoprolol, Sucralose, Sulfamethoxazol, Terbutryn, Tolytriazol	AMPA, Atenolol, Benzotriazol, Bezafibrat, Carbamazepin, Clarithromycin, Diclofenac, Iomeprol, Lidocain, Metoprolol, Sulfamethoxazol, Terbutryn, Tolytriazol	AMPA, Atenolol, Benzotriazol, Clarithromycin, Diclofenac, Iomeprol, Lidocain, Metoprolol, Terbutryn, Tolytriazol	/ ----- AMPA, Atenolol, Benzotriazol, Bezafibrat, Carbendazim, Clarithromycin, Diclofenac, Glyphosat, Lidocain, Metoprolol, Terbutryn, Tolytriazol
Abbauresistente Mikroschadstoffe (< 80 %)	AMPA, Carbendazim, TCP	TCP	Amidotrizoessäure, Carbamazepin, Carbendazim, Sucralose, Sulfamethoxazol, TCP	Amidotrizoessäure, Carbamazepin, Sucralose, TCP

Quellennachweis

Venditti, S., Brunhoferova, H., Hansen, J., 2022.

Behaviour of 27 selected emerging contaminants in vertical flow constructed wetlands as post-treatment for municipal wastewater. *Sci. Total Environ.* 819, 153234.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153234>

<https://micropoll.ch>

<https://comingreat.eu>



Erstellt im Rahmen des Projekts CoMinGreat

Competence platform for **M**icropollutants **i**n the **G**reater Region

