

Großtechnische Versuche zur Elimination von Spurenstoffen auf der Kläranlage Harsewinkel

A solid orange square is positioned on the right side of the page, partially overlapping the main title area.

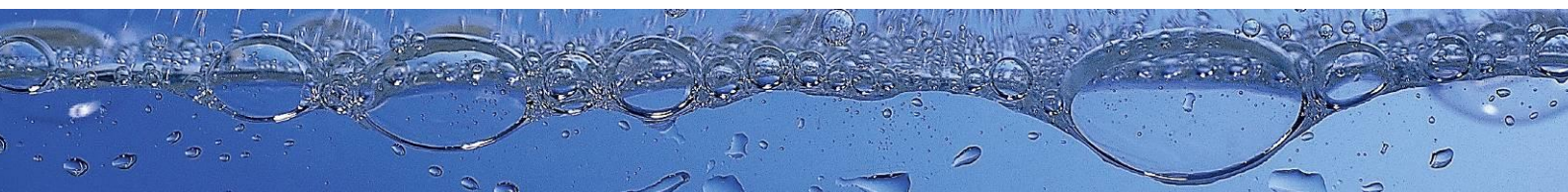
Einsatz granulierter Aktivkohle

Projektergebnisse im Rahmen des Zuwendungsbescheids
A-01/13-HA der Bezirksregierung Detmold

März 2015

Stadt Harsewinkel

Heinz Austermann



Antragsteller:

Stadt Harsewinkel

FG.3.2

Münsterstraße 14
33419 Harsewinkel

Heinz Austermann
Telefon: 05247 935-168

heinz.austermann@gt-net.de

Betriebsleiter Heiner Roderfeld
Telefon: 05247 409008

abwasserbetrieb@harsewinkel.de

Projektbeteiligte

Bezirksregierung Detmold

Leopoldstr. 15
32756 Detmold
www.bezreg-detmold.nrw.de

Regierungsbauoberamtsrat
Thomas Sürder
Telefon: 05231 715487
thomas.suerder@bezreg-detmold.nrw.de

ATEMIS GmbH

Technologiezentrum am Europaplatz
Dennewartstraße 25-27
52068 Aachen
www.atemis.net

Dipl.-Ing. Frank Schlösser
Telefon: 0241 9631-892
schloesser@atemis.net

Hydro-Ingenieure Planungsgesellschaft für Siedlungswasserwirtschaft mbH

Stockkampstraße 10
40477 Düsseldorf
www.hydro-ingenieure.de

Dipl.-Ing. Klaus Alt
Telefon: 0211 44991-55
Klaus.Alt@hydro-ingenieure.de

IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gemeinnützige GmbH

Moritzstraße 26
45476 Mülheim an der Ruhr
www.iww-online.de

Dr.-Ing. Andreas Nahrstedt
Telefon: 0208 40303-330
a.nahrstedt@iww-online.de

Zur besseren Lesbarkeit wird nicht zwischen weiblichen und männlichen Berufsbezeichnungen unterschieden; es sind immer beide Geschlechter gleichberechtigt angesprochen.

[IWW\Abschlussbericht KA-Harsewinkel-final.docx](#)

31.03.2015

Geschäftsführung:
Dr.-Ing. Wolf Merkel

Wissenschaftliches Direktorium:
Prof. Dr. Torsten C. Schmidt (Sprecher), Prof. Dr. Stefan Panglisch
Prof. Dr. Andreas Hoffman, Prof. Dr. Christoph Schüth



Amtsgericht Duisburg HRB Nr. 14699
Sparkasse Mülheim an der Ruhr IBAN DE73 3625 0000 0300 0930 19
SWIFT BIC SPMHDE3E
Commerzbank AG Mülheim an der Ruhr IBAN DE30 3624 0045 0762 6310 00
SWIFT BIC COBADEFFXX
Internet: www.iww-online.de

Danksagung

Alle Projektbeteiligten bedanken sich für die Projektförderung in Form einer Zuwendung durch das Land NRW (MKULNV-NRW) sowie für die fachliche und administrative Unterstützung durch die Bezirksregierung Detmold (Zuwendungsbescheid A-01/13-HA).

Zusammenfassung der Ergebnisse und Empfehlungen

- Auf der kommunalen Kläranlage (KA) der Stadt Harsewinkel wurde ein einzelner großtechnischer Filter des Anlagenbestandes (Filterstufe mit 14 Einzelfiltern) so umgerüstet, dass er mit granulierter Aktivkohle im Abstrom als Adsorber betrieben werden konnte. In der Verfahrensfolge wurde er allen bestehenden Verfahrensstufen der KA nachgeschaltet, d. h. mit dem Ablauf der Flockungsfiltration beschickt.
- Parallel zu diesem großtechnischen Adsorber (GA, Betthöhe 2,3 m; Filterfläche 7,1 m²; Filtrationsgeschwindigkeit 3,5 m/h; Leerbettkontaktzeit 40 min) wurde ein kleintechnischer Adsorber mit gleicher Betthöhe (KA, Betthöhe 2,3 m; Filterfläche 0,028 m²; Filtrationsgeschwindigkeit 7 m/h, Leerbettkontaktzeit 20 min) betrieben.
- Auf der Basis von zwei Probenahmen und einem breit gefassten Spurenstoffscreening im Vorfeld der Adsorptionsversuche fand die Stoffauswahl für das Monitoring der Zulauf- und Filtratqualität von GA und KA für eine Filterlaufzeit von gut 8 Monaten statt.
- Während im Filtrat des Kleinadsorbers von Beginn an ein linearer Anstieg der CSB-Konzentration von 5 auf etwa 15 mg CSB/l zu beobachten war (Zulaufkonzentration: 15 bis 30 mg CSB/l), lag die CSB-Konzentration im GA-Filtrat für mehr als zwei Wochen unter der Nachweisgrenze von 5 mg/l. Der nachfolgende CSB-Anstieg beider Adsorber erfolgt etwas zeitversetzt in recht analoger Verlaufsform, wobei der Konzentrationsanstieg des KA voraneilt. Erst nach 4.000 bis 5.000 durchgesetzten Bettvolumina (BVT) weicht die Kurvenform beider CSB-Filtratkonzentrationen voneinander ab: Der CSB des KA-Filtrats mit Werten im Bereich von etwa 10 bis 20 mg CSB/l schmiegt sich ab diesem Status mehr und mehr in einem Abstand von etwa 3 bis 5 mg CSB/l an die Zulaufkonzentrationen an.
- Bis zum 16.12.2014, d. h. nach gut 8 Monaten Laufzeit, erreicht die Aktivkohle des KA nach Aufbereitung von 19.150 BVT eine Beladung von ca. 380 g CSB/kg; die Aktivkohle des GA erzielt nach 8.350 BVT und einer noch beachtlichen „Laufreserve“ eine Beladung von ca. 280 g CSB/kg Aktivkohle.

- Nahezu alle untersuchten Spurenstoffe wurden in den ersten Betriebswochen vom GA vollständig eliminiert. Die überwiegende Anzahl der Spurenstoffe zeigen im Filtrat des GA einen Trend mit ansteigender Konzentration erst ab etwa November (nach einem Durchsatz von gut 4.700 BVT). Nur die Stoffe in der Gruppe der Röntgenkontrastmittel zeigen teilweise von Beginn an ansteigende Filtratkonzentrationen, die sich rasch den Zulaufkonzentrationen nähern; als Folge wurden diese Stoffe anschließend nicht mehr analysiert. Diclofenac und einige industriell gebräuchliche Stoffe (mit allerdings sehr hohen Konzentrationen im Adsorberzulauf wie bspw. TMDD oder die Benzotriazole) sind schon im Mai nach nur 1.700 BVT oder ab Juli mit anwachsenden Konzentrationen im Filtrat vertreten.
- Beim KA sind diese Effekte infolge des höheren Volumenstroms zeitlich etwas eher festzustellen. So sind Diclofenac und die Röntgenkontrastmittel bereits von Beginn an im Filtrat zu detektieren. Für die meisten der untersuchten Spurenstoffe wird aber auch noch anlässlich der Probenahme im Dezember d. h. nach einer Aufbereitungsmenge von 18.770 BVT noch eine maßgebliche Elimination erwirkt! Die über die Frachtsumme aller erfassten Spurenstoffe bilanzierte mittlere Elimination beträgt zu diesem Zeitpunkt immerhin noch gut 70 % (nach 14.400 BVT werden sogar noch über 80 % erzielt)!
- Die mittlere über die Frachtsumme aller Spurenstoffe bilanzierte Elimination des GA klingt mit den durchgesetzten Bettvolumina der höheren Leerbettkontaktzeit entsprechend langsamer ab.
- Die Einzelschritte des Spülprogramms und die Spülparameter wurden so effektiv und dennoch sanft gewählt, dass die periodisch notwendigen Spülungen der Adsorber aus praktischer Sicht keine negativen Auswirkungen auf das Adsorptionsverhalten zeigen.
- Das betreuungsarme Betriebsverhalten inklusive die hydraulische Erstbefüllung des Großadsorbers mit Aktivkohle war im gesamten Untersuchungszeitraum absolut störungsfrei und somit praxistauglich für den Alltagsbetrieb der KA.
- Als Fazit der Untersuchungen wurden folgende Empfehlungen für die Auslegung einer zukünftigen Verfahrensstufe zur Spurenstoffelimination abgeleitet:
 - Adsorptionsstufe bestehend aus 4 GAK-Filtern in Druckkesselbauweise, die der Flockungsfiltration nachgeschaltet im Abstrom betrieben werden
 - Unterbringung der Adsorptionsstufe in einer neu auf dem vorhandenen Betriebsgelände zu errichtenden Halle mit separater Spülwasserbevorratung. Die Halle bietet zudem Reservestellplatz für 2 weitere GAK-Filter (optional).

- Es wurde für die Bemessung des GAK-Betts der Filter eine mittlere Leerbettkontaktzeit von 44 min (minimale Leerbettkontaktzeit von 32 min für einen maximalen Volumenstrom von 300 m³/h) zu Grunde gelegt.
- Eine solche Verfahrensstufe wäre auf dem bestehenden Betriebsgelände der KA mit einer Investitionssumme von knapp 1,8 Mio € (brutto) realisierbar.
- Der daraus erwachsende jährliche Kapitaldienst läge bei gut 106.000 €/a, welcher zusammen mit den Betriebskosten für Personalbedarf, Energie, Betriebsmitteln (Aktivkohle) und Unterhalt/Sonstiges zu jährlichen Gesamtkosten von gut 239.000 €/a (brutto) führen würde. Die Aktivkohle hätte daran einen Anteil von etwa 79.000 €/a (brutto) bei einem GAK-Austausch nach einem Filtratdurchsatz je Filter von ca. 14.000 BVT.
- Die spezifischen Gesamtkosten des Verfahrens je Kubikmeter aufbereiteten Wassers liegen bei etwa 12,6 Cent/m³ (brutto, ohne Fördermittel) aufbereitetes Wasser.
- Auf der 4. Sitzung des Betriebsausschusses des KA-Betreibers am 04.02.2015 wurde beschlossen, auf der Basis dieser Empfehlungen den Bau einer Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination mit granulierter Aktivkohle auszuschreiben.

Die Berichtsversion als .pdf ist nicht unterschrieben. Bitte vergleichen Sie im Zweifelsfall das unterschriebene Original.

IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für
Wasserforschung gemeinnützige GmbH

Mülheim an der Ruhr

i.V.

Dr.-Ing. W. Merkel

Dipl.-Ing. A. Nahrstedt

Hydro-Ingenieure GmbH

ATEMIS GmbH

Dipl.-Ing. Klaus Alt

Dipl.-Ing. Frank Schlösser



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Hintergrund	1
1.1	Ziel des Projekts	1
1.2	Auftrag und Projektdurchführung	3
2	Anlagenumbau und verfahrenstechnische Randbedingungen	4
2.1	Verfahrenstechnische Ausgangssituation	4
2.2	Umrüstung von Filter 9 zum Großadsorber (GA)	6
2.3	Bemessung der Hauptkomponenten des Großadsorbers (GA)	10
2.4	Spülprogramm des Großadsorbers	11
2.5	Kleinadsorber (KA) im Pilotmaßstab	12
2.6	Befüllung der Filter mit GAK	15
3	Verfahrensparameter der Adsorber	15
3.1	Charakterisierung der frischen granulierten Aktivkohle	18
4	Analytik	18
4.1	Analytik für Standardparameter der Abwasserreinigung	18
4.2	Analytik für ausgewählte organische Spurenstoffe	19
5	Messergebnisse	22
5.1	Messergebnisse für die Standardparameter	22
5.2	Messergebnisse für die organischen Spurenstoffe	29
5.2.1	Vorbemerkung zur gewählten Darstellung	29
5.2.2	Messergebnisse für den Kläranlagenablauf (Zulauf der Adsorber)	30
5.2.3	Messergebnisse für den Großadsorber (GA)	34
5.2.4	Messergebnisse für den Kleinadsorber (KA)	45
5.3	Vergleich der mit dem GA und KA erzielten Spurenstoffelimination	57
5.4	Vergleich der erzielten Spurenstoffelimination im Kontext anderer Festbettadsorber zur weitergehenden Abwasserreinigung	58
6	Betriebspraxis der Adsorber im Arbeitsalltag	61
...		



7	Kosten	62
7.1	Auslegungsgrundlagen und Investitionskosten	62
7.2	Betriebskosten	63
7.2.1	Ansatz der Einzelpositionen	63
7.2.2	Bemessung der Einzelpositionen	64
7.3	Jährliche Gesamtkosten	65
8	Literatur	66
9	Glossar	68
10	Anhang	69

1 Einleitung und Hintergrund

1.1 Ziel des Projekts

Die Stadt Harsewinkel betreibt die Kläranlage Harsewinkel mit einer derzeitigen Ausbaugröße von 57.000 EW, die aus einer mechanisch-biologischen Reinigungsstufe mit anschließender Flockungsfiltration besteht. Dem 1-straßigen Sandfang folgen eine 1-straßige Vorklä- rung und zwei belüftete Umlaufbecken mit vorgeschalteter Denitrifikationsstufe. Das Ge- samt volumen der Nitrifikation und Denitrifikation beträgt 11.500 m³. Dem Ablauf der zwei runden Nachklärbecken wurde zwecks chemischer Phosphorelimination eine Flockungsfiltra- tion (14 Filter je 7,1 m² Filterfläche, Fa. Preussag, Baujahr 1995) nachgeschaltet. Der Vorflut- ter, in den eingeleitet wird, ist der südlich des Klärwerks verlaufende Abrooksbach, ein Ne- benfluss der Ems.

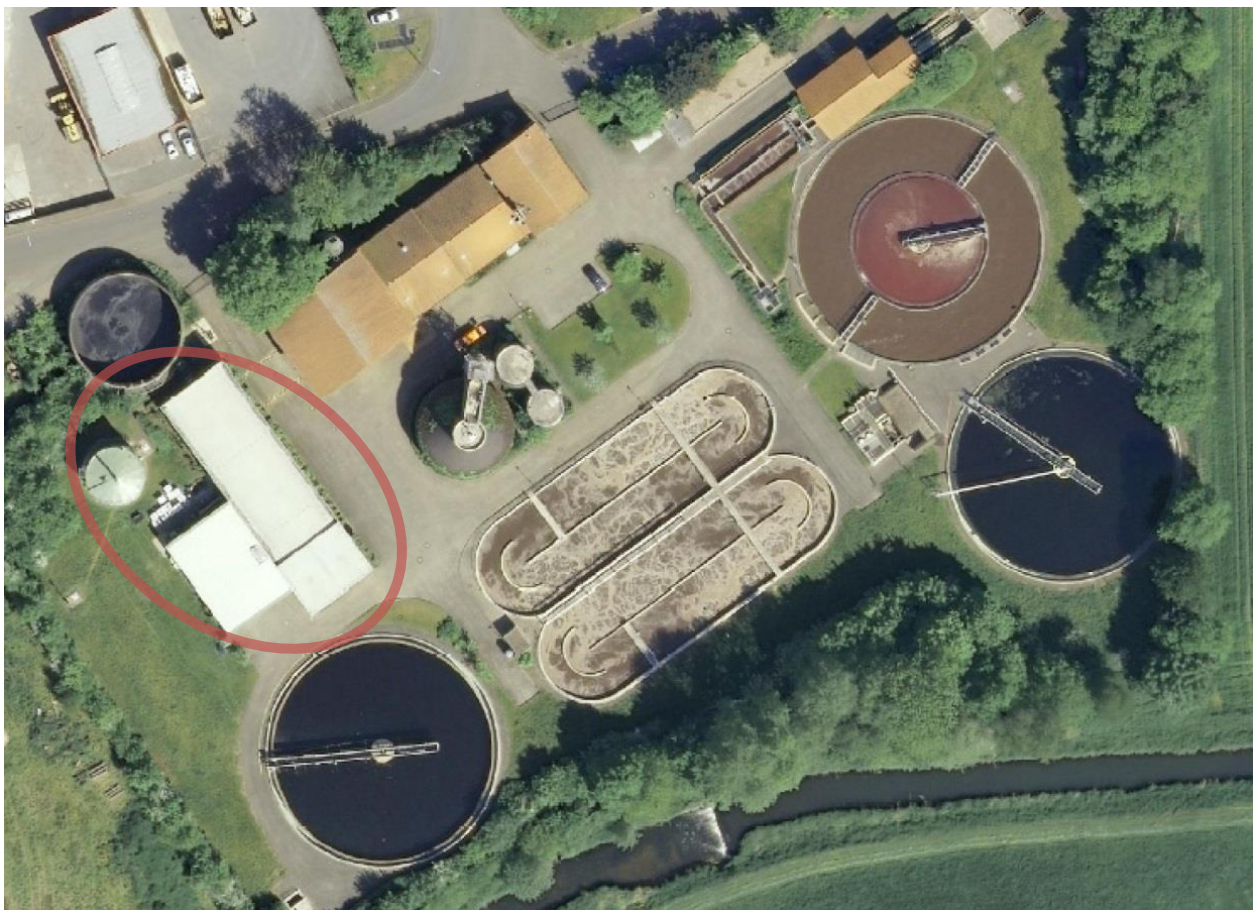


Abbildung 1: Luftbild der Kläranlage Harsewinkel mit Flockungsfiltrationsstufe (0)

Die Stadt Harsewinkel strebt eine weitergehende Abwasserreinigung durch den Einsatz von Aktivkohle auf der Kläranlage Harsewinkel an. Hierzu wurde von der Hydro-Ingenieure GmbH im November 2012 eine Machbarkeitsstudie unter der Projektbezeichnung „Einsatz von Aktivkohle/Alternative Verfahrenstechniken“ erstellt. Die Ergebnisse aus der Machbarkeitsstudie 2012 wurden hinsichtlich des Beschlusses der Betriebsausschusssitzung vom 28.11.2012 im Rahmen des 1. Projektgespräches wie folgt zusammengefasst:

- In der Machbarkeitsstudie wurden die Varianten 3 (Granulierte Aktivkohle, GAK, im vorhandenen Filter) und 4 (Ozonanlage) hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit zur Betrachtung im Rahmen eines großtechnischen Versuches empfohlen.
- Im Rahmen der Ausschusssitzung wurde einstimmig für die Variante 2 (GAK in nachgeschalteten Druckkesseln, 1-stufig) zur Untersuchung gestimmt (höchste Investkosten). Sollte der großtechnische Versuch erfolgreich im Hinblick auf die Spurenstoffelimination durchgeführt werden können, würde ein darauf folgender Förderantrag aber die Variante 2 (GAK in Filterkessel in einer neben der Filteranlage liegenden Halle) beinhalten zum Umbau/zur Anpassung der Kläranlage Harsewinkel.

Aufbauend auf die Ergebnisse der Machbarkeitsstudie sollte daher innerhalb dieses Projektes ein vorhandener Filterkessel der Verfahrensstufe zur Flockungsfiltration so umgerüstet und mit GAK gefüllt werden, dass ein großtechnischer Versuch zur Elimination von Spurenstoffen durchgeführt werden kann. Hierzu wurde an die Bezirks-Regierung Detmold ein Förderantrag gestellt, welchen diese mit Schreiben vom 16.12.2013 bewilligte.

Als erste Ziele lassen sich folgende Aspekte bzw. die Beantwortung verschiedener Fragen zusammenfassen:

- Ermittlung der erreichbaren Reinigungsleistung der granulierten Aktivkohle im Hinblick auf verschieden Spurenstoffparameter,
- Ermittlung der Bettvolumenwerte (BVT) bis zum Durchbruch / bis zur möglichst weitgehenden Ausnutzung der Beladungskapazitäten,
- Konkretisierung der Betriebskosten in Abhängigkeit der Bettvolumenwerte sowie
- Bewertung der Wirtschaftlichkeit/der Jahreskosten einer Lösung für den Endausbau mit granulierter Aktivkohle.

1.2 Auftrag und Projektdurchführung

Die Hydro-Ingenieure GmbH wurde mit Schreiben vom 21.02.2014 von Seiten der Stadt Harsewinkel beauftragt, die Projektleitung und fachtechnische Begleitung zur Durchführung des großtechnischen Versuchs zum Einsatz von granulierter Aktivkohle auf der Kläranlage durchzuführen.

Die Projektdurchführung des Pilotversuches ist unter Beteiligung folgender Partner mit jeweils beschriebenen Aufgaben realisiert worden:

- Atemis GmbH Aachen – technische Planung des Umbaus des vorhandenen Druckkessels und u.a. zugehörige Abschätzung der Investkosten der Endausbaulösung
- IWW Mülheim an der Ruhr – wissenschaftliche Begleitung des Pilotversuches und Erstellung des Abschlussberichts
- BR Detmold – fachliche Begleitung und Abstimmung des gesamten Versuchskonzeptes aus Sicht der Aufsichtsbehörde
- Jacobi Frankfurt – Beratung innerhalb des Projektes aus dem Blickwinkel des Aktivkohlelieferanten

Durch regelmäßige Projekt- und Abstimmungsgespräche im Projektverlauf wurden die wesentlichen Fragestellungen der Versuchskonzeption und die Diskussion der jeweiligen Versuchsergebnisse durchgeführt (1. Projektgespräch vom 24.02.2014, 2. Projektgespräch vom 18.03.2014, 3. Projektgespräch vom 04.07.2014, 4. Projektgespräch vom 04.09.2014, 5. Projektgespräch vom 16.12.2014).

2 Anlagenumbau und verfahrenstechnische Randbedingungen

2.1 Verfahrenstechnische Ausgangssituation

Insgesamt stehen in der Filterhalle 14 Filterbehälter in zwei Reihen für die Flockungsfiltration zur Verfügung (siehe Foto der Filterhalle in Abbildung 2 und Foto von einer der beiden Filterstraßen in Abbildung 3). Die Filterbehälter werden über eine zentral angeordnete Beschickungsleitung aus dem Rohwasserspeicher (R+I Schemata siehe Anhang 1) beschickt. Das filtrierte Abwasser wird über eine gemeinsame Ablaufsammelleitung in den Reinwasserspeicher und von dort im Überlauf in die nachgeschalteten Schönungsteiche abgegeben. Aus dem Reinwasserspeicher heraus erfolgt die Entnahme des Spülwassers zur Rückspülung der Flockungsfilter. Das anfallende Spülabwasser wird ebenfalls über eine Sammelleitung gefasst und in einen Schlammwasserspeicher abgegeben.

Die Schlammbehandlung auf der Kläranlage Harsewinkel besteht aus einem Voreindicker, einem Faulbehälter zur anaeroben Schlammstabilisierung, einem Nacheindicker und der Schlammmentwässerung. Die Entsorgung des entwässerten Schlammes erfolgt zu 100 % im Landschaftsbau/Landwirtschaft.

Die Rohwasserbeschickungspumpen der Flockungsfiltration verteilen das vorgereinigte Abwasser auf die einzelnen Filter unter Berücksichtigung eines definierten Überstaus über dem Filterbett. Die Regulierung der Durchflussmenge der einzelnen Filter erfolgt über die vorhandenen magnetisch-induktiven Durchflussmesser (MID) im Ablauf der einzelnen Filter in Verbindung mit den jeweiligen Regelschiebern.

Die bestehenden Flockungsfilter sind als Zweischichtfilter bestückt und besitzen folgenden Filterbettaufbau (in Durchflussrichtung von oben nach unten, siehe Schnittzeichnung in Abbildung 4):

- Filterschicht I: Anthrazit der Körnung 1,4-2,5 mm
- Filterschicht II: Quarzsand der Körnung 0,71-1,25 mm
- Stützschicht I: Basaltkies der Körnung 2,5-5,6 mm
- Stützschicht II: Basaltkies der Körnung 7,1-12,5 mm

Die Filterbehälter sind als drucklose Filter in zylindrischer Betonbauweise mit Zuganker (siehe Abbildung 3) errichtet worden und besitzen einen Düsenboden zur Rückspülung. Die Schlitzweite der bestehenden Filterdüsen beträgt 0,50 mm. Das zulaufende Rohwasser wird über eine im Filter ansteigende Rohrleitung mit abschließendem Trichter (s.g. Tulpe) im Filter verteilt.



Abbildung 2: Filterhalle der Flockungsfiltration KA Harsewinkel



Abbildung 3: Blick auf eine der beiden Filterstraßen (je 7 Einzelfilter) der Flockungsfiltration

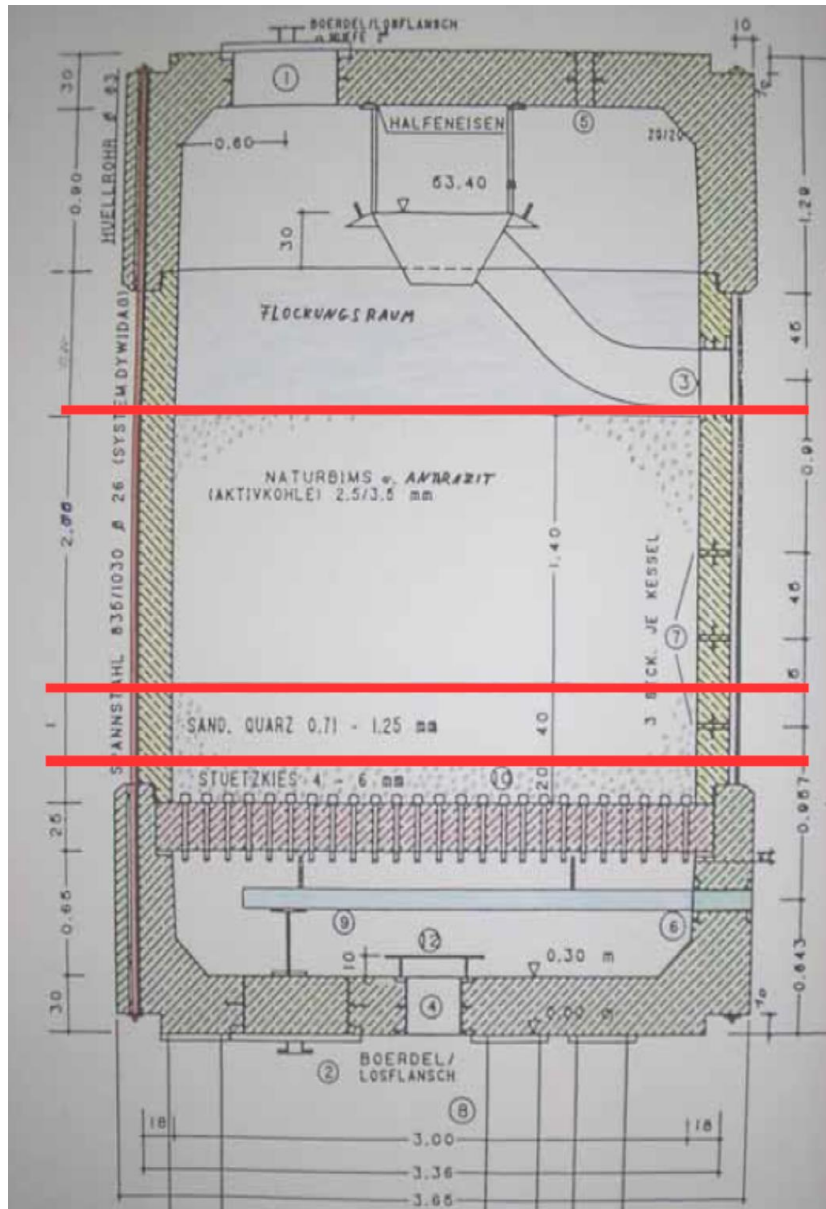


Abbildung 4: Filterquerschnittszeichnung mit ursprünglichem Betaufbau bei Fertigstellung im Jahr 1995 (ehemals Bims), der durch die im Kapitelanfang detailliert aufgeführten Materialien und Schütthöhen ersetzt wurde

2.2 Umrüstung von Filter 9 zum Großadsorber (GA)

Zur Durchführung des großtechnischen Versuchs für die Elimination von Spurenstoffen aus Kläranlagenablauf mittels granulierter Aktivkohle sollte einer der vorhandenen 14 Flockungsfilter auf der Kläranlage umgerüstet, d. h. das vorhandene Mehrschicht-Filtermaterial ausgebaut und gegen granulierte Aktivkohle ausgetauscht werden. Das Gesamtkonzept verdeutlicht das Fließschema der Abbildung 5.

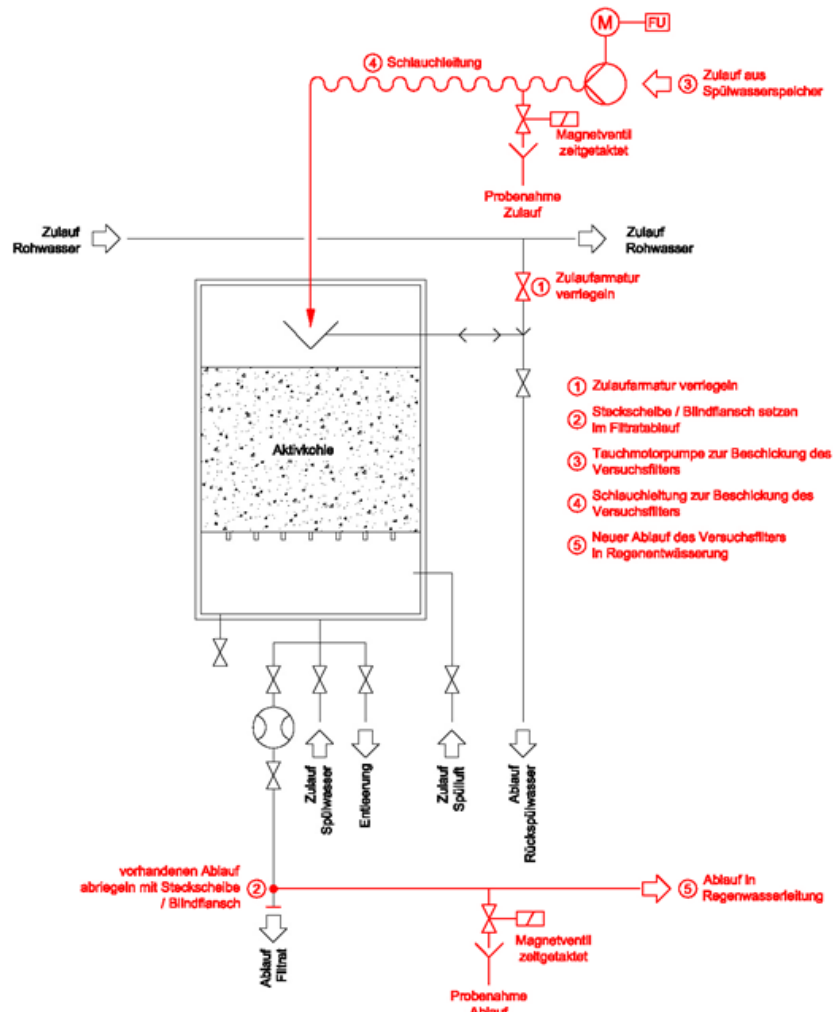


Abbildung 5: Fließschema des Umbaukonzeptes

Aufgrund seiner Anordnung in der Filterhalle und seiner Ausstattung wurde der Filter Nr. 9 für den großtechnischen Versuch und damit zur Umrüstung ausgewählt. Im Rahmen der gemeinsamen Besprechung am 24.02.2014 wurde festgelegt, dass der Versuchsfilter in Bezug auf den Rohwasserzulauf und den Filtratablauf hydraulisch von den übrigen Filtern abgekoppelt (Abkopplung der Reinwasserleitung) wird.

Die Beschickung des Versuchsfilters erfolgte mit Filtrat aus dem Spülwasserspeicher (bisheriger Zulauf Schönungsteich).

Für die Zuführung wurden die folgenden Varianten betrachtet:

- I. Zuführung durch Verlängerung bestehender Rohrleitungen und Verwendung von Regelventilen zur Mengenregulierung.
- II. Zuführung durch Einsatz einer neuen Förderpumpe und Bau einer neuen Beschickungsleitung für den Versuchsbetrieb.

Die Ausführung der Variante (I) wurde verworfen, da dadurch nicht sichergestellt werden kann, dass der Versuchsfilter einen vollständig durchmischten Filtratablauf aus den verbleibenden 13 Flockungsfiltern erhält. Die Realisierung der Variante (II) mittels neuer Tauchmotorpumpe und Frequenzumrichter bietet hier den Vorteil, dass die Filtrate der 13 Flockungsfilter zunächst über die bestehende Sammelleitung in den Filtratspeicher geleitet, vergleicht und dort das Sammelfiltrat für die Beschickung des Versuchsfilters wieder entnommen werden kann.

Das Rohwasser für die parallel betriebene Kleinfiltersäule (Adsorber im Pilotmaßstab) wurde ebenfalls aus dem Filtratspeicher entnommen, sodass hier identische und verlässliche Rahmenbedingungen für die Vergleichbarkeit der erhobenen Messdaten sorgen.

Für die Beschickung des Versuchsfilters bot sich der Einsatz einer Tauchmotorpumpe an, die von oben in den Spülwasserspeicher eingebracht werden kann. Dies hat gegenüber einer trocken in der Filterhalle aufgestellten Pumpe den Vorteil, dass der Wasserspeicher für die Rohrdurchführung nicht angebohrt werden musste. Die Einbringung konnte über eine vorhandene Einstiegs Luke vom Polymeransatzraum aus erfolgen. Die Beschickung des Filter Nr. 9 erfolgt mittels Schlauchleitung durch dessen oberes Mannloch direkt in die Filtertulpe hinein (siehe Abbildung 6).



Abbildung 6: Beschickung des Adsorbers mit Filtrat der Flockungsfiltration direkt vom oberen Mannloch aus in die Filtertulpe hinein

Im Zuge der ersten Projektbesprechung am 24.02.2014 wurde für die Befüllung des großtechnischen Versuchsfilters der Typ AquaSorb 5000 mit einer Korngröße von 8x30 mesh (0,60-3,16 mm) des Herstellers Jacobi Carbon beschlossen. Die Schlitzweite der vorhandenen Filterdüsen von 0,50 mm (siehe bestückter Düsenboden in Abbildung 7) wurde nach Aussage des IWW und nach Rücksprache mit dem Hersteller als ausreichend befunden, damit ein Durchtritt der Aktivkohle unter den Düsenboden trotz der sehr variablen Kornform verhindert wird: Nach dem Einbringen der Aktivkohle in den Filter, nach ihrer Benetzung und nach den ersten Spülvorgängen wird eine leichte Kornklassierung erzeugt, so dass der Feinkornanteil mehr und mehr in das obere Filterbett transportiert wird und nur das gröbere Korn unmittelbar auf den Düsenkörben verbleibt.



Abbildung 7: Blick auf den Düsenboden und die Luftpolsterdüsen mit zylindrischem Kopf und Schlitzweite 0,50 mm in Filter Nr. 9

Das Filtrat aus dem Versuchsfilter wurde wie bisher über die bestehende Ablaufleitung aus dem Filter abgegeben und mittels MID-Durchflussmesser und Ablaufregelschieber auf den Solldurchsatz eingeregelt. Um eine Vermischung mit den Filtraten der übrigen Filter zu verhindern, wurde die Filtratleitung des Großadsorbers hinter dem Regelschieber vom übrigen System getrennt und in die bestehende Regenentwässerungsleitung, die als HT-Rohrleitung DN 100 in der Filterhalle ausgeführt ist, abgeleitet.

Der Zulauf in den Versuchsfilter wird mit Hilfe eines eingebauten Magnetventils DN 15 beprobt, welches über einen definierten Zeitraum hinweg zeitgetaktet geöffnet wird, um z. B. 24-h-Mischproben zu entnehmen.

Hinsichtlich der Filterspülung wurde der Versuchsfilter aus dem automatischen Spülprogramm der Filterstufe herausgenommen und im Zuge des Versuchsbetriebs manuell gespült.

2.3 Bemessung der Hauptkomponenten des Großadsorbers (GA)

Die technischen Daten der gewählten Dimensionierung der wesentlichen Komponenten zur Umrüstung eines Flockungsfilters für die Spurenstoffelimination mit granulierter Aktivkohle sind:

■ Filterbehälter:	druckloser Betonbehälter
■ Innendurchmesser:	3,00 m
■ Filterfläche:	7,07 m ²
■ Höhe OK Tulpe - Höhe Düsenboden:	3,05 m
■ Filterbetthöhe:	2,30 m
■ Gesamtfreibord:	0,75 m
■ Expansionsfreibord:	0,46 m
■ Sicherheitsfreibord:	0,29 m
■ GAK-Bettvolumen:	16,3 m ³

Die Filtergeschwindigkeit (Leerrohrgeschwindigkeit) für den Versuchsbetrieb wurde mit $v_f = 3,5 \text{ m/h}$ festgesetzt. Mit der angesetzten Filtergeschwindigkeit ergibt sich aus der Filterfläche der durchgesetzte Volumenstrom des Großadsorbers im Versuchsbetrieb:

$$Q_{zu} = 3,5 \text{ m/h} \cdot 7,07 \text{ m}^2 = 24,7 \text{ m}^3/\text{h} \quad \rightarrow \quad \text{gewählt: } Q_{zu, \max} = 25,0 \text{ m}^3/\text{h}$$

Für die Bemessung der erforderlichen Leitungsquerschnitte für die Beschickungsleitung wurde eine Fließgeschwindigkeit von $v = 2,0 \text{ m/s}$ angesetzt. Unter Berücksichtigung dieser Fließgeschwindigkeit und einem Durchsatz von $25,0 \text{ m}^3/\text{h}$ ergibt sich der erforderliche Leitungsquerschnitt für die Beschickungsleitung zu $d = 66,5 \text{ mm}$. Unter Berücksichtigung der nach ISO 4200 abgestuften Rohrdurchmesser für Edelstahlrohrleitungen sind Rohrleitungen und Formstücke mit folgender Nennweitenangabe zu verwenden:

DN 65/2,5"/76,1 x 1,6 mm

Der resultierende Innendurchmesser beträgt somit 72,9 mm.

Bei Schlauchleitungen sind Nennweiten in Zollabmessungen gebräuchlich. Hier liegt der Innendurchmesser bei 3"-Schläuchen bei 75,0 mm. Als zugehörige Schlauchkupplung ist beim Typ Storz die Größe Storz B/75 geeignet.

Neben der Durchsatzleistung war die Förderhöhe zur Auswahl einer geeigneten Tauchmotorpumpe festzulegen. Die Förderhöhe ergibt sich wie folgt:

$$\begin{aligned}
 &\text{OK Versuchsfilter} = 65,10 \text{ m üNN} \\
 &\underline{- \text{OK Wasserspiegel Reinwasserspeicher} = - 60,70 \text{ m üNN}} \\
 &\Delta H_{\text{geo}} = 4,40 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Zusätzlich zur geodätischen Förderhöhe sind die Reibungsverluste im Rohr zu berücksichtigen. Auf der Basis der vorgesehenen und umgesetzten Leitungsführung wurden die Rohrreibungsverluste mit rd. 200 mbar berechnet.

Die Gesamtförderhöhe ergibt sich somit zu

$$H_{\text{Ges}} = 4,40 \text{ m} + 0,20 \text{ m} = 4,60 \text{ m} \rightarrow \text{gewählt: } H_{\text{Ges,max}} = 8,0 \text{ m}$$

Die Förderpumpe wurde frequenzgeregelt für die Förderhöhe von $H_{\text{Ges}} = 8,0 \text{ m}$ und einen Volumenstrom von $Q_{\text{zu,max}} = 25,0 \text{ m}^3/\text{h}$ ausgesucht:

- Hersteller/Typ: KSB Amarex NF 65-220/024 ULG-195
- Förderleistung: 25,63 m³/h
- Förderhöhe: 8,41 m
- Laufrad: Freistromrad
- Leistungsbedarf: 1,23 kW
- Motornennleistung: 1,80 kW
- Betriebsspannung: 400 V
- Gewicht: 51 kg
- Anschlussnennweite: DN 65

2.4 Spülprogramm des Großadsorbers

Der Versuchsfilter Nr. 9 wurde programmtechnisch aus dem automatischen Spülprogramm der Filterstufe herausgenommen. Die Spülung mit der Sequenz Luft und Wasser erfolgt von Hand anhand des Spülprogramms der Tabelle 1. Da der obere Mannlochdeckel ständig geöffnet war, konnte jeder einzelne Spülprozess von oben beobachtet werden. Das wurde genutzt, um die Spülwassergeschwindigkeit so einzustellen, dass sich eine Bettexpansion von 20 % ergab. Zudem wurde die Dauer der einzelnen Wasserspülphasen anhand der im Überstauraum verbleibenden Resttrübung so gewählt, dass sowohl wirtschaftlich (Energiebedarf und Spülwasserverlust) als auch effektiv gespült wurde.

Das anfallende schlammhaltige Spülwasser wird mit den Spülabwässern der Flockungsfilter über die gemeinsame Verrohrung und gemeinsame Schlammwasserkammer abgeleitet.

Tabelle 1: Phasen, Schrittfolge und Parameter des Spülprogramms

Schritt Nr.	Aktion / Phase	Geschwindigkeit [m/h]	Volumenstrom [m³/h]	Dauer [Min:Sek]	Bemerkung
1	Rohwasser- und Filtrataratur zu			Stellzeit	
1.1	Filterbelüftung auf			Stellzeit	
2.1	Spülabwasserarmatur auf + Armatur Erstfiltratabschlag auf			Stellzeit	Absenken bis OK Filterbett
2.2	Armatur Erstfiltratabschlag schließen			02:00	
3.1	Entlastungsarmatur Spülluft öffnen, Ringkolbenverdichter starten, Spülluftarmatur auf, Entlastungsarmatur schließen			Stellzeiten	
3.2	Luftspülung	50		02:00	
3.3	Entlastungsarmatur öffnen, Spülluftarmatur zu, Ringkolbenverdichter stoppen, Entlastungsarmatur schließen			Stellzeiten	
3.4	Zeit für die Düsenbodenentlüftung			06:00	gemäß Luftblasenaustritt
4.1	Spülwasserpumpe ein				
4.2	Spülwasserarmatur auf			02:00	
4.3	Wasserspülung	ca. 30		08:00	gemäß Trübung Überstau
4.4	Spülabwasserarmatur zu			Stellzeit	
4.5	Spülwasserarmatur auf			Stellzeit	
4.6	Wasserspülung, sanfte Nachspülphase	15		05:00	gemäß Trübung Überstau
4.7	Spülwasserarmatur zu			02:00	
4.8	Spülwasserpumpe aus				
4.9	Spülabwasserarmatur zu			Stellzeit	
5.1	Rohwasserarmatur auf (Niveauregelung greift)			Stellzeit	
5.2	Filtrataratur auf			Stellzeit	

2.5 Kleinadsorber (KA) im Pilotmaßstab

Verfahrenstechnisch parallel zum GA (s. Abbildung 8) wurde eine Filtersäule (Kleinadsorber, KA) mit der gleichen GAK jedoch mit einer Filtergeschwindigkeit von 7 m/h (gemessenes Mittel im gesamten Betriebszeitraum: 7,3 m/h) betrieben. Mit dieser Wahl wurde gegenüber der Betriebsweise des GA (mit $v_f = 3,5$ m/h) zum einen angestrebt, die insgesamt für eine bestimmte Abflussmenge der Kläranlage erforderliche Filtrationsfläche zu reduzieren.

Zum anderen erreicht der KA mit dem pro Zeit höheren durchgesetzten Bettvolumen (Bed Volumes Treated, BVT) bestimmte Beladungszustände schneller. Da bis Ende 2014 die optimalen Auslegungsdaten sowie die Investitions- und Betriebskosten einer zukünftigen Adsorptionsstufe ermittelt werden sollten, d. h. das Auftreten von Stoffdurchbrüchen in das Filtrat noch vor Jahresfrist in einem ausreichenden Maß beobachtet und bewertet werden musste, tritt gegenüber dem GA ein willkommener Zeitraffereffekt auf. Die Daten des KA sind jedoch nicht 1:1 auf den GA übertragbar. Mit der höheren Geschwindigkeit ergibt sich eine geringere Leerbettkontaktzeit (Empty Bed Contact Time, EBCT) für das Wasser im Adsorber, was die Adsorptionsfronten längs der Betttiefe etwas auseinander zieht. Stoffdurchbrüche treten dadurch im Vergleich durchgesetzter Bettvolumina eher auf.

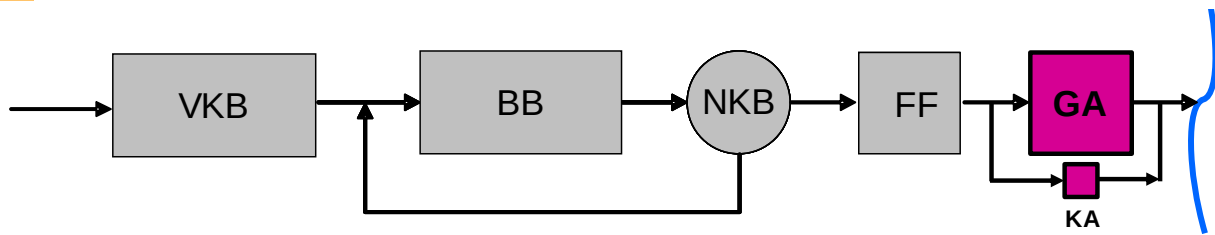


Abbildung 8 Verfahrenskette der Abwasserbehandlung inklusive GA und KA

Die Filtersäule hat eine Höhe von ca. 4,00 m und wurde im Bereich des Vorraums zur Filterhalle aufgestellt (siehe Abbildung 9). Aufgrund der Raumhöhe von 2,80 m wurde eine Montageöffnung in der Geschossdecke zur Gebläsehalle für die Aufstellung genutzt. Die Montageöffnung wurde von oben mit einer Absturzsicherung versehen. Somit war der obere Flansch der Filtersäule direkt zugänglich, was den Befüllvorgang mit GAK erleichterte.



Abbildung 9: In der Vorhalle (links) aufgestellte Filtersäule (Kleinsorbent KA) mit einer Deckendurchführung in die obere Gebläsehalle (rechts)

Die Anbindung der Filtersäule an die großtechnische Verfahrenstechnik geschah wie folgt:

- Anbindung Zulauf: Der Zulauf erfolgte aus dem Brauchwassersystem, das mit dem Filtrat der Flockungsfiltration gespeist wird; Anschluss der Leitung über eine vorhandene GEKA-Schlauchkupplung den Nennweite 1" im Polymeransatzraum; Einbau eines Druckminderers zum Schutz der Säule.
- Anbindung Filtrat: Das Filtrat der Filtersäule wurde mittels Schlauchleitung auf kürzestem Weg in die Schlammwasserkammer als abgeleitet.
- Filtermaterial: Die Filtersäule wurde mit der gleichen granulierten Aktivkohle und in der gleichen Betthöhe gefüllt wie der GA. Das eingefüllte Aktivkohlevolumen betrug 65 Liter.
- Sensorik/Datenaufzeichnung: Die Filtersäule verfügt über eine eigene Durchflussmessung (MID) und einen Datenlogger (E+H Memograph) zur kontinuierlichen Messdatenaufzeichnung und Visualisierung. Der Datentransfer erfolgte mittels Speicherstick.
- Volumenstromreglung: Als Regeleinrichtung wurde eine Niveauhaltung in einer Ablaufkammer genutzt, der das Filtrat über ein Schwimmerventil zulief. Der konstante Filtratvolumenstrom ergibt sich aus der Ablaufmenge der Ablaufkammer bzw. dem sich darin einstellenden Wasserniveau.
- Anbindung Spülwasser: Als Spülwasser wurde Brauchwasser genutzt.
- Spülprogramm: Analog zum Großadsorber, jedoch ohne die Phase mit Luftspülung und ohne die Stellzeiten für die Klappen (anstelle dessen handbetätigte Kugelhähne).
- Spülung/-intervall: Eine Spülung wurde nach Bedarf manuell ausgeführt, wobei der Spülwasservolumenstrom sowohl mittels Rotameter und eine Feinjustierung per Sichtkontrolle der Bettexpansion vorgenommen wurde.

Die technischen Daten der gewählten Dimensionierung des Kleinadsorbers für die Spurenstoffelimination mit granulierter Aktivkohle sind:

- Filterbehälter: geschlossener Zylinder (Säule)
- Außendurchmesser: 0,200 m
- Innendurchmesser: 0,190 m
- Filterfläche: 0,028 m²
- Säulenhöhe: 4,00 m
- Filterbetthöhe: 2,30 m
- Freibord: 1,70 m
- GAK-Bettvolumen: 0,065 m³
- Druck im Zulauf: 1,0 bar

2.6 Befüllung der Filter mit GAK

Die Anlieferung der granulierten Aktivkohle erfolgte mittels Silofahrzeug. Die Aktivkohle wurde aus diesem mittels fliegend verlegten Schlauchs (mit Schlauchkupplung Storz A/110) und Treibwasser (Zufuhr über Schlauchleitung mit Kupplung Storz C/45) hydraulisch in den Filter gepumpt. Der Einfüllvorgang in den Adsorber wurde vorbereitet, indem bis über den Düsenboden ein Wasserpolster vorgelegt wurde, um für einen sanften Aufprall der GAK auf dem Düsenboden und dem sich darauf nach und nach aufbauenden Aktivkohlebett zu sorgen. Diese Maßnahme beugt einer Kornzerstörung vor. Für die Kleinfiltersäule wurden bei der Aktivkohleanlieferung etwa 100 Liter GAK in saubere Mörtelkübel abgefüllt, dort bereits mehrtägig gewässert und anschließend ein Schüttvolumen von gut 65 Liter vom Obergeschoss aus manuell in die Filtersäule eingefüllt.

3 Verfahrensparameter der Adsorber

Das durch die beiden Adsorber durchgesetzte Bettvolumen wurde jeweils mittels MID gemessen und online aufgezeichnet. Wie in Tabelle 2 aufgelistet ist, wurde die Soll-Filtergeschwindigkeit des KA mit 7,0 m/h doppelt so groß gewählt wie die des GA mit 3,5 m/h. Die Diagramme von Abbildung 10 und Abbildung 11 belegen über einen Vergleich von Soll- und Istwert, dass der GA im Mittel (d. h. inklusive der Zeiten für die Filterspülung) mit einer Filtergeschwindigkeit von 3,2 m/h beschickt wurde. Der KA lag mit 7,3 m/h im Mittel etwas höher als sein Sollwert. Den linear verlaufenden Kurven der Messdaten in den Diagrammen ist zudem zu entnehmen, dass die Regelung der Adsorber sehr konstante Volumenströme erzeugt.

Tabelle 2: Verfahrensvarianten der untersuchten Adsorber

Kurz-bez.	GAK-Typ / Filtermaterial	Filtergeschwindigkeit	Leerbett-Kontaktzeit
GA	Frischkohle AquaSorb 5000 Jodzahl = 1.200 mg/g	konstant 3,5 m/h Ø inklusive Spülzeit = 3,2 m/h	39,4 min
KA	Frischkohle AquaSorb 5000 Jodzahl = 1.200 mg/g	konstant 7 m/h Ø inklusive Spülzeit = 7,3 m/h	19,7 min

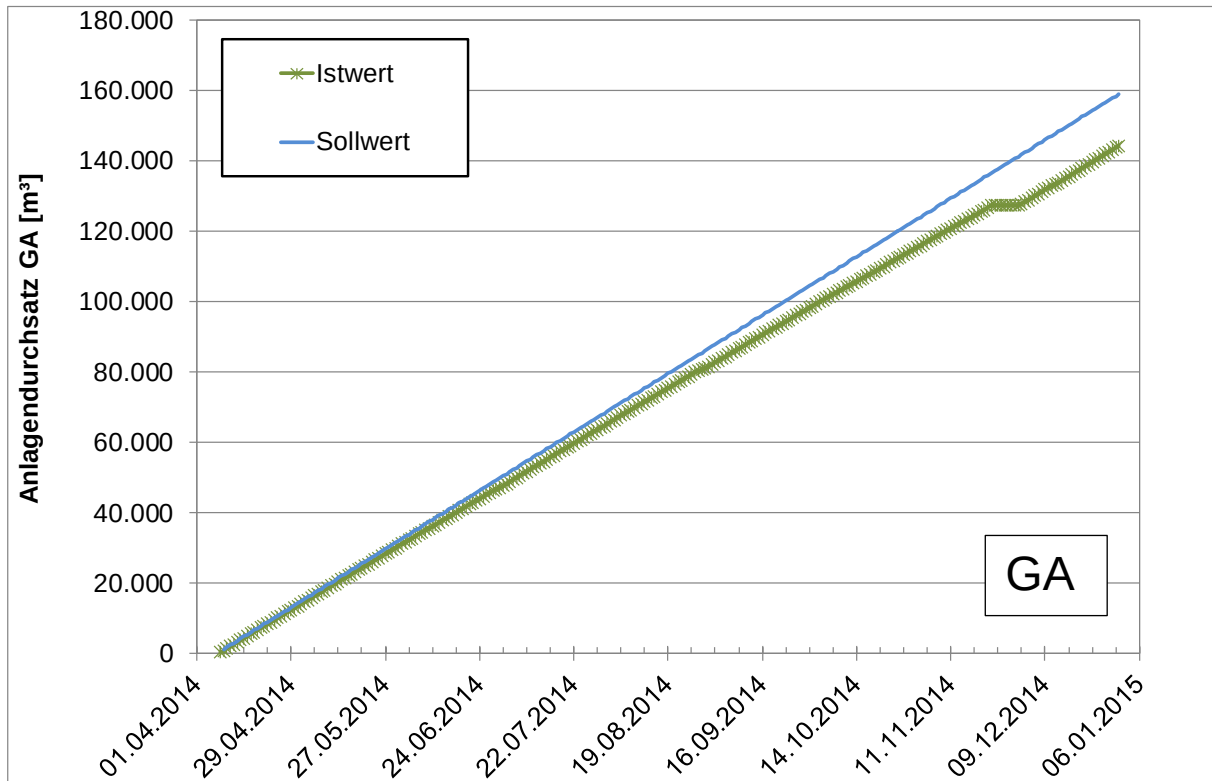


Abbildung 10: Vergleich gemessener Istwerte für den Durchsatz des Großadsorbers im Vergleich zu den Sollwerten (Skalierung: 7 bzw. 28 Tage)

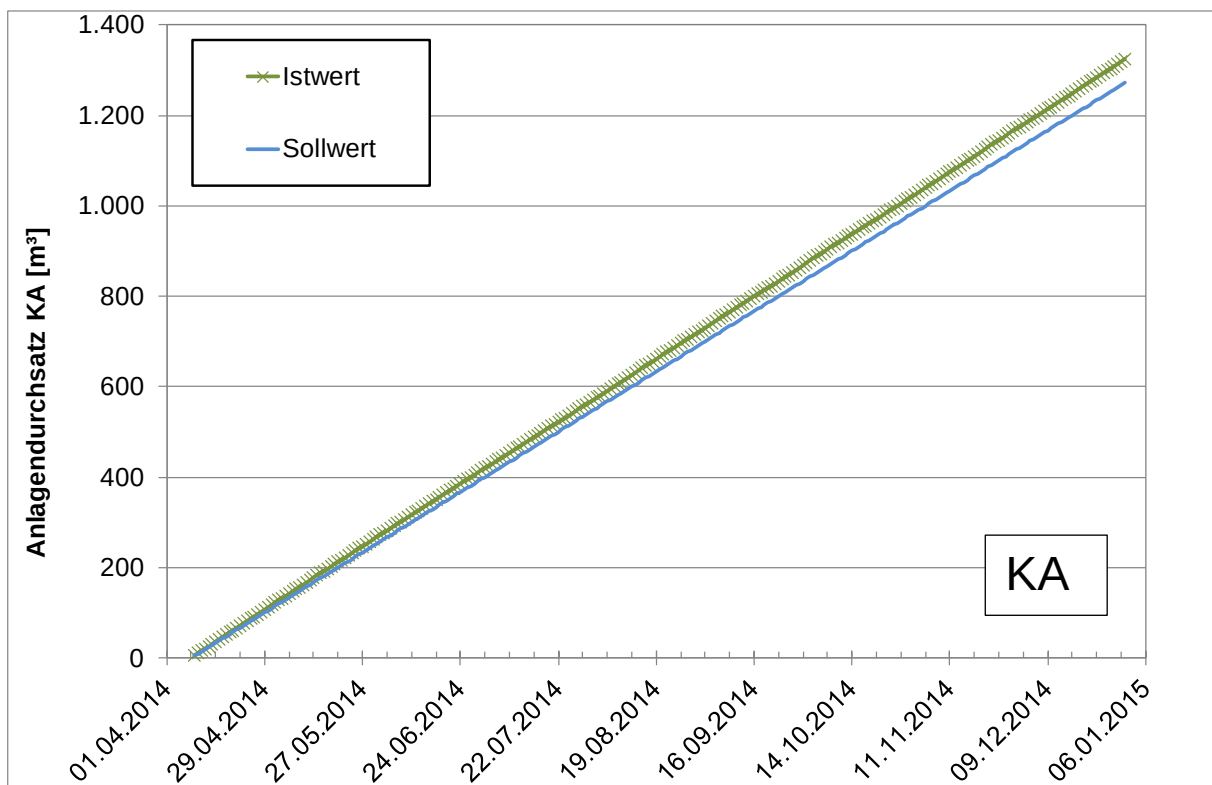


Abbildung 11 Vergleich gemessener Istwerte für den Durchsatz des Großadsorbers im Vergleich zu den Sollwerten (Skalierung: 7 bzw. 28 Tage)

Legt man die Messdaten für die Durchsätze der beiden Adsorber und die Schüttgewichte der in die Filter gefüllten Aktivkohle zugrunde, so lassen sich die in dem Diagramm der Abbildung 12 aufgetragenen hyperbolischen Abnahmen der pro Wasservolumen eingesetzten Aktivkohlemasse mit fortschreitender Laufzeit berechnen. Für die in diesem Bericht verwendeten Daten wurde als Endpunkt der 16.12.2014 festgelegt; die Adsorber befinden sich aber auch nach diesem Stichtag inklusive eines begleitenden Monitorings in Betrieb.

Am 16.12.2014 kann man dem Prozess des GA einen spezifischen Bedarf oder Verbrauch an Aktivkohlemasse von 34 g/m³ Wasser zuschreiben. Beim KA mit etwas mehr als der doppelten Filtergeschwindigkeit beträgt der Wert mit 14,7 g/m³ weniger als die Hälfte. Da aufgrund der guten Eliminationsleistung für die Spurenstoffe der Betrieb beider Aktivkohleschüttungen nach dem Stichtag fortgesetzt wird, nehmen beide Werte weiterhin kontinuierlich ab.

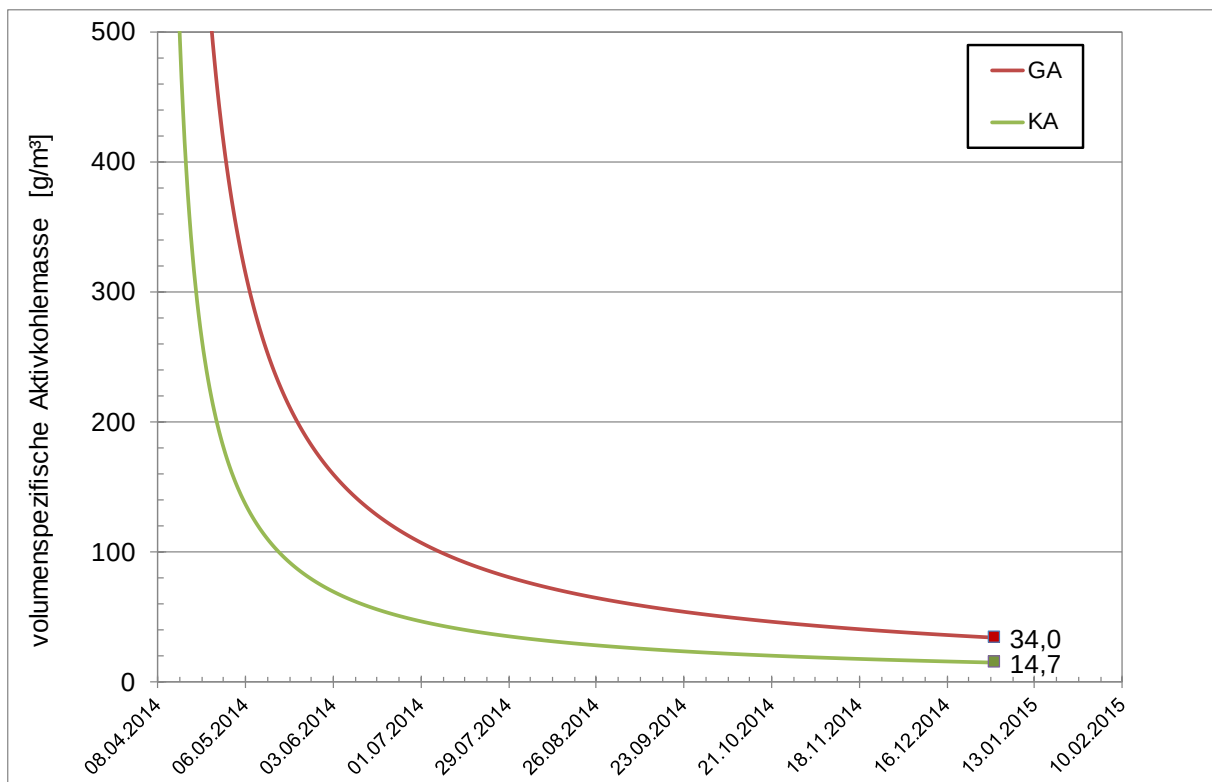


Abbildung 12: Spezifischer Bedarf an Aktivkohle für das aufbereitete Filtratvolumen in Abhängigkeit der Laufzeit des GA und des KA (Schrittweite der Skalierung: 7 bzw. 28 Tage)

3.1 Charakterisierung der frischen granulierten Aktivkohle

Bei der AquaSorb 5000 handelt es sich um eine mit Wasserdampf hoch aktivierte Aktivkohle (siehe Jodzahl), die speziell für die Abwasser- und Deponiesickerwasserbehandlung entwickelt wurde. In vergleichbaren Projekten zur weitergehenden Abwasserreinigung erzielte sie im Vergleich zu anderen Produkten sowohl in Laborversuchen (Isothermen) als auch beim großtechnischen Einsatz sehr hohe CSB- und TOC-Beladungen. Zur Ihrer Charakterisierung seien nachfolgend die wichtigsten Parameter genannt. Ein Produktblatt des Herstellers befindet sich in Anhang 2:

- Rohstoff: Lignite, d. h. Braunkohle
- hoher Anteil an Makroporen am gesamten inneren Porensystem durch diesen Rohstoff
- Jodzahl > 1.100 mg Jod/g
(von IWW wurden Werte bis zu 1229 mg Jod/g gemessen)
- BET-Oberfläche: 1.150 m²/g
- Schüttdichte: 300 kg/m³

4 Analytik

4.1 Analytik für Standardparameter der Abwasserreinigung

Folgende Routineparameter wurden vom Betriebslabor der Kläranlage 2 Mal pro Woche in homogenisierten 24-h-Mischproben des gemeinsamen Zulaufs und - um die Verweilzeit im Adsorber zeitversetzt - der Filtrate untersucht:

- CSB_{filtriert}
- NH₄-N
- N_{ges}
- P_{ges}
- Trübung

Da aufgrund der geringen Feststoffgehalte sowohl im Zulauf als auch in den Filtraten der Adsorber der Parameter Abfiltrierbare Stoffe (AFS) mit den gängigen Probenvolumina zu wenig sensitiv war, wurde anstelle seiner die Trübung gemessen. Ab September 2014 wurde dann auf die Analytik der Parameter NH₄-N, N_{ges} und P_{ges} verzichtet, da kein weiterer Erkenntniszuwachs mehr zu erwarten war.

4.2 Analytik für ausgewählte organische Spurenstoffe

In der Phase des Anlagen-Auf- und Umbaus wurden zwei Spurenstoff-Screenings im Ablauf der Flockungsfiltrationsstufe durchgeführt, um eine Übersicht über die auf der KA Harsewinkel i. d. R. vorliegende Stoffvielfalt und deren Konzentrationen zu erhalten. Die hierzu getroffene Parameterauswahl (siehe Spalte 2 der Tabelle 3) wurde im Projektkreis gemeinsam diskutiert und mit der Bezirksregierung Detmold abgesprochen. Kriterien für die Auswahl waren:

- die offizielle Wunschliste der Bezirksregierung Detmold für die Analyse von Spurenstoffparametern
- Stoffe, die bei der konventionellen Abwasserbehandlung i. d. R. unzureichend eliminiert werden (Strippen, mikrobiologischer Abbau),
- Stoffe, die sich nach und nach zu Leitparametern bei Verfahren zur weitergehenden Abwasserreinigung entwickeln und etablieren,
- Stoffe, zu denen bereits Erfahrungen durch nationale und internationale Projekte mit Einsatz von Aktivkohle vorliegen,
- Stoffe aus möglichst vielen Substanzkategorien, wie Chemikalien der Industrie und Landwirtschaft, Humanpharmaka, Humandiagnostika, Personal Care Products, Substanzen aus dem häuslichen Umfeld (Gebäude und Haushalt), Lebensmittelzusatzstoffe, ...,
- Stoffe mit unterschiedlichen chemo-physikalischen Stoffeigenschaften,
- Literaturdaten, u. a. aus Merkel (2004), Hembrock-Heger et al. (2007), Bergmann et al. (2008), Dieter (2011) und Bode et al. (2010),
- Stoffe aus der Fortschreibung der Liste prioritärer Substanzen (WRRL),
- Stoffe aus der Fortschreibung der Liste von Stoffen mit Trinkwasserrelevanz, deren Trinkwasserkonzentration mit einem Gesundheitlichen Orientierungswert (GOW) belegt wurden.

Auf der Basis der Ergebnisse der beiden durchgeführten Screenings wurde die Stoffvielfalt für das Monitoring der Adsorberleistung deutlich verringert. Das Ziel dieser Maßnahme war die Bündelung eines aussagekräftigen und repräsentativen Stoffspektrums, das mit einer möglichst kleinen Anzahl von separaten Nachweisverfahren wirtschaftlich zu analysieren ist. Der bestehende Finanzierungsrahmen sollte nicht überschritten werden.

Verzichtet wurde daher auf Stoffe, deren Konzentrationen beim Screening des KA-Ablauf sehr dicht an ihrer Bestimmungsgrenze oder darunter lagen, und zwar betraf dies:

alle Tetracycline des Screenings, Chloramphenicol, Sulfadiazin, Estradiol, Estriol, Estron, Mestranol, 16a-Hydroxyestron, 17a-Ethinylestradiol, Betaxolol, Pindolol, Propanolol, Diazepam, Etofibrat, Fenofibrat, Pentoxifyllin, Phenacetin, Clofibrinsäure, Fenoprofen, Gemfibrozil, Indometacin, Ketoprofen, Polyfluorierte Chemikalien Verbindungen (PFC), Diuron, Isoproturon, Glyphosat.

Befinden sich einzelne Stoffe dieser Aufzählung aber dennoch im Parameterspektrum des Monitorings, dann nur deshalb, da sie im Zuge angewandter Nachweismethoden für das Monitoring ohnehin und somit kostenneutral anfallen.

Bei den Zuckerersatzstoffen lag aus eigenen zuvor durchgeführten Projekten und aus Daten der Literatur die Erfahrung vor, dass sie nur in einer sehr kurzen Anfangsphase der Adsorber aufgenommen werden und danach vollständig in das Filtrat gelangen. Daher wurde trotz der im Vergleiche hohen Messwerte (Acesulfam im Ablauf der Flockungsfiltration bis zu 41 µg/l) auf die Analyse dieser Stoffe beim Monitoring verzichtet.

Stoffe mit hormoneller Wirkung wurden zunächst ins Monitoring eingebunden (beta-Sitosterol, Estradiol, Estriol, Estron, Mestranol, 16a-Hydroxyestron, 17a-Ethinylestradiol), dann aber aufgrund der geringen Konzentrationen im Adsorberzulauf darauf verzichtet. Mit der Gruppe der Phenole (Bisphenol A, 4-Nonylphenol-Isomerengemisch, 4-tert.-Octylphenol) wurde analog verfahren.

Die Bestimmungsgrenzen der Nachweisverfahren für die Spurenstoffe sind in Anhang 9 aufgelistet. Bei der Bilanzierung der Frachten und bei der Stoffelimination wurden bei Konzentrationen unter der Bestimmungsgrenzen hinterfragt, ob auch die Nachweisgrenze unterschritten wurde. War dies der Fall, wurden bei der Berechnung der Elimination für Nullbefunde die jeweiligen Nachweisgrenzen angesetzt.

Die Analyse der Spurenstoffparameter erfolgte nach Filtration. Der Feststoffgehalt der Proben war nach den vorangehenden filtrativen Schritten bei der großtechnischen Aufbereitung ohnehin vernachlässigbar klein.

Tabelle 3: Analysierte Spurenstoffe^{*)} beim Screening und Adsorbermonitoring

Parameter(gruppe)	Screening KA-Ablauf	Monitoring Adsorber
Antibiotika	Makrolide und Sulfonamide	
	Chloramphenicol	
	Clarithromycin	
	Dehydrato-erythromycin	
	Erythromycin	
	Roxithromycin	
	Sulfadiazin	
	Sulfadimidin	
	Sulfamethoxazol	
	Trimethoprim	
	Tetracycline	
	Chlortetracyclin	
	Doxicyclin	
	Oxytetracyclin	
	Tetracyclin	
	Metabolite	
	N4-Acetylsulfamethoxazol	
Betablocker	Atenolol	Atenolol
	Betaxolol	Betaxolol
	Bisoprolol	Bisoprolol
	Metoprolol	Metoprolol
	Pindolol	Pindolol
	Propanolol	Propanolol
	Sotalol	Sotalol
Hormone	Natürliche Östrogene	Natürliche Östrogene
	Estradiol	Estradiol
	Estron	Estron
	Estriol	Estriol
	Synthetische Östrogene	Synthetische Östrogene
	17 a -Ethinylestradiol	17 a -Ethinylestradiol
	Mestranol	Mestranol
	Phytoöstrogen	Phytoöstrogen
	b -Sitosterol	b -Sitosterol
	Metabolit	Metabolit
	16 a-Hydroxyestron	16 a-Hydroxyestron
sonstige Humanpharmaka	Analgetika / Antiphlogistika	Analgetika / Antiphlogistika
	Acetylsalicylsäure	Acetylsalicylsäure
	Diclofenac	Diclofenac
	Fenoprofen	Fenoprofen
	Ibuprofen	Ibuprofen
	Indometacin	Indometacin
	Ketoprofen	Ketoprofen
	Naproxen	Naproxen
	Phenacetin	Phenacetin
	Phenazon	Phenazon
	Lipidsenker	Lipidsenker
	Bezafibrat	Bezafibrat
	Clofibrinsäure	Clofibrinsäure
	Etofibrat	Etofibrat
	Fenofibrat	Fenofibrat
	Gemfibrozil	Gemfibrozil
	Antiepileptika	Antiepileptika
	Carbamazepin	Carbamazepin
	Durchblutungsfördernde Mittel	Durchblutungsfördernde Mittel
	Pentoxifyllin	Pentoxifyllin
	Psychopharmaka	Psychopharmaka
	Diazepam	Diazepam
	Oxazepam	Oxazepam
Röntgenkontrastmittel	Amidotrizoesäure	Amidotrizoesäure
	Iohexol	Iohexol
	Iomeprol	Iomeprol
	Iopamidol	Iopamidol
	Iopromid	Iopromid
	Iothalamicsäure	Iothalamicsäure

...

...

	Perfluoralkanoat	Perfluoralkanoat
PFC	Perfluorbutanoat (PFBA)	
	Perfluorpentanoat (PFPA)	
	Perfluorhexanoat (PFHxA)	
	Perfluorheptanoat (PFHpA)	
	Perfluoroctanoat (PFOA)	
	Perfluoronanoat (PFNA)	
	Perfluordecanoat (PFDA)	
	Perfluorbutylsulfonat (PFBS)	
	Perfluorhexylsulfonat (PFHxS)	
	Perfluoroctylsulfonat (PFOS)	
Industriechemikalien	Sulfolan (Tetrahydrothiophen-1,1-dioxid)	
	TMDD (2,4,7,9-Tetramethyl-5-decin-4,7-diol)	TMDD (2,4,7,9-Tetramethyl-5-decin-4,7-diol)
	Phenole	Phenole
	Bisphenol A	
	Nonylphenol (4-n-NP + NP Isomerengemisch)	
	Octylphenol (4-tert.-Octylphenol)	
	Benzotriazole	Benzotriazole
	1H-Benzotriazol	1H-Benzotriazol
	4-Methyl-1H-Benzotriazole	4-Methyl-1H-Benzotriazole
	5-Methyl-1H-Benzotriazole	5-Methyl-1H-Benzotriazole
Pflanzenschutzmittel	PSM Einzel Diuron	
	PSM Einzel Isoproturon	
	PSM Einzel Terbutryn	PSM Einzel Terbutryn
	PSM Einzel Glyphosat	
Zuckerersatzstoffe	Acesulfam	

*) alle Parameter ermittelt in der filtrierten Probe

5 Messergebnisse

5.1 Messergebnisse für die Standardparameter

Dem zeitlichen Verlauf für den CSB (im Folgenden ist der CSB_{filtriert} gemeint) im Zulauf der Adsorber (= Sammelfiltrat der Flockungsfiltration) in Abbildung 13 für die gut 8-monatige Laufzeit ist nur ansatzweise zu entnehmen, dass kurz nach dem Start der Adsorber Anfang April ein maßgeblicher Einleiter mit Schlachtung und Fleischverarbeitung im Einzugsgebiete der Kläranlage seinen Betrieb einstellte und die CSB-Konzentrationen im Zu- wie im Ablauf der Kläranlage (hier auf einen Wertebereich zwischen 10 und 30 mg CSB/l) sanken. Während im Filtrat des Kleinadsorbers mit der geringeren Kontaktzeit (EBCT = 20 min) von Beginn an ein linearer Anstieg von 5 auf etwa 15 mg CSB/l zu beobachten war, lag die CSB-Konzentration im GA-Filtrat für mehr als zwei Wochen unter der Nachweisgrenze von 5 mg/l.

Trägt man wie in Abbildung 14 die CSB-Konzentrationen über dem spezifischen Durchsatz der Adsorber, d. h. in Form aufbereiteter Bettvolumina (BVT) auf, so lässt sich der Einfluss der unterschiedlichen Filtergeschwindigkeiten bzw. die einhergehende unterschiedliche Beschickung mit Stofffrachten auf die Adsorptionsprozesse besser erkennen. Hierbei geht allerdings die zeitliche Koinzidenz zwischen den Kurven verloren. Damit für einen Adsorber aber dennoch Zu- und Ablauf klar zugeordnet werden kann, wurde der gemeinsame Zulauf doppelt über das jeweilige bettspezifische Beschickungsvolumen der Adsorber aufgetragen.

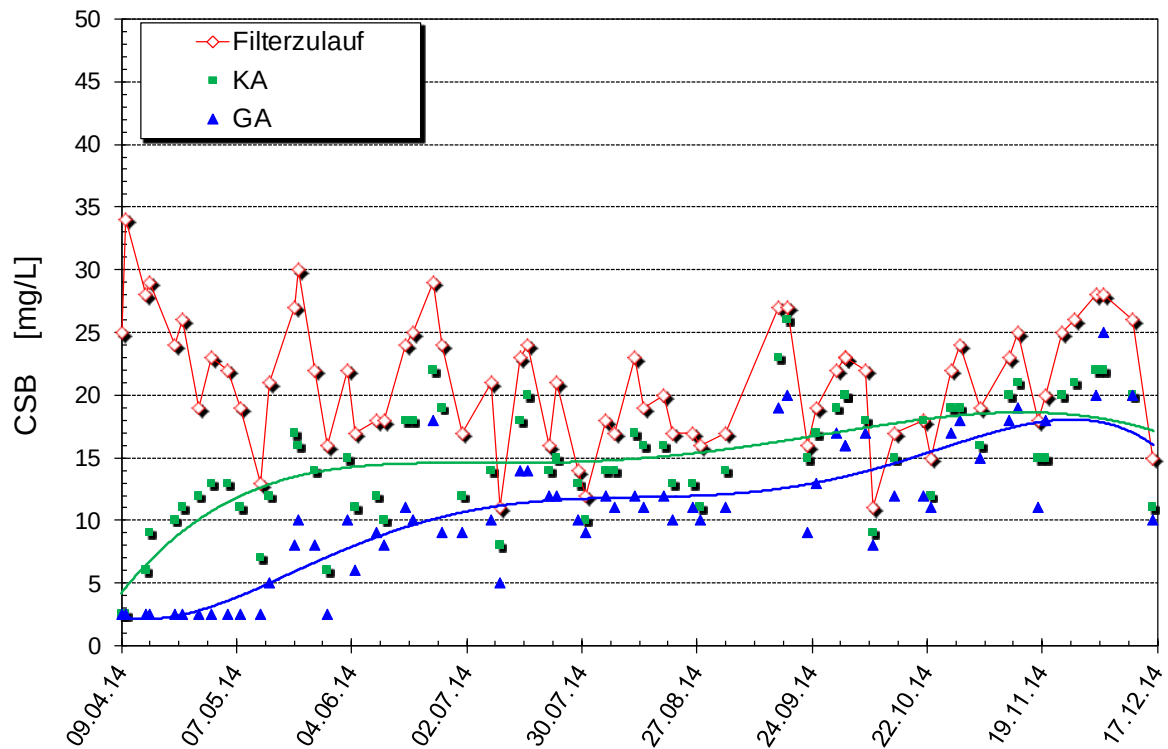


Abbildung 13 Zeitlicher Verlauf der CSB-Konzentration im Zulauf und in den Filtraten von GA und KA (09.04.2014 bis 16.12.2014, Skalierung: 7 bzw. 28 Tage)

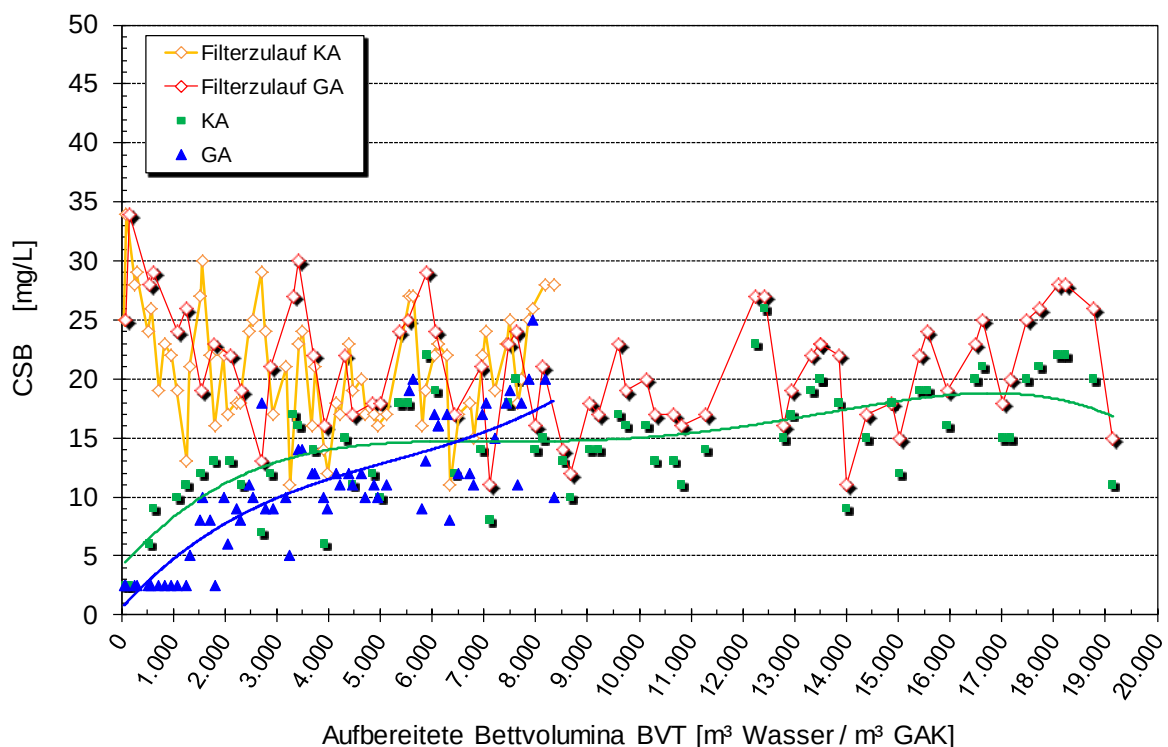


Abbildung 14 Verlauf der CSB-Konzentration im Zulauf und in den Filtraten in Abhängigkeit der durchgesetzten Bettvolumina des GA und KA (09.04.2014 bis 16.12.2014)

Der anfängliche Anstieg der CSB-Konzentration beider Adsorber unterscheidet sich im Wesentlichen durch einen horizontalen Versatz um gut 1.000 BVT, der sich durch die Phase mit Nullbefunden für das Filtrat des GA bis etwa 1.300 BVT ergibt. Erst nach 4.000 bis 5.000 BVT weichen beide Kurvenverläufe voneinander ab. Die Konzentrationen des KA mit Werten im Bereich von etwa 10 bis 20 mg CSB/l schmiegen sich in einem Abstand von etwa 3 bis 5 mg CSB/l an die Zulaufkonzentrationen an. Bis zum 16.12.2014 nach gut 8 Monaten Laufzeit wurden mit dem KA ca. 19.150 BVT erreicht. Diese Phase ist beim GA bis zu diesem Zeitpunkt bei nur 8.350 BVT noch nicht eingetreten.

Zum Verständnis der Wirkmechanismen für die Adsorptionsprozesse, welche die Konzentrationszunahmen bzw. Leistungsverminderung mit voranschreitender Adsorberlaufzeit in den Filtraten verursachen, ist es hingegen sinnvoll, die Messdaten in Abhängigkeit der jeweiligen Beladung der Aktivkohlen zu betrachten. Dazu bieten sich Bilanzen für die Summenparameter an, wie für den hier gemessenen CSB (alternativ DOC). Bei der Durchströmung einer Aktivkohleschicht wirken beim Transport eines gelösten aber adsorbierbaren Stoffes heran an die Adsorptionsflächen im Inneren des einzelnen Aktivkohlekorns drei Transportwiderstände (Sontheimer et al. 1985 und Sontheimer et al. 1988):

- die Filmdiffusion aus der Wasserphase an die umströmte äußere Oberfläche des Korns,
- die Porendiffusion von der äußeren Oberfläche des Korns auf dem Weg des Wasserkörpers einer gefüllten Pore in das Innere der Korns hinein und
- die Oberflächendiffusion, d. h. an der äußeren Oberfläche des Korns beginnend entlang der inneren Oberfläche in das Innere des Korns hinein.

Als zwei der maßgeblichen Parameter für diese Transportschritte tritt die Beladung des Aktivkohlekorns und eine mit dieser Beladung jeweils im Gleichgewicht stehende Konzentration auf. Letztere ergibt sich aus der individuellen Gleichgewichtslage der Stoffmengen bzw. der Affinität eines Stoffes zwischen Wassermatrix und Aktivkohleoberfläche. Je nach Transportwiderstand bestimmen sowohl Beladungsdifferenzen innerhalb des Korns (Oberflächendiffusion) als auch Konzentrationsdifferenzen innerhalb (Porendiffusion) und außerhalb des Korns (Filmdiffusion aus der freien Lösung im Filterbett) die treibenden Potenziale der Transportkinetik.

Der Beladungsgradient innerhalb des Korns ist jedoch nur modelltheoretisch zu berechnen oder in speziellen KleinfILTERversuchen experimentell näherungsweise zu ermitteln. Eine mittlere Beladungszunahme im Korn kann hingegen direkt aus den eliminierten Stoffmengen innerhalb einer Aktivkohleschicht bilanziert werden. Wird wie in diesem Projekt nur Zu- und Ablauf untersucht, erhält man eine mittlere Beladung für das gesamte Adsorberbett.

Die mittlere Beladung q_n bzw. die Beladungszunahme Δq_i der gesamten Aktivkohlenmasse m_{GAK} eines Adsorbers in einem zeitlichen Betriebsintervall $(t_i - t_{i-1})$ zwischen der Probenahme Nr. $i-1$ und i wurde gemäß Gleichung (1) und (2) aus den gemittelten Zulauf- und gemittelten Ablaufkonzentrationen c und c_0 für den CSB und dem Volumenstrom $\dot{V}$ des Adsorbers berechnet.

$$q_n = \sum_{i=1}^n \Delta q_i \quad (1)$$

$$\Delta q_i = \frac{\dot{V}}{m_{GAK}} \cdot \frac{1}{2} \cdot [(c_{0,i} + c_{0,i-1}) - (c_i + c_{i-1})] \cdot (t_i - t_{i-1}) \quad (2)$$

In Abbildung 15 ist die auf den Zulauf normierte CSB-Konzentration der Filtrate (c/c_0) über der CSB-Beladung aufgetragen. Es ist klar zu erkennen, dass der GA auch beim Vergleich identischer CSB-Beladungen anfänglich einen geringeren Anstieg der normierten (und somit auch der absoluten) Filtratkonzentration aufweist als der KA. Die Steigung ist selbst dann geringer, wenn man bei der Kurve des GA die anfängliche Plateauphase vernachlässigen würde. Dieses Verhalten muss daher den kürzeren Adsorptionsfronten infolge der geringeren Filtergeschwindigkeit bzw. längeren Verweilzeit des Wassers im Bett zugeschrieben werden.

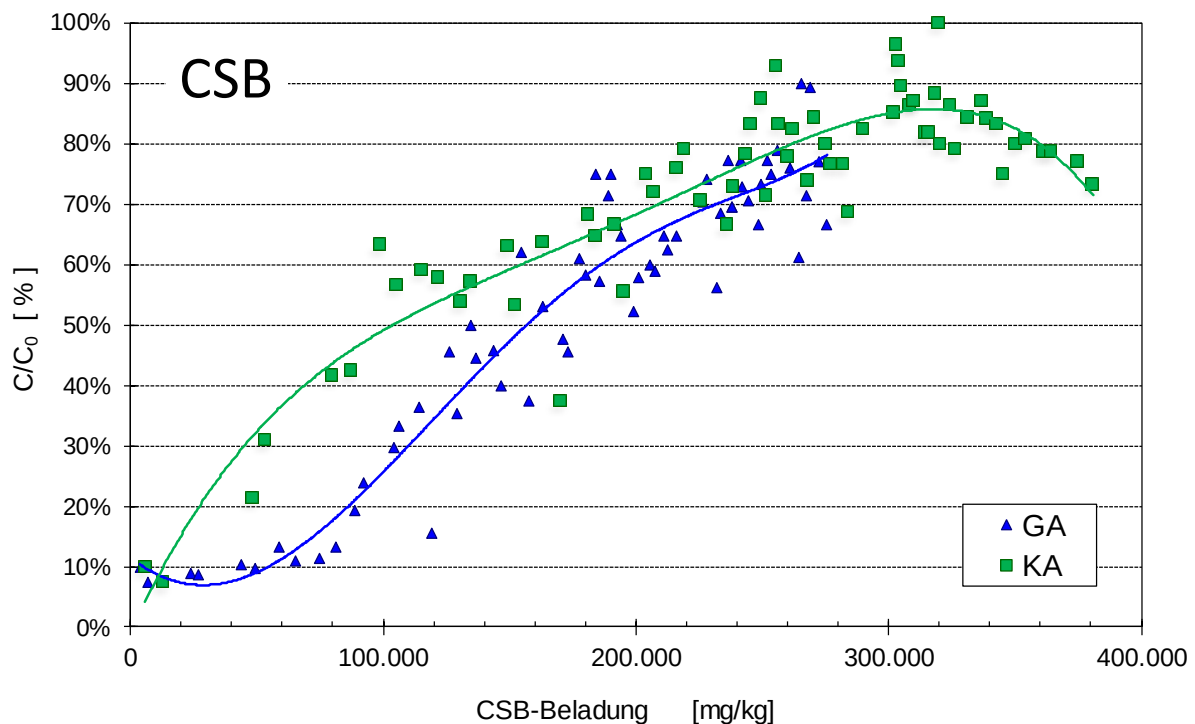


Abbildung 15 Auf den Zulauf normierte Filtratkonzentration c/c_0 des Parameters CSB in Abhängigkeit der CSB-Beladung (09.04.2014 bis 16.12.2014)

Ab einer Beladung von etwa 100.000 mg CSB/kg Aktivkohle nähern sich beide Kurven wieder mehr und mehr an. Dieser Effekt tritt dadurch auf, dass beim KA ein fast linearer Anstieg in der ersten Betriebsphase ab ca. 100.000 mg CSB/kg Aktivkohle in eine zweite Betriebsphase mit ebenfalls linearem Verlauf jedoch geringerer Steigung übergeht. Ein solcher Änderungspunkt zeichnet sich beim GA analog ab, jedoch erst bei einer Beladung von 180.000 mg CSB/kg Aktivkohle, was knapp dem Doppelten des KA entspricht. Schließlich wird beim KA ein oberes Plateau mit einem um $c/c_0 = 85\%$ stärker streuenden Wertebereich erreicht, der oberhalb von etwa 350.000 mg CSB/kg Aktivkohle linear auf 75 % sinkt. Als Ausblick könnte man ein nahezu identisches Verhalten für den GA prognostizieren. Beim Kleinadsorber wird nach gut 8 Monaten und einem Durchsatz von 19.150 BVT eine Beladung von 380 g CSB/kg erreicht. Das sind stattliche 38 Gewichtsprozent. Zum gleichen Zeitpunkt mit nur 8.350 BVT sind es beim GA 380 g CSB/kg Aktivkohle.

Abschließend wurde die normierte Filtratkonzentration in Abbildung 16 über die aufbereiteten Bettvolumina aufgetragen. Es zeigt sich ein Gesamtbild aus Datenpunkten für die einzelnen PN-Termine und deren Ausgleichskurven, das zu Abbildung 14 und mit den absoluten CSB-Konzentrationen passt.

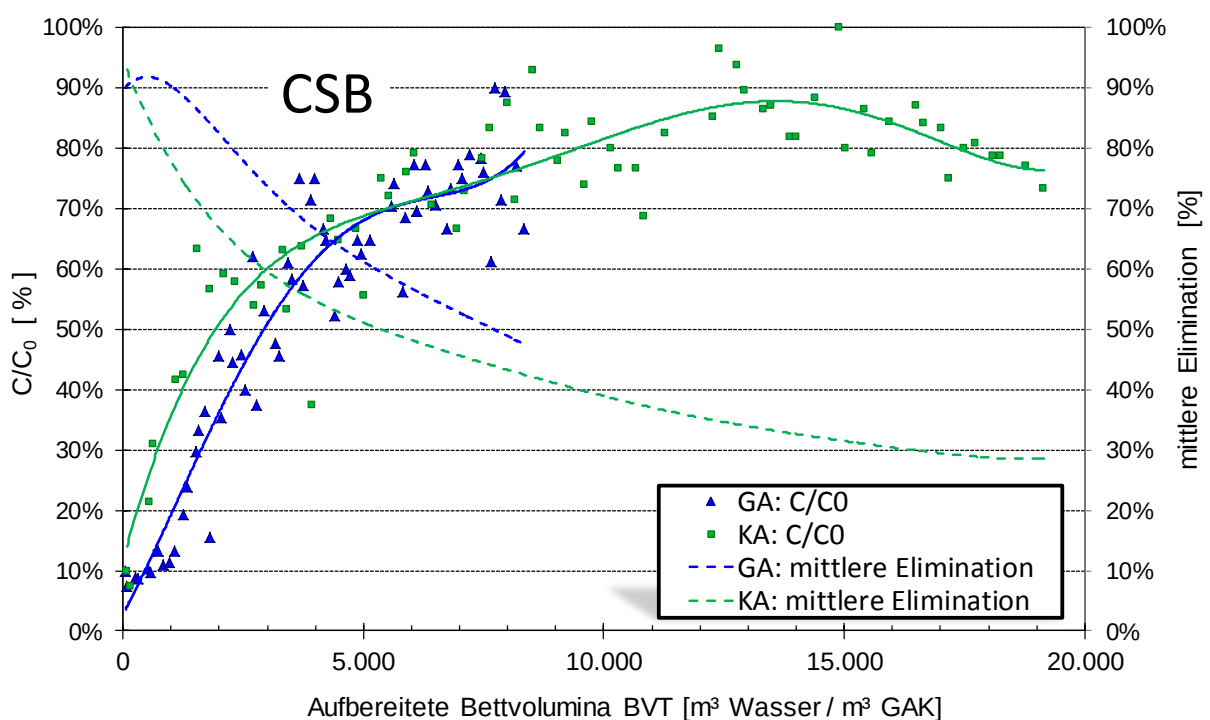


Abbildung 16 Auf den Zulauf normierte Filtratkonzentration c/c_0 (Datenpunkte mit c/c_0 zum Zeitpunkt der PN) und mittlere Elimination des GA und KA in Abhängigkeit vom durchgesetzten Bettvolumen(BVT); (gestrichelte Kurve: aus Beschickung und Beladung berechneter Mittelwert bis einschließlich PN-Zeitpunkt im Zeitraum 09.04.2014 bis 16.12.2014)

Wie es zu erwarten war, tritt im direkten Vergleich für die normierten bzw. relativen Konzentrationen eine geringere Streuung der Datenpunkte auf, da Konzentrationsspitzen im Zulauf – ob nach oben oder nach unten – sich i. d. R. in gedämpftem Ausmaß bis in die Filtrate fort-pflanzen. Es wird aber etwas deutlicher, dass an relativ definierten „Punkten“ grundlegende Änderungen beim KA eingetreten sind (siehe Abbildung 16): Nach dem Übergang bei 4.000 BVT von einem ersten nahezu linearen Anstieg in einen zweiten flacheren und dem anschließenden eher horizontalen Kurvenverlauf ab 14.000 BVT.

Beim GA tritt ab 5.000 BVT (und wie beim KA bei etwa $c/c_0 = 65\%$) ein markanter Punkt auf, ab dem sich der Kurvenanstieg grundlegend ändert. Die sich daran anschließenden Datenpunkte des GA erlauben - im Gegensatz zum Verlauf der Ausgleichskurve - die Annahme eines ähnlichen Anstiegs der normierten Konzentration wie beim KA.

Aus den Bilanzen in Gleichung (3) und (4) für die jeweils gesamte CSB-Fracht F_n , mit der die Adsorber bis zu einem bestimmten Probenahmezeitpunkt t_i beschickt wurden,

$$F_n = \sum_{i=1}^n \Delta F_i \quad (3)$$

$$\Delta F_i = \dot{V} \cdot \frac{1}{2} (c_{O,i} + c_{O,i-1}) \cdot (t_i - t_{i-1}) \quad (4)$$

und denjenigen aus Gleichung (1) und (2) für die CSB-Frachten ($m_{GAK} \cdot q_n$), die von den Adsorbern eliminiert, d. h. adsorptiv gespeichert wurden, ist mittels Gleichung (5) deren mittlere Eliminationsleistung (gestrichelte Linien in Abbildung 16) bis zur Probenahme Nr. n und dem dabei vorliegenden BVT-Werte berechnet worden:

$$\bar{E}_n = \frac{m_{GAK} \cdot q_n}{F_n} \quad (5)$$

Insgesamt zeichnet sich im Mittel ein fast hyperbolisches Abklingen der mittleren Eliminationsleistung bei beiden Adsorbern ab, das etwa bei 90-% startet und ohne eine Reaktivierung der GAK und unter der Annahme sich stetig fortsetzender Prozesse bei einem Niveau zwischen 20 bis 30 % enden würde.

Die Messwerte der Trübung im Zu- und Ablauf der Adsorber, die in Abbildung 17 über der Zeit aufgetragen ist, liegen aufgrund der in der Verfahrenskette vorangestellten Flockungsfiltration bereits im Zulauf bei Werten im Bereich zwischen 0,4 und 1,0 FNU. Das sind sehr geringe Feststoffkonzentrationen, wie sie beispielsweise im Trinkwasserbereich üblich sind. Die Adsorber vermindern diese Trübung unabhängig von der Filtergeschwindigkeit nochmals auf Werte zwischen 0,2 und 0,4 FNU. Unter den abgeschiedenen Trübstoffen werden sich zumindest anteilig auch sehr kleine Flocken befinden, die aus der Flockungsfiltration ausge-

tragen wurden oder die durch eine Nachfällung entstanden sind. Mit der Trübstoffabscheidung werden daher auch geringe Konzentrationen an gefälltem Phosphat aus dem Zulauf (Wertebereich zwischen 0,1 und etwa 0,3 mg/l P_{ges}) entfernt, wie die Daten der Abbildung 18 belegen. I. d. R. erzeugen die Adsorber eine Dämpfung von Konzentrationsspitzen für P_{ges} .

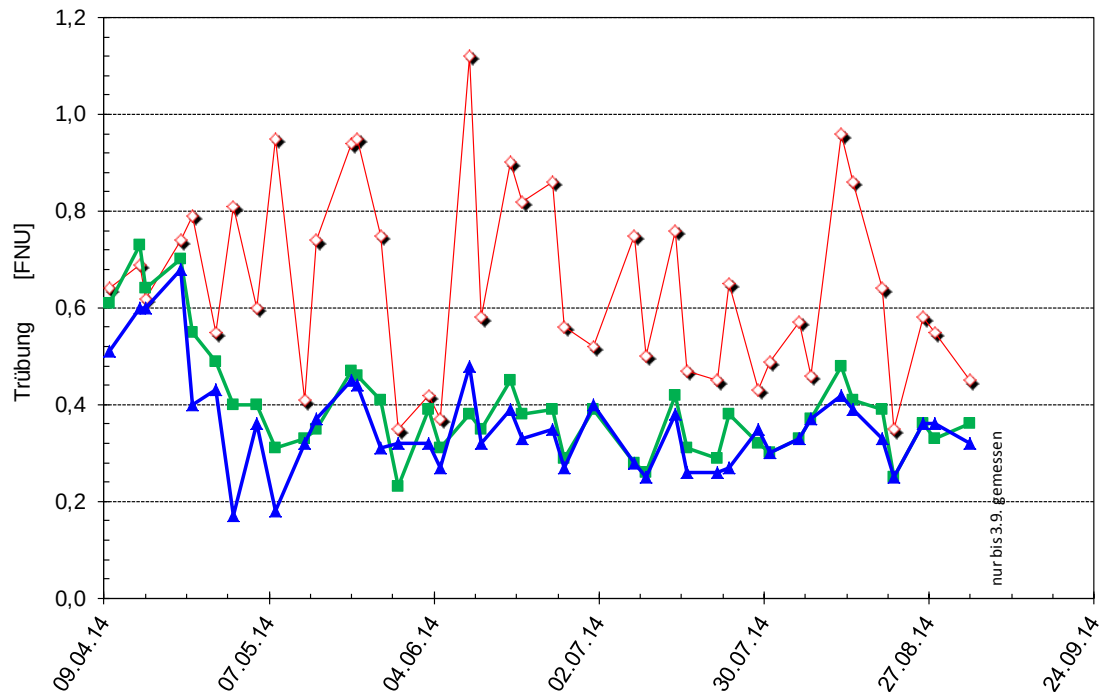


Abbildung 17 Zeitlicher Verlauf der Trübung (als Ersatzparameter für die AFS) im Zulauf und in den Filtraten von GA und KA (09.04.2014 bis 03.09.2014)

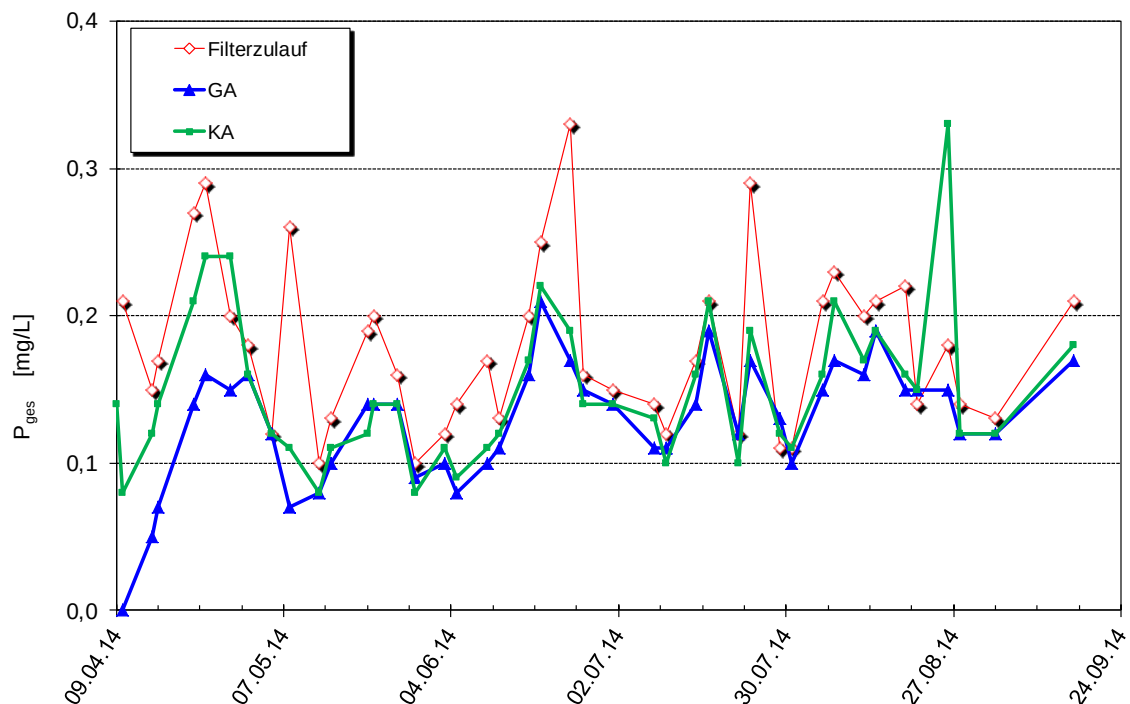


Abbildung 18 Zeitlicher Verlauf der Konzentration an Gesamtphosphor P_{ges} im Zulauf und in den Filtraten von GA und KA (09.04.2014 bis 16.09.2014)

Die Messwerte für N_{ges} , für die Abbildung 19 Wertebereiche zwischen 4 und 8 mg/l im Zulauf und in den Filtraten ausweist, bleiben von der Adsorptionsfiltration weitgehend unbeeinflusst.

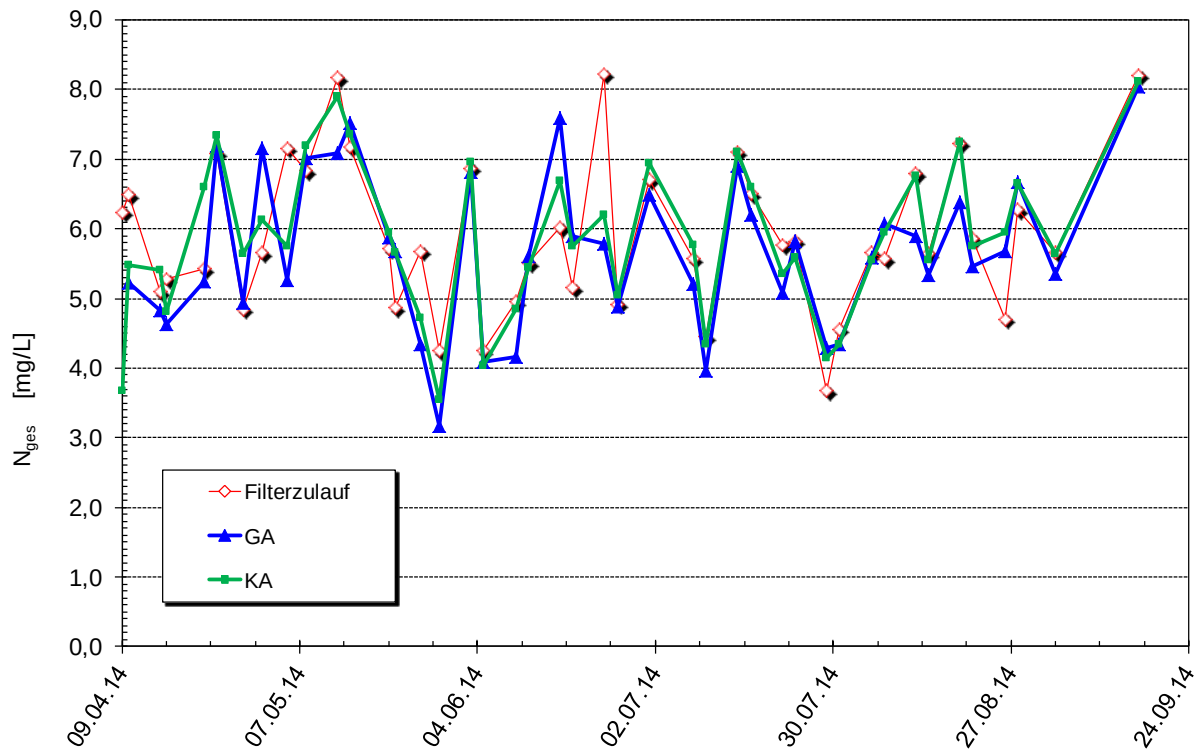


Abbildung 19 Zeitlicher Verlauf der Konzentration an Gesamtstickstoff N_{ges} im Zulauf und in den Filtraten von GA und KA (09.04.2014 bis 16.09.2014)

5.2 Messergebnisse für die organischen Spurenstoffe

5.2.1 Vorbemerkung zur gewählten Darstellung

Die Messergebnisse für die Spurenstoffe befinden sich tabellarisch in Anhang 4 bis Anhang 6. Bei ihrer Darstellung wurden die Spurenstoffe in verschiedene Stoffgruppen bzw. -kategorien aufgeteilt. Die Konzentrationen sind dabei logarithmisch über dem jeweiligen Probenahmezeitpunkt aufgetragen. Es ist zu beachten, dass die Y-Achse der Diagramme, die u. a. industriebürtige Stoffe sowie auch Zuckerersatzstoffe enthalten um den Faktor 10 höher skaliert wurden.

Die Konzentrationen im Zu- und Ablauf der beiden Adsorber (in Abbildung 26 bis Abbildung 29 sowie Abbildung 34 bis Abbildung 39) eines Probenahmetermins sind jeweils aufeinander angeordnet, wobei die Zulaufkonzentration als Rahmen und die Ablaufkonzentration als Füllung einer Balkensäule dargestellt sind. Durch die logarithmierte Darstellung ist hier der lichte Abstand von Rahmen und Füllung ein direktes Maß für den Verminderungsfaktor.

Beispiel: Als Bezugslänge kann auf der Y-Achse die Strecke zwischen 0,1 und 1,0 gewählt werden. Diese Strecke entspricht dem Verminderungsfaktor von 10 bzw. einer Elimination des Spurenstoffs von 90 %. Liegt der Abstand zwischen Zulauf und Filtrat doppelt so weit auseinander, liegt ein Verminderungsfaktor von 100 bzw. eine Elimination von 99 % vor, bei der Hälfte beträgt der Faktor etwa 3,1 und die Elimination knapp 69 %.

5.2.2 Messergebnisse für den Kläranlagenablauf (Zulauf der Adsorber)

Die Abbildungen dieses Kapitels enthalten u. a. Messdaten von zwei Probenahmeterminen (am 13. und 20.03.2014), die im Zuge eines Screenings dem Adsorberbetrieb zeitlich vorausgingen und deren Ergebnisse dazu genutzt wurden, ein Parameterspektrum für ein wirtschaftliches Monitoring der Adsorber festzulegen. Im Zuge des Monitorings wurden in der Zeit vom 14.04.2014 bis 09.12.2014 bis zu dieser Berichtserstellung 9 weitere Proben des Kläranlagenablaufs analysiert (Weitere sind in Arbeit).

In den 5 nachfolgenden Diagrammen der Abbildung 20 bis Abbildung 24 soll der Kopf eines Daten-Balkens unmittelbar auf der X-Achse jeweils indizieren, dass eine Analyse stattgefunden hat, der betreffende Stoff aber nicht nachgewiesen werden konnte. Fehlt dieser Indikator, wurde auf eine entsprechende Analytik verzichtet!

Wie den Daten der Abbildung 20 für die Konzentrationen der Antibiotika im Kläranlagenablauf zu entnehmen ist, wurden einige der untersuchten Stoffe nicht nachgewiesen. Das betrifft bei den Antibiotika Chloramphenicol und ausnahmslos alle untersuchten Tetracycline. Clarithromycin war in dieser Gruppe immer und mit den höchsten Konzentrationen von bis zu 1,3 µg/l nachweisbar.

Bei den Betablockern in Abbildung 21 konnten Betaxolol, Pindolol und Propanolol (bis auf drei Ausnahmen) nicht detektiert werden. Atenolol (bis auf eine Ausnahme), Bisoprolol, Metoprolol und Sotalol wurden hingegen immer in einem jeweils relativ einheitlichen Konzentrationsspektrum nachgewiesen. Metoprolol hatte dabei das höchste Niveau und erreichte im Zulauf der Adsorber (entspricht Ablauf der Kläranlage) Spitzenkonzentrationen von bis zu 2,6 µg/l.

In den Stoffgruppen Analgetika/Antiphlogistika in Abbildung 22 wurden Acetylsalicylsäure, Fenoprofen, Indometacin (bis auf eine Ausnahme), Ketoprofen und Phenacetin (bis auf eine Ausnahme) nicht detektiert. Diclofenac, Naproxen (mit einer Ausnahme) und Phenazon (mit ebenfalls einer Ausnahme) konnten immer nachgewiesen werden, Ibuprofen in 6 von 11 Analysen. In dieser Stoffgruppe zeigt Diclofenac eine klare Dominanz mit Konzentrationen, die fast immer oberhalb von 1 µg/l lagen und im Maximum 4,4 µg/l erreichten.

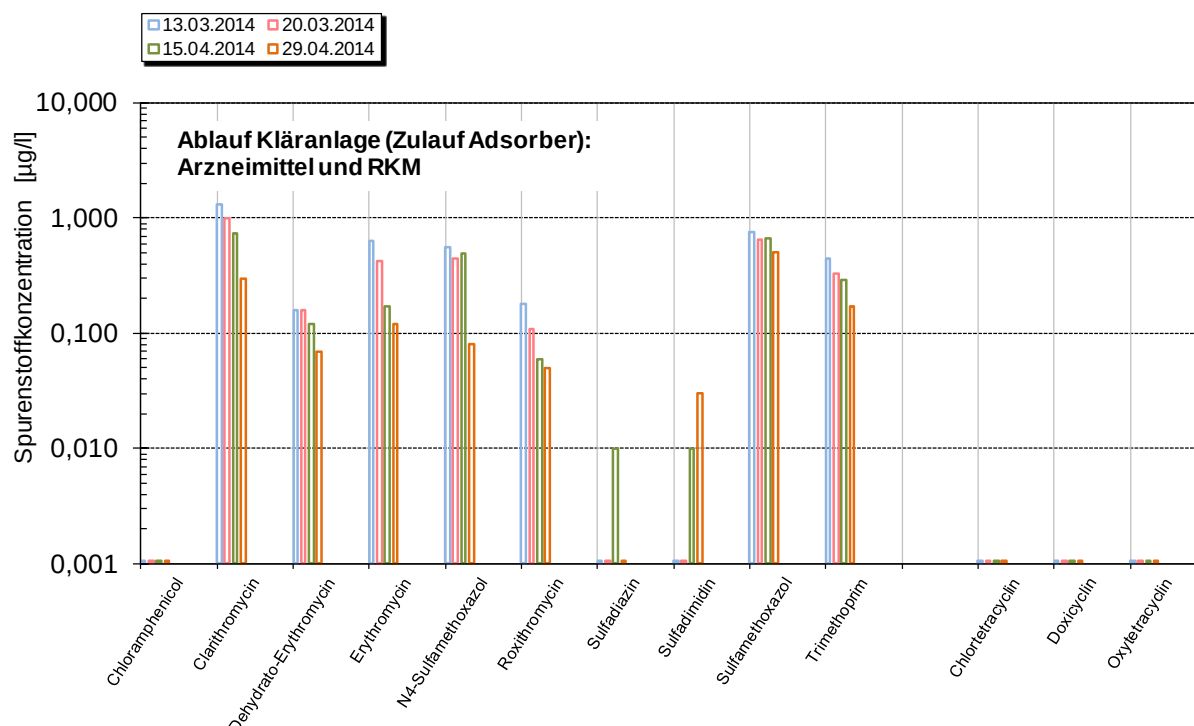


Abbildung 20 Zeitlicher Verlauf der Konzentration an Antibiotika im Ablauf der Kläranlage (13.03.2014 bis einschließlich 29.04.2014)

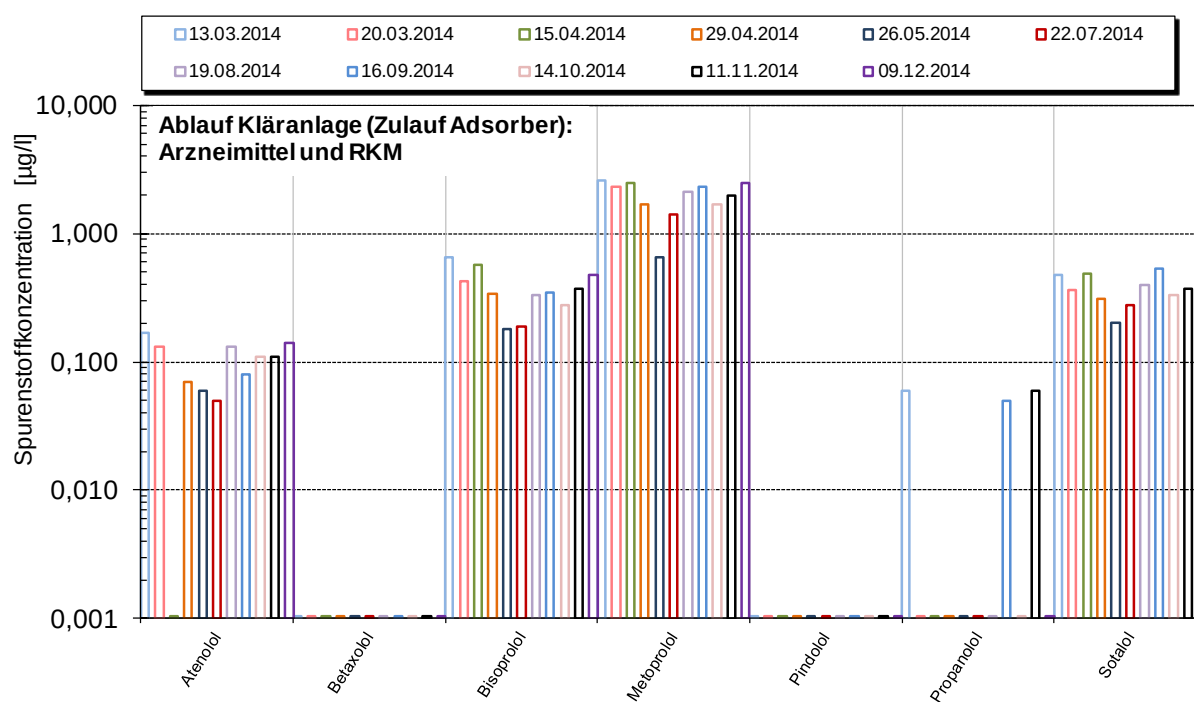


Abbildung 21 Zeitlicher Verlauf der Konzentration an Betablocker im Ablauf der Kläranlage (= Zulauf Adsorber; 13.03.2014 bis 09.12.2014)

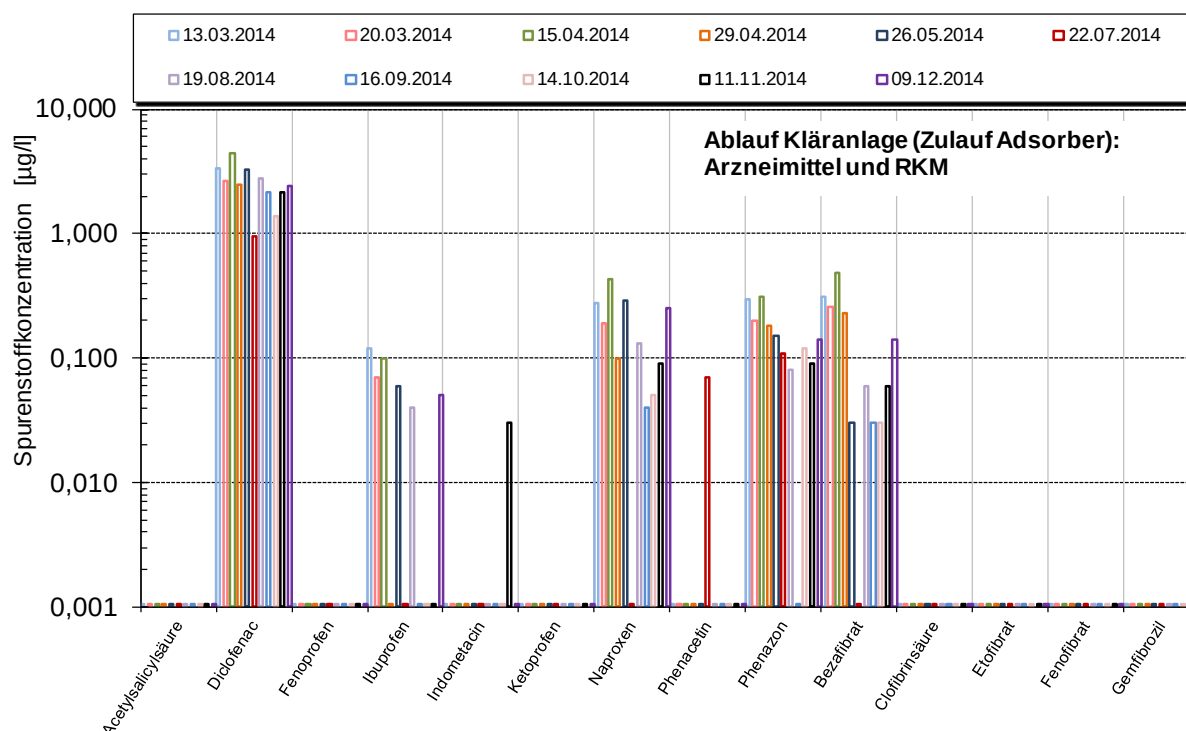


Abbildung 22 Zeitlicher Verlauf der Konzentration an Spurenstoffen (Analgetika, Antiphlogistika, Lipidsenker) im Ablauf der Kläranlage (= Zulauf Adsorber; 13.03.2014 bis 09.12.2014)

In der Stoffgruppe der Lipidsenker (Bezafibrat, Clofibrinsäure, Etofibrat, Fenofibrat, Gemfibrozil, siehe ebenfalls Abbildung 22) trat nur Bezafibrat (mit nur einem Negativbefund) im Kläranlagenablauf auf und erreichte Konzentrationen von bis zu 0,48 µg/l.

Das Antiepileptikum Carbamazepin (siehe Konzentrationsverlauf in Abbildung 23) wurde in allen Proben des Kläranlagenablaufs (bis zu 0,74 µg/l) detektiert, das durchblutungsfördernde Mittel Pentoxifyllin jedoch nie. Unter den beiden Psychopharmaka Oxazepam und Diazepam konnte das Letztere nie nachgewiesen werden, während Oxazepam ein relativ einheitliches Konzentrationsspektrum zwischen 0,12 und 0,22 µg/l aufwies (nur einmal auch eine Konzentration unterhalb der Nachweisgrenze).

Die Gruppe der Röntgenkontrastmittel (Amidotrizoesäure, Iohexol, Iomeprol, Iopamidol, Iopromid, Iothalamicsäure) wurde während des Monitoring nicht bei jeder Probenahme, sondern nur sporadisch analysiert (siehe ebenfalls Messdaten in Abbildung 23), da infolge ihrer vergleichsweise schlechten Adsorbierbarkeit und der in Hinsicht auf Vielfalt und Konzentration hohen Stoffkonkurrenz mit einem relativ frühen Durchbruch durch die Adsorber gerechnet wurde. Bis auf Iothalamicsäure wurden alle Stoffe dieser Gruppe detektiert, Amidotrizoesäure, Iomeprol und Iopamidol sogar oberhalb von 1 µg/l.

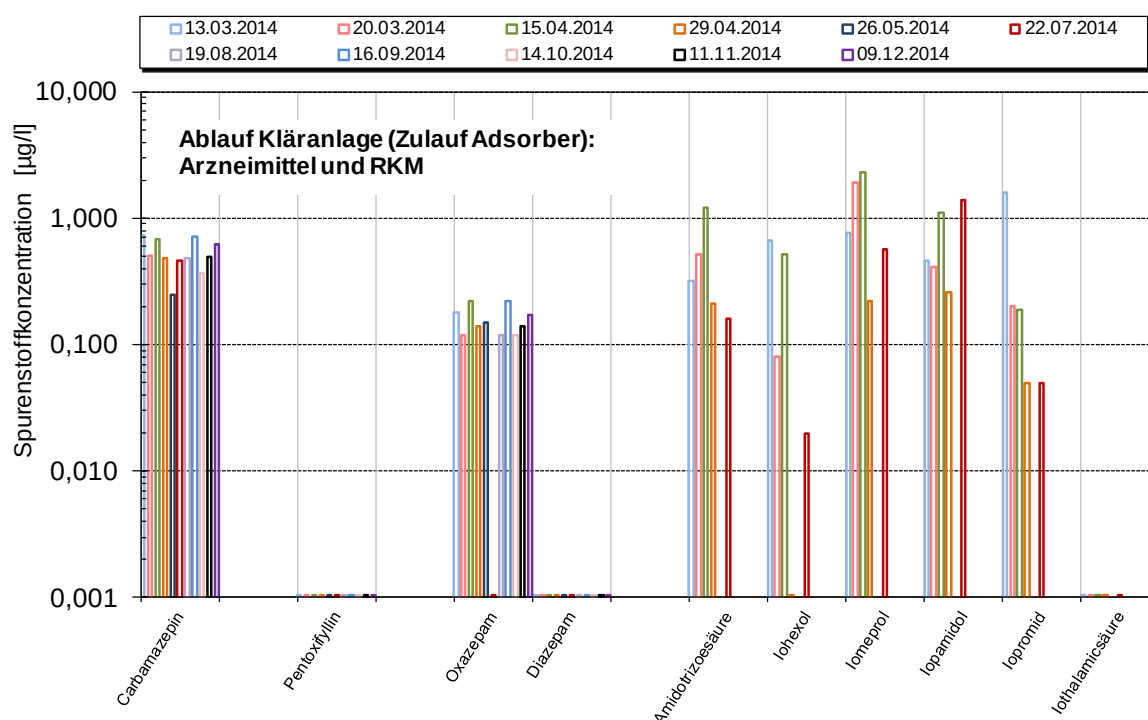


Abbildung 23 Zeitlicher Verlauf der Konzentration an Spurenstoffen (Antiepileptikum, durchblutungsförderndes Mittel, Psychopharmaka, Röntgenkontrastmittel) im Ablauf der Kläranlage (= Zulauf Adsorber; 13.03.2014 bis 09.12.2014)

Beim Screening wurden als Untergruppe der Industriestoffe auch zweimalig Polyfluorierte Chemikalien (PFC bzw. PFT) mit den Einzelstoffen PFBA, PFBS, PFPA, PFHxA, PFHxS, PFHpA, PFOA, PFOS, PFNA, PFDA analysiert. Nur PFOA (perfluorierte Octansäure) wurde jeweils mit einer Konzentration von 0,02 µg/l nachgewiesen (ohne Abbildung in den Diagrammen, siehe Daten in Anhang 4). Die Untergruppe der Phenole wurde beim Screening und bei den ersten beiden Analysen im Rahmen des Monitorings analysiert (siehe Datenbalken im Diagramm der Abbildung 24, deren Y-Achse im Gegensatz zu den zuvor diskutierten Abbildungen im Maximum auf 100 µg/l skaliert wurde). Bisphenol A konnte immer nachgewiesen werden (mit Werten bis zu 0,74 µg/l), die 4-Nonylphenol-Isomere und das 4-tert.-Octylphenol (mit Werten bis zu 0,76 µg/l) nur in der Hälfte aller Analysen. Das Lösungsmittel Sulfolan wurde in nur einer Probe des Kläranlagenablaufs detektiert, das Tensid TMDD jedoch in allen und i.d.R. mit Konzentrationen oberhalb von 3 µg/l (siehe Abbildung 24). Der Spitzenwert betrug 8,0 µg TMDD/l.

Das sowohl industrielle als auch im Haushalt verwendete Korrosionsschutzmittel Benzotriazol konnte mit all seinen Metaboliten (vergleiche Abbildung 24) ebenfalls in allen Proben nachgewiesen werden. Als Stoffsumme weisen sie sehr hohe Konzentrationen zwischen knapp 10 und 16,3 µg/l auf. Unter den drei Herbizide Diuron, Isoproturon und Terbutryn, die

auch im kommunalen Abwasser relevant sind, da sie auch im häuslichen Umfeld Verwendung finden, wurde Terbutryn bis auf zwei Probenahmen stets und Diuron bei den ersten vier PN nur einmal nachgewiesen.

Der Zuckerersatzstoff Acesulfam wurden ebenfalls nur bei den ersten vier PN analysiert und stets nachgewiesen, wobei eine Spitzenkonzentrationen von bis zu 41 µg/l auftrat (siehe Abbildung 24).

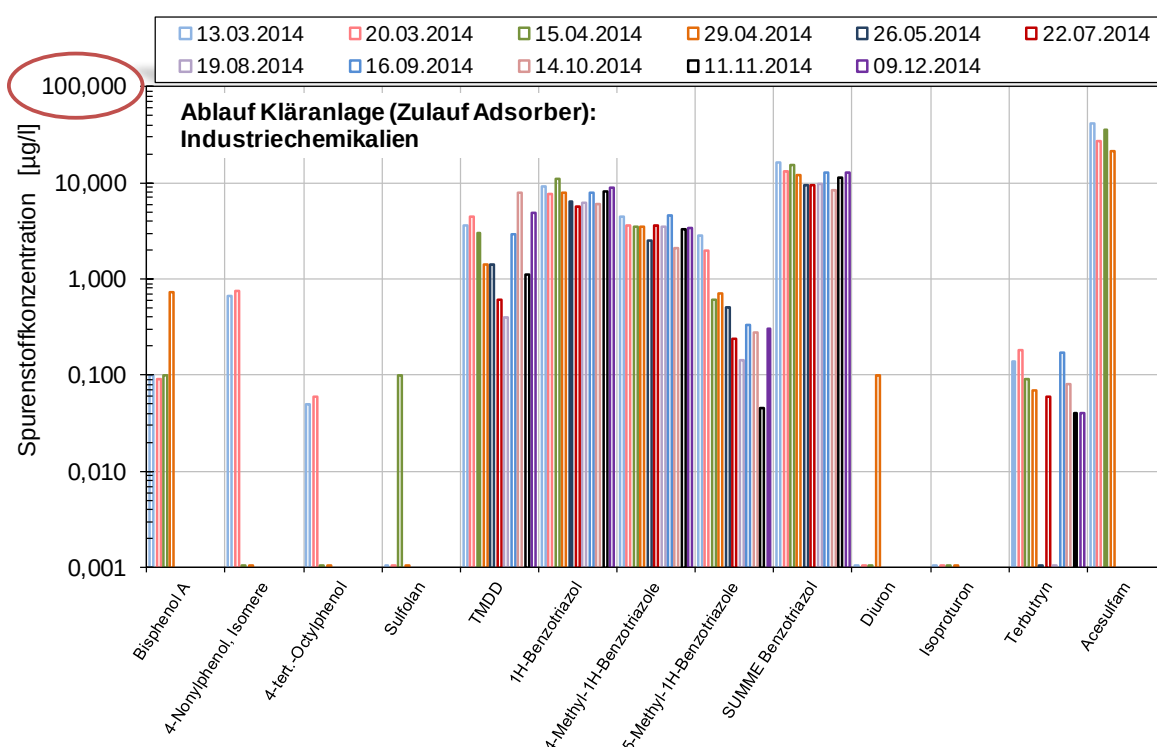


Abbildung 24 Zeitlicher Verlauf der Konzentration an Spurenstoffen (Industrie- und Haushaltsstoffe, Herbizide, Zuckerersatzstoff) im Ablauf der Kläranlage (= Zulauf Adsorber; 13.03.2014 bis 09.12.2014; Y-Skalierung bis 100 µg/l)

5.2.3 Messergebnisse für den Großadsorber (GA)

Abweichend zu den Diagrammen des vorangehenden Kapitels wurden in den folgenden Diagrammen für die Stoffkonzentrationen im Zu- und Ablauf bzw. Filtrat nicht nachweisbare Stoffe mit der halben Konzentration ihrer Nachweisgrenze aufgetragen. Auf dieser Basis wurden auch die normierten Konzentrationen c/c_0 sowie die Stoffmassenbilanzen für die Beladung und eine mittleren Elimination berechnet.

Aus Abbildung 26 ist zu entnehmen, dass die Konzentrationen der Antibiotika (nur bis zur PN vom 29.04.2014 analysiert) im Filtrat des GA konsequent unter der Nachweisgrenze liegen.

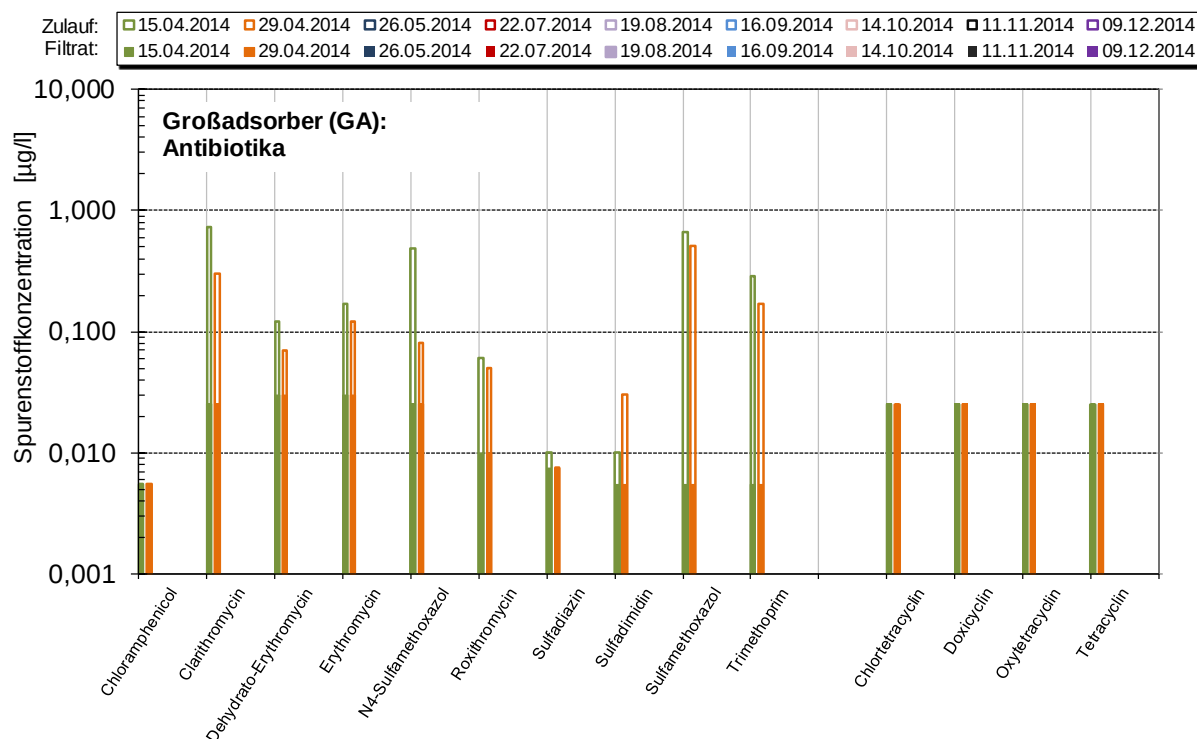


Abbildung 25 Zeitlicher Verlauf der Konzentration an Antibiotika im Zulauf und im Filtrat des GA (lediglich 15.04.2014 bis 29.04.2014)

Bei den Betablockern in Abbildung 27 wurde Atenolol zwar konsequent im Zulauf, jedoch nie im Filtrat des GA nachgewiesen. Bisoprolol wurde im August und Dezember im Filtrat detektiert. Bei Metoprolol, das ebenfalls im August im Filtrat auftrat, zeichnet sich ab November ein leichter Konzentrationsanstieg im Filtrat ab. Sotalol wurde hingegen nur einmalig im August detektiert. Das gemeinsame Auftreten der drei letztgenannten Stoffe im August ist auffällig, eine Ursache kann dafür aber nicht genannt werden.

In der Stoffgruppe der Analgetika/Antiphlogistika in Abbildung 27 hebt sich das Verhalten von Diclofenac von den übrigen Stoffen ab: Im Kontext relativ hoher Zulaufkonzentrationen ist Diclofenac schon beim dritten Probenahmetermin nach Adsorberstart (am 26.05.2014) im Filtrat nachweisbar. Die Filtratkonzentration steigt danach konsequent von Probenahme zu Probenahme und erreicht im Dezember einen Wert von 0,68 µg Diclofenac/l. Naproxen, das auch nahezu immer im Zulauf detektiert werden konnte, trat nur im Dezember im Filtrat des GA auf. Phenacetin wurde einmalig im Zu- (0,07 µg/l) und Ablauf (0,05 µg/l) des GA und Phenazon zweimalig (Mai und August) mit 0,01 µg/l im Filtrat nachgewiesen, bevor sich im November und Dezember ein klarer Trend für einen Konzentrationsanstieg im Filtrat abzeichnet.

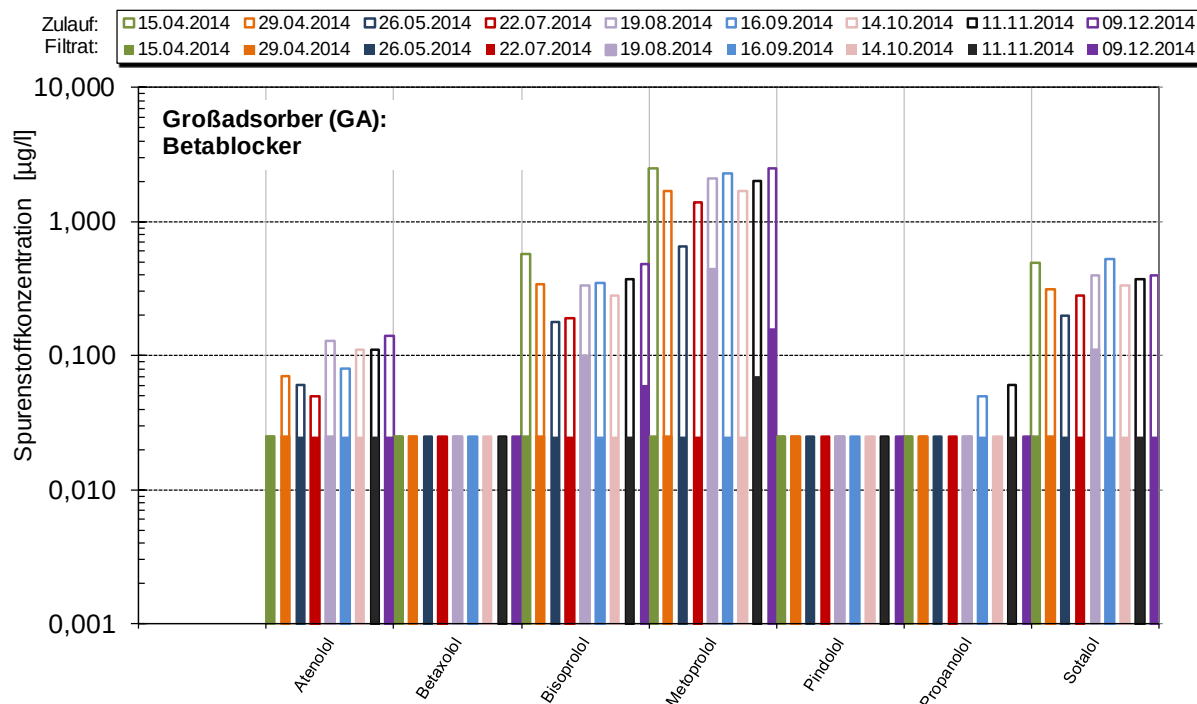


Abbildung 26 Zeitlicher Verlauf der Konzentration an Spurenstoffen (Antibiotika und Betablocker) im Zulauf und im Filtrat des GA (15.04.2014 bis 09.12.2014)

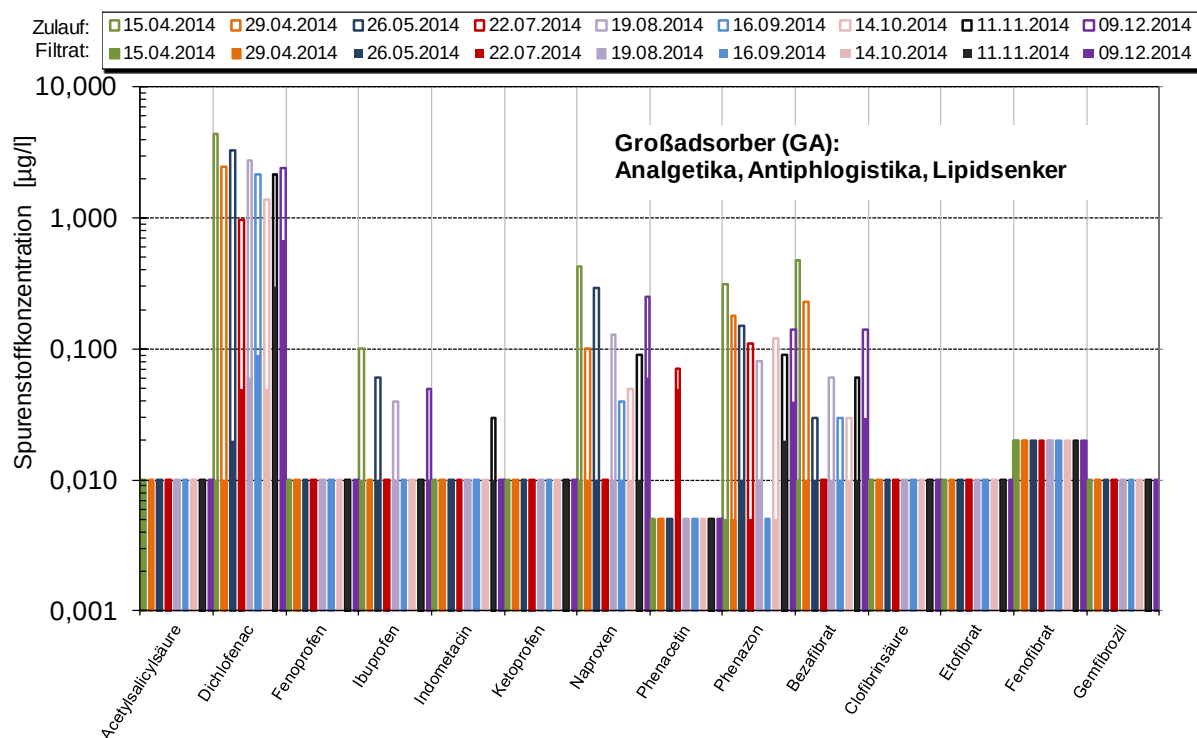


Abbildung 27 Zeitlicher Verlauf der Konzentration an Spurenstoffen (Analgetika, Antiphlogistika, Lipidsenker) im Zulauf und im Filtrat des GA (15.04.2014 bis 09.12.2014)

In der Stoffgruppe der Lipidsenker (siehe Abbildung 27) trat nur Bezafibrat im Zulauf des GA auf. Im Filtrat des GA wurde aber nur im Dezember ein Positivbefund mit 0,03 µg Bezafibrat/l detektiert.

Das Antiepileptikum Carbamazepin in Abbildung 28 wurde am dem 29.08.2014 im Filtrat des GA detektiert und zeigt an den Folgeterminen stetig ansteigende Konzentrationen, die im Dezember einen Wert von 0,12 µg Carbamazepin/l erreichten.

Das Psychopharmaka Oxazepam wurde im Dezember einmalig im Filtrat des GA mit einer Konzentration von 0,08 µg Oxazepam/l nachgewiesen.

Die Gruppe der Röntgenkontrastmittel (Amidotrizoesäure, Iohexol, Iomeprol, Iopamidol, Iopromid, Iothalamidsäure) wurde nur in der anfänglichen Adsorberlaufzeit analysiert. Doch bereits in dieser relativ frühen Phase, d. h. ab dem zweiten oder dritten Probenahmetermin, beginnt der Konzentrationsdurchbruch aller im Zulauf nachgewiesenen Stoffe, so dass am 26.05.2004 oder spätestens 22.07.2014 so genannte Chromatographieeffekte beobachtet werden können (siehe Abbildung 28). Bei diesen bewirkt die starke Stoffkonkurrenz, dass auf der Aktivkohle bereits adsorbierte Stoffmengen wieder in das Filtrat verdrängt werden und dort in Relation zum Zulauf zu Konzentrationsüberhöhungen führen. Hier schlägt sich die erwartete vergleichsweise schlechte Adsorbierbarkeit der Röntgenkontrastmittel nieder.

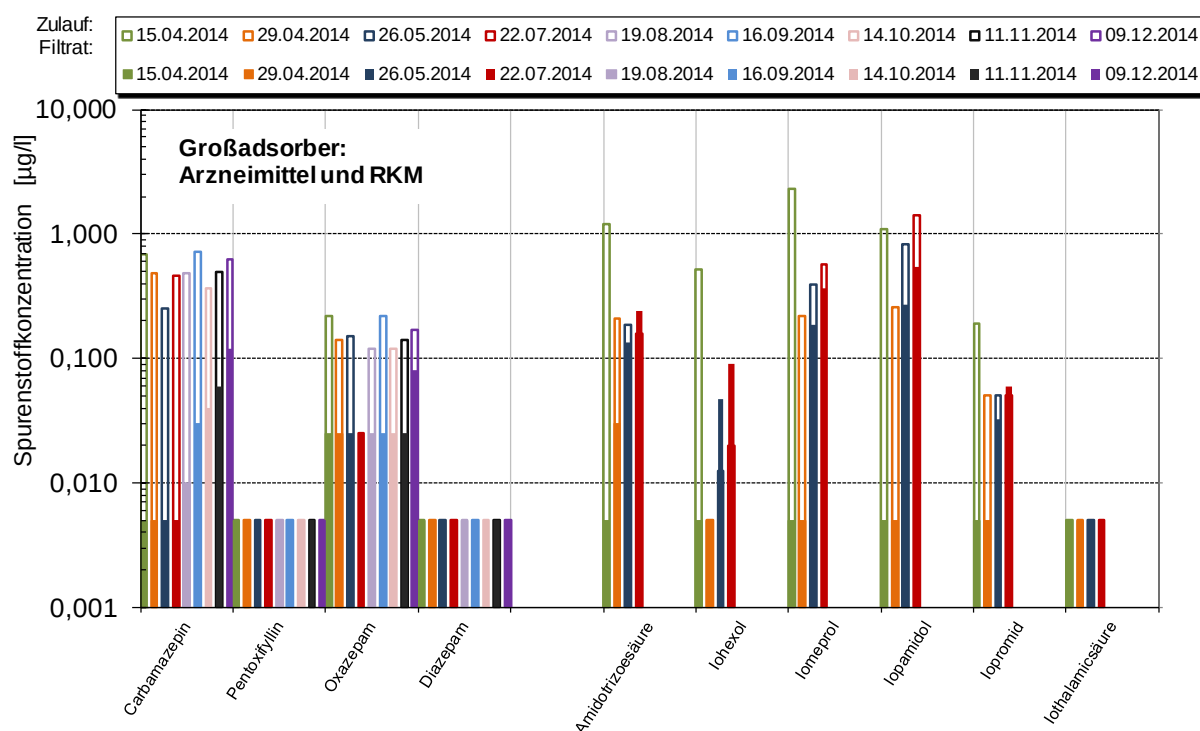


Abbildung 28 Zeitlicher Verlauf der Konzentration an Spurenstoffen (Antiepileptika, durchblutungsfördernde Mittel, Psychopharmaka, Röntgenkontrastmittel) im Zulauf und im Filtrat des GA (15.04.2014 bis 09.12.2014)

In Gruppe der Industriestoffe (siehe Abbildung 29) liegen in Gruppe der Herbizide für Diuron und Isoproturon zu wenige Messdaten vor, um das Adsorberverhalten diskutieren zu können. Terbutryn tritt im Zulauf nicht immer, und falls doch, nur in geringen Konzentrationen i. d. R. unterhalb von 0,1 Terbutryn µg/l auf. Im Filtrat wurde es nie nachgewiesen. Obwohl für den Zuckerersatzstoff Acesulfam ebenfalls eine nur geringe Anzahl an Messdaten vorliegt, zeichnet sich hier bereits am 29.04.2014 der aus Vorgängerprojekten (Nahrstedt et al. 2014) gut bekannte rasche Stoffdurchbruch durch das GAK-Bett ab (siehe Abbildung 29).

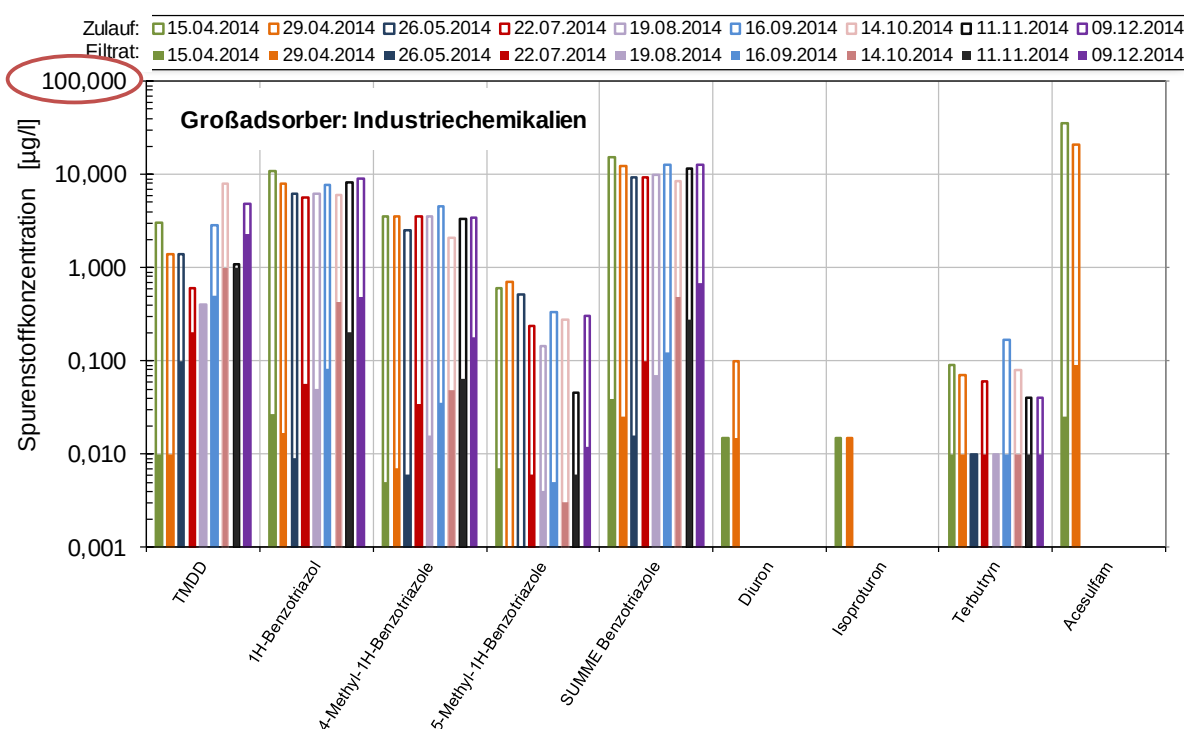


Abbildung 29 Zeitlicher Verlauf der Konzentration an Spurenstoffen (Industrie- und Haushaltsstoffe, Herbizide, Zuckerersatzstoff) im Zulauf und im Filtrat des GA (15.04.2014 bis 09.12.2014, Y-Skalierung bis 100 µg/l)

Für das Tensid TMDD ist ab dem 26.05.2014 ein stetiger Konzentrationsanstieg im Filtrat des GA festzustellen (vergleiche Abbildung 29), und zwar bis auf einen Wert von 2,3 µg TMDD/l, der im Dezember detektiert wurde. Für das Korrosionsschutzmittel Benzotriazol und eine Gruppe seiner Metabolite (4-Methyl-1H-Benzotriazole) sowie auch die Stoffsumme der Benzotriazole zeichnen sich moderate Konzentrationsanstiege ab. Die Werte für die 5-Methyl-1H-Benzotriazole schwanken ohne klar erkennbaren Trend.

Aus den Zu- und Ablaufkonzentrationen zu einem Probenahmezeitpunkt i wurde die jeweils aktuelle Elimination E_i eines Stoffes gemäß Gleichung (6) berechnet und in den Diagrammen der Abbildung 30 und Abbildung 31:

$$E_i = \left(1 - \frac{c_i}{c_{0,i}}\right) \quad (6)$$

Durch den Bezug von der Filtrat- auf die Zulaufkonzentration eines Stoffes bei einem Probenahmetermin lassen sich die Zulaufschwankungen zur Bewertung der Adsorberleistung etwas kompensieren.

Im Folgenden sind in Abbildung 30 und Abbildung 31 Diagramme für diejenigen Stoffe gezeigt, die im Adsorberzulauf regelmäßig nachweisbar waren. Änderungen der prozentualen Elimination, die sich im Bereich oberhalb 99 % in der Nachkommastelle abspielen, sind bei der linearen Darstellung wie z. B. anfänglich für Diclofenac in Abbildung 30 kaum noch wahrnehmbar, während sie sich bei der logarithmierten Darstellung der Konzentrationen in Abbildung 27 sehr stark bemerkbar machen. Die Diagrammlegende enthält neben dem Probenahmetermin auch die bis zu diesem Zeitpunkt durchgesetzten Bettvolumina (BVT).

Die Elimination von Atenolol liegt während der gesamten hier erfassten Adsorberlaufzeit ohne einen eindeutigen Trend zwischen 50 und gut 80 % (siehe Abbildung 30), doch ist diese Werte nur von der Zulaufkonzentration und der Nachweisgrenze abhängig, da die Konzentration im Filtrat stets unter der Bestimmungsgrenze liegt; nach 8.183 BVT ergibt sich daraus im Mittel für die Gesamtfrachten (Berechnung mit den Gleichungen (1) bis (5)) eine Elimination von 82,1 %, deren zeitliche Entwicklung Abbildung 32 zeigt.

Die Bisoprolol-Konzentration im Filtrat liegt bis auf zwei Ausnahmen (19.08.2014 und 09.12.2014) ebenfalls unter der Nachweisgrenze, was zu einer jeweils aktuellen Elimination zwischen 86 und 98 % führt (nur am 19.08.2014 wurden 70 % ermittelt); die mittlere Elimination ergibt sich mit dem einen Ausreißer schließlich zu 88,3 %. Bei Metoprolol (aktuelle Elimination zwischen 79 und 99 %, mittlere Elimination von 95,0 %) und Sotalol (aktuelle Elimination zwischen 72,5 und 94,9 %, mittlere Elimination 89,9 %) verhält es sich analog.

Diclofenac wird anfänglich im Filtrat nicht nachgewiesen (siehe Abbildung 30), so dass die Elimination bis zum 14.10.2014 einem ganz leichten und danach einem etwas stärkeren Trend (beginnend mit einer Elimination von 99,8 % bis zu 71,9 % im Dezember) unterliegt. Die mittlere Elimination beträgt beim letzten Probenahmetermin 95,7 % (siehe Abbildung 32). Die Filtratkonzentration in Abbildung 30 für Ibuprofen, das im Zulauf häufig nicht nachweisbar ist, liegt immer unter der Nachweisgrenze, so dass sich auch hier die rechnerisch ausgewiesene Elimination rein zulaufspezifisch ergibt. Die mittlere Elimination erreicht nach 8.183 BVT einen Wert von 66,4 % (siehe ebenfalls Abbildung 32). Das gleiche gilt für Naproxen mit einem Mittelwert von 90,9 % und für Phenazon mit einem Mittelwert von 92,0 %.

15.04.14, 265 BVT 29.04.14, 725 BVT 26.05.14, 1707 BVT 22.07.14, 3674 BVT 19.08.14, 4642 BVT 16.09.14, 5572 BVT 14.10.14, 6511 BVT 11.11.14, 7437 BVT 09.12.14, 8183 BVT

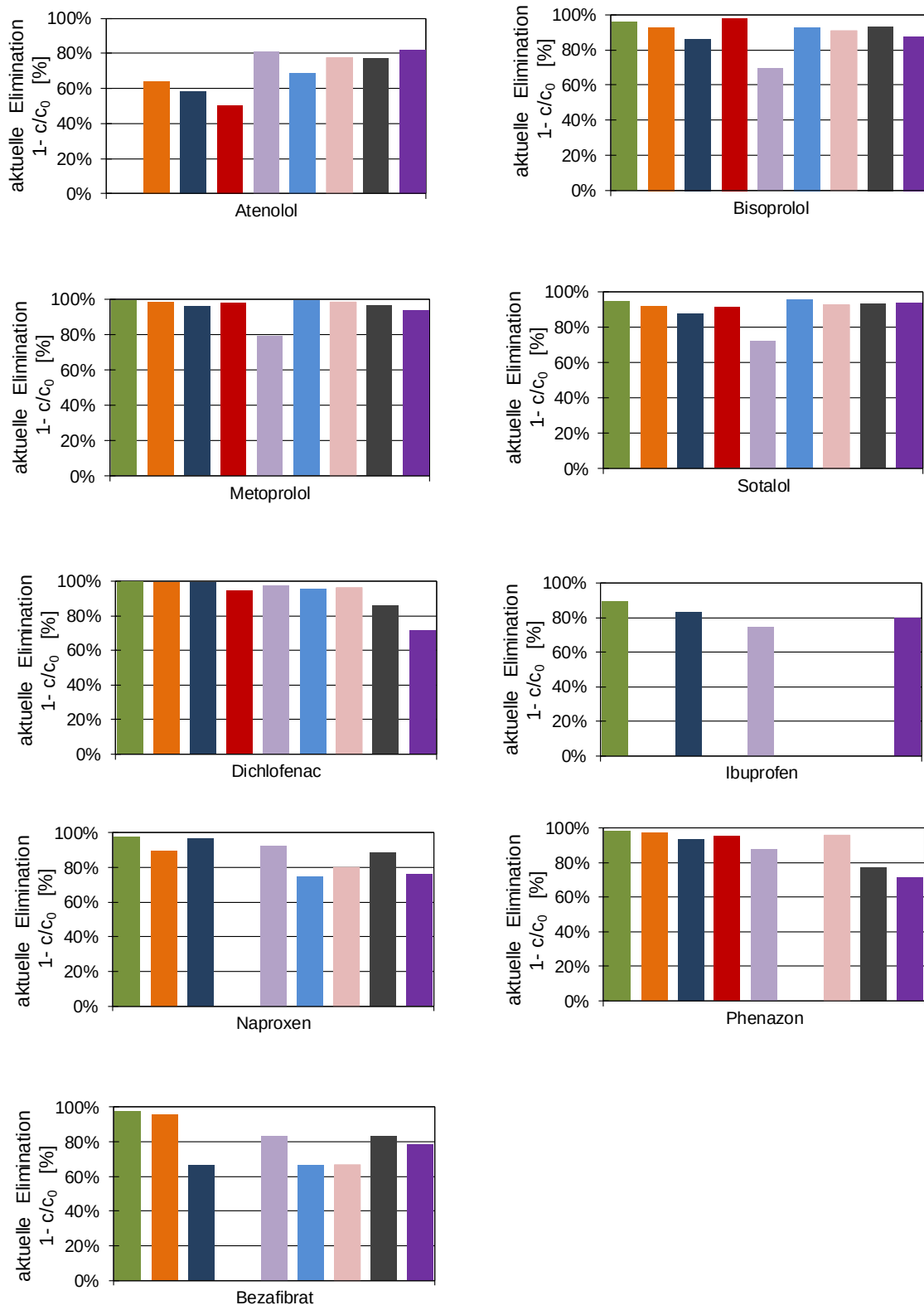


Abbildung 30 Bei der PN aktuelle Elimination nachweisbarer Spurenstoffe (1. Teil) im GA in Abhängigkeit der Zeit und des BVT (15.04.2014 bis 09.12.2014; bei Nullwerten ist Zulaufkonzentration < Bestimmungsgrenze)

15.04.14, 265 BVT 29.04.14, 725 BVT 26.05.14, 1707 BVT 22.07.14, 3674 BVT 19.08.14, 4642 BVT 16.09.14, 5572 BVT 14.10.14, 6511 BVT 11.11.14, 7437 BVT 09.12.14, 8183 BVT

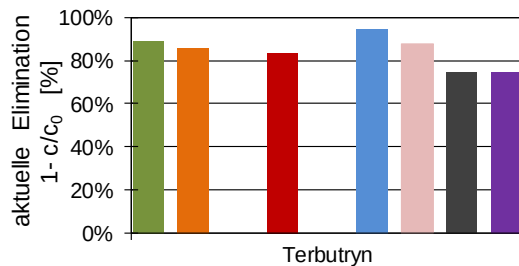
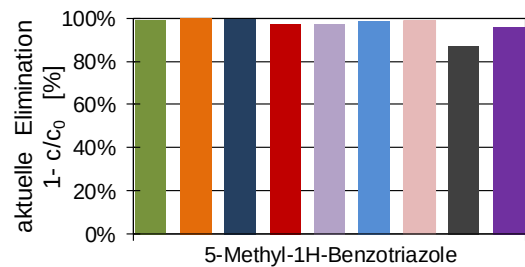
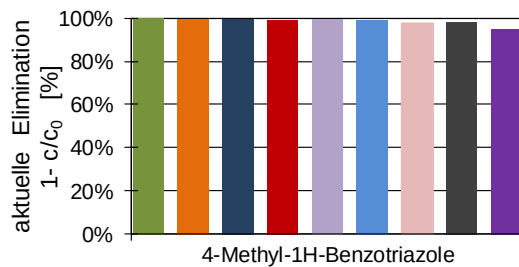
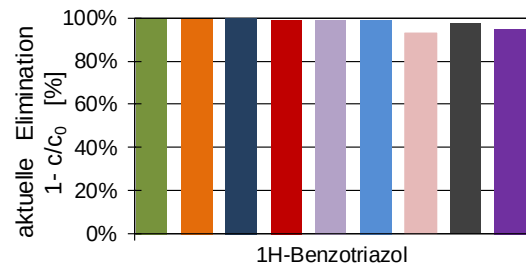
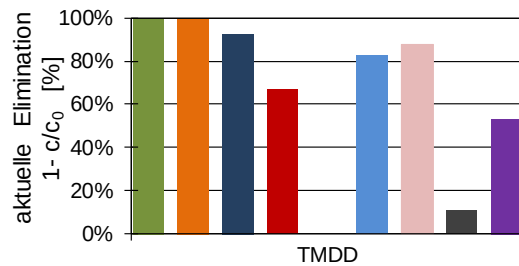
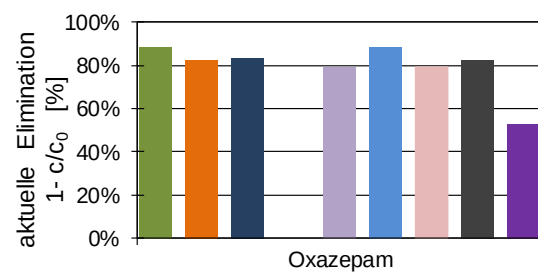
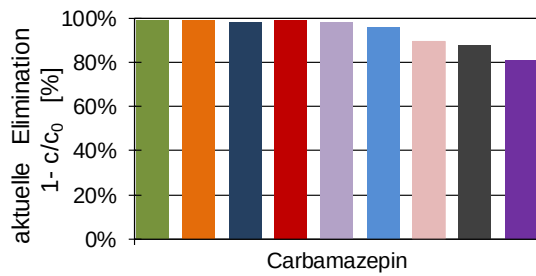


Abbildung 31 Bei der PN aktuelle Elimination nachweisbarer Spurenstoffe (2. Teil) im GA in Abhängigkeit der Zeit und des BVT (15.04.2014 bis 09.12.2014; bei Nullwerten ist Zulaufkonzentration < Bestimmungsgrenze)

Während auch Bezafibrat (aktuelle Eliminationen in Abbildung 30) und Oxazepam (aktuelle Eliminationen siehe Daten in Abbildung 31) nur beim letzten Probenahmetermin im Dezember im Filtrat des GA detektierbar waren (berechnete mittlere Eliminationen nach 8.183 BVT von 86,8 % und 79,2 %, siehe Abbildung 32 und Abbildung 33), wies Carbamazepin ab August einen minimalen Konzentrationsanstieg und somit eine leicht sinkende aktuelle Elimination auf mit einer mittleren Eliminationen von insgesamt 95,1 %.

Bei den Röntgenkontrastmitteln konnte schon ab dem 4. Probenahmetermin negative Eliminationen berechnet werden, d. h. die Konzentration im Filtrat lag über dem Zulauf. In der Gesamtbilanz ergibt sich letztlich ein Nullbefund für die mittlere Elimination.

Das Tensid TMDD wird anfänglich vollständig eliminiert, danach mit etwas schwankendem Eliminationsgrad (siehe Balkendiagramm in Abbildung 31). Die mittlere Elimination sinkt dabei kontinuierlich und erreicht am letzten Probenahmetermin einen Wert von 79,1 % (vergleiche Abbildung 33). Die Benzotriazol-Derivate mit vereinzelt relativ hohen Zulaufkonzentrationen werden ausnahmslos exzellent eliminiert (siehe Abbildung 31). Für die Stoffsumme ergibt sich mit dem letzten Probenahmetermin eine mittlere Elimination von 98,5 % (vergleiche berechnete Werte in Abbildung 33).

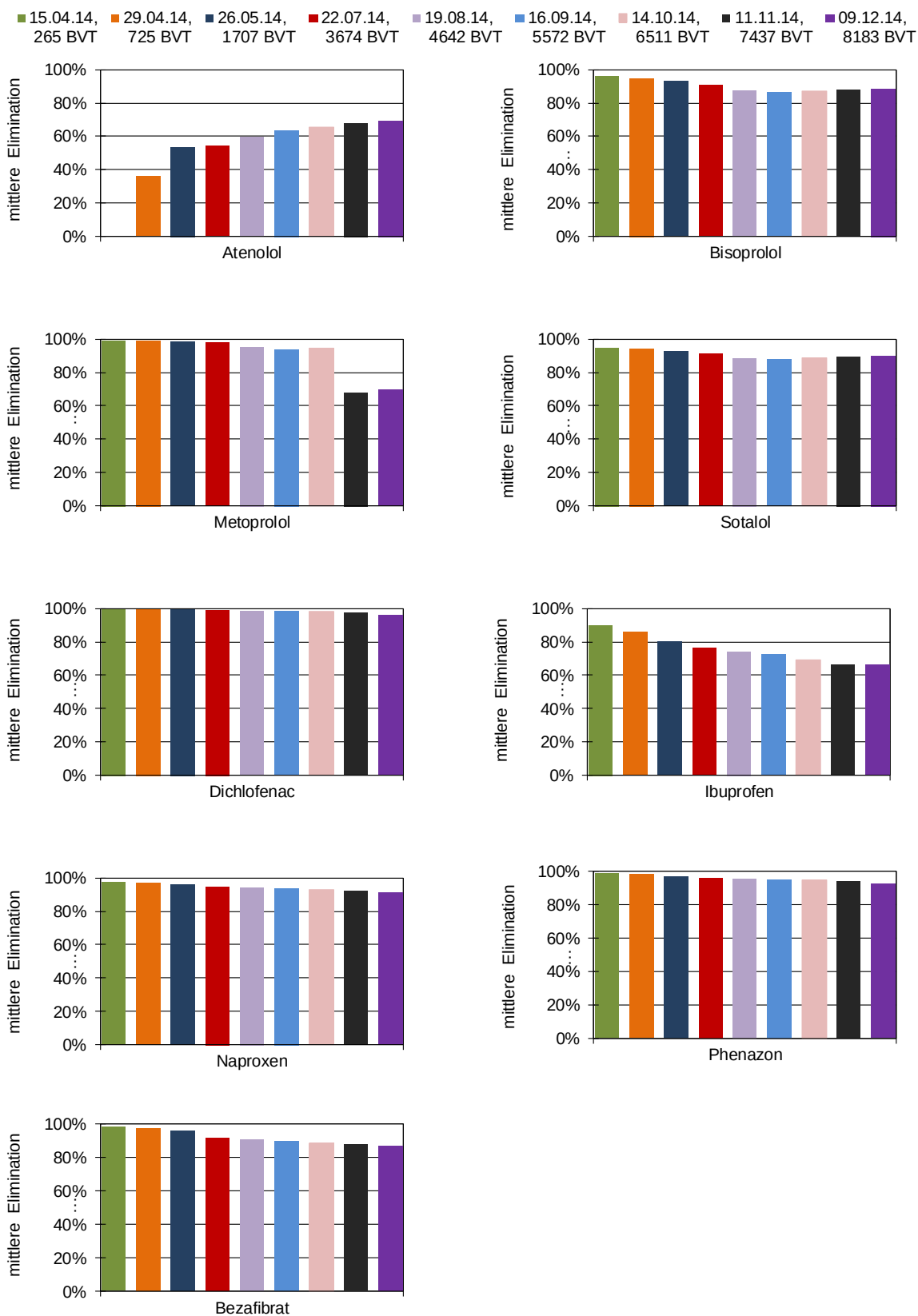


Abbildung 32 Mittlere Elimination nachweisbarer Spurenstoffe (1. Teil) in der Laufzeit des GA in Abhängigkeit von Zeit und BVT (15.04.2014 bis 09.12.2014; bei Nullwerten ist Zulaufkonzentration < Bestimmungsgrenze)

Großadsorber

15.04.14, 265 BVT 29.04.14, 725 BVT 26.05.14, 1707 BVT 22.07.14, 3674 BVT 19.08.14, 4642 BVT 16.09.14, 5572 BVT 14.10.14, 6511 BVT 11.11.14, 7437 BVT 09.12.14, 8183 BVT

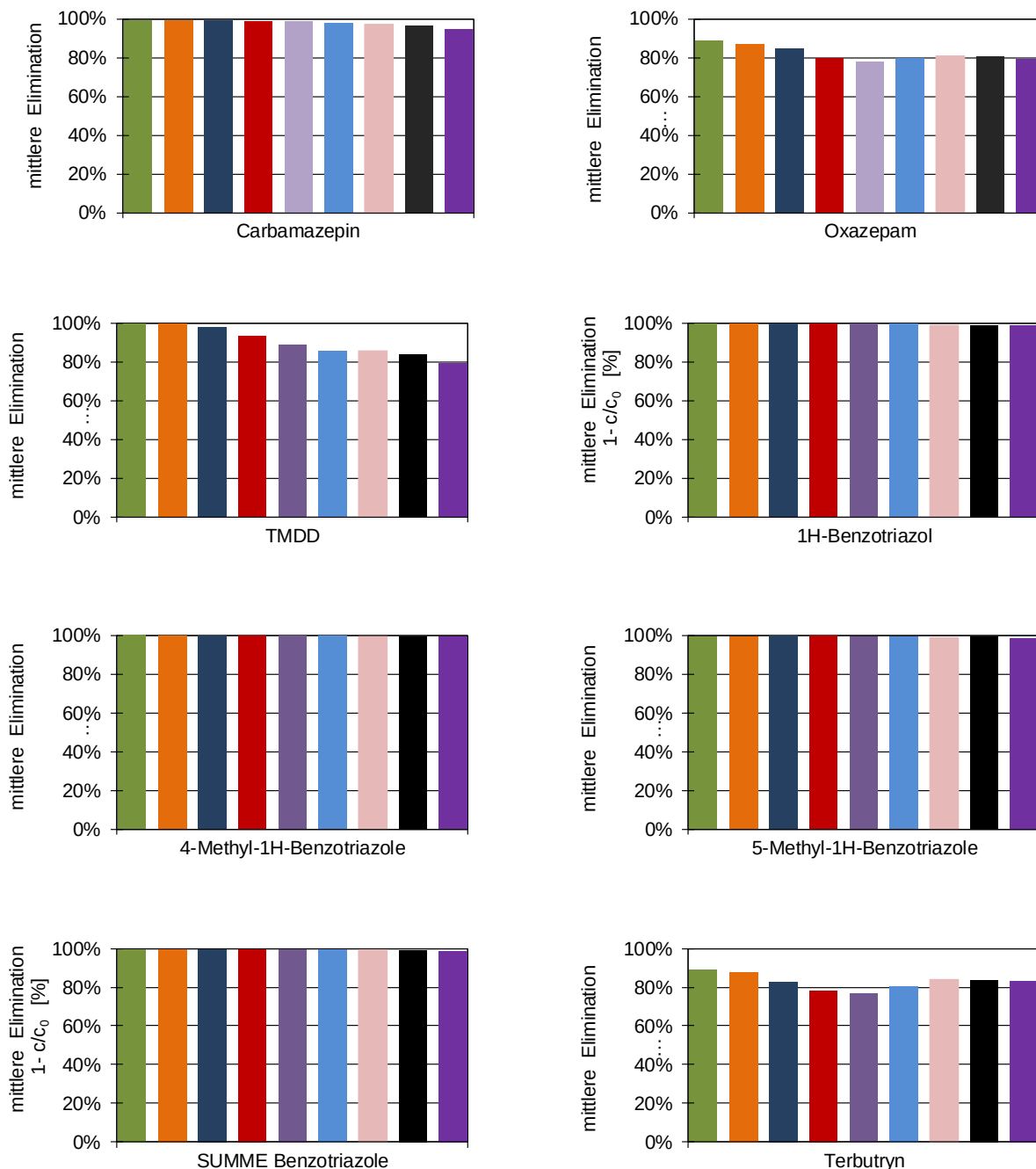


Abbildung 33 Mittlere Elimination nachweisbarer Spurenstoffe (2. Teil) in der Laufzeit des GA in Abhängigkeit von Zeit und BVT (15.04.2014 bis 09.12.2014)

5.2.4 Messergebnisse für den Kleinadsorber (KA)

Im Rahmen der Spurenstoffanalytik, die für den KA in einem 14-tägigen Turnus stattfand, wurden die Antibiotika nur anfänglich bei drei Probenahmen analysiert, d. h. bis zum 20.05.2014, wie Abbildung 34 zeigt. Hierbei konnten die Tetracycline und das Chloramphenicol weder in Zulauf noch im Filtrat nachgewiesen werden. Während Roxithromycin, Sulfadiazin, Sulfadimidin, Trimethoprim und der Metabolit Dehydrato-Erythromycin im Filtrat stets unterhalb der Nachweisgrenze lagen, zeichnet sich bei Clarithromycin und Sulfamethoxazol im Filtrat ein stetiger Anstieg ab. Erythromycin und der Metabolit N4-Sulfamethoxazol weisen im zuletzt analysierten Filtrat einen deutlichen Anstieg auf.

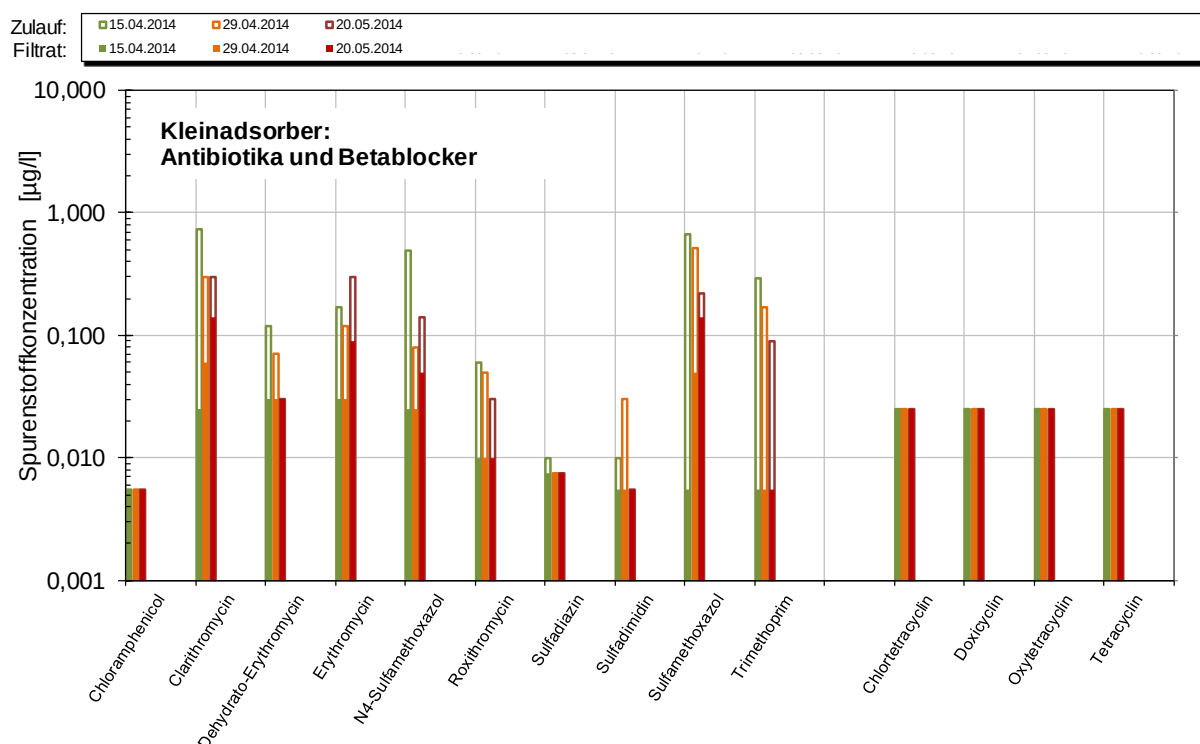


Abbildung 34 Zeitlicher Verlauf der Konzentration an Spurenstoffen (Antibiotika) im Zulauf und im Filtrat des KA (15.04.2014 bis 20.05.2014)

In der Gruppe der Betablocker in Abbildung 35 wurde Atenolol, das im Zulauf ohne Unterbrechung nachweisbar war, erst beim Probenahmetermin am 14.10.2014 detektiert, d. h. nach einem Durchsatz durch den KA von 14.380 BVT.

Das Verhalten von Bisoprolol, Metoprolol und Sotalol in Abbildung 35 ist hingegen stärker schwankend bzw. weniger stetig. Ab dem Probenahmetermin 08.07.2014 zeichnet sich eine Grundtendenz zu einem sehr langsam ansteigenden Durchbruch dieser Stoffe ins Filtrat ab. Diese Tendenz wird gelegentlich auch durch Negativbefunde unterbrochen.

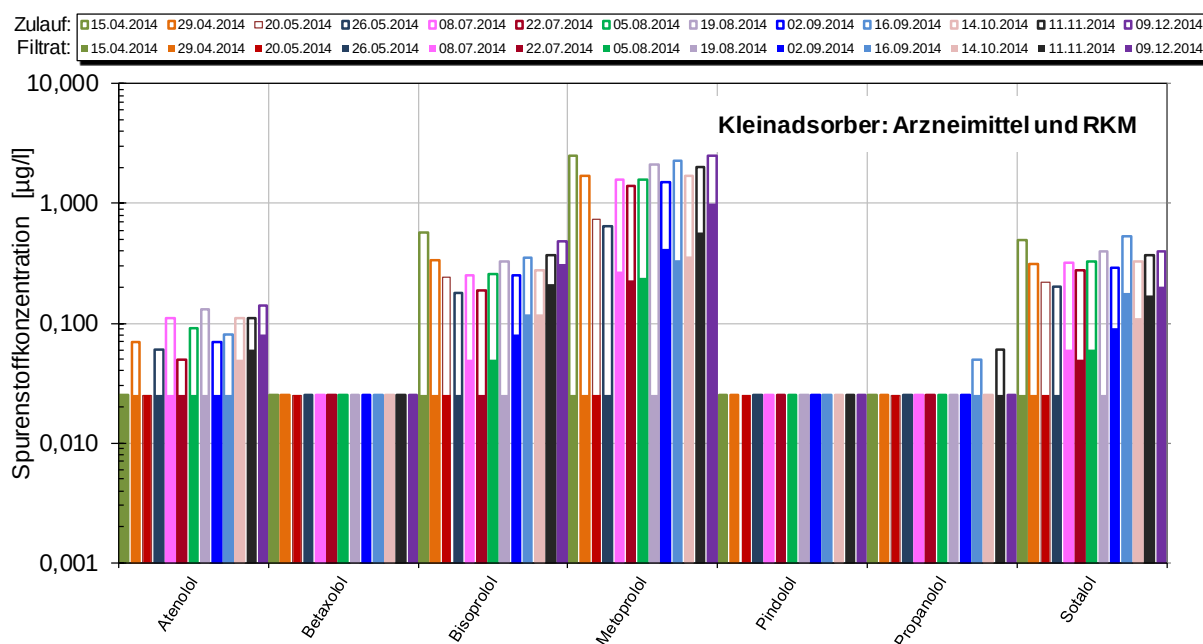


Abbildung 35 Zeitlicher Verlauf der Konzentration an Spurenstoffen (Betablocker) im Zulauf und im Filtrat des KA (15.04.2014 bis 09.12.2014)

Innerhalb der Stoffgruppe der Analgetika/Antiphlogistika in Abbildung 36 sind sehr unterschiedliche Verhaltensweisen der einzelnen Stoffe festzustellen: Diclofenac zeigt bereits von Beginn an eine sehr hohe Filtratkonzentration, tritt danach einmalig mit einem Negativbefund auf und folgt dann in einem stark streuenden, aber im Mittel mehr oder weniger festen Verhältnis zur Zulaufkonzentration. Ähnlich verhält sich Phenazon, wobei das Filtrat sich bei den beiden ersten Probenahmeterminen unbelastet zeigt. Das Auftreten von Naproxen im Filtrat des KA weist bis zum Probenahmetermin im September kein einheitliches Muster auf, sondern scheint bis zu diesem Zeitpunkt eher dem Zufall zu unterliegen (siehe Abbildung 36). Danach steigen sowohl Zulauf als auch Filtratkonzentration in einem etwa konstanten Verhältnis zueinander an. Ibuprofen wird nur einmalig am 08.07.2014 im Filtrat nachgewiesen, Phenacetin am 26.05.2014 und 08.07.2014 zweimalig.

Als einziger Vertreter aus der Gruppe der Lipidsenker (siehe Abbildung 37) wurde im Zulauf des KA Bezafibrat detektiert, das anfänglich zunächst nicht im Filtrat (einzige Ausnahme: 20.05.2014) nachgewiesen werden konnte, ab dem 19.08.2014 dann aber in Konzentrationen gemessen wurde, die in einem festen Verhältnis zum Zulauf stehen (siehe gleiche Längendifferenz der Balken für Zulauf und Filtrat bei der logarithmischen Darstellung in Abbildung 37).

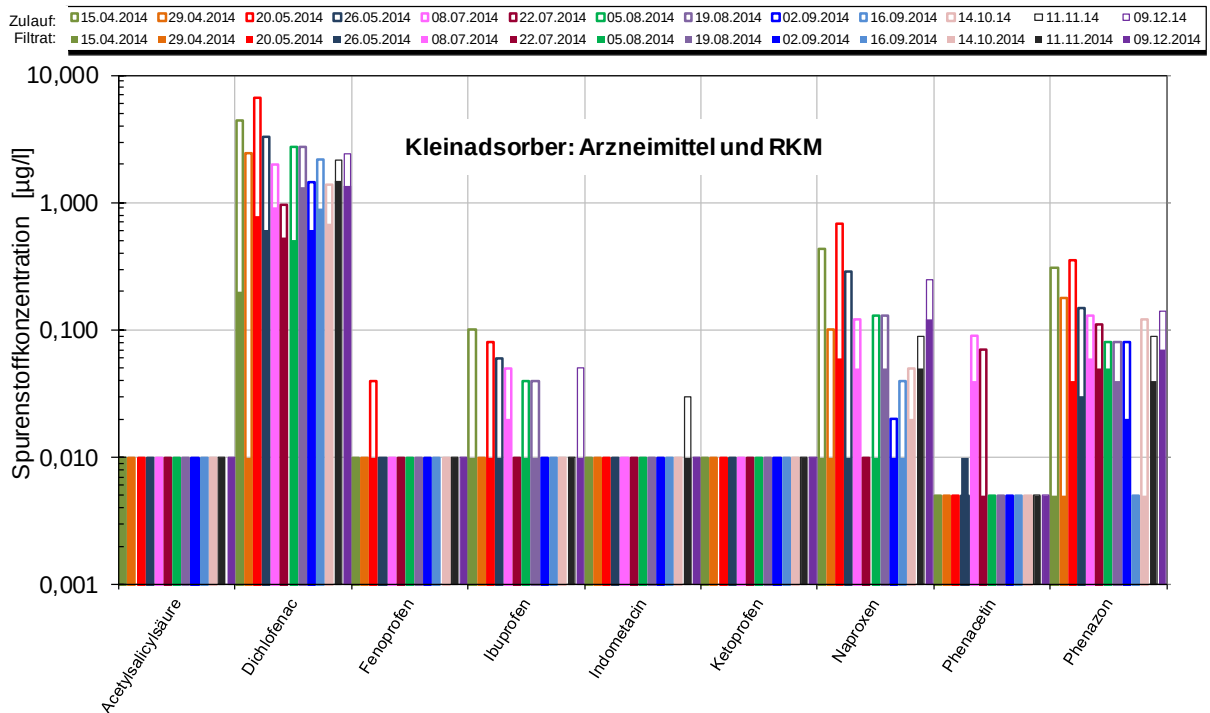


Abbildung 36 Zeitlicher Verlauf der Konzentration an Spurenstoffen (Analgetika, Antiphlogistika) im Zulauf und im Filtrat des KA (15.04.2014 bis 09.12.2014)

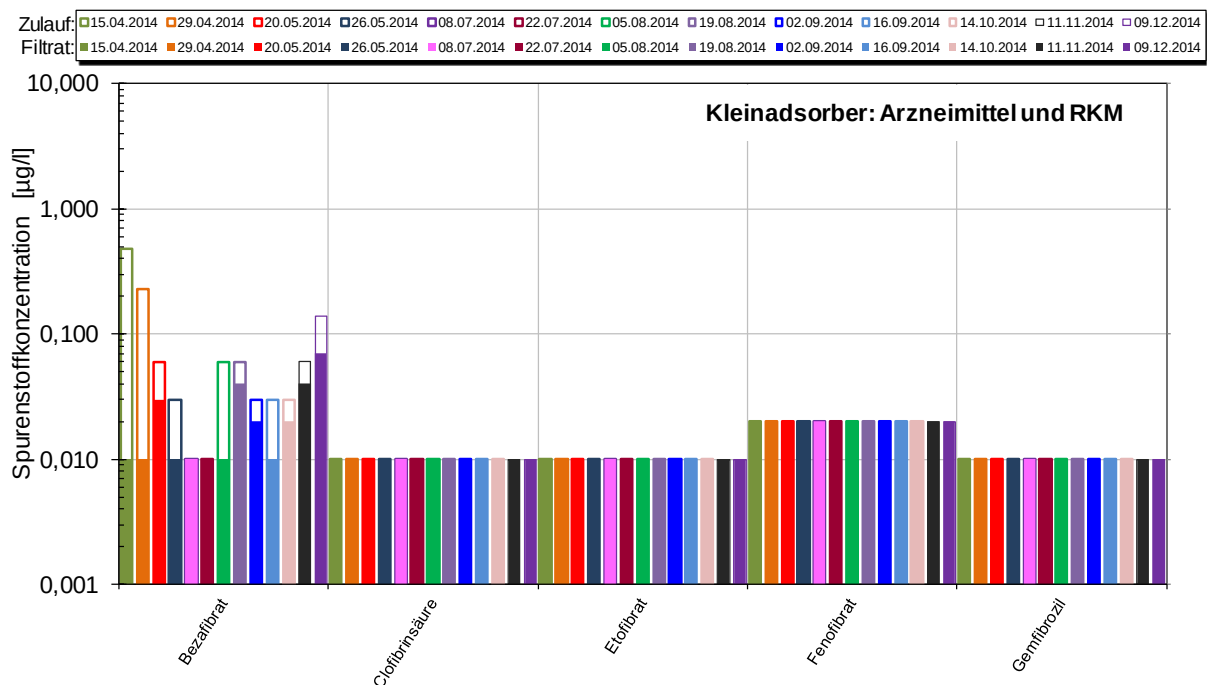


Abbildung 37 Zeitlicher Verlauf der Konzentration an Spurenstoffen (Lipidsenker) im Zulauf und im Filtrat des KA (15.04.2014 bis 09.12.2014)

Das Antiepileptikum Carbamazepin in Abbildung 38 lag bereits beim dritten Probenahmetermin am 20.05.2014 im Filtrat des KA vor und nähert sich danach asymptotisch einem festen Verhältnis zur Zulaufkonzentration. Das durchblutungsfördernde Mittel Pentoxifyllin und das Psychopharmaka Diazepam wurden bei keiner der Probenahmen im Zulauf nachgewiesen. Oxazepam wurde hingegen detektiert und bis zum 05.08.2014 vom KA vollständig eliminiert (siehe Balkendiagramm in Abbildung 38), bevor sich dessen Filtratkonzentrationen ab dem 19.08.2014 sprunghaft aber in einem festen Verhältnis derjenigen im Zulauf annähern.

Röntgenkontrastmittel wurde nur in der anfänglichen Laufzeit des KA und ein weiteres Mal sporadisch analysiert (siehe Abbildung 38). Von Beginn an treten im Filtrat relativ hohe Konzentrationen für die im Zulauf nachweisbaren Vertreter der Stoffgruppe (Amidotrizoesäure, Iomeprol, Iopamidol, Iopromid) auf. Iohexol ist die einzige Ausnahme. Schon beim zweiten, spätestens aber ab dem vierten Probenahmetermin am 22.07.2014, sind Chromatographie-Effekte zu erkennen, bei denen sich im Filtrat Konzentrationsüberhöhungen im Vergleich zum Zulauf abzeichnen, die sich infolge der konkurrierenden Adsorption und den damit einhergehenden Verdrängungseffekten ergeben. Davon betroffen sind vorrangig schlecht adsorbierbare Stoffe mit sehr ungünstigen Verteilgleichgewichten zwischen wässriger Phase und Aktivkohleoberfläche, wie es z. B. bei den Röntgenkontrastmittel der Fall ist.

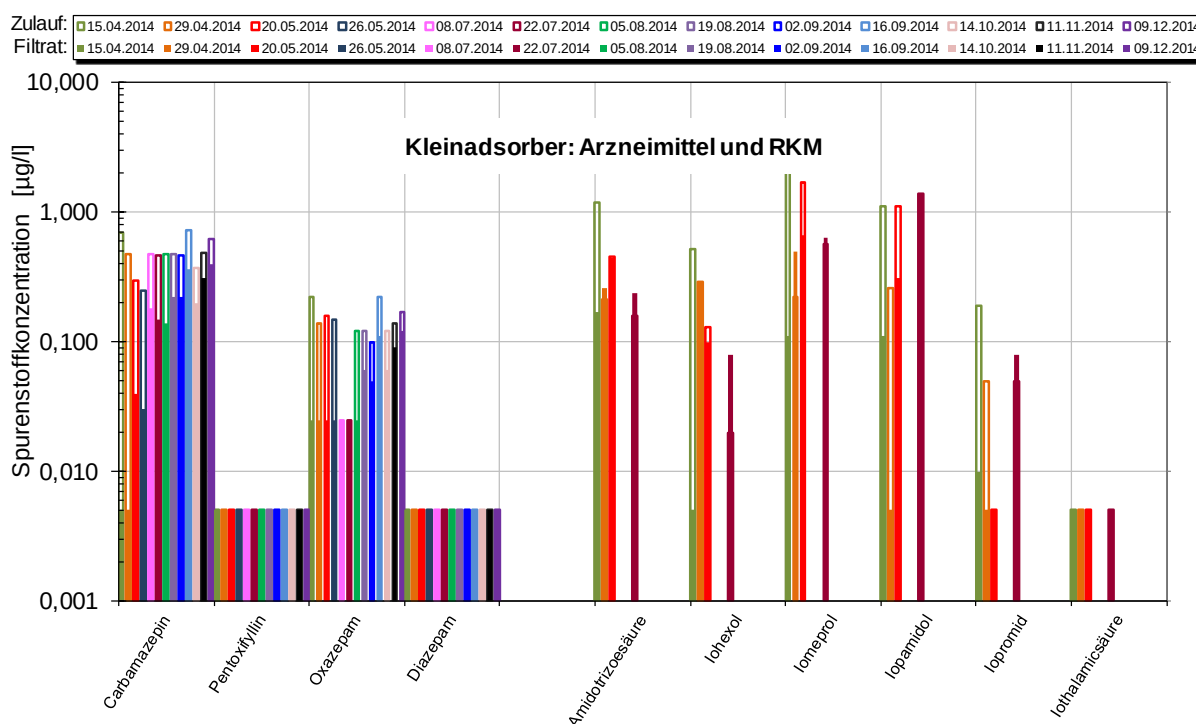


Abbildung 38 Zeitlicher Verlauf der Konzentration an Spurenstoffen (Antiepileptika, durchblutungsfördernde Mittel, Psychopharmaka, Röntgenkontrastmittel) im Zulauf und im Filtrat des KA (15.04.2014 bis 09.12.2014)

Aus der Gruppe der Industriestoffe waren TMDD und die Gruppe der Benzotriazolderivate, die sowohl in der Industrie als auch im Haushalt Anwendung finden, fester Bestandteil des Monitorings. Abbildung 39 zeigt die Konzentrationen mit einer um den Faktor 10 gestreckten Y-Achse gegenüber den zuvor diskutierten Abbildungen dieses Kapitels. TMDD ist bereits beim zweiten Probenahmetermin am 29.04.2014 zu einem recht hohen Anteil im Filtrat vertreten und seine Konzentration steigt danach stetig bis nahezu auf das Niveau des Zulaufs. Die Gruppe der Benzotriazole mit sowohl insgesamt als auch einzeln relativ hohen Zulaufkonzentrationen wurde summarisch ausgewertet: Der sich in Abbildung 39 bei logarithmischer Auftragung abzeichnende lineare Balkenanstieg sowohl bei den Einzelstoffe als auch bei ihrer Summe bedeutet für die Filtratkonzentration ein Anstiegsverhalten nach einem Potenzgesetz.

Sulfolan wurde im Zulauf kaum nachgewiesen und somit an dem 26.05.2014 aus dem Stoffspektrum für das Monitoring der Adsorber gestrichen.

Terbutryn mit den in diesem Kontext geringen Zulaufkonzentrationen ist erst ab dem 08.07.2014 im Filtrat nachweisbar (siehe Abbildung 39). Dessen Filtratkonzentration nimmt danach schrittweise (nach einer Konzentrationsüberhöhung und einem Negativbefund) ein etwa festes Verhältnis zur Zulaufkonzentration an.

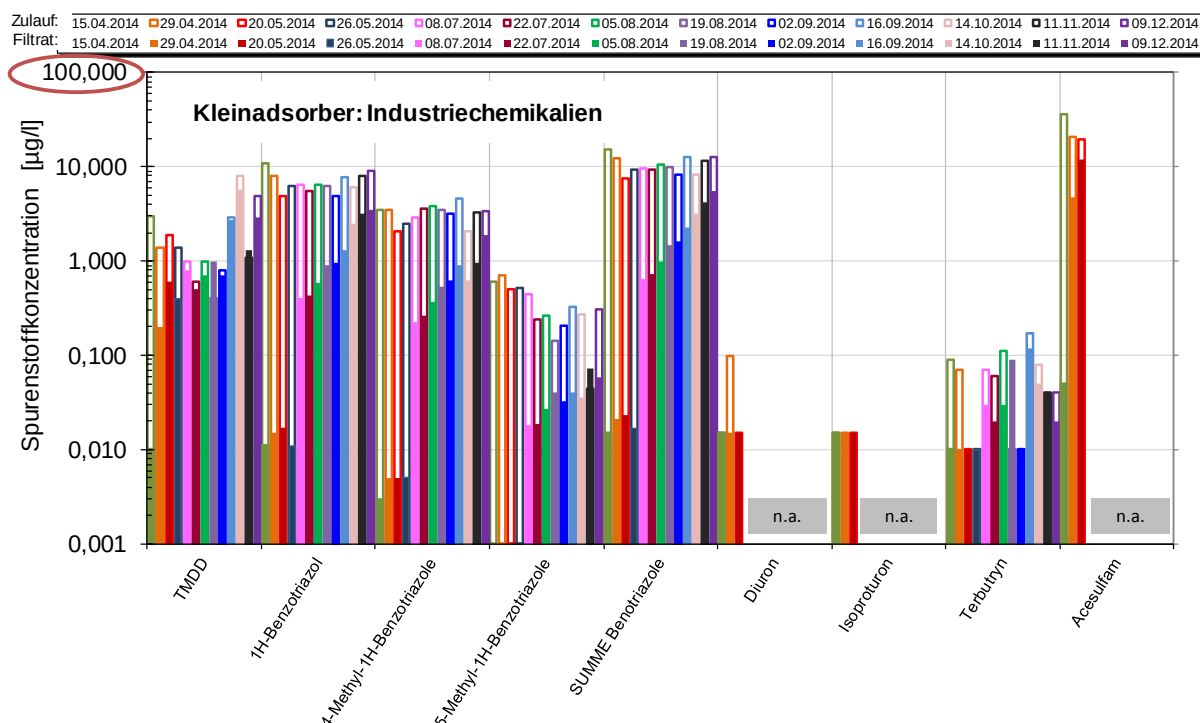


Abbildung 39 Zeitlicher Verlauf der Konzentration an Spurenstoffen (Industriestoffe, Herbizide, Zuckerersatzstoff) im Zulauf und im Filtrat des KA (15.04.2014 bis 09.12.2014)

Acesulfam zeigt sich von Beginn an als eine schwer adsorbierbare Substanz, deren Ablaufkonzentration beim KA rasch das Niveau des Zulaufs erklimmt (siehe Abbildung 39).

In Abbildung 40 wurde die jeweils bei einem Probenahmetermin aktuellen Eliminationen des KA für die Stoffe der Gruppe Antibiotika dargestellt. Zumindest bei Clarithromycin und Sulfamethoxazol sind schon mit 1.557 BVT oder spätestens mit 3.131 BVT anlässlich der dritten Probenahme ein Nachlassen der Eliminationsleistung und eine Tendenz zum Durchbruch durch den Adsorber feststellbar. Bei Erythromycin und N4-Sulfamethoxazol ist ein Nachweis im Filtrat nur bei der dritten Probenahme möglich, so dass auf der Basis dieser Einzelbefunde kein genereller Trend unterstellt werden kann. Alle Übrigen der abgebildeten Antibiotika waren im Filtrat nicht nachweisbar, so dass sich ihre Elimination rein durch die Zulaufkonzentration und die (halbe) Bestimmungsgrenze ergibt. Die gleiche Aussage gilt für Daten von Atenolol in Abbildung 41 bis einschließlich des Probenahmetermins im September bei 11.254 BVT. Die Elimination ist bis dahin nur vom Zulauf abhängig und streut entsprechend zwischen 50 und 81 %. Nach 14.380 BVT liegt jedoch ein abnehmender Trend vor. Es ergibt sich im Mittel aus den Gesamtfrachten nach 18.771 BVT eine Elimination von 59,1 % (vergleiche Abbildung 43).

Die Bisoprolol-Konzentration im Filtrat des KA erreicht erst ab dem 5. Probenahmetermin Werte oberhalb der Bestimmungsgrenze. Ab hier beginnt die Elimination (siehe Abbildung 41) zunächst etwas zu schwanken, bevor sie stetig bis auf einen Wert von 35,4 % abklingt, was letztendlich zu einer mittleren Elimination von 70,9 % führt (vergleiche Abbildung 43). Bei Metoprolol verhält es sich anfänglich analog, der schwankende Wertebereich für eine aktuell vorliegende Elimination setzt sich dann ohne klar erkennbaren Trend fort, nach um 12.263 BVT leicht und stetig abzuklingen. Die mittlere Elimination nach 18.771 BVT wurde mit 83,2 % berechnet (vergleiche Abbildung 43). Sotalol zeigt in Abbildung 41 bis auf den Probenahmetermin im August eine insgesamt stetige Abnahme der aktuellen Elimination mit einem Mittelwert von 74,9 % (vergleiche Abbildung 43).

Für Diclofenac sinkt die Elimination ab 3.713 BVT trotz der Schwankungen von Zulauf- und Filtratkonzentration einen leicht aber stetig, wie das Diagramm in Abbildung 41 zeigt, um danach auf einem fast konstanten, ggf. nur minimal abnehmenden Bereich zwischen 30 und knapp 60 % zu verharren. Die mittlere Elimination beträgt beim letzten Probenahmetermin 67,8 % (vergleiche Abbildung 43). Die Konzentration von Ibuprofen im Filtrat liegt bis auf eine Ausnahme auch bis zum letzten Probenahmetermin konsequent unter der Bestimmungsgrenze, so dass sich hier die aktuellen Eliminationen in Abbildung 41 rein zulaufspezifisch ergeben, was deren Schwankungsbreite erklärt. Die mittlere Elimination erreicht am Ende rein rechnerisch einen Wert von 67,1 % (vergleiche Abbildung 43).

15.04.14, 29.04.14, 20.05.14,
551 BVT 1557 BVT 3331 BV

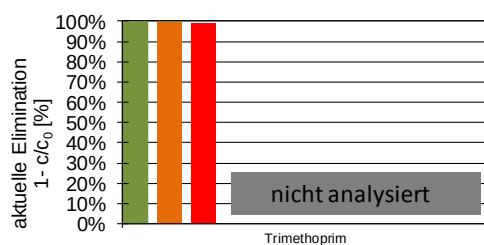
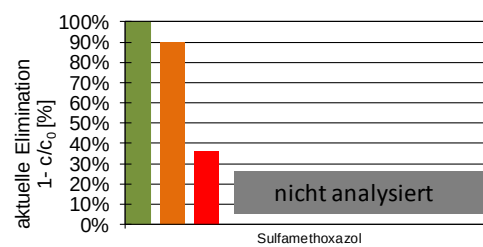
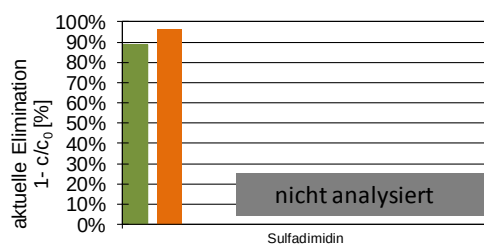
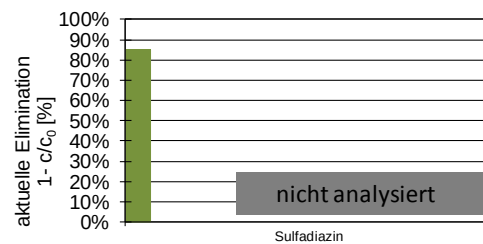
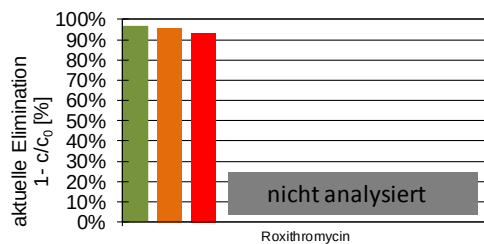
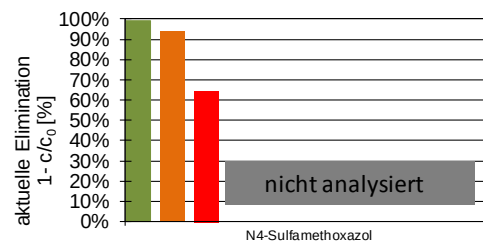
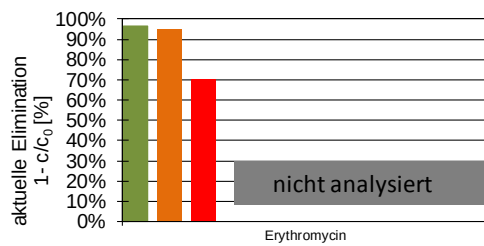
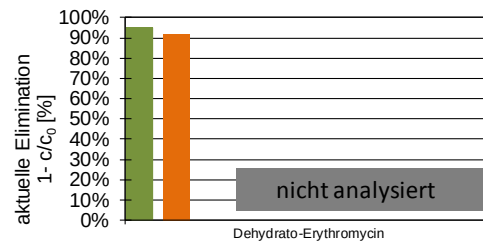
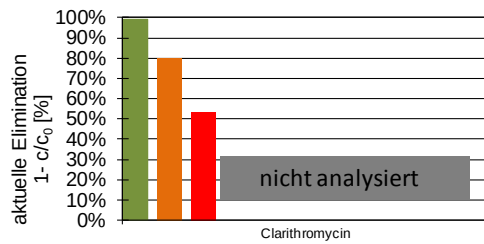


Abbildung 40 Bei der PN aktuelle Elimination nachweisbarer Spurenstoffe (1. Teil) im KA in Abhängigkeit der Zeit und des BVT (15.04.2014 bis 20.05.2014 bei Nullwerten ist Zulaufkonzentration < Bestimmungsgrenze)

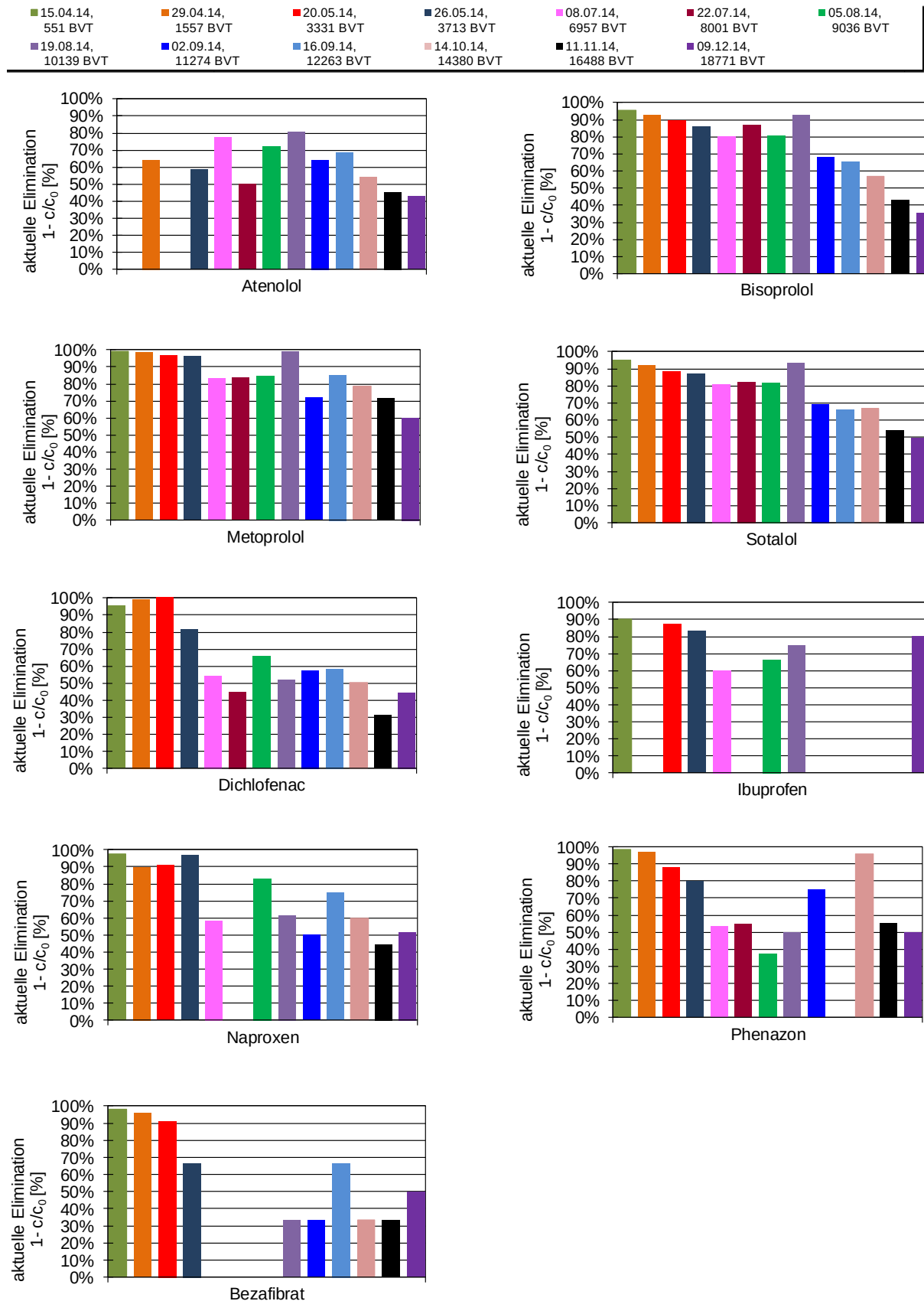


Abbildung 41 Bei der PN aktuelle Elimination nachweisbarer Spurenstoffe (2. Teil) im KA in Abhängigkeit der Zeit und des BVT (15.04.2014 bis 09.12.2014 bei Nullwerten ist Zulaufkonzentration < Bestimmungsgrenze)

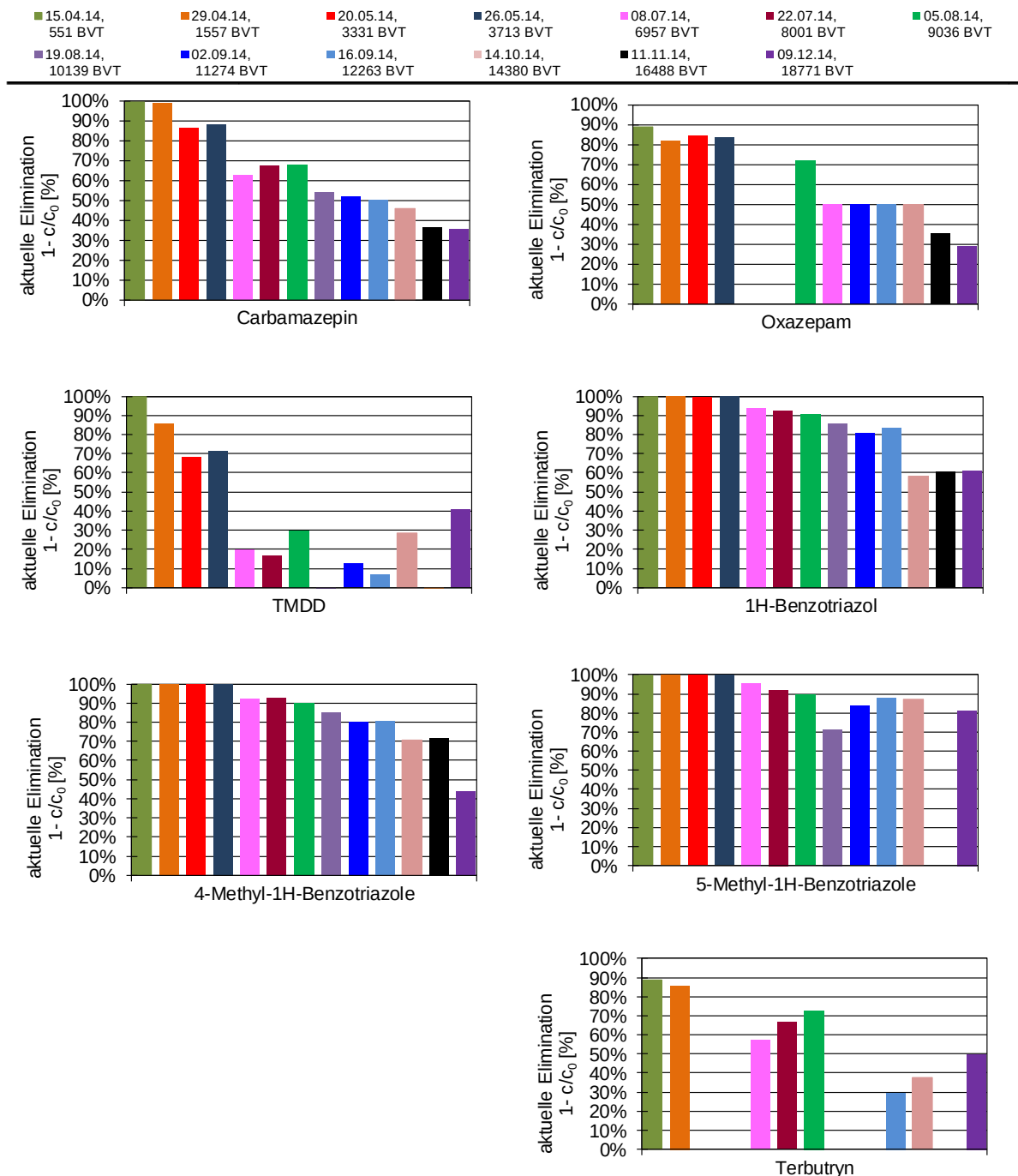


Abbildung 42 Bei der PN aktuelle Elimination nachweisbarer Spurenstoffe (3. Teil) im KA in Abhängigkeit der Zeit und des BVT (15.04.2014 bis 09.12.2014 bei Nullwerten ist Zulaufkonzentration < Bestimmungsgrenze)

Die Konzentrationen für Naproxen waren sowohl im Zu- als auch im Ablauf des KA stark schwankend, so dass die jeweils aktuelle Elimination stark variiert. Bei den letzten drei Probenahmeterminen ab Oktober (ab 14.380 BVT) steigen die Konzentrationen im Zu- und Ablauf bei leicht und stetig sinkender Elimination an (siehe Abbildung 41). Es wurde nach 18.771 BVT eine mittlere Elimination von 79,8 % erzielt, wie Abbildung 43 ausweist.

Die jeweils aktuelle Elimination für Phenazon in Abbildung 41 scheint nach einem anfänglichen Abwärtstrend ein Plateau mit stark streuenden Werten zu durchlaufen, wobei die Zu- und Ablaufkonzentration nur einmalig unter der Bestimmungsgrenze lag. Der Mittelwert wurde aus den Frachten mit 76,2 % berechnet (vergleiche Abbildung 43).

Bezafibrat ist bis zum Probenahmetermin im September nur sporadisch im Filtrat nachweisbar (aktuelle Eliminationen siehe Abbildung 41). Danach sinkt die aktuelle Elimination bis auf 50 % bei der letzten Beprobung im Kontexte gemeinsam steigender Konzentrationen im Zu- und Ablauf. Aus den Frachten ergibt sich zu diesem Zeitpunkt eine mittlere Elimination von 72,5 % (vergleiche Abbildung 43).

Die Ablaufkonzentration von Carbamazepin in Abbildung 42 weist in der Zeit von Mai bis Juli zunächst einen starken Anstieg mit den entsprechenden Einbußen für die jeweils aktuelle Elimination auf, der sich anschließend etwas weniger steil fortsetzt. Beim Probenahmetermin im Dezember liegt die aktuelle Elimination nur noch bei 35 %, die mittlere für den gesamten Zeitraum bei 61,6 % (vergleiche Abbildung 44).

Die jeweils aktuelle Elimination für Oxazepam (siehe Abbildung 42) beginnt mit einem Wert von 88,6 % bei der ersten Probenahme und sinkt in Stufen bis auf 29,4 % im Dezember. Aus den Frachten ergibt sich eine mittlere Elimination von 58,4 % für den gesamten Zeitraum bis zum Erreichen von 18.771 BVT (vergleiche Abbildung 44).

Für die ausgewählten Röntgenkontrastmittel (Amidotrizoesäure, Iohexol, Iomeprol, Iopamidol, Iopromid, Iothalamicsäure) konnte schon ab dem 4. Probenahmetermin negative Eliminationen berechnet werden, d. h. die Konzentration im Filtrat lag über dem Zulauf. In der Gesamtbilanz ergibt sich letztlich ein Nullbefund für die mittlere Elimination. Daher wurde auf die Darstellung der zeitabhängigen und mittleren Eliminationsleistung verzichtet.

Die Zulaufkonzentration für das Tensid TMDD war immer bestimmbar und die Ablaufkonzentrationen näherten sich dieser stetig an. Im August (mit 10.139 BVT) und November (mit 16.488 BVT) lag die Ablaufkonzentration sogar über der des Zulaufs, was auf Desorptionseffekte bzw. Verdrängung des TMDD von der GAK-Oberfläche bei einer - im Bezug auf den Beladungszustand und das Verteilungsgleichgewicht – zu geringen Zulaufkonzentration hinweist. Bei der anschließend im Dezember vorliegenden deutlich höheren Zulaufkonzentration nimmt die GAK des KA den Stoff hingegen wieder auf (aktuelle Elimination von 40,8 %). Die mittlere Elimination liegt zu diesem Zeitpunkt nach 18.771 BVT infolge der Desorption mit einem Wert von 34,7 % sogar darunter (vergleiche Abbildung 44).

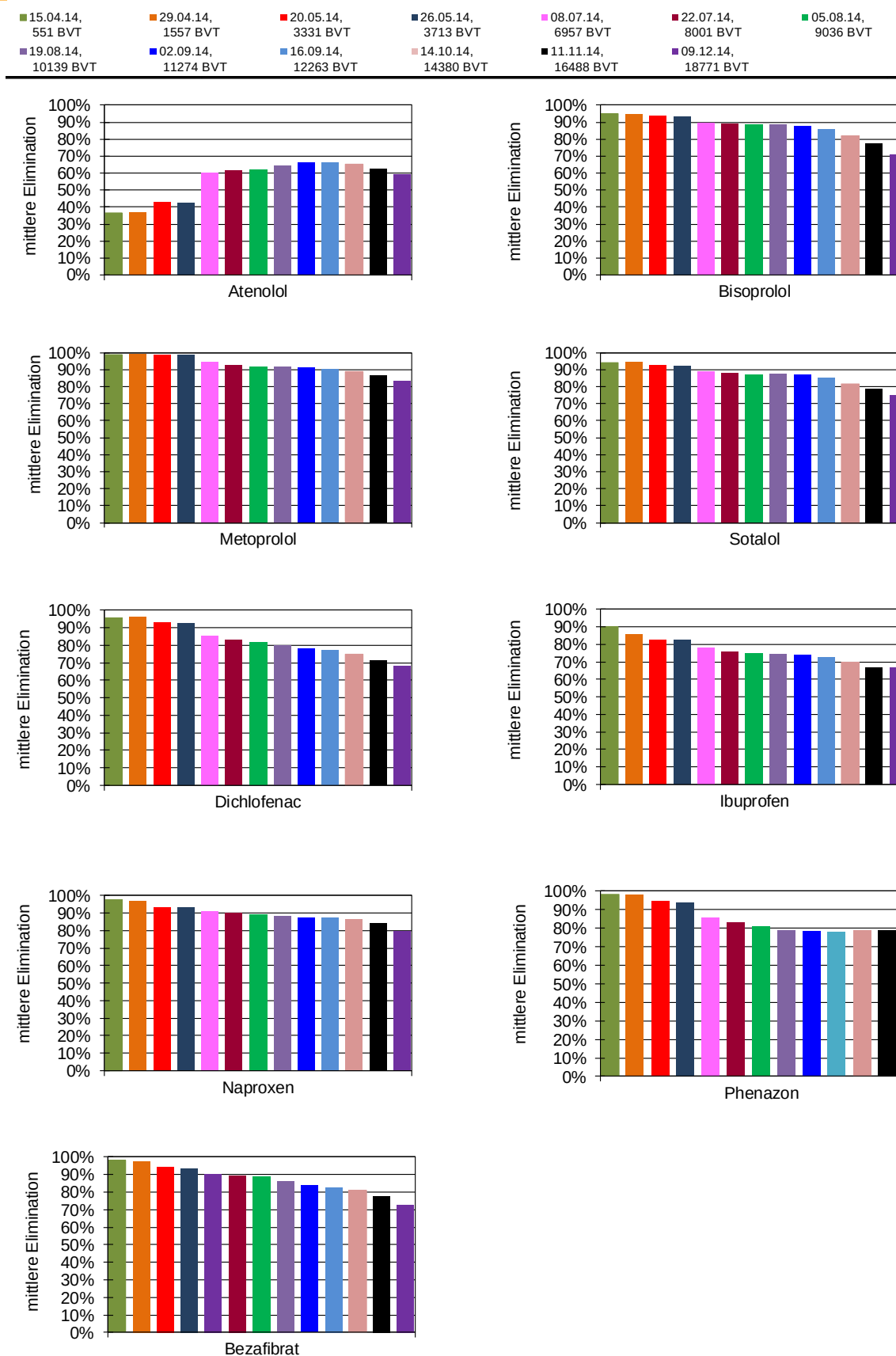


Abbildung 43 Mittlere Elimination nachweisbarer Spurenstoffe (1. Teil) in der Laufzeit des KA in Abhängigkeit von Zeit und BVT (15.04.2014 bis 09.12.2014)

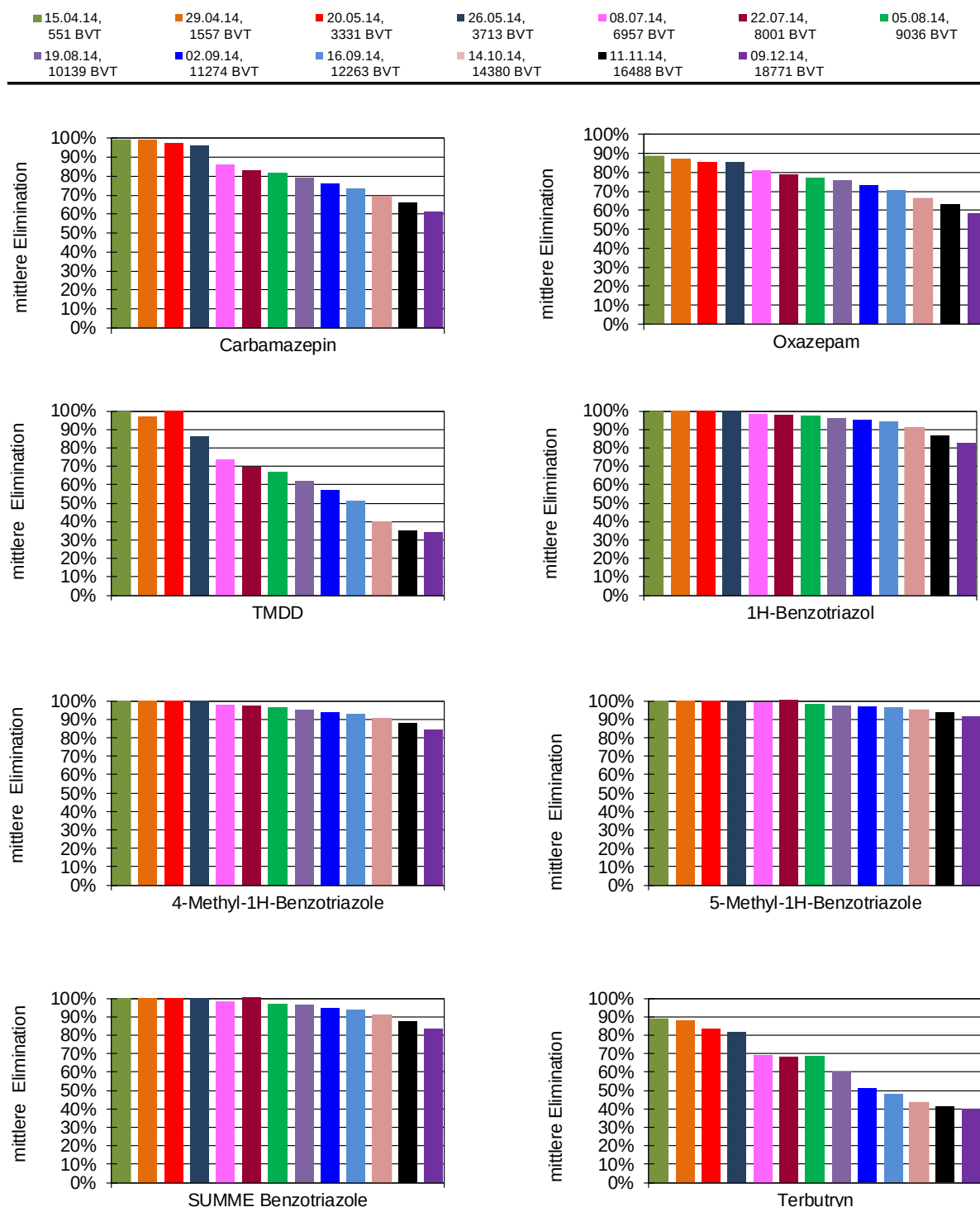


Abbildung 44 Mittlere Elimination nachweisbarer Spurenstoffe (2. Teil) in der Laufzeit des KA in Abhängigkeit von Zeit und BVT (15.04.2014 bis 09.12.2014)

Die Benzotriazol-Derivate in Abbildung 42 mit vereinzelt relativ hohen Zulaufkonzentrationen werden bis zum September sehr gut und mit einem nur leichten Leistungsrückgang eliminiert. Ab Oktober (nach 14.380 BVT) verstärkt sich die Abnahme der Elimination. Für die

Stoffsummen aller Benzotriazol-Derivate ergibt sich mit dem letzten Probenahmetermin aus den Frachten eine mittlere Elimination von 85,6 % (vergleiche Abbildung 44).

Die Konzentration an Terbutryn lag häufig bereits im Zulauf der Adsorber unter der Bestimmungsgrenze, weshalb die aktuelle Elimination nur lückenhaft nachgewiesen werden konnte (siehe Abbildung 42). Die Mittlere Elimination für den gesamten Zeitraum, d. h. nach 18.771 BVT wurde mit 40,0 % berechnet (vergleiche Abbildung 44).

5.3 Vergleich der mit dem GA und KA erzielten Spurenstoffelimination

Um die Leistungsfähigkeit beider Adsorber bei der Spurenstoffelimination unter Zunahme an durchgesetzten Bettvolumina zu vergleichen, werden im Folgekapitel die Eliminationsgrade zweier ausgewählter Einzelstoffe gegenübergestellt, während an dieser Stelle für die **mittlere Gesamtelimination aller Spurenstoffe** die Frachtensumme aller während der Adsorbermonitorings detektierten Spurenstoffe (im gemeinsamen Zulauf, im GA-Filtrat sowie im KA-Filtrat) herangezogen wird. Diese Vorgehensweise wird gewählt, da das vorrangig im Fokus stehende öko- und humantoxische Potenzial derartiger Stoffgemische mit dem aktuellen Stand des Wissens nicht ausreichend bewertet werden kann. Diese Vorgehensweise führt aber zu einer Gewichtung der einzelnen Stoffe gemäß der Höhe ihrer Konzentrationen im Zulauf, jedoch ebenfalls gemäß der Höhe ihrer Konzentrationen im jeweiligen Filtrat.

Die Ausgleichkurve der berechneten Werte in Abbildung 45 legen nahe, dass das anfängliche Leistungsverhalten beider Adsorber bis etwa 4.000 oder 5.000 BVT nicht allzu unterschiedlich ausfällt, obwohl die Streuung der Werte für den KA in dieser Phase leicht höher ist. Das betrifft sowohl das Startniveau als auch den Abnahmetrend. Fasst man jedoch den Abnahmetrend bis etwa 10.000 BVT zusammen, so wirkt sich die im Vergleich zum GA doppelt so hohen Filtrationsgeschwindigkeit des KA (mit nur halb so großer EBCT) deutlicher aus: der nahezu lineare Eliminationsrückgang beträgt beim GA etwa 2,5 Prozentpunkte je 10.000 BVT, während er beim KA mit etwa 8,2 Prozentpunkten je 10.000 BVT auftritt und in der Phase von 10.000 bis 20.000 BVT mit 17,4 2 Prozentpunkten je 10.000 BVT beschleunigt. Die mittlere Elimination des KA durchschreitet mit etwa 14.400 BVT die 80-%-Marke und wird mit etwa 21.500 BVT die 70-%-Marke überschreiten (siehe Trendlinie in Abbildung 45). Für den GA ist unklar, ob sein Leistungsverhalten oberhalb von 6.000 bis gut 8.000 BVT dem KA äquidistant folgen wird. Der Datenverlauf in dieser Phase zeigt eine leichte Neigung zu einem solchen Verhalten. Es kann aber nur sicher prognostiziert werden, dass der Leistungsgrad einer 80 %-igen Gesamtelimination und weniger oberhalb von 14.400 BVT liegen wird.

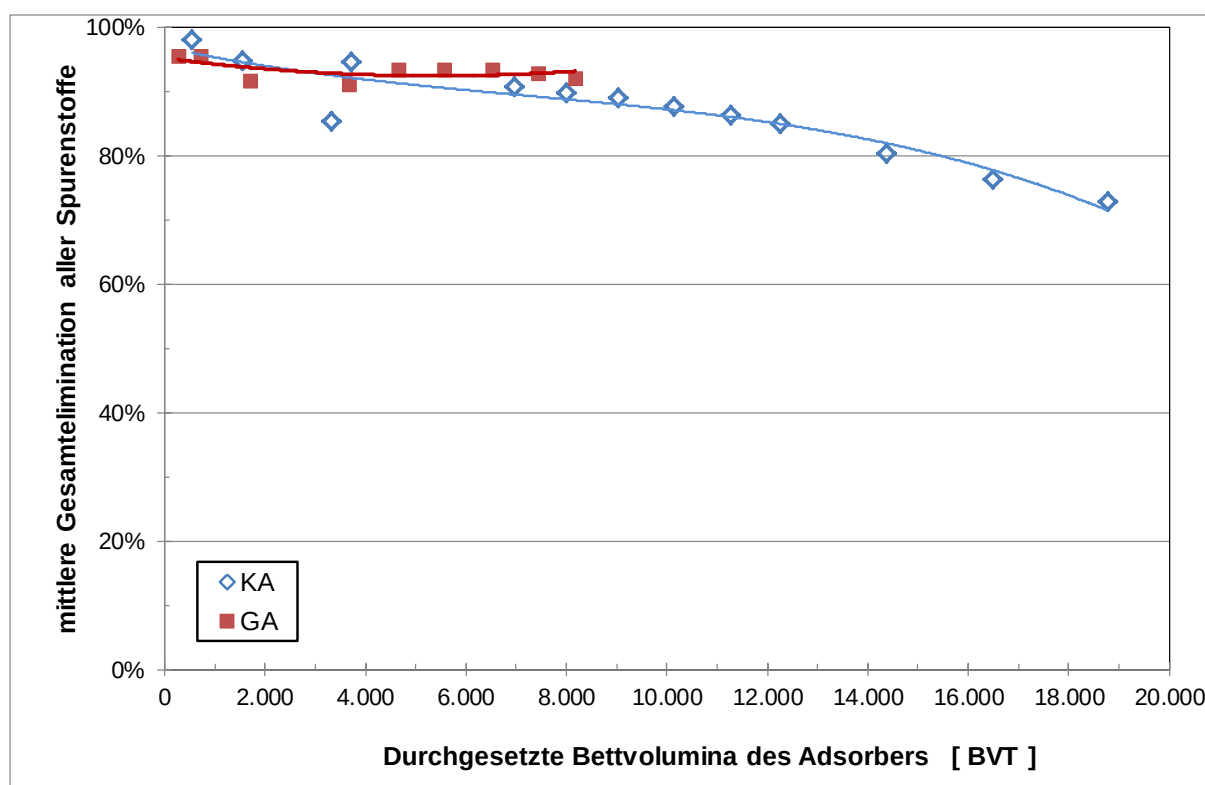


Abbildung 45 Mittlere Gesamtelimination der nachweisbaren Spurenstoffe auf der Basis der Beladungs-/Frachtsumme aller Stoffe in Abhängigkeit durchgesetzter Bettvolumina, BVT (15.04.2014 bis 09.12.2014)

5.4 Vergleich der erzielten Spurenstoffelimination im Kontext anderer Festbettadsorber zur weitergehenden Abwasserreinigung

Für die Spurenstoffe Diclofenac und Carbamazepin, denen in vielen Projekten zur weitergehenden Abwasserreinigung eine Leitparameterfunktion zugesprochen wird, wurde die Abhängigkeit des aktuellen Eliminationsgrades von den durchgesetzten Bettvolumina aus verschiedenen Projekten (KA Düren, KA Obere Lutter, KA GT-Putzhagen, KA Harsewinkel) zur Spurenstoffentfernung mit granulierter Aktivkohle in jeweils einem Diagramm zusammengefasst (Benstöm, Nahrstedt und Rolfs, 2013; Nahrstedt, Schröder et al. 2013; Nahrstedt, Burbaum et al. 2014a; Nahrstedt, Burbaum et al. 2014b).

Die individuelle Konfiguration der einzelnen Adsorber (mit/ohne vorgeschalteter Flockungsfiltration; GAK-Produkt; Leerbettkontaktzeit EBCT; Auf-/Abstrombetrieb) ist der seitlichen Diagrammlegende zu entnehmen.

Die Kurven der normierten Ablaufkonzentrationen für den Klein- und Großadsorber aus dem aktuellen Projekt auf der KA Harsewinkel liegen bei beiden Spurenstoffen im Gesamtfeld für

die Adsorber aller übrigen KA. Die normierte Konzentration für Diclofenac des Großadsorbers auf der KA Harsewinkel liegt bis zu einem Durchsatz von etwa 6.000 BVT jeweils im unteren Bereich des Gesamtfeldes, steigt danach aber plötzlich und - im Unterschied zu den bis dahin etwa vergleichbaren Kurvenverläufen z. B. von der KA Gütersloh Putzhagen mit gleicher Aktivkohle im Aufstrom doch einer EBCT von nur 25 min oder der KA Obere Lutter mit ebenfalls gleicher Aktivkohle Aufstrom doch einer EBCT von 75 min - sehr steil an und nähert sich mehr und mehr der Kurve von der KA Düren (EBCT von 30 min, Adsorber wie auf der KA Harsewinkel einer Flockungsfiltration nachgeschaltet und im Abstrombetrieb). Die Ursache für diesen „Kurswechsel“ ist unklar, sie führt aber dazu, dass die Leistungsmarke einer Elimination von aktuell 80 % vom Großadsorber der KA Harsewinkel zwischen 7.000 und 8.000 BVT durchschritten wird.

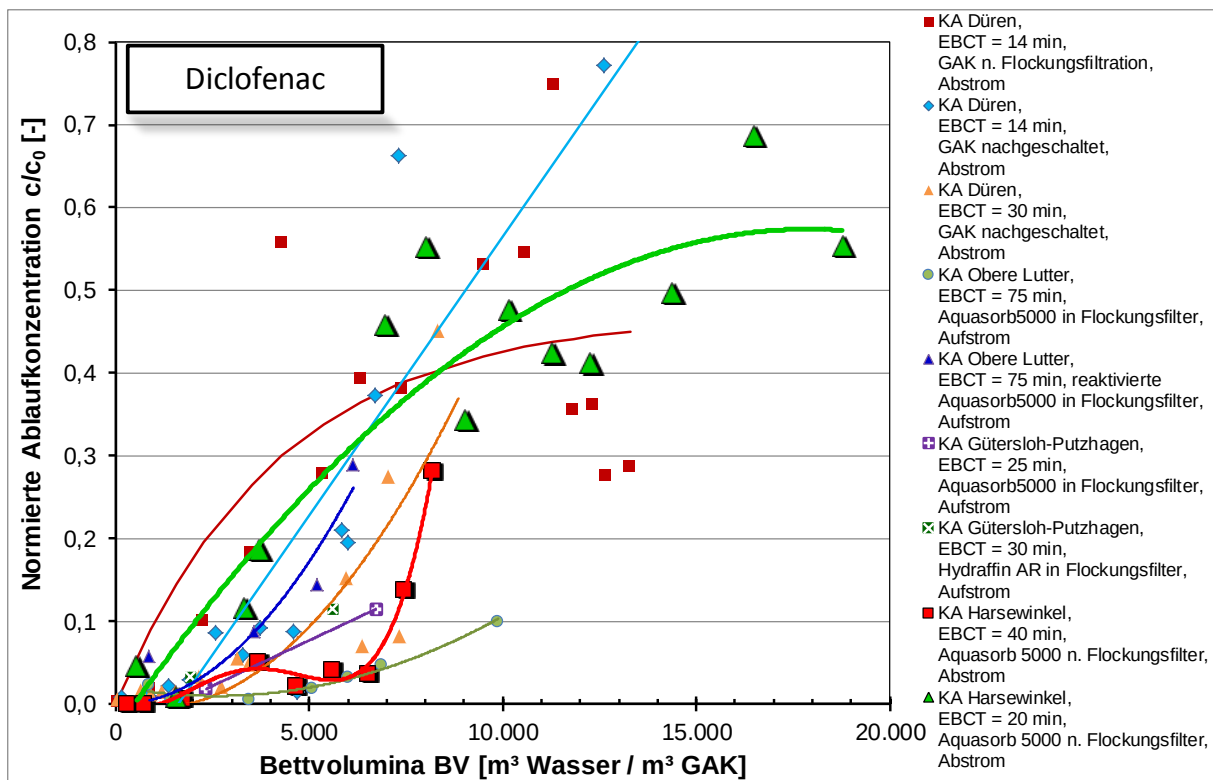


Abbildung 46 Anstieg normierter Ablaufkonzentrationen c/c_0 von Diclofenac im Filtrat von 9 GAK-Adsorptionsfiltern (auf vier Kläranlagen) zum Zeitpunkt der jeweils durchgesetzten Bettvolumina (Randbedingungen siehe Legende: mit/ohne vorgeschalteter Flockungsfiltration; GAK-Produkt; Leerbettkontaktzeit EBCT; Auf-/Abstrombetrieb)

Die Elimination bzw. die normierte Konzentration des Kleinadsorbers in Harsewinkel weist ein ähnliches Verhalten zu den Adsorbern der KA Düren (ebenfalls der Flockungsfiltration

nachgeschaltet und im Abstrombetrieb, jedoch mit einer EBCT von nur 14 min) auf: Nach etwa 8.000 BVT ändert sich – analog zu einem der Adsorber aus Düren – der Kurvenverlauf und der anfänglich lineare Anstieg wird flacher und flacher. Diclofenac wird dadurch bei fast 20.000 durchgesetzten Bettvolumina immer noch zu etwa 40 % ($c/c_0 = 60$ %) eliminiert.

Das Gesamtfeld aller normierten Ablaufkonzentrationen ist für den Spurenstoff Carbamazepin wesentlich homogener. Der Kurvenverlauf für den Kleinadsorber der KA Harsewinkel (Kontaktzeit von 20 min EBCT) folgt relativ strikt dem Verlauf der Adsorber der KA Düren mit der sehr kurzen Kontaktzeit von nur 14 min EBCT (ebenfalls einer Flockungsfiltration nachgeschaltet und im Abstrombetrieb). Der Kurvenverlauf für den Großadsorber der KA Harsewinkel mit einer Kontaktzeit von 40 min EBCT ist relativ deckungsgleich mit dem Adsorber der KA Obere Lutter, der mit reaktivierter Aktivkohle des gleichen Typs befüllt war, jedoch im Aufstrom und mit 75 min EBCT betrieben wurde. Die Leistungsmarke einer Elimination von aktuell 80 % wird vom Großadsorber der KA Harsewinkel nach gut 8.000 BVT durchschritten.

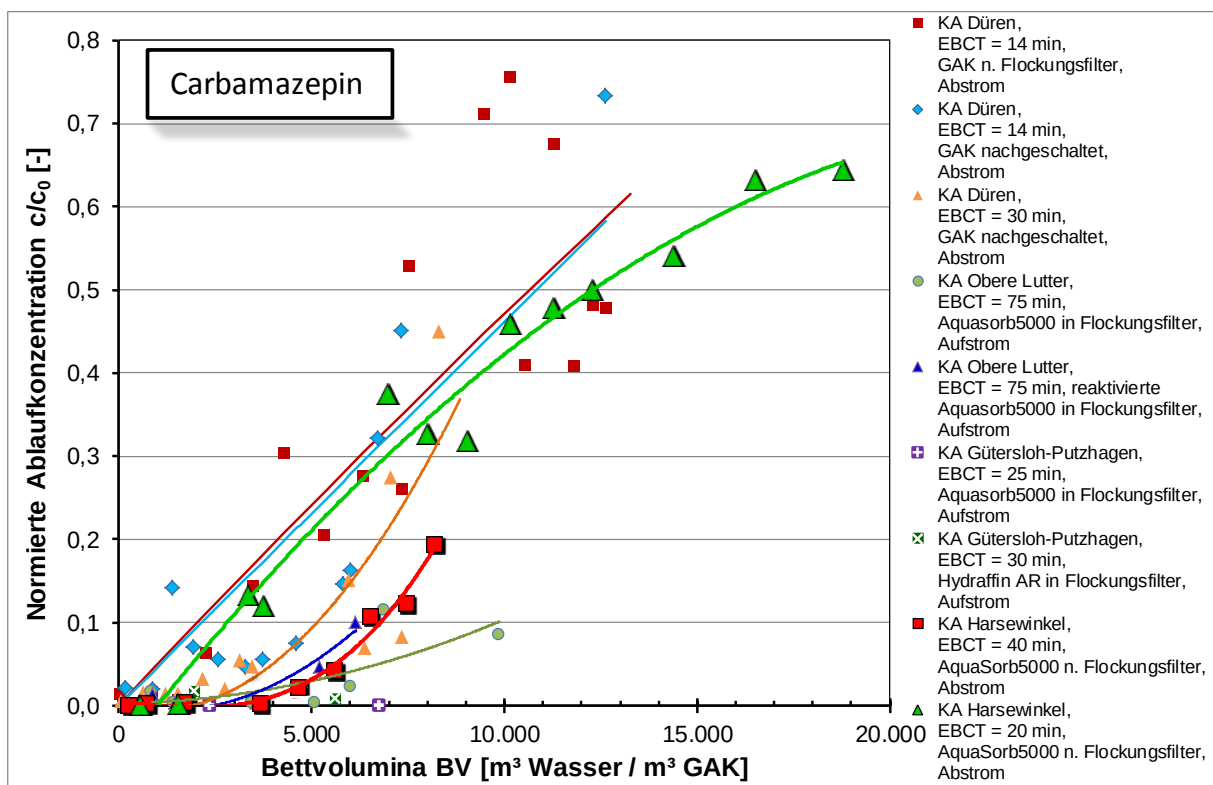


Abbildung 47 Anstieg normierter Ablaufkonzentrationen c/c_0 von Carbamazepin im Filtrat von 9 GAK-Adsorptionsfiltern (auf vier Kläranlagen) zum Zeitpunkt der jeweils durchgesetzten Bettvolumina (Randbedingungen siehe Legende: mit/ohne vorgeschalteter Flockungsfiltration; GAK-Produkt; Leerbettkontaktzeit EBCT; Auf-/Abstrombetrieb)

6 Betriebspraxis der Adsorber im Arbeitsalltag

Eine wöchentliche Spülung der Adsorber zeigte sich als absolut ausreichend, um eventuell auftretende Verbackungen zu lösen oder gar grundsätzlich zu vermeiden und akkumulierte Trübstoffbeladungen auf den Kornoberflächen der Schüttung zu resuspendieren und aus dem Filterraum auszutragen. Es wurde anhand des Parameters CSB festgestellt, dass zwischen zwei Spülzyklen kein Rückgang der Eliminationsleistung infolge Beeinträchtigung der Adsorptionsprozess bzw. der Stoffaustauschkinetik durch zusätzliche Transportwiderstände festzustellen war. Derartige Beeinträchtigungen wären prinzipiell durch partikuläre Beladungsschichten oder auch durch Biofilme auf dem äußeren Korn möglich.

Zielvorgabe für das Ende der manuell durchgeführten Wasserspülung einer sich daran anschließenden Nachspülphase war die zu beobachtende Resttrübung im Wasser des Filterüberstauraums, der von dem oberen Mannlauch aus mit Hilfe einer Lampe einzusehen war (siehe Foto in Abbildung 6).

Das bei einer Spülung durchgesetzte Spülwasservolumen betrug etwa 45 m^3 . Damit ergibt sich rechnerisch ein 2,4-facher Austausch des Leerbettvolumens von $16,3 \text{ m}^3$ (das Porenvolumen liegt je nach Bettexpansion während der Spülung etwa bei der Hälfte) und ein ca. 8,5-facher Austausch des Wasservolumens von $5,3 \text{ m}^3$ im Filterüberstauraum (Freibord bei ruhendem Bett). Je nach Spülgeschwindigkeit und Bettexpansion der GAK verschieben sich diese Werte zu Gunsten eines häufigeren Austausches des Überstauraumes. Gespült wurde mit dem Filtrat der Flockungsfiltration, so dass für eine später voll ausgebaute Adsorptionsstufe zu folgern ist, dass nicht bei dieser der Verlust an hochwertigem, da spurenstoffarmem Filtrat auftritt, sondern bei der vorangestellten Flockungsfiltration. Das wird sich positiv auf die Betriebskosten auswirken.

Die während der Wasserspülphase erzielte Bettexpansion erzeugte ein schwebendes Bett mit einer relativ exakt auftretenden oberen Begrenzung. Diese war Grundvoraussetzung dafür, dass kein Kornverlust bei der Spülung in das abgeleitete Schlammwasser auftrat. Ein Korndurchtritt durch die Schlitze der Filterdüsen unter den Düsenboden wurde nicht beobachtet. Zusammenfassend ist dem GA ein alltagstaugliches und in der Aufbereitungspraxis robustes (d. h. störungsfreies und wartungsarmes) Betriebsverhalten zu attestieren.

7 Kosten

7.1 Auslegungsgrundlagen und Investitionskosten

Um die Kostenschätzung für die großtechnische Umsetzung des Verfahrens zur Spurenstoffelimination zu erarbeiten, sind anhand aktueller Richtpreisangebote und Ausschreibungsergebnisse die Grundlagen für die Konkretisierung der Investitionskosten zu ermitteln.

Die wesentlichen Erkenntnisse aus dem Versuchsbetrieb sind in eine aktualisierte klärtechnische Berechnung eingeflossen, die im Anhang 8 wiedergegeben sind. Als einer der Eckparameter wurde die Oberflächenbeschickung der GAK-Adsorber zu 5,5 m/h und einer Aufbereitungsmenge für die darin eingesetzte GAK von maximal 14.000 BVT zu Grunde gelegt und mit allen Projektbeteiligten abgestimmt (siehe auch Protokoll der Besprechung vom 16.12.2014). Diese Anpassung gegenüber der ursprünglich im Zuge der Machbarkeitsstudie angenommenen Oberflächenbeschickung von 8 m/h und hierdurch bedingten reduzierten Leerbettkontaktzeit im Adsorber erfolgte in erster Linie aufgrund der als nicht ausreichend gut erachteten Reinigungsleistung verschiedener Spurenstoffparameter. In o.g. Festlegung der maßgebenden Bettvolumina zur Ermittlung der Wirtschaftlichkeit ist noch nicht berücksichtigt, dass nicht unerhebliche Auslegungsreserven infolge der Mischungsrechnung eines optimalen Betriebes der Einzelfilter bestehen. Diese Erfahrungswerte werden aktuell in anderen Projekten wie „WV Buchenhofen AK plus“ gesammelt und im vorliegenden Fall auf der sicheren Seite liegend nicht angesetzt.

Auf dieser Basis lassen sich für die Teilstrommenge von 83 l/s (ca. 300 m³/h) eine Spurenstoffeliminationsanlage von 4 GAK -Adsorbern mit einem Durchmesser von je 4,15 m ermitteln, die im Rahmen der weiteren Planung im Bedarfsfall nochmals zu überprüfen wären:

- Maximaler Volumenstrom: $\dot{V}_{f,max} = 299 \text{ m}^3/\text{h}$
- Mittlerer Volumenstrom: $\bar{V}_f = 216 \text{ m}^3/\text{h}$
- Maximale Filtergeschwindigkeit: $v_{f,max} = 5,5 \text{ m/h}$
- Mittlere Filtergeschwindigkeit: $\bar{v}_f = 4,0 \text{ m/h}$
- Gesamtfläche der 4 Filter: $A_{ges} = 54,1 \text{ m}^2$
- Einzelfilterfläche: $A_{Filter} = 13,5 \text{ m}^2$
- Bettvolumen Einzelfilter: $V_{Bett} = 40,6 \text{ m}^3$
- Betthöhe: $h_{Bett} = 3,0 \text{ m}$
- Minimale Leerbettkontaktzeit: $t_{EBCT} = 32 \text{ min}$
- Mittlere Leerbettkontaktzeit: $t_{EBCT} = 44 \text{ min}$
- Durchsatz bis zur GAK-Erschöpfung: $V_{Filtrat}/V_{Bett} = 14.000 \text{ BVT}$
 $V_{Filtrat} = 527.800 \text{ m}^3/\text{Filter}$

Die Ergebnisse der Investkostenermittlung lassen sich in einer Übersicht wie folgt darstellen:

■ Bautechnik	874.341 €
■ Maschinentechnik	150.520 €
■ EMSR Technik	202.000 €
■ Nebenkosten etc.	282.178 €
■ Nettosumme	1.509.039 €
■ Mehrwertsteuer (z.Zt. 19%)	286.717 €
■ <u>Bruttosumme</u>	<u>1.795.756 €</u>

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Stadt Harsewinkel in der Lage ist, mit einer Investitionssumme von knapp 1,8 Mio. € eine nachhaltige Spurenstoffeliminationsanlage für eine Teilstrommenge von 83 l/s zu gewährleisten. Hierin wurde berücksichtigt, dass der geplante Hallenneubau zur Unterbringung der 4 GAK-Adsorber ausreichend groß bemessen ist und für eine eventuelle Erhöhung der zu behandelnden Teilstrommenge Platzreserven für 2 weitere GAK-Adsorber aufweist. Damit ist rechnerisch eine Erweiterung der GAK-Kapazitäten auf $6/4 \cdot 83,3 \text{ l/s} = 125 \text{ l/s}$ ($450 \text{ m}^3/\text{h}$) möglich und konzeptionell berücksichtigt.

7.2 Betriebskosten

7.2.1 Ansatz der Einzelpositionen

Die Betriebskosten einer zukünftigen Adsorptionsstufe lassen sich in drei Gruppen unterteilen (siehe hierzu auch die tabellarischen Berechnungen in Anhang 9):

B.1 Personalkosten mit einem spezifischen Ansatz von 40.000 €/(Person Jahr)

B.2 Energiekosten mit einem spezifischen Ansatz für die Kläranlagen Harsewinkel von 0,1983 €/(kWh)

B.3 Kosten für die Aktivkohlereaktivierung inklusive Make-up-Kohle (das ist diejenige Menge an neuer Aktivkohle, die benötigt wird, um den Abbrand beim Reaktivierungsprozess zu ersetzen) mit einem spezifischen Ansatz von 1.650 €/t GAK und 12,18 t GAK/Filter (neu geplante Filter mit einem Bettvolumen von $40,6 \text{ m}^3$), was zu Kosten von etwa 20.100 €/je Filteraustausch führt.

B.4 Als Overhead für Wartungskosten und Weiteres wurden von den Investsummen 1,0 % der Bautechnik, 2,5% der Maschinentechnik und 2,5% der EMSR-Technik angesetzt.

7.2.2 Bemessung der Einzelpositionen

Die tabellarischen Auflistungen der Bemessungsgrundlagen für die Einzelpositionen, ihre Berechnung und Summierung befinden in Anhang 8 und Anhang 9.

Der jährliche Personalaufwand (10.000 €) mit dem Viertel einer vollen Stelle zu Position B.1 ergibt sich aus den Positionen

- Abwicklung des Aktivkohleaustauschs in der Verwaltung und der Betreuung der Adsorber vor Ort (3 Arbeitstage je Austausch, dessen zeitliche Häufigkeit von dem insgesamt durch eine zukünftigen Adsorptionsstufe durchgesetzten Wasservolumen abhängt) und
- Anlagenkontrolle (im Mittel 1,5 Stunden je Werktag) inklusive Überwachung von Wasserqualitätsparametern, d. h. Probenahme und Analytik.

Eine zweite Gruppe (B.2) bilden die Energiekosten in Höhe von knapp 18.300 €,

- die sich einerseits ergeben aus dem mittleren aufzubereitenden Volumenstrom von $216 \text{ m}^3/\text{h}$ (bzw. aus der näherungsweise gewählten mittleren Filtrationsgeschwindigkeit von 4 m/h) aller 4 Adsorber sowie der dabei zu überwindenden Höhendifferenz von 8 m für die Filterbeschickung zuzüglich der Druckverluste in den Rohrleitungen, Messeinrichtungen und Stellorganen (entsprechend einer Förderhöhe von 1 m) und dem Wirkungsgrad der eingesetzten Pumpe (Leistungsbedarf in dem der Auslegung zu Grunde gelegten Betriebspunkt: $9,1 \text{ kW}$) und
- die sich andererseits ergibt aus dem Energiebedarf von 4 kWh/a für die Filterspülung (Volumenstrom Spülwasser, Förderhöhe, Druckverlust durch Filterdüsen, Fluidisierung Filterbett, Rohrleitungen inklusive Einbauten und Pumpenwirkungsgrad) sowie aus der Anzahl aller Spülungen je Jahr; für die Zurückführung des schlammhaltigen Spülwassers wird die bei der Spülung auftretende geodätische Höhendifferenz zwischen Oberkante Filtertulpe und Öffnung Spülwasserrückführleitung genutzt.

Die dritte Position B.3 ergibt sich aus der festgelegten Anzahl maximal durchgesetzter Bettvolumina durch die einzelnen Filter und der Option, die tatsächliche Filtergeschwindigkeit der Abflussmenge bei Regenereignissen bis maximal $5,5 \text{ m/h}$ anzupassen.

Da der Großadsorber zum Zeitpunkt dieser Berichtsabfassung eine noch exzellente Eliminationsleistung der untersuchten Spurenstoffe aufweist und sich hier also noch keine Limitierung der Laufzeiten oder durchgesetzten Bettvolumina abzeichnen, werden zur Abschätzung der durchsetzbaren Bettvolumina die experimentell Befunde für den Kleinadsorber (KA) herangezogen: Es wird erwartet, dass bei einem einzelnen Adsorber einer neu zu errichtenden Adsorptionsstufe bis zu 14.000 Bettvolumina bis zum Erreichen maßgeblicher Spuren-

stoffdurchbrüche (im Kontext des untersuchten Stoffspektrums) durchgesetzt werden können. In der klärtechnischen Berechnung in Anhang 8 wird vorgeschlagen, ein realistisches durchgesetztes Bettvolumen (BVT) von 14.000 m³/m³ zu Grunde zu legen und in der Wirtschaftlichkeitsberechnung zur Ermittlung der maßgebenden Betriebskosten zu berücksichtigen. Diese führen zu einer Standzeit der GAK im Einzelfilter von 14,6 Monaten und somit zu einer im Mittel jährlich zwecks Reaktivierung auszutauschenden GAK-Masse für alle 4 Filter von ca. 40 t/a (entspricht einem Volumen 133 m³/a).

Werden die 4 Adsorber zeitversetzt gestartet, ergibt sich im Sammelfiltrat auch mit einem einzelnen Adsorber kurz vor der Reaktivierung immer noch eine sehr gute Gesamtelimination, die dem über die Gesamtfrachten und –beladungen berechneten Mittel des einzelnen Adsorbers entspricht. Mit 14.400 Bettvolumina treten für den KA (bei einer relativ hohen Filtergeschwindigkeit von 7,3 m/h und daher deutlich geringerer Leebettkontaktzeit EBCT als der Großadsorber) bei den folgenden Stoffen, deren Zulaufkonzentrationen deutlich über der jeweiligen Bestimmungsgrenze liegen, Gesamteliminationsgrade unter 80 % auf: Atenolol (65 %), Dichlofenac (74,8 %), Ibuprofen (69,7 %), Carbamazepin (69,3 %), Oxazepam (66,2 %), TMDD (43,5 %), Terbutryn (47 %). Die eliminierte Gesamtfracht aller detektierten Spurenstoffe liegt aber noch oberhalb von 80 %, wie dem Diagramm der Abbildung 45 zu entnehmen ist.

Die vierte Position B.4 weist für die jährlichen Wartungskosten etc. gut 8.4000 € bei der Bau-technik, knapp 3.800 € bei der Maschinentechnik und knapp 5.100 € für die EMSR-Technik aus.

7.3 Jährliche Gesamtkosten

Zusammen mit einem jährlichen Kapitaldienst von 106.140 €/Jahr (brutto; entspricht 89.193 €/Jahr netto), dessen Zusammensetzung in Anhang 10 tabellarisch untergliedert ist, ergeben sich spezifischen Gesamtkosten des Verfahrens je Kubikmeter aufbereiteten Wassers von etwa 12,6 Cent/m³ (brutto), wobei hier eine eventuelle Projektförderung durch den Bund oder das Land NRW noch nicht berücksichtigt ist.

8 Literatur

- Benstöm, F.; Nahrstedt, A.; Rolfs, T.:
Filtration über granuliert Aktivkohle (GAK) zur Spurenstoffelimination. Spurenstoffelimination auf Kläranlagen, DWA-Seminar, Siegburg 14.11.2013
- Bergmann, A.; Hembrock-Heger, A.:
Bewertung der Umweltrelevanz von Arzneistoffen. Umweltwiss. Schadst. Forsch. 20 (2008): S. 197-208
- Bode, H.; Grünebaum, T.; Klopp, R.:
Anthropogene Spurenstoffe aus Kläranlagen - Teil 2: Maßnahmen bei der Abwasserbehandlung – Möglichkeiten, Notwendigkeiten und Voraussetzungen. Korrespondenz Abwasser, Abfall, 57 (2010) Nr. 3, S. 240-244
- Dieter, H. H.
Grenzwerte, Leitwerte, Orientierungswerte, Maßnahmenwerte – Definitionen und Festlegungen mit Beispielen aus dem UBA. Hrsg. Umweltbundesamt: Fortschreibung eines Vortrags zur 42. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft „Mikroschadstoffe in der aquatischen Umwelt“ vom 18.-20. März 2009 im EUROGRESS Aachen; Stand: Oktober 2009
- Hembrock-Heger, A.; Bergmann, A.:
Eintrag von Arzneimitteln und deren Verhalten und Verbleib in der Umwelt - Literaturstudie. Kurzfassung zum Abschlussbericht (Fachbericht 2). Hrsg.: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Recklinghausen (2007)
- Merkel, W.:
Arzneimittelrückstände in der aquatischen Umwelt: Neue Herausforderungen an Abwasserreinigung und Trinkwasseraufbereitung? GWF Wasser Abwasser 145 (2004) Nr. 5, 326-335
- Mertsch, V.
Maßnahmen an der Quelle. Vortrag anl. des Kolloquiums „Mikroschadstoffe in der aquatischen Umwelt“, Berlin, 21.10.2009.
- Metzger, S.; Rößler, A.; Kapp, H.; Hiller, G.; Süßmuth, W.; Maurer, M.:
Spurenstoffentnahme in kommunalen Kläranlagen durch Adsorption. KA Korrespondenz Abwasser, Abfall, 56(2009) Nr. 6, 610 - 618
- Nahrstedt, A.; Burbaum, H.; Alt, K.; Barnscheidt, I.; Fitzsche, J.; Sürder, T.:
Abschlussbericht - CSB- und Spurenstoffadsorption am Aktivkohlefestbett, Eigenverlag IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasser Beratungs- und Entwicklungsgesellschaft mbH, Mülheim an der Ruhr, 2011.
- Nahrstedt, A., Burbaum, H., Mauer, C., Alt, K., Sürder, T., Fritzsche, J.: Der Einsatz von granulierter Aktivkohle auf dem Verbandsklärwerk ‚Obere Lutter‘; KA Korrespondenz Abwasser, Abfall, 61(2014a) Nr. 5, 408-426.
- Nahrstedt, A.; Burbaum, H.; Alt, K.; Mauer, C.; Fitzsche, J.; Sürder, T.: Abschlussbericht Einsatz von granulierter Aktivkohle auf dem Verbandsklärwerk „Obere Lutter“ - Teil 2 - . Eigenverlag IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasser Beratungs- und Entwicklungsgesellschaft mbH, Mülheim an der Ruhr, (2014b).
- Sontheimer, H.; Frick, B.R.; Fettig, J.; Hörner, G.; Hubele, C.; Zimmer, G.:
Adsorptionsverfahren in der Wasserreinigung. Eigenverlag DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut Universität Karlsruhe (TH), (1985), ISBN 3-922 671-11-X.
- Sontheimer, H.; Crittenden, J.C.; Summers, R.S.:
Activated Carbon for Water Treatment. Eigenverlag DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut Universität Karlsruhe (TH), (1988), ISBN 3-922 671-20-9.

A solid orange vertical bar is positioned on the left side of the page, above the text.

UBA-Fachgespräch

„Bewertung der Trinkwasserrelevanz von Chemikalien im Rahmen der REACH-Verordnung“
am 19.01.2011, Ergebnisprotokoll, Institut für Wasserforschung GmbH Dortmund (2011)

<http://www.pills-project.eu/>

9 Glossar

AFS:	Abfiltrierbare Stoffe
BB:	Belebungsbecken
B.G.:	analytische Bestimmungsgrenze
BVT:	Bed Volumes Treated
CF:	Carbon Footprint
CSB=CSB _{filtriert} :	Chemischer Sauerstoff-Bedarf der filtrierten Probe
DOC:	Dissolved Organic Carbon
EBCT:	Empty Bed Contact Time
FF:	Flockungsfiltration
GAK:	Granulierte Aktivkohle
GA:	Großadsorber
GOW:	Gesundheitlicher Orientierungswert
KA:	Kleinadsorber
Mesh:	Korngrößenmaß gemäß ASTM
n.b.:	Parameter nicht bestimmt
NKB:	Nachklärbecken
PLS:	Prozessleitsystem
PFT/PFC:	Polyfluorierte Tenside/ per- bzw. polyfluorierte Chemikalien
PN:	Probenahme
RKM:	Röntgenkontrastmittel
SAK:	Spektraler Absorptionskoeffizient
SPS:	Speicherprogrammierbare Steuerung
TOC:	Total Organic Carbon
VKB:	Vorklärbecken
WRRL:	Wasserrahmenrichtlinie (Richtlinie 2000/60/EG)

10 Anhang

Verzeichnis der Anhänge

Anhang 1: R+I Schemata

Anhang 2: Produktdatenblatt AquaSorb 5000

Anhang 3: Spurenstoffanalytik - Bestimmungsgrenzen und Probenahmeplan

Anhang 4: Messdaten des Screenings und des Monitorings der Spurenstoffe im Kläranlagenablauf (= Zulauf GA und KA)

Anhang 5: Zur Berechnung der Elimination angesetzte Messdaten des Zulaufs GA und KA

Anhang 6: Messdaten des Monitorings der Spurenstoffe im Filtrat des Großadsorbers (GA)

Anhang 7: Messdaten des Monitorings der Spurenstoffe im Filtrat des Kleinadsorbers (KA)

Anhang 8: Klärtechnische Bemessung (Variante 2)

Anhang 9: Berechnung der jährlichen Betriebskosten

Anhang 10: Berechnung der jährlichen Kapitalkosten

Anhang 2: Produktdatenblatt AquaSorb 5000



TECHNICAL DATASHEET

WWW.JACOBI.NET



Jacobi
THE CARBON COMPANY

AquaSorb® 5000

Granulierte auf ~~Steinkohle~~
basierende Aktivkohle

AquaSorb® 5000 ist eine hochaktive, granulierte Aktivkohle, hergestellt durch Wasserdampfaktivierung aus ausgewählten Braunkohlen. Der optimierte Anteil an Adsorptions- und Transportporen ermöglicht eine exzellente Entfernung von organischen Verbindungen auch im Spurenbereich. Der Anteil an Makroporen führt zu einer beschleunigten Adsorptionskinetik und erlaubt dadurch verkürzte Kontaktzeiten. Die guten Betriebseigenschaften werden auch durch die strenge Kontrolle der Körnung erreicht.

Produktvorteile

- Hohe Aktivität
- Hoher Makroporenanteil
- Hohes Porenvolumen
- Optimierte Adsorptionskinetik
- Schnelle Schadstoffdiffusion im Porensystem
- Streng kontrollierte Partikelgröße

Typische Anwendungen

- Abwasseraufbereitung in der chemischen und pharmazeutischen Industrie
- Aufbereitung von Deponiesickerwasser
- Interne Abwasserkreisläufe
- Ablauf industrieller Kläranlagen

Verfügbare Korngrößen

- 12x40 mesh (0,425 - 1,70 mm)
- 8x30 mesh (0,60 - 2,36 mm)

Zertifizierungen & Zulassungen

- EN12915



AquaSorb® 5000 ist eine hochleistungsfähige, offenerporige Aktivkohle, die speziell für den Einsatz in der Abwasseraufbereitung entwickelt wurde.

Spezifikation*

Jodzahl	min. 1100 mg/g
Wassergehalt (beim Abpacken)	max. 5%

Typische Eigenschaften*

BET Oberfläche	1150 m ² /g
Schüttdichte	300 kg/m ³
pH	9

Verpackungsarten

- 15 kg sack (33 lb)
- 325 kg big bag (717 lb)



Verfälschte aus PE von Jacobi setzen Müllabfälle hinsichtlich Sicherheit, Stabilität und sichere Handhabung

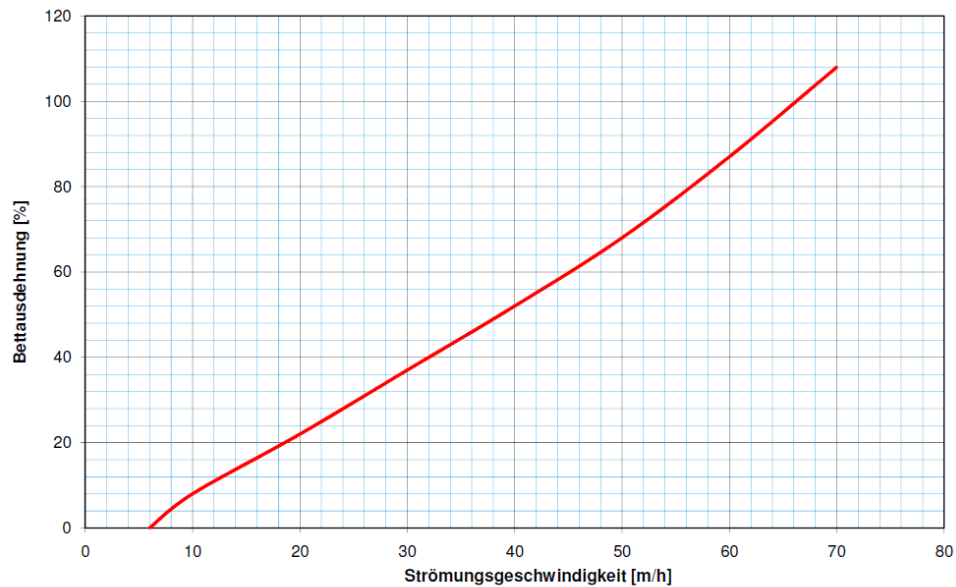
*Spezifikationswerte und Angaben zu typischen Eigenschaften werden mit Testmethoden von Jacobi Carbon ermittelt. Oben aufgeführte Werte dienen lediglich zu informativen Zwecken und nicht als Verkaufsspezifikation. Verkaufsspezifikationen erhalten Sie auf Anfrage von Ihrem Jacobi Verkaufsraum. Vor jeder Bestellung sollten diese geprüft werden.

Jacobi AG - QSR-AquaSorb5000-A1008

Rückspülausdehnung



AquaSorb® 5000 8x30

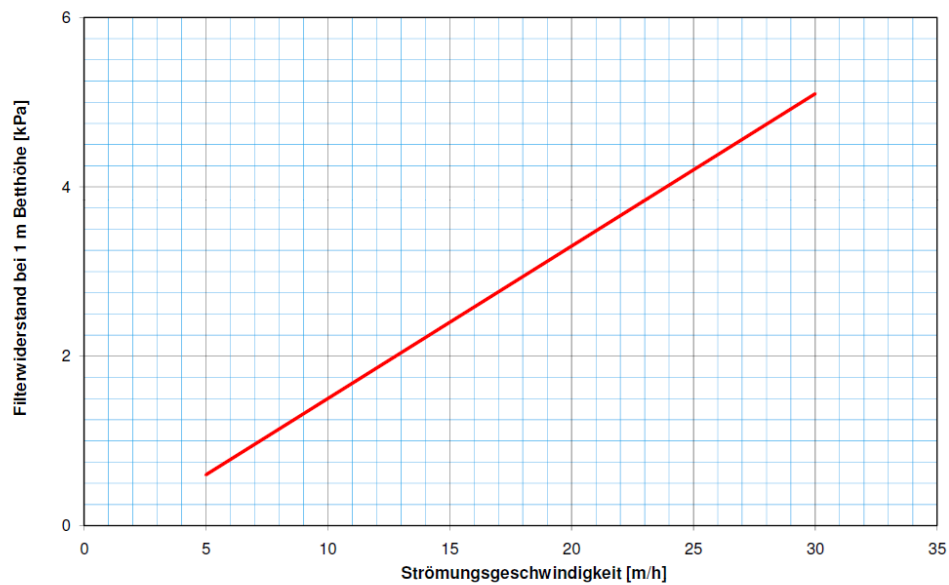


(Richtwerte 15 C)

Filterwiderstand



AquaSorb® 5000 8x30

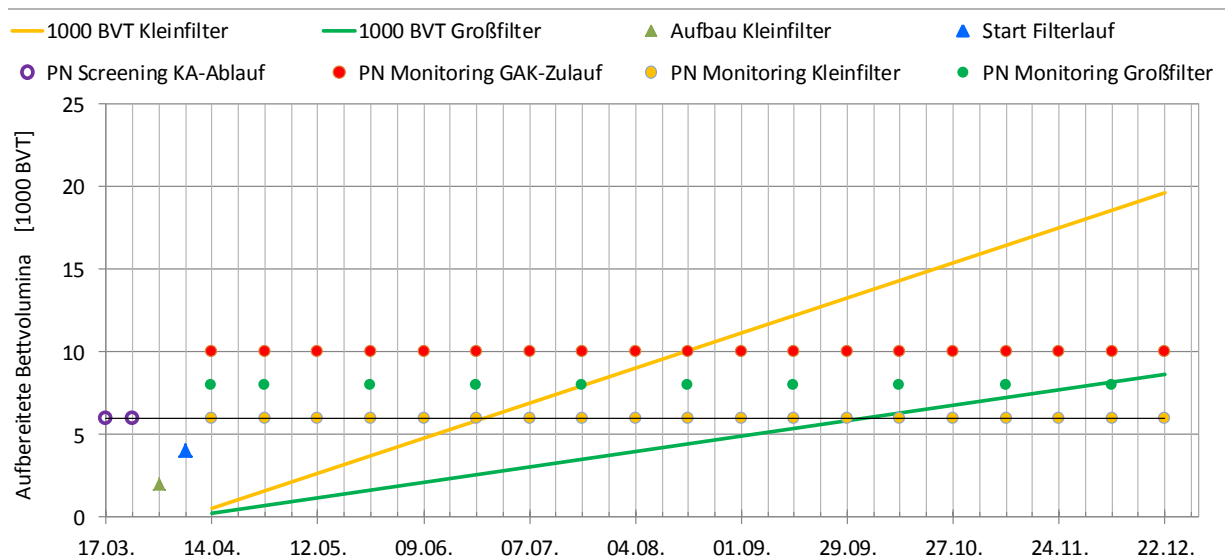


(Richtwerte 15 C)

Anhang 3: Spurenstoffanalytik - Bestimmungsgrenzen und Probenahmeplan

Parameter(gruppe)	Einheit	Bestimmungsgrenze
Makrolide und Sulfonamide		
Chloramphenicol	[µg/L]	0,011
Clarithromycin	[µg/L]	0,050
Dehydrato-Erythromycin	[µg/L]	0,060
Erythromycin	[µg/L]	0,060
N4-Sulfamethoxazol	[µg/L]	0,050
Roxithromycin	[µg/L]	0,020
Sulfadiazin	[µg/L]	0,015
Sulfadimidin	[µg/L]	0,011
Sulfamethoxazol	[µg/L]	0,011
Trimethoprim	[µg/L]	0,011
Tetracycline		
Chlortetracyclin	[µg/L]	0,050
Doxicyclin	[µg/L]	0,050
Oxytetracyclin	[µg/L]	0,050
Tetracyclin	[µg/L]	0,050
Betablocker		
Atenolol	[µg/L]	0,050
Betaxolol	[µg/L]	0,050
Bisoprolol	[µg/L]	0,050
Metoprolol	[µg/L]	0,050
Pindolol	[µg/L]	0,050
Propanolol	[µg/L]	0,050
Sotalol	[µg/L]	0,050
Analgetika / Antiphlogistika		
Acetylsalicylsäure	[µg/L]	0,020
Diclofenac	[µg/L]	0,020
Fenoprofen	[µg/L]	0,020
Ibuprofen	[µg/L]	0,020
Indometacin	[µg/L]	0,020
Ketoprofen	[µg/L]	0,020
Naproxen	[µg/L]	0,020
Phenacetin	[µg/L]	0,010
Phenazon	[µg/L]	0,010
Lipidsenker		
Bezafibrat	[µg/L]	0,020
Clofibrinsäure	[µg/L]	0,020
Etofibrat	[µg/L]	0,020
Fenofibrat	[µg/L]	0,040
Gemfibrozil	[µg/L]	0,020

Parameter(gruppe)	Einheit	Bestimmungsgrenze
Antiepileptika		
Carbamazepin	[µg/L]	0,010
Durchblutungsfördernde Mittel		
Pentoxifyllin	[µg/L]	0,010
Psychopharmaka		
Oxazepam	[µg/L]	0,050
Diazepam	[µg/L]	0,010
Röntgenkontrastmittel		
Amidotrizoesäure	[µg/L]	0,010
Iohexol	[µg/L]	0,010
Iomeprol	[µg/L]	0,010
Iopamidol	[µg/L]	0,010
Iopromid	[µg/L]	0,010
Iothalamsäure	[µg/L]	0,010
PFC		
PFBA	[µg/L]	0,050
PFBS	[µg/L]	0,050
PFDA	[µg/L]	0,050
PFHpA	[µg/L]	0,050
PFHxA	[µg/L]	0,050
PFHxS	[µg/L]	0,050
PFNA	[µg/L]	0,050
PFOA	[µg/L]	0,050
PFOS	[µg/L]	0,050
PFPA	[µg/L]	0,050
Phenole		
Bisphenol A	[µg/L]	0,010
4-Nonylphenol, Isomerengemisch	[µg/L]	0,010
4-tert.-Octylphenol	[µg/L]	0,010
Chloramphenicol	[µg/L]	0,010
Industrie		
Sulfolan	[µg/L]	0,050
TMDD	[µg/L]	0,020
Industrie + Haushalt		
1H-Benzotriazol	[µg/L]	0,050
4-Methyl-1H-Benzotriazole	[µg/L]	0,050
5-Methyl-1H-Benzotriazole	[µg/L]	0,002
Herbizide		
Diuron	[µg/L]	0,030
Isoproturon	[µg/L]	0,030
Terbutryn	[µg/L]	0,020
Zuckerersatzstoffe		
Acesulfam	[µg/L]	0,050



Anhang 4: Messdaten des Screenings und des Monitorings der Spurenstoffe im Kläranlagenablauf (= Zulauf GA und KA)

Zulauf Adsorber	Parameter	Datum	13.03.2014	20.03.2014	15.04.2014	29.04.2014	20.05.2014	26.05.2014	08.07.2014	22.07.2014	05.08.2014	19.08.2014	02.09.2014	16.09.2014	14.10.2014	11.11.2014	09.12.2014
Parameter(gruppe)	Parameter																
Makrolide und Sulfonamide	Chloramphenicol	[µg/L]	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01										
	Clarithromycin	[µg/L]	1,300	1,000	0,730	0,300	0,300										
	Dehydrato-Erythromycin	[µg/L]	0,160	0,160	0,120	0,070	< 0,06										
	Erythromycin	[µg/L]	0,640	0,420	0,170	0,120	0,300										
	N4-Sulfamethoxazol	[µg/L]	0,560	0,440	0,490	0,080	0,140										
	Roxithromycin	[µg/L]	0,180	0,110	0,060	0,050	0,030										
	Sulfadiazin	[µg/L]	< 0,01	< 0,01	0,010	< 0,01	< 0,01										
	Sulfadimidin	[µg/L]	< 0,01	< 0,01	0,010	0,030	< 0,01										
Tetracycline	Sulfamethoxazol	[µg/L]	0,760	0,650	0,670	0,510	0,220										
	Trimethoprim	[µg/L]	0,440	0,330	0,290	0,170	0,090										
	Chlortetracyclin	[µg/L]	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05										
	Doxycyclin	[µg/L]	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05										
Betablocker	Oxytetracyclin	[µg/L]	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05										
	Tetracyclin	[µg/L]	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05										
	Atenolol	[µg/L]	0,170	0,130	< 0,05	0,070	< 0,05	0,060	0,110	0,050	0,090	0,130	0,070	0,080	0,110	0,110	0,140
	Betaxolol	[µg/L]	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
	Bisoprolol	[µg/L]	0,650	0,430	0,570	0,340	0,240	0,180	0,250	0,190	0,260	0,330	0,250	0,350	0,280	0,370	0,480
	Metoprolol	[µg/L]	2,600	2,300	2,500	1,700	0,730	0,650	1,600	1,400	1,600	2,100	1,500	2,300	1,700	2,000	2,500
Analgetika / Antiphlogistika	Pindolol	[µg/L]	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
	Propanolol	[µg/L]	0,060	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,050	< 0,05	< 0,05
	Sotalol	[µg/L]	0,480	0,360	0,490	0,310	0,220	0,200	0,320	0,280	0,330	0,400	0,290	0,530	0,330	0,370	0,400
	Acetylsalicylsäure	[µg/L]	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
	Diclofenac	[µg/L]	3,310	2,660	4,430	2,450	6,710	3,280	2,010	0,960	1,490	2,770	1,440	2,160	1,390	2,170	2,420
	Fenoprofen	[µg/L]	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,040	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Lipidsenker	Ibuprofen	[µg/L]	0,120	0,070	0,100	< 0,02	0,080	0,060	0,050	< 0,02	0,030	0,040	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,050
	Indometacin	[µg/L]	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,030	< 0,02
	Ketoprofen	[µg/L]	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
	Naproxen	[µg/L]	0,280	0,190	0,430	0,100	0,680	0,290	0,120	< 0,02	0,060	0,130	0,020	0,040	0,050	0,090	0,250
	Phenacetin	[µg/L]	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,090	0,070	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Phenazon	[µg/L]	0,300	0,200	0,310	0,180	0,350	0,150	0,130	0,110	0,080	0,080	0,080	< 0,01	0,120	0,090	0,140
Antiepileptika	Bezalifrat	[µg/L]	0,310	0,260	0,480	0,230	0,060	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,060	0,030	0,030	0,030	0,060	0,140
	Clofibrinsäure	[µg/L]	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
	Etofibrat	[µg/L]	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
	Fenofibrat	[µg/L]	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04
	Gemfibrozil	[µg/L]	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Durchblutungsfördernde Mittel	Carbamazepin	[µg/L]	0,740	0,510	0,690	0,480	0,300	0,250	0,480	0,460	0,440	0,480	0,460	0,720	0,370	0,490	0,620
Psychopharmaka	Pentoxifylin	[µg/L]	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Röntgenkontrastmittel	Oxazepam	[µg/L]	0,180	0,120	0,220	0,140	0,160	0,150	< 0,01	< 0,01	0,090	0,120	0,100	0,220	0,120	0,140	0,170
	Diazepam	[µg/L]	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
PFC	Amidotrizesäure	[µg/L]	0,320	0,520	1,200	0,210	0,450			0,160							
	Iohexol	[µg/L]	0,670	0,080	0,520	< 0,01	0,130			0,020							
	Iomeprol	[µg/L]	0,770	1,900	2,300	0,220	1,700			0,570							
	Iopamidol	[µg/L]	0,460	0,410	1,100	0,260	1,100			1,400							
	Iopromid	[µg/L]	1,600	0,200	0,190	0,050	< 0,01			0,050							
	Iothalamidsäure	[µg/L]	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01			< 0,01							
Phenole	PFBA	[µg/L]	< 0,02	< 0,02													
	PFBS	[µg/L]	< 0,02	< 0,02													
	PFDA	[µg/L]	< 0,02	< 0,02													
	PFHpA	[µg/L]	< 0,02	< 0,02													
	PFHxA	[µg/L]	< 0,02	< 0,02													
	PFHxS	[µg/L]	< 0,02	< 0,02													
	PFNA	[µg/L]	< 0,02	< 0,02													
	PFOA	[µg/L]	0,020	0,020													
Industriestoffe	PFOS	[µg/L]	< 0,01	< 0,01													
	PFPA	[µg/L]	< 0,02	< 0,02													
	Bisphenol A	[µg/L]	0,100	0,090	0,100	0,740	0,070										
	4-Nonylphenol, Isomere	[µg/L]	0,670	0,760	< 0,01	< 0,01	< 0,01										
Benzotriazol	4-tert.-Octylphenol	[µg/L]	0,050	0,060	< 0,01	< 0,01	< 0,01										
	Chloramphenicol	[µg/L]	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01										
	Sulfolan	[µg/L]	< 0,05	< 0,05	0,100	< 0,05	< 0,05										
	TMDD	[µg/L]	3,600	4,400	3,000	1,400	1,900	1,400	1,000	0,600	1,000	0,400	0,800	2,900	8,000	1,100	4,900
Herbizide	1H-Benzotriazol	[µg/L]	9,100	7,600	11,000	8,000	4,900	6,300	6,400	5,600	6,400	6,200	4,900	7,800	6,000	8,100	9,000
	4-Methyl-1H-Benzotriazol	[µg/L]	4,400	3,600	3,500	3,500	2,100	2,500	2,900	3,600	3,800	3,500	3,200	4,600	2,100	3,300	3,400
	5-Methyl-1H-Benzotriazol	[µg/L]	2,800	2,000	0,600	0,700	0,510	0,515	0,438	0,239	0,261	0,143	0,205	0,329	0,276	0,045	0,307
	SUMME:																
Zuckerersatzstoffe	Diuron	[µg/L]	< 0,03	< 0,03	< 0,03	0,100	< 0,03										
	Isoproturon	[µg/L]	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03										
	Terbutryn	[µg/L]	0,140	0,180	0,090	0,070	< 0,02	< 0,02	0,070	0,060	0,110	< 0,02	< 0,02	0,170	0,080	0,040	0,040

(bei Stoffkonzentrationen unterhalb der Bestimmungsgrenzen: rechnerischer Ansatz der Nachweisgrenze mit halber Bestimmungsgrenze)

Zulauf Adsorber		Datum	13.03.2014	20.03.2014	15.04.2014	29.04.2014	20.05.2014	26.05.2014	08.07.2014	22.07.2014	05.08.2014	19.08.2014	02.09.2014	16.09.2014	14.10.2014	11.11.2014	09.12.2014
Parameter(gruppe)	Parameter																
Makrolide und Sulfonamide	Chloramphenicol	[µg/L]	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006										
	Clarithromycin	[µg/L]	1,300	1,000	0,730	0,300	0,300										
	Dehydrato-Erythromycin	[µg/L]	0,160	0,160	0,120	0,070	0,030										
	Erythromycin	[µg/L]	0,640	0,420	0,170	0,120	0,300										
	N4-Sulfamethoxazol	[µg/L]	0,560	0,440	0,490	0,080	0,140										
	Roxithromycin	[µg/L]	0,180	0,110	0,060	0,050	0,030										
	Sulfadiazin	[µg/L]	0,008	0,008	0,010	0,008	0,008										
	Sulfadimidin	[µg/L]	0,006	0,006	0,010	0,030	0,006										
	Sulfamethoxazol	[µg/L]	0,760	0,650	0,670	0,510	0,220										
Trimethoprim	[µg/L]	0,440	0,330	0,290	0,170	0,090											
Tetracycline																	
	Chlortetracyclin	[µg/L]	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025										
	Doxicyclin	[µg/L]	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025										
	Oxytetracyclin	[µg/L]	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025										
	Tetracyclin	[µg/L]	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025										
Betablocker																	
	Atenolol	[µg/L]	0,170	0,130	0,025	0,070	0,025	0,060	0,110	0,050	0,090	0,130	0,070	0,080	0,110	0,110	0,140
	Betaxolol	[µg/L]	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
	Bisoprolol	[µg/L]	0,650	0,430	0,570	0,340	0,240	0,180	0,250	0,190	0,260	0,330	0,250	0,350	0,280	0,370	0,480
	Metoprolol	[µg/L]	2,600	2,300	2,500	1,700	0,730	0,650	1,600	1,400	1,600	2,100	1,500	2,300	1,700	2,000	2,500
	Pindolol	[µg/L]	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
	Propanolol	[µg/L]	0,060	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,050	0,025	0,060	0,025
	Sotalol	[µg/L]	0,480	0,360	0,490	0,310	0,220	0,200	0,320	0,280	0,330	0,400	0,290	0,530	0,330	0,370	0,400
Analgetika / Antiphlogistika																	
	Acetyl(salicylsäure	[µg/L]	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
	Diclofenac	[µg/L]	3,310	2,660	4,430	2,450	6,710	3,280	2,010	0,960	1,490	2,770	1,440	2,160	1,390	2,170	2,420
	Fenoprofen	[µg/L]	0,010	0,010	0,010	0,010	0,040	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
	Ibuprofen	[µg/L]	0,120	0,070	0,100	0,010	0,080	0,060	0,050	0,010	0,030	0,040	0,010	0,010	0,010	0,010	0,05

Anhang 6: Messdaten des Monitorings der Spurenstoffe im Filtrat des Großadsorbers (GA)

(bei Stoffkonzentrationen unterhalb der Bestimmungsgrenzen: rechnerischer Ansatz der Nachweisgrenze mit halber Bestimmungsgrenze)

Filtrat Großadsorber (GA)			15.04.14, 265 BVT	29.04.14, 725 BVT	26.05.14, 1707 BVT	22.07.14, 3674 BVT	19.08.14, 4642 BVT	16.09.14, 5572 BVT	14.10.14, 6511 BVT	11.11.14, 7437 BVT	09.12.14, 8183 BVT
Makrolide und Sulfonamide	Chloramphenicol	[µg/L]	0,001	0,001							
	Clarithromycin	[µg/L]	0,005	0,005							
	Dehydrato-Erythromycin	[µg/L]	0,006	0,006							
	Erythromycin	[µg/L]	0,006	0,006							
	N4-Sulfamethoxazol	[µg/L]	0,005	0,005							
	Roxithromycin	[µg/L]	0,002	0,002							
	Sulfadiazin	[µg/L]	0,002	0,002							
	Sulfadimidin	[µg/L]	0,001	0,001							
	Sulfamethoxazol	[µg/L]	0,001	0,001							
	Trimethoprim	[µg/L]	0,001	0,001							
Tetracycline		[µg/L]									
	Chlortetracyclin	[µg/L]	0,005	0,005							
	Doxicyclin	[µg/L]	0,005	0,005							
	Oxytetracyclin	[µg/L]	0,005	0,005							
	Tetracyclin	[µg/L]	0,005	0,005							
Betablocker	Atenolol	[µg/L]	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
	Betaxolol	[µg/L]	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
	Bisoprolol	[mg/L]	0,005	0,005	0,005	0,005	0,100	0,005	0,005	0,005	0,060
	Metoprolol	[mg/L]	0,005	0,005	0,005	0,005	0,440	0,005	0,005	0,070	0,160
	Pindolol	[µg/L]	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
	Propanolol	[µg/L]	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
	Sotalol	[µg/L]	0,005	0,005	0,005	0,005	0,110	0,005	0,005	0,005	0,005
Analgetika / Antiphlogistika	Acetylsalicylsäure	[µg/L]	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
	Diclofenac	[µg/L]	0,002	0,002	0,020	0,050	0,060	0,090	0,050	0,300	0,680
	Fenoprofen	[µg/L]	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
	Ibuprofen	[µg/L]	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
	Indometacin	[µg/L]	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
	Ketoprofen	[µg/L]	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
	Naproxen	[µg/L]	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,060
	Phenacetin	[µg/L]	0,001	0,001	0,001	0,050	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
	Phenazon	[µg/L]	0,001	0,001	0,010	0,001	0,010	0,001	0,001	0,020	0,040
Lipidsenker	Bezafibrat	[µg/L]	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,030
	Clofibrinsäure	[µg/L]	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
	Etofibrat	[µg/L]	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
	Fenofibrat	[µg/L]	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
	Gemfibrozil	[µg/L]	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Antiepileptika	Carbamazepin	[µg/L]	0,001	0,001	0,001	0,001	0,010	0,030	0,040	0,060	0,120
Durchblutungsfördernde Mittel	Pentoxifyllin	[µg/L]	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Psychopharmaka	Oxazepam	[µg/L]	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,080
	Diazepam	[µg/L]	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Röntgenkontrastmittel	Amidotrizoesäure	[µg/L]	0,001	0,030	0,135	0,240					
	Iohexol	[µg/L]	0,001	0,001	0,046	0,090					
	Iomeprol	[µg/L]	0,001	0,001	0,186	0,370					
	Iopamidol	[µg/L]	0,001	0,001	0,271	0,540					
	Iopromid	[µg/L]	0,001	0,001	0,031	0,060					
	Iothalamidsäure	[µg/L]	0,001	0,001	0,001	0,001					
Phenole		[µg/L]									
	Bisphenol A	[µg/L]	0,010	0,020							
	4-Nonylphenol, Isomere	[µg/L]	0,001	0,001							
	4-tert.-Octylphenol	[µg/L]	0,001	0,001							
Industriestoffe	Sulfolan	[µg/L]	0,005	0,005							
	TMDD	[µg/L]	0,002	0,002	0,100	0,200	0,400	0,500	1,000	0,980	2,300
Benzotriazol	1H-Benzotriazol	[µg/L]	0,027	0,017	0,009	0,057	0,050	0,082	0,427	0,206	0,483
	4-Methyl-1H-Benzotriazole	[µg/L]	0,005	0,007	0,006	0,035	0,016	0,036	0,048	0,065	0,180
	5-Methyl-1H-Benzotriazole	[µg/L]	0,007	0,000	0,000	0,006	0,004	0,005	0,003	0,006	0,012
	SUMME Benzotriazol	[µg/L]	0,039	0,024	0,015	0,098	0,070	0,123	0,478	0,277	0,675
Herbizide	Diuron	[µg/L]	0,003	0,003							
	Isoproturon	[µg/L]	0,003	0,003							
	Terbutryn	[µg/L]	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Zuckerersatzstoffe	Acesulfam	[µg/L]	0,005	0,090							

(bei Stoffkonzentrationen unterhalb der Bestimmungsgrenzen: rechnerischer Ansatz der Nachweisgrenze mit halber Bestimmungsgrenze)

Filtrat Klein-adsorber			15.04.14, 551 BVT	29.04.14, 1557 BVT	20.05.14, 3331 BVT	26.05.14, 3713 BVT	08.07.14, 6957 BVT	22.07.14, 8001 BVT	05.08.14, 9036 BVT	19.08.14, 10139 BVT	02.09.14, 11274 BVT	16.09.14, 12263 BVT	14.10.14, 14380 BVT	11.11.14, 16488 BVT	09.12.14, 18771 BVT
Makrolide und Sulfonamide	Chloramphenicol	[µg/L]	0,006	0,006	0,006										
	Clarithromycin	[µg/L]	0,025	0,060	0,140										
	Dehydrato-Erythromycin	[µg/L]	0,030	0,030	0,030										
	Erythromycin	[µg/L]	0,030	0,030	0,090										
	N4-Sulfamethoxazol	[µg/L]	0,025	0,025	0,050										
	Roxithromycin	[µg/L]	0,010	0,010	0,010										
	Sulfadiazin	[µg/L]	0,008	0,008	0,008										
	Sulfadimidin	[µg/L]	0,006	0,006	0,006										
	Sulfamethoxazol	[µg/L]	0,006	0,050	0,140										
Tetracycline	Trimethoprim	[µg/L]	0,006	0,006	0,006										
		[µg/L]													
	Chlortetracyclin	[µg/L]	0,025	0,025	0,025										
	Doxicyclin	[µg/L]	0,025	0,025	0,025										
	Oxytetracyclin	[µg/L]	0,025	0,025	0,025										
Betablocker	Tetracyclin	[µg/L]	0,025	0,025	0,025										
		[µg/L]													
	Atenolol	[µg/L]	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,050	0,060	0,080
	Betaxolol	[µg/L]	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
	Bisoprolol	[mg/L]	0,025	0,025	0,025	0,025	0,050	0,025	0,050	0,025	0,080	0,120	0,120	0,210	0,310
	Metoprolol	[mg/L]	0,025	0,025	0,025	0,025	0,270	0,230	0,240	0,025	0,420	0,340	0,360	0,570	1,000
	Pindolol	[µg/L]	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
	Propanolol	[µg/L]	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
	Sotalol	[µg/L]	0,025	0,025	0,025	0,025	0,060	0,050	0,060	0,025	0,090	0,180	0,110	0,170	0,200
Analgetika / Antiphlogistika		[µg/L]													
	Acetylsalicylsäure	[µg/L]	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
	Dichlofenac	[µg/L]	0,200	0,010	0,780	0,610	0,920	0,530	0,510	1,320	0,610	0,890	0,690	1,490	1,340
	Fenoprofen	[µg/L]	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
	Ibuprofen	[µg/L]	0,010	0,010	0,010	0,010	0,020	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
	Indometacin	[µg/L]	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
	Ketoprofen	[µg/L]	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
	Naproxen	[µg/L]	0,010	0,010	0,060	0,010	0,050	0,010	0,010	0,050	0,010	0,010	0,020	0,050	0,120
	Phenacetin	[µg/L]	0,005	0,005	0,005	0,010	0,040	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
	Phenazon	[µg/L]	0,005	0,005	0,040	0,030	0,060	0,050	0,050	0,040	0,020	0,005	0,005	0,040	0,070
	Bezafibrat	[µg/L]	0,010	0,010	0,030	0,010	0,010	0,010	0,010	0,040	0,020	0,010	0,020	0,040	0,070
	Clofibrinsäure	[µg/L]	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
	Etofibrat	[µg/L]	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
	Fenofibrat	[µg/L]	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
	Gemfibrozil	[µg/L]	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
Lipidsenker	Carbamazepin	[µg/L]	0,005	0,005	0,040	0,030	0,180	0,150	0,140	0,220	0,220	0,360	0,200	0,310	0,400
	Pentoxifylin	[µg/L]	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
	Oxazepam	[µg/L]	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,060	0,050	0,110	0,060	0,090	0,120
	Diazepam	[µg/L]	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
		[µg/L]													
		[µg/L]													
		[µg/L]													
Röntgenkontrastmittel	Amidotrizoesäure	[µg/L]	0,170	0,260	0,440			0,240							
	Iohexol	[µg/L]	0,005	0,290	0,100			0,080							
	Iomeprol	[µg/L]	0,110	0,500	0,670			0,640							
	Iopamidol	[µg/L]	0,110	0,005	0,310			1,400							
	Iopromid	[µg/L]	0,010	0,005	0,005			0,080							
	Iothalamicsäure	[µg/L]	0,005	0,005	0,005			0,005							
		[µg/L]													
Phenole	Bisphenol A	[µg/L]	0,010	0,010	0,005										
	4-Nonylphenol, Isomerengemisch	[µg/L]	0,005	0,005	0,005										
	4-tert.-Octylphenol	[µg/L]	0,005	0,005	0,005										
Industriestoffe	Sulfolan	[µg/L]	0,025	0,025	0,025										
	TMDD	[µg/L]	0,010	0,200	0,600	0,400	0,800	0,500	0,700	1,000	0,700	2,700	5,700	1,300	2,900
Benzotriazol	1H-Benzotriazol	[µg/L]	0,011	0,015	0,017	0,011	0,402	0,433	0,583	0,902	0,945	1,300	2,500	3,200	3,530
	4-Methyl-1H-Benzotriazole	[µg/L]	0,003	0,005	0,005	0,005	0,225	0,267	0,368	0,527	0,626	0,894	0,617	0,949	1,910
	5-Methyl-1H-Benzotriazole	[µg/L]	0,001	0,001	0,001	0,001	0,018	0,019	0,027	0,041	0,033	0,040	0,036	0,072	0,058
	SUMME	[µg/L]	0,015	0,021	0,023	0,017	0,645	0,719	0,978	1,470	1,604	2,234	3,153	4,221	5,498
Herbizide	Diuron	[µg/L]	0,015	0,015	0,015										
	Isoproturon	[µg/L]	0,015	0,015	0,015										
	Terbutryn	[µg/L]	0,010	0,010	0,010	0,010	0,030	0,020	0,030	0,090	0,010	0,120	0,050	0,040	0,020
Zuckerersatzstoffe	Acesulfam	[µg/L]	0,050	4,700	12,000										

Anhang 8: Klärtechnische Bemessung (Variante 2)

GAK in nachgeschalteten Druckkesseln (1-stufig, kont. Betrieb)			
Hydraulische Daten:			
Zulauf Kläranlage gesamt			
	$Q_{TW} =$	111 l/s	85% aller Zuflüsse
	$Q_{RW} =$	389 l/s	max Abfluss gemäß Bescheid
Teilstrom zum GAK-Filter:			
	$Q_{max} = Q_{TW}$	83 l/s	
		300 m³/h	
	$Q_{mittel} =$	60 l/s	
1. Bemessung des Zulaufpumpwerkes für den Teilstrom			
Installation eines Pumpwerkes (FU/MID)			
Gewählt		1 Pumpen, selbstansaugend	
		+ 1 Reservepumpe	
		je 83,2 l/s	
		Pumpen regelbar über FU	
2. Bemessung der GAK-Adsorber			
Filtergeschwindigkeit generell	maximal	7,5 m/h	
gewählt (bei Q_{max}):	$v =$	5,5 m/h	
Filterbetthöhe generell		2 - 3 m	
gewählt	$H =$	3,0 m	
Filterhöhe gesamt ca.	$H_{ges} =$	5,0 m	
erforderliche Oberfläche	$A_{ges} =$	54,5 m²	
Durchmesser	$D =$	4,15 m	
Oberfläche pro Adsorber	$A =$	13,5 m²	
erforderliche Anzahl Adsorber		4,0 Stck	
$n + 1$: Anzahl Filter		5,0 Stck	
gewählt:		4,0 Stck	
Gesamtvolumen Filter			
	$V_{ges} =$	162 m³	
Kontaktzeit		> 30 min	
errechnet:	$t =$	32,5 min	
<u>Nachweis Filtergeschwindigkeit bei $Q_{max} (n - 1)$</u>			
	$Q_{max} =$	83 l/s	
		300 m³/h	
Filtergeschwindigkeit max.	$v =$	5,5 m/h	
	$Q_{mittel} =$	60 l/s	
		216 m³/h	
Filtergeschwindigkeit mittel	$v =$	4,0 m/h	
<u>Nachweis Kontaktzeit bei $Q_{max} (n - 1)$</u>			
Kontaktzeit max.	$t =$	26,0 min	
Kontaktzeit mittel	$t_{mittel} =$	36,1 min	

3. Bemessung Spülwasserpumpen			
maximale Spülgeschwindigkeit	v =	25 - 30 m/h	
gewählt	v =	27 m/h	
Spüldauer		10 min	
Spülintervall		1 mal wöchentlich	
	Q =	365 m³/h	
		101 l/s	
Gewählt		1 Pumpen, selbstansaugend	
		+ 1 Reservepumpe	
	je	101 l/s	
		Pumpen regelbar über FU	
4. Bemessung Spülluftgebläse			
maximale Spülgeschwindigkeit	v =	60 m/h	
Spüldauer		3 min	
Spülintervall		1 mal wöchentlich	
	Q =	812 m³/h	
Gewählt		1 Gebläse	
		+ 1 Reservegebläse	
	je	812 m³/h	
5. Filterlaufzeit/ Standzeit			
1.) über Bettvolumina			
gewählt:		14.000 m³ Wasser/m³ GAK	
Standzeit	t _F =	438 d	
		14,6 Monate	
Mittlerer Jahresverbrauch GAK		133 m³/a	
		40 t/a	
Erstbefüllung GAK		49 t	

Anhang 9: Berechnung der jährlichen Betriebskosten

Pos.	Kurztext			Variante 2 Nachgeschaltete Druckkessel	
				€/a	
1	Personalkosten				
		Menge		0,25	1/a
		spez. Preis		40.000	€/1
					10.000,00
	Gesamtsumme 1 Personalkosten:				10.000,00
2	Energiekosten				
		Menge		92.211	kWh/a
		spez. Preis		0,19827	€/kWh
					18.282,75
	Gesamtsumme 2 Energiekosten:				18.282,75
3	Chemikalienkosten				
3.1	GAK	Menge		40	t/a
		spez. Preis		1.650	€/t
					66.000,00
	Gesamtsumme 3 Chemikalienkosten:				66.000,00
4	Kosten Wartung/Versicherungen				
		Bautechnik	1% Invest		8.743,41
		Maschinentechnik	2,5% Invest		3.763,00
		EMSR-Technik	2,5% Invest		5.050,00
	Gesamtsumme 4 Wartung/Versicherungen:				17.556,41
1	Gesamtsumme Personalkosten				10.000,00
2	Gesamtsumme Energiekosten				18.282,75
3	Gesamtsumme Chemikalienkosten				66.000,00
4	Gesamtsumme Kosten Wartung/Versicherungen				17.556,41
	Summe Betriebskosten netto				111.839,16
	+ 19 % MwSt.				21.249,44
	Summe Betriebskosten brutto				133.088,61

Anhang 10: Berechnung der jährlichen Kapitalkosten

		Variante 2 Nachgeschaltete Druckkessel	
			€/a
Kapitalkosten			
1. Anteil Bau			
	Investitionskosten (€)	874.341 €	50.955 €/a
	Abschreibungsdauer (Jahre)	40	
	Verzinsung (%)	5,0	
	Kapitalwiedergew.-fakt.	0,0583	
2. Anteil Maschinentechnik			
	Investitionskosten (€)	150.520 €	12.078 €/a
	Abschreibungsdauer (Jahre)	20	
	Verzinsung (%)	5,0	
	Kapitalwiedergew.-fakt.	0,0802	
3. Anteil EMSR-Technik			
	Investitionskosten (€)	202.000 €	26.160 €/a
	Abschreibungsdauer	10	
	Verzinsung (%)	5,0	
	Kapitalwiedergew.-fakt.	0,1295	
4. Nebenkosten		282.178 €	
	Summe Investitionskosten (€)	1.509.039 €	
Summe Kapitalkosten			89.193 €/a
Betriebskosten Gesamt			111.839 €/a
Jahreskosten (netto)			201.032 €/a
+ 19 % MwSt.			38.196 €/a
Jahreskosten (brutto)			239.228 €/a