

Machbarkeitsstudie zur Spurenstoffelimination

auf der

Kläranlage Grevenbroich

Kurzfassung



Gefördert von:

Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen



Auftraggeber: Erftverband

Auftragnehmer: Erftverband aquatec GmbH
Am Erftverband 6
50126 Bergheim

Tel: 02271 / 88-0
Fax: 02271 / 88-1210

Bearbeitung: Luk Beyerle
Christoph Brepols
Niklas Wachendorf

Bearbeitungszeitraum: 2016 - 2018

Gefördert vom:

Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen



Bildquelle Deckblatt: Digitale Orthophotos, www.tim-online.nrw.de, Land NRW 2018,
Datenlizenz Deutschland -Namensnennung - Version 2.0 (www.govdata.de/dl-de/by-2-0)

Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung	6
1.1	Untersuchung von Mikroschadstoffen in der Erft	6
1.2	Effizienzstudien zur Mikroschadstoffentfernung im Erfteinzugsgebiet	7
2	Stand der Forschung und Technik zur Mikroschadstoffelimination	10
2.1	Herkunft und Verbreitung von Mikroschadstoffen	10
2.2	Überblick technischer Maßnahmen in der Abwasserreinigung	11
2.3	Stand der Erkenntnisse, großtechnische Umsetzungen	12
3	Einzugsgebiet der Kläranlage und Abwassereigenschaften	14
3.1	Beschreibung des Einzugsgebiets	14
3.2	Abwassermenge und Zuflußcharakteristik	15
3.3	Abwasserzusammensetzung	15
3.4	Screening auf Mikroschadstoffe	17
4	Ausarbeitung von technischen Anlagenkonzepten	20
4.1	Vorhandene Kläranlage	20
4.1.1	Verfahrenstechnik	21
4.1.2	Aktuelle Reinigungsanforderungen	22
4.2	Verfahrensauswahl für die Kläranlage Grevenbroich	22
4.3	Auslegungswerte der 4. Reinigungsstufe	24
4.4	V1a-d: Neuerrichtung PAK-Dosierung mit eigenem Schlammkreislauf und Sandfiltration als Nachbehandlung	27
4.5	V2a-d: Neuerrichtung GAK-Filtration	32
4.6	V3a-d: Neuerrichtung Ozonbehandlung mit Nachbehandlung durch Sandfilter	36
5	Kostenermittlung und Variantenvergleich	40
5.1	Kostenansätze	40
5.2	Variantendiskussion und Verfahrensempfehlung	40
5.3	Variantenvergleich Vollstrombehandlung	42
5.4	Variantenvergleich Teilstrombehandlung	45
6	Betrachtung des Gewässers und sonstiger Umweltwirkungen	50
6.1	Ökologische Betrachtung des Gewässers	50
6.2	Erfordernis zur Mikroschadstoffelimination aus ökologischer Sicht	51
7	Fazit	53
8	Literaturverzeichnis	57

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Untersuchte Kläranlagenstandorte (blau) und Probenahmepunkte am Gewässer (rot).....	8
Abbildung 2: Eintragspfade anthropogener Spurenstoffen in die Gewässer	11
Abbildung 3: Verfahren der Spurenstoffentfernung aus Abwasser.....	12
Abbildung 4: Einzugsgebiet der KA Grevenbroich	14
Abbildung 5: Häufigkeitsverteilung der Tageszuflüsse für das Jahr 2015, KA Grevenbroich	15
Abbildung 6: Erweiterungsflächen für die 4. Reinigungsstufe	21
Abbildung 7: Gemessene Zulaufmengen der KA Grevenbroich mit bei Teilstrombehandlung behandeltem (blau) und nicht behandeltem Anteil (rot)	26
Abbildung 8: Lageskizze PAK-Stufe (Vollstrom)	28
Abbildung 9: Systemskizze PAK-Stufe (hier: Teilstrombehandlung)	29
Abbildung 10: Lageskizze PAK-Stufe (Teilstrombehandlung nur Grevenbroich).....	32
Abbildung 11: Lageskizze PAK-Stufe (Teilstrombehandlung, Grevenbroich mit Wevelinghoven)	32
Abbildung 12: Lageskizze GAK-Filtration (Vollstrom)	33
Abbildung 13: Bauwerksskizze GAK-Filtration.....	34
Abbildung 14: Lageskizze GAK-Filtration (Teilstrom, nur Grevenbroich)	35
Abbildung 15: Lageskizze GAK-Filtration (Teilstrom, Grevenbroich mit Wevelinghoven).....	36
Abbildung 16: Lageskizze Ozonbehandlung (Vollstromverfahren).....	37
Abbildung 17: Prinzipskizze Ozon-Kontaktreaktor (hier Teilstromvariante mit Trennbauwerk)	38
Abbildung 18: Lageskizze Ozonbehandlung (Teilstrom, nur Grevenbroich).....	39
Abbildung 19: Lageskizze Ozonbehandlung (Teilstrom, Grevenbroich mit Wevelinghoven)	39
Abbildung 20: Technische Bewertung der untersuchten Verfahren	41
Abbildung 21: Behandelte Wassermenge und Bypassmenge bei der Teilstrombehandlung	48
Abbildung 22: Vergleich Diclofenac-Ablaufkonzentrationen Vollstrom- vs. Teilstrombehandlung	48

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kenngrößen der zehn betrachteten Kläranlagen im Erfteinzugsgebiet	9
Tabelle 2: Technische Referenzen zu Verfahren der Mikroschadstoffentfernung	13
Tabelle 3: Auswertung der Ablaufkonzentrationen der KA Grevenbroich.....	16
Tabelle 4: Mikroschadstoffkonzentrationen in der KA und im Gewässer.....	18
Tabelle 5: Verfahrensauswahl für die Kläranlage Grevenbroich	22

Abkürzungsverzeichnis

AbwV	Abwasserverordnung	-
AFS	Abfiltrierbare Stoffe	mg/l
AOP	Advanced Oxidation Process (fortschrittlicher Oxidationsprozess)	-
DOC	Dissolved Organic Carbon (gelöster organischer Kohlenstoff)	mg/l
GAK	Granulierte Aktivkohle	-
GKW	Gruppenklärwerk	-
KA	Kläranlage	-
MBA	Membranbelebungsanlage	-
MBR	Membranbioreaktor	-
MF	Mikrofiltration	-
MTZ	Massentransferzone	-
NF	Nanofiltration	-
PAK	Pulveraktivkohle	-
PBT	Persistente, bioakkumulierbare und toxische Stoffe	-
PS	Primärschlamm	-
PSM	Pflanzenschutzmittel	-
RBF	Retentionsbodenfilter	-
SdT	Stand der Technik	-
TOC	Total Organic Carbon (gesamter organischer Kohlenstoff)	mg/l
UF	Ultrafiltration	-
UO	Umkehrosmose	-
ÜS	Überschussschlamm	-
UV	Ultraviolette Strahlung	-
ÜW	Überwachungswerte	-

1 Veranlassung

Der fachliche Diskurs zur Weiterentwicklung des Standards der Abwasserreinigung in Europa und Deutschland wird in den letzten zehn Jahren vielfach von der Diskussion um Mikroschadstoffe in den Gewässern bestimmt. Waren in der öffentlichen Wahrnehmung zunächst vor allem mögliche Auswirkungen von Arzneimittelrückständen oder östrogen wirksamen Substanzen auf Umwelt und menschliche Gesundheit ein Thema, mischen sich hierin vor allem in den vergangenen Monaten zunehmend auch Berichte zum Vorkommen von Mikroplastik (*Die Zeit* 2018; NDR o. J.; Rundschau o. J.) und antibiotikaresistenten Krankheitserregern in den Gewässern (tagesschau.de o. J.).

Der Erftverband hat in den vergangenen Jahrzehnten im Bereich der Modernisierung seiner Abwasseranlagen immer wieder Pionierarbeit geleistet: Sei es bei der Einführung, der großtechnischen Anwendung des Membranbelebungsverfahrens für die kommunale Abwasserreinigung im Jahre 1999 sowie der weiteren Anwendung, Erforschung und Verbesserung des Membranbelebungsverfahrens (Erftverband 2004; Brepols 2010; Brepols 2013; Drensla und Janot 2017), der Anwendung von Retentionsbodenfilter für die Niederschlagswasserbehandlung (Mertens et al. 2012) oder auch bei der Erkundung von Eintragspfaden und Minderungsmaßnahmen für Spurenstoffe und Keimbelastungen in Gewässern am Beispiel des Swistbaches (Christoffels et al. 2016; Brunsch et al. 2018; Schreiber 2015). Das Verbandsgebiet weist mit insgesamt 17 Filtrationsanlagen, wovon drei Membranbelebungsanlagen sind, bereits heute eine ungewöhnliche Dichte an Kläranlagen für die weitergehende Abwasserreinigung auf.

Leider lagen bislang keine ausreichenden Erkenntnisse zur Belastungssituation mit gelösten Mikroschadstoffen entlang des Gewässerverlaufs der Erft und ihrer Nebengewässer vor. Der Erftverband hat daher ein umfangreiches Analytik – und Untersuchungsprogramm in der Erft durchgeführt. Parallel dazu werden an insgesamt zehn Klärwerksstandorten die Bedingungen und die Wirksamkeit einer möglichen Spurenstoffelimination durch Errichtung einer 4. Reinigungsstufe untersucht.

Die vorliegende Studie beinhaltet die Bedarfs- und Effizienzanalyse einer Abwasserbehandlungsstufe zur Mikroschadstoffentfernung auf der Kläranlage Grevenbroich und schließt Aspekte zu ihrer ökologischen Notwendigkeit ein.

1.1 Untersuchung von Mikroschadstoffen in der Erft

Die Erft weist in ihrem Verlauf einige Besonderheiten auf. Sie entspringt in der nördlichen Eifel bei Bad Münstereifel. Aus dem Gebiet der Nordeifel erhält die Erft außerdem Zuläufe von Nebengewässern (insbesondere des Veybachs) die, aufgrund eines natürlichen, geologischen Hintergrundes und ehemaliger bergbaulicher Aktivitäten in der Region, eine hohe Belastung an Schwermetallen mit sich führen, die im weiteren Verlauf der Erft prägend wirkt. Die Erft durchfließt weiter die Landschaft der Zülpicher und Jülicher Börde, die sich, im südlichen Bereich im Stauschatten der Eifel gelegen, durch geringe jährliche Niederschlagshöhen auszeichnen. Grundwasserbürtige Zuläufe und Nebengewässer fehlen

hier oftmals. Südlich von Bergheim ist das Abflussgeschehen in der Erft dann im Wesentlichen geprägt durch massive Einleitungen von Sumpfungsäwässern, die aus den Tagebauen des rheinischen Braunkohlereviere stammen und die ein Vielfaches der natürlichen Wasserföhrung ausmachen. Durch die tagebaubedingten Grundwasserabsenkungen fehlt hier ebenfalls ein Kontakt zum Grundwasserleiter. Dies macht sich vor allem dadurch bemerkbar, dass einige Nebengewässer der Erft öberwiegend durch Köhlwassereileitungen aus Braunkohlekraftwerken oder aber kommunale Abwasserbehandlungsanlagen gespeist werden. Des Weiteren ist das Einzugsgebiet der Erft sehr stark landwirtschaftlich geprägt. Mehr als 60% der Flächen im Einzugsgebiet sind landwirtschaftliche Nutzflächen in Form von Acker- oder Grünland, die in weiten Bereichen durch den intensiven Anbau von Feldfröchten und insbesondere Zuckerröben geprägt sind.

Im Rahmen der Umsetzung der europäischen Wasserrahmenrichtlinie wurde in den vergangenen Jahren ein flächendeckendes Gewässermonitoring zur Bestimmung des ökologischen Zustandes der Gewässer etabliert. In den drei bisherigen Monitoring Zyklen wurde für die Erft, wie für öber 90% der Nordrhein-Westfälischen Gewässer, ein schlechter ökologischer und chemischer Zustand ermittelt. Auch für einige Mikroschadstoffe wurden dabei Überschreitungen der derzeitigen Orientierungswerte festgestellt. Dieses Ergebnis wurde für die Erft nur anhand einer sogenannten Überblicksmessstelle nahe der Mündung ermittelt. Daher sind nur sehr begrenzt Rückschlüsse auf die Quellen und die Belastungen im Verlauf der Erft und ihrer Nebengewässer möglich. Ohne genaue Kenntnis der Eintragspfade können jedoch keine zielgerichteten Maßnahmen ergriffen werden, um die Belastung zu verringern.

Aus diesem Grund hat sich der Erftverband entschlossen, ein detaillierteres Monitoring durchzuführen. Neben der analytischen Bestimmung von Mikroschadstoffkonzentrationen und Frachten an zahlreichen Messstellen im Verlauf der Erft und den größeren Nebengewässern werden auch die Zuläufe und Abläufe ausgewählter Kläranlagen erfasst und anhand von Stoffstrommodellen und Gewässergrößesimulationen in den Gesamtzusammenhang des Flusseinzugsgebietes gestellt. Darüber hinaus werden insgesamt zehn große Kläranlagen unter dem Aspekt der technischen Realisierung möglicher Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffeliminationen sowie deren Wirksamkeit und Effizienz betrachtet.

1.2 Effizienzstudien zur Mikroschadstoffentfernung im Erfteinzugsgebiet

Der Erftverband betreibt derzeit in seinem Verbandsgebiet insgesamt noch 35 Kläranlagen mit Ausbaugrößen zwischen 1.500 und 132.000 Einwohnerwerten (Stand Januar 2018). Von diesen Kläranlagen leiten 30 unmittelbar in die Erft oder eines ihrer Nebengewässer ein, die fünf öbrigen Kläranlagen gehören zum Einzugsgebiet des Rheingrabens.

Für insgesamt zehn große Kläranlagen im Einzugsgebiet (s. Abbildung) hat der Erftverband Studien durchgeführt, die die Wirksamkeit und Effizienz einer zusätzlichen Mikroschadstoffelimination bewerten. Hierbei soll zu einem ermittelt werden, mit welcher Technologie und zu welchen Kosten die jeweilige Anlage mit einer zusätzlichen Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination ausgerüstet werden kann zum anderen soll eine qualitative Abschätzung der zu erwartenden Umweltwirkungen erfolgen.



Abbildung 1: Untersuchte Kläranlagenstandorte (blau) und Probenahmepunkte am Gewässer (rot)

Die zehn Standorte wurden anhand Ihrer Kenngrößen, insbesondere der Ausbaugröße und des Anteils an der Wasserführung im Einleitgewässer, ausgewählt und im Hinblick auf die dort behandelten und eingeleiteten Mikroschadstoffe genauer untersucht. (s. Tabelle). Die übrigen Kläranlagen des Erftverbandes sind über die Einleitung der Nebengewässer in die Erft summarisch mit erfasst. Die zehn Kläranlagen besitzen insgesamt eine Ausbaugröße von 656.000 Einwohnerwerten und entsprechen damit rund 65% der beim Erftverband erfassten Einwohnerwerte. Bezogen auf die 30 Kläranlagen im Einzugsgebiet der Erft reinigen die zehn ausgewählten Standorte das Abwasser von 78% der angeschlossenen Einwohner. Auf den zehn Standorten wurde im Jahre 2016 insgesamt eine Jahresschmutzwassermenge JSM von 30.402.842 m³ gereinigt. Das entsprach 81% des gereinigten Schmutzwassers das über die Erft und ihre Nebengewässer abfließt. Die Jahresabwassermenge JAM betrug im gleichen Zeitraum 43.848.116 m³ und damit 79% des auf allen Kläranlagenstandorten des Erftverbandes im Erfteinzugsgebiet gereinigten Abwassers.

Tabelle 1: Kenngrößen der zehn betrachteten Kläranlagen im Erfteinzugsgebiet

Kläranlage	Einleitgewässer, bei Station km	Ausbau- größe [EW]	Überwachungswerte N_{anorg} , NH_4 , P_{ges}	Art vorhandenen der Filtration	Verhältnis $Q_{d,JAM}$ zu MNQ im Gewässer
Kirspenich	Erft, km 85,17	27.000	18, 3 (5°C), 1	Sandfilter	64,7 %
Kessenich	Erft, km 74,35	132.000	13, 3 (9°C), 1	Dynasand	40,6 %
Weilerswist	Erft, km 64,57	25.000	18, 5 (5°C), 1	Sandfilter	4,9 %
Rheinbach	Wallbach, km 4,86	27.000	18, 1 (9°C), 0,4	Sandfilter	6.111,4 %
Flerzheim	Swistbach, km 21,30	65.000 (gepl.)	18, 1,3 (5°C), 0,6	Sandfilter	16.006,6%
Köttingen	Erft, km 55,57	70.000	18, 4 (8°C), 2	keine	16,4%
Kenten	Erft, km 40,00	120.000	13, 5 (8°C), 1	Dynasand	35,6 %
Kaster	Erft, km 29,11	66.000	18, 5 (10°C), 2	Sandfilter	2,0 %
Grevenbroich	Wevelinghovener Entwässerungs- graben, km 3,34	97.000	18, 10 (12°C), 1	keine	73%
Wevelinghoven	Erft, km 12,23	27.000	18, 10 (12°C), 2	keine	1,1%

Die Kläranlagen Rheinbach und Flerzheim gehören beide zum Einzugsgebiet des Swistbaches, der bei km 63,17 unterhalb von Weilerswist in die Erft mündet. Der Wevelinghovener Entwässerungsgraben, in den die Kläranlage Grevenbroich einleitet mündet kurz unterhalb der Kläranlagen Wevelinghoven bei km 11,69 in die Erft.

2 Stand der Forschung und Technik zur Mikroschadstoffelimination

2.1 Herkunft und Verbreitung von Mikroschadstoffen

Durch den rasanten Fortschritt in der Analysentechnik in den letzten Jahrzehnten sind, neben den klassischen Kenngrößen zur Beschreibung der Wasserqualität wie Sauerstoffzehrung und Nährstoffkonzentrationen, auch Stoffe in den Fokus gerückt, die in der Umwelt als Spurenstoffe vorkommen (Ternes und Joss 2008).

Der Begriff Spurenstoffe fasst zunächst wertungsfrei alle Stoffe zusammen, die in kleinsten Konzentrationen von wenigen ng/l bis µg/l, d.h. in Spuren in der Umwelt vorkommen. Im Kontext der Wasserwirtschaft sind in der Regel Stoffe anthropogenen Ursprungs, einschließlich ihrer Transformations- und Abbauprodukte gemeint, die im Abwasser (sowohl gereinigt als auch ungereinigt) aber auch in Oberflächengewässern, im Grundwasser und im Trinkwasser gefunden werden.

Häufig wird dann auch von Mikroverunreinigungen oder Mikroschadstoffen gesprochen, um hervorzuheben, dass es sich hierbei in der Regel um Stoffe handelt, die im Gewässer oder im Trinkwasser unerwünscht sind und dort nicht natürlicher Weise vorkommen. Anorganika, Mikroplastik, Nährstoffe oder Krankheitserreger können zwar ebenfalls unerwünscht oder je nach Nutzung des Wassers schädlich sein, werden aber üblicherweise nicht unter dem Begriffe der Mikroschadstoffe mit zusammengefasst sondern als separate Stoffgruppen behandelt.

Anthropogene Spurenstoffe stammen aus verschiedensten Bereichen von Privathaushalten, Landwirtschaft und Industrie. Arzneimittel, Körperpflegeprodukte, Farben, Reinigungsmittel, Pflanzenschutzmittel aus der Landwirtschaft oder Industriechemikalien wie Flammschutzmittel und Weichmacher sind nur einige Beispiele. Entsprechend ihrer unterschiedlichen Herkunft und Stoffeigenschaften lassen sich Spurenstoffe nicht in einheitliche Substanzklasse einordnen und besitzen unterschiedlichste Stoffeigenschaften.

Die Eintragspfade von Spurenstoffen in die Gewässer können sehr vielfältig sein. Sie sind Abhängig von Herstellung, Verwendung und, dies gilt insbesondere für Metaboliten und Transformationsprodukte, auch vom Ort ihres Entstehens. Beim Eintrag in die Gewässer kann zwischen Punktquellen und diffusen Quellen unterschieden werden.

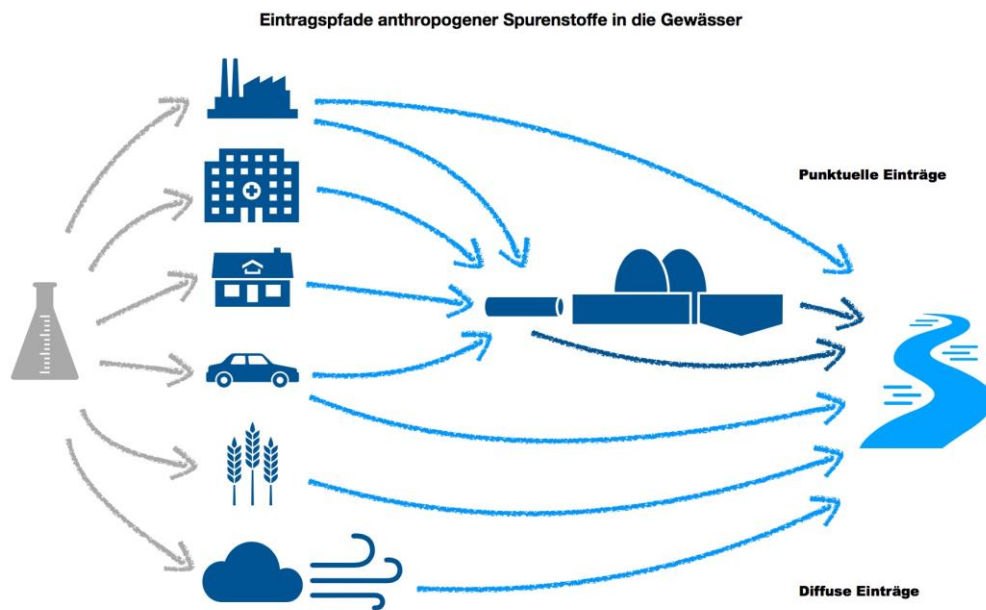


Abbildung 2: Eintragspfade anthropogener Spurenstoffen in die Gewässer

Das Potenzial für die schädliche Wirkung von Spurenstoffen ist ebenso wie der Verbleib und das Aufspüren in Gewässern Gegenstand weiterer Erforschung (Hollert, Floehr, und Maletz 2013; Petrie, Barden, und Kasprzyk-Hordern 2015; Aymerich et al. 2017). Nicht für alle Stoffe, vor allem nicht für deren Transformations-/Abbauprodukte, liegen belastbare toxikologische und ökotoxikologische Vergleichswerte vor, anhand derer eindeutig bestimmt werden kann, ob der Stoff gefährlich für Mensch und Gewässer ist. Auch bei Substanzen, für die eine Umweltisikobewertung durchgeführt wurde, bestehen teils weiterhin Unkenntnisse und Unsicherheiten über Kurz- und Langzeiteffekte sowie zu Interaktionen in Stoffgemischen (UBA 2018).

Bislang existiert kein einheitlicher Ordnungsrahmen zum Umgang mit Spurenstoffen, sowie zur Vermeidung und Verminderung von Einträgen in die Gewässer. Stattdessen wird eine Fülle von nationalen und überstaatlichen rechtlichen Regelungen auf den Umgang mit Mikroschadstoffen angewendet (UBA 2018).

2.2 Überblick technischer Maßnahmen in der Abwasserreinigung

Wie bereits oben beschrieben handelt es sich bei den im Abwasser und im Gewässer gefundenen Mikroschadstoffen nicht um eine bestimmte, chemisch verwandte Stoffgruppe. Sie stammen aus zahlreichen Anwendungen von Industriechemikalien über Arzneimittel bis zu Pflanzenschutzmitteln und haben dementsprechend sehr unterschiedliche Stoffeigenschaften, die eine gezielte Elimination der Mikroschadstoffe erschweren und zusätzliche Behandlungsstufen erforderlich machen.

Für die meisten Stoffe haben sich in den letzten Jahren verschiedene Verfahren als wirksam erwiesen, die sich z.T. bereits in der Trinkwasseraufbereitung bewährt haben. Sie lassen anhand der vorherrschenden Wirkungsmechanismen grob in folgende Gruppen aufteilen:

- Oxidative Verfahren zur chemischen Zerlegung der Mikroschadstoffe
- Adsorptive Verfahren zur Adsorption der Mikroschadstoffe an Aktivkohle oder andere Adsorbentien
- Filtrationsverfahren, die unter anderem Mikroschadstoffe zurückhalten
- Biologische Verfahren mit teilweise deutlich eingeschränkter Wirksamkeit

Einzelne Verfahren sind in der untenstehenden Abbildung aufgeführt. Daneben existieren auch Verfahren, die auf einer Kombination der oben dargestellten Grundprinzipien beruhen. Von den hier dargestellten Verfahren haben derzeit bei der großtechnischen Umsetzung nur die Ozonung und die Adsorption an Aktivkohle eine herausragende Bedeutung. Diese Verfahren werden in der Regel als nachgeschaltete Reinigungsstufen zu einer weitgehenden biologischen Reinigung des Abwassers oder in Kombination mit einer biologischen Reinigungsstufe eingesetzt.

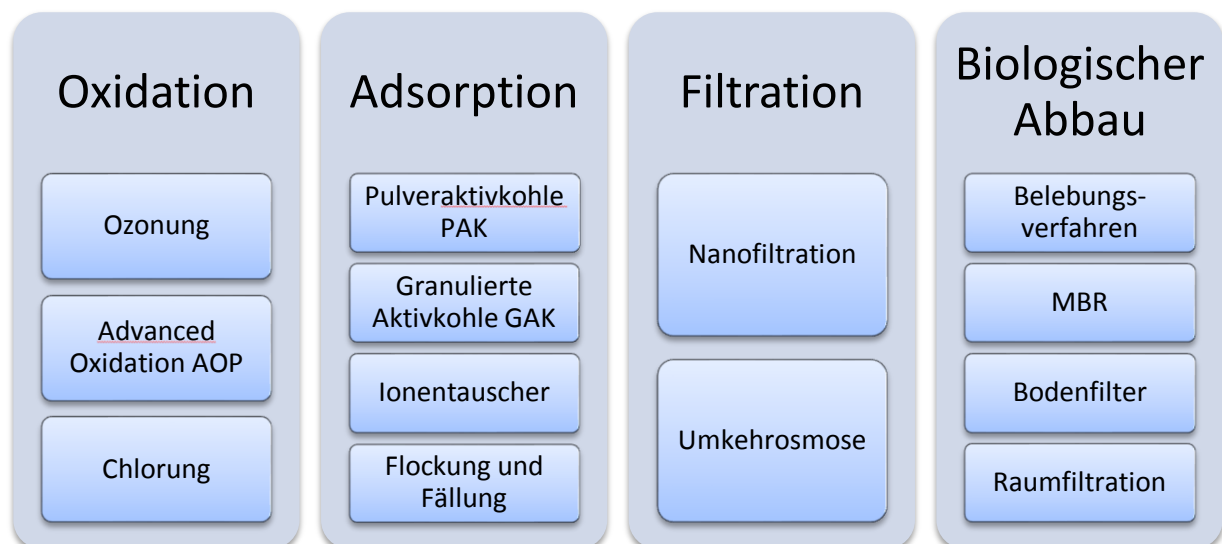


Abbildung 3: Verfahren der Spurenstoffentfernung aus Abwasser

2.3 Stand der Erkenntnisse, großtechnische Umsetzungen

Durch Kombination der einzelnen Verfahren mit biologischen Reinigungsverfahren und Stufen für die Abtrennung oder Nachbehandlung der Reaktionsprodukte aus der Spurenstoffeliminationen ergeben sich eine Reihe von technischen Varianten. Nicht alle Kombinationen erscheinen sinnvoll. Aufgrund der zahlreichen Initiativen in Nordrhein-Westfalen, Baden-Württemberg aber auch in der Schweiz liegen für eine ganze Reihe von Verfahren mittlerweile Referenzen für den großtechnischen Einsatz, zumindest aber aus Pilotversuchen und Studie vor. In der untenstehenden Tabelle sind beispielhaft einige Referenzen aufgeführt.

Tabelle 2: Technische Referenzen zu Verfahren der Mikroschadstoffentfernung

Verfahren	Variante	Status der Erprobung	Beispiele für ausgeführte großtechnische Anlagen
PAK Verfahren	PAK, Dosierung in Belebungsbecken und nachgeschaltete Raumfiltration	P / P	ARA Flos, Schweiz (Frank et al. 2015) / ARA Schöna (Rößler und Metzger 2015)
	PAK, Dosierung in Belebungsbecken und nachgeschaltete Tuchfiltration	S	Halbtechnische Anlage Uni Stuttgart (Pinnekamp und Bornemann 2012)
	PAK, Dosierung in Kontaktbecken, Sedimentationsbecken und nachgeschaltete Raumfiltration	G / G	Kläranlage Dülmen, NRW, DE / Kläranlage Albstadt-Lautlingen, BW, DE / viele weitere
	PAK, Dosierung in Kontaktbecken, Sedimentationsbecken und nachgeschalteter Tuchfiltration	G / G	Kläranlage Lahr, BW, DE / Kläranlage Laichlingen, BW, DE („Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg“, o. J.)
	PAK, Dosierung vor Flockenfilter	P	Kläranlage Kloten/Opfikon, Schweiz (Boehler et al. 2011)
	PAK, Dosierung in Membranbelebungsanlage	P / S-P	GKW Nordkanal, NRW, DE / Kläranlage Locle, Schweiz
GAK Verfahren	GAK Filtration im diskontinuierlich betriebenen Filter	G / P	Kläranlage Obere Lutter, NRW, DE / Kläranlage Gütersloh Putzhagen, NRW, DE
	GAK Filtration im kontinuierlich betriebener Filter	G	Kläranlage Rietberg, NRW, DE
Oxidative Verfahren	Ozonung mit Sandfiltration zur Nachbehandlung	G / G	Kläranlage Aachen-Soers, NRW, DE / KA Neugut (Neugut o. J.)
	Ozonung mit Wirbelbettreaktor zur Nachbehandlung	G / G	Kläranlage Warburg, NRW, DE / Duisburg Vierlinden, NRW, DE
Kombinierte Verfahren	Ozonung und nachgeschaltete GAK Filtration	P / G	Kläranlage Paderborn / Kläranlage Weißenburg (Schatz und Hanke 2016)
	MBR mit nachgeschalteter GAK Filtration	S / P	KA Langen, HE, DE (Abwasserverband LEE 2016) / Kläranlage Glessen (in Planung), NRW, DE
Biologische Verfahren	Bodenfilter mit GAK als Zuschlagsstoff	P / G	Retentionsbodenfilter Kläranlage Rheinbach (im Bau), NRW, DE

S: Studie, P: Pilotversuch, G: Großtechnische Anlage, Fett gedruckt: Projekte des EV, Quelle soweit nicht anders angegeben: (KOM-M NRW 2018)

Abgesehen von einer möglichen Dosierung von PAK in den Hauptstrom der Kläranlage (d.h. unmittelbar in die biologische Reinigungsstufe) können viele der Verfahren sowohl als Vollstrom-, wie auch als Teilstromlösung realisiert werden. Dadurch ergeben sich weitere Variationsmöglichkeiten, die letztlich eine Fülle von Möglichkeiten eröffnen für den Standort und den Anwendungsfall passenden Lösungen zu finden, die sowohl die Wirtschaftlichkeit wie auch die Wirksamkeit der Verfahren berücksichtigen.

3.1 Beschreibung des Einzugsgebiets

Der Zufluss zur Kläranlage erfolgt über den städtischen Hauptsammler (Kanalstauraum, DN 1.200) zum Zulaufpumpwerk.

Im Zuge der Umsetzung seines Masterplans Abwasser 2025 beabsichtigt der Ertftverband die nahe gelegene KA Wevelinghoven stillzulegen und das derzeit dort anfallende Abwasser auf der KA Grevenbroich mitzubehandeln. Im Zuge der vorliegenden Studie wird daher auch geprüft, welche zusätzlichen Maßnahmen für die Mikroschadstoffelimination erforderlich sind, wenn Wevelinghoven angeschlossen ist und welche Kosten hiermit verbunden sind.

Abbildung 4: Einzugsgebiet der KA Grevenbroich

3.2 Abwassermenge und Zuflußcharakteristik

In den Jahren 2012 bis 2016 wurden im Mittel folgende Wassermengen behandelt. Nebenstehend und fett gedruckt sind die grob abgeschätzten Größen für den Ausbauzustand nach Anschluss der KA Wevelinghoven.

Jahresabwassermenge:	3.491.000 m ³ /a	mit W.:(ca. 5,0 Mio m³/a)
Jahresschmutzwassermenge:	2.264.000 m ³ /a	mit W.:(ca. 3,4 Mio m³/a)

Bei Trockenwetter bewegt sich der Zufluss zur Kläranlage zur Zeit in einer Größenordnung von 6.000 m³/d bis 10.000 m³/d.

Der maximale Zufluss bei Regenwetter betrug 2015 rund 39.000 m³/d

Der Verlauf der Häufigkeitsverteilung deutet darauf hin, dass keine relevanten Fremdwassermengen im Zulauf vorhanden sind. Auch detaillierte Untersuchungen des Erftverbandes haben keinen nennenswerten Fremdwasseranfall ergeben.

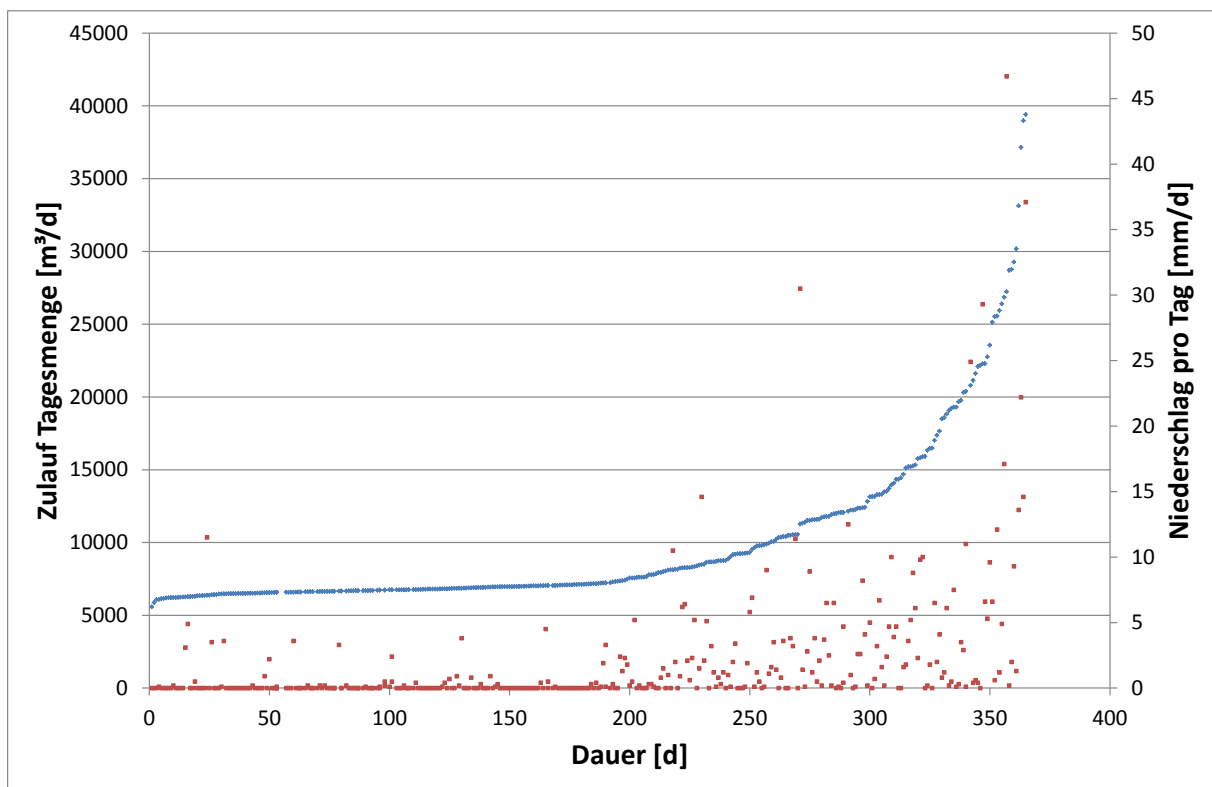


Abbildung 5: Häufigkeitsverteilung der Tageszuflüsse für das Jahr 2015, KA Grevenbroich

3.3 Abwasserzusammensetzung

Aufwand und Erfolg einer Mikroschadstoffelimination, hängen unter anderem, maßgeblich von der Vorreinigung des Abwassers ab. Hohe Hintergrundbelastungen stören sowohl die Adsorption an Aktivkohle als auch die Oxidation mit Ozon. Ist auf der Kläranlage eine Sandfiltration vorhanden, kann diese zur Nachbehandlung nach der Mikroschadstoffelimination genutzt werden. Die 4. Reinigungsstufe wird dann in aller Regel

zwischen der biologischen Reinigungsstufe und der Filtration angeordnet. Da auf der KA Köttingen bislang keine Abwasserfiltration betrieben wird, würde eine Mikroschadstoffelimination als nachgeschaltetes Verfahren nach der Nachklärung eingebunden werden. Der Ablauf der Nachklärbecken stellt damit die maßgebliche Zulaufqualität zur 4. Reinigungsstufe dar.

Die Auswertung der Standard-Abwasserparameter erfolgt anhand regelmäßiger Messungen des eigenen Labors des Erftverbandes. Diese haben einen größeren Parameterumfang als die standardmäßigen Messungen zur Betriebsüberwachung und erlauben insbesondere eine Bewertung der organischen Hintergrundbelastung. Es wurden insgesamt ca. 100 Proben von Trockenwettertagen aus dem Zeitraum 2012-2015 ausgewertet.

Die Ergebnisse der statistischen Auswertung sind in Tabelle 3 dargestellt

Tabelle 3: Auswertung der Ablaufkonzentrationen der KA Grevenbroich

KA 06 Grevenbroich

			15%-Wert	Median	85%-Wert
pH-Wert (Vor-Ort-Messung)	pH.vO		7,4	7,6	7,8
Leitfähigkeit (Vor-Ort-Messung)	LF.vO	µS/cm	680	1.036	1.224
CSB, homogenisiert	CSB.h	mg/l	23,0	28,0	41,8
TOC, homogenisiert	TOC.h	mg/l	7,1	10,5	15,2
CSB/TOC			2,3	2,7	3,3
Ammonium-Stickstoff	NH ₄ -N	mg/l	0,2	0,5	1,5
Stickstoff, gesamt (TNb)	TNb	mg/l	4,4	8,6	10,4
Phosphor, gesamt	P.g	mg/l	0,2	0,2	0,3
Orthophosphat-Phosphor (gelöst)	o-PO ₄ -P.f	mg/l	0,04	0,06	0,10
Säurekapazität (pH 4.3)	kS _{4_3}	mmol/l	2,8	4,2	5,5
Temperatur Biologie	TB	° C	11,1	16,6	20,0
Nitrit-Stickstoff	NO ₂ -N	mg/l	0,1	0,1	1,3
Nitrat-Stickstoff	NO ₃ -N	mg/l	3,2	5,5	9,5
Nges. i.S.d. AbwV, berechnet	N.AbwV	mg/l	3,9	8,0	10,4
Chlorid	Cl	mg/l	72,1	107,5	144,0
Sulfat	SO ₄	mg/l	66,9	97,0	112,0

Die KA Grevenbroich muss Überwachungswerte einhalten, die bis auf den Parameter Phosphor (gesamt) den Mindestanforderungen aus der Abwasserverordnung entsprechen (siehe auch Kapitel 4.1.2). Der Überwachungswert für Phosphor (gesamt) liegt bei 1 mg/l. Die Ablaufkonzentrationen für diesen Parameter liegen mit unter 0,5 mg/l auf sehr niedrigen Niveau für eine Anlage ohne nachgeschaltete Abwasserfiltration. Auch Ammoniumstickstoff ist mit einem Median von deutlich unter 1 mg/l im Ablauf der KA Grevenbroich sehr nur geringfügig enthalten.

Für die Umsetzung der Mikroschadstoffelimination mit einer Ozonung wären erhöhte Nitritablaufwerte problematisch, da Nitrit bevorzugt mit dem Ozon reagiert und so zu einem erhöhten Ozonverbrauch führt. Trotz der sehr niedrigen, medianen Nitritkonzentration im Ablauf der KA Grevenbroich zeigt sich anhand der Perzentilwerte, dass offenbar auch immer wieder höhere Nitritkonzentrationen vorkommen können. Vor der Umsetzung einer

Ozonbehandlung sollten die gefundenen Konzentrationen mit einem Sondermessprogramm überprüft werden um erhöhte Ozonverbräuche/Betriebskosten ausschließen zu können.

Zusätzlich wurden Daten der Betriebsüberwachung herangezogen, um den AFS-Gehalt des Ablaufes bewerten zu können. Im Mittel befinden sich 2,2 mgAFS/l im Ablauf der Kläranlage und es wurden im untersuchten Zeitraum nie mehr als 4,2 mgAFS/l gemessen. Die Zahlen deuten auf eine sehr gut funktionierende Nachklärung hin, sodass für alle in Frage kommenden Verfahren eine ausreichende Zulaufqualität erzeugt wird.

Auch Bromid im Abwasser kann die Anwendung oxidativer Verfahren zumindest erschweren oder bei höheren Konzentrationen zu einem Ausschlusskriterium werden.

Unter Einwirkung von Ozon wird ein großer Teil des vorhandenen Bromids zu Bromat umgewandelt. Dieses ist potentiell krebserregend und aerob nicht wieder abbaubar, die vorgeschlagene UQN liegt bei 50 µg/l. Werden im Abwasser daher Konzentrationen von > 100 µg/l Bromid vorgefunden, sind weitere Untersuchungen erforderlich, um das Bromatbildungspotential abzuschätzen („Ozon - VSA Micropoll“ o. J.).

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wurde der Bromidgehalt im Ablauf der KA Grevenbroich anhand einer 24h Mischprobe bestimmt. Dabei lag der Bromidgehalt kleiner der Bestimmungsgrenze von 50 µg/l.

Im Falle der Umsetzung einer Mikroschadstoffelimination mit Ozon ist dieser Befund mit weiteren Untersuchungen zu stützen. Zusätzlich sollte dann auch das Potential zur Bildung von Nitrosaminen untersucht werden.

Über die zu behandelnde Wassermenge hinaus ist die organische Hintergrundbelastung ein Maß, um die erforderlichen Dosiermengen von Ozon bzw. Aktivkohle abzuschätzen und die Lager, -Erzeugungs- und Dosiereinrichtungen zu dimensionieren. Bei der Ozonung können zudem bereits kleine Mengen Nitrit höheren Ozondosierungen erforderlich machen. Hierzu werden jeweils die Mittelwerte der Parameter Total Organic Carbon (TOC) und Nitrit-Stickstoff aus den Standardabwasseruntersuchung herangezogen:

TOC	= 10,5 mg/l
NO₂-N	= 0,1°mg/l

Aus den gefundenen Konzentrationen der Standardabwasserparameter ergeben sich damit zunächst keine Einschränkungen für die Planung einer 4. Reinigungsstufe.

3.4 Screening auf Mikroschadstoffe

In einem Zeitraum von einem Jahr wurden insgesamt 13 Stichproben bei verschiedenen Betriebsbedingungen genommen und auf ca. 150 Spurenstoffe untersucht. So können standortspezifische Spurenstoffe und Substanzgruppen ausgemacht und geeignete Maßnahmen zur Reduzierung der Emissionen ergriffen werden.

Neben dem Screening im Ablauf der betrachteten Kläranlage wurden im Zuge des übergeordneten Rahmenprojektes „Spurenstoffe Erft“ auch in 9 weiteren Kläranlagen, sowie unterhalb und oberhalb der Einleitstellen im Gewässer die Frachten bestimmt. Nachfolgend wird dargestellt, wie hoch die Spurenstoffemissionen für die 7 Leitparameter durch den Ablauf der KA Grevenbroich sind und ob es weitere Substanzen gibt, die regelmäßig in nennenswerten Konzentrationen gemessen werden.

Diese Ablaufkonzentrationen werden mit den durchschnittlichen Konzentrationen aller im Rahmenprojekt betrachteten Kläranlagen verglichen und auch mit den Gewässerkonzentrationen ins Verhältnis gesetzt. Dabei ist zu beachten, dass die Bewertungskriterien nur für die Konzentrationen im Gewässer gelten und zum Teil aus den Anforderungen für Rohwasser zur Trinkwassergewinnung stammen. Für den Ablauf der Kläranlage sind diese Kriterien daher nur bedingt anwendbar.

Tabelle 4: Mikroschadstoffkonzentrationen in der KA und im Gewässer

Spurenstoffe (7- Leitparameter)	Zulauf KA	Ablauf KA			Alle KA Abläufe	Oberhalb Einleitung	Unterhalb Einleitung	Bewertungskriterium
	mittel µg /L	min µg /L	mittel µg /L	max µg /L	mittel µg /L	mittel µg /L	mittel µg /L	
1H-Benzotriazol	19,42	5,30	10,32	19,00	5,95	0,57	0,65	10,00
Carbamazepin	1,12	0,41	1,04	1,50	0,67	0,04	0,07	0,50
Clarithromycin	1,54	0,00	0,76	3,60	0,29	0,00	0,00	0,10
Diclofenac	4,05	1,50	3,52	5,10	2,13	0,19	0,22	0,05
Metoprolol	2,25	0,76	1,81	3,30	1,46	0,14	0,15	7,30
Sotalol	0,51	0,17	0,45	0,73	0,31	0,00	0,01	0,10
Sulfamethoxazol	0,78	0,00	0,20	0,90	0,19	0,00	0,01	0,60

Mit Blick auf die sieben Leitparameter kann festgestellt werden, dass sich die Konzentrationen von Spurenstoffen im Ablauf der KA Grevenbroich auf dem üblichen Niveau für den Ablauf kommunaler Kläranlagen bewegen. Die mittleren Konzentrationen im Ablauf der KA Grevenbroich liegen allerdings für alle Leitparameter leicht über den mittleren Ablaufkonzentrationen der betrachteten Anlagen im Erfteinzugsgebiet. Die Anlage leitet in den, aus der Erft gespeisten, Wevelinghovener Entwässerungsraben ein. Dieser mündet nach wenigen Kilometern, nahe der KA Wevelinghoven, wieder in die Erft. Für die Untersuchung der Mikroschadstoffkonzentrationen im Einleitgewässer wurden Messstellen an der Erft gewählt, die die Einleitungen der benachbarten Kläranlagen Grevenbroich und Wevelinghoven gemeinsam erfassen. Die Auswirkungen beider Einleitungen auf die Erft halten sich aufgrund der hohen Wasserführung und der Vorbelastung der Erft in engen Grenzen. Es ergibt sich aus den Einleitungen zwar ein messbarer, aber nicht sehr ausgeprägter Anstieg der Gewässerkonzentrationen.

Im Einzugsgebiet der KA Grevenbroich lässt sich das Kreiskrankenhaus als potentiell wichtiger Emittent von Medikamenten (-rückständen) ins Abwasser identifizieren. Die ebenfalls zahlreichen Pflegeeinrichtungen befinden sich dagegen im ganzen Einzugsgebiet. Zudem deuten neuere Untersuchungen darauf hin, dass der Großteil der Medikamente über dezentrale Quellen wie Privathaushalte in das Abwasser gelangt. Trotz eines zentralen Einleiters bieten sich im Einzugsgebiet der KA Grevenbroich daher keine Maßnahmen bei indirekt einleitenden Betrieben oder Einrichtungen des Gesundheitswesens an.

Zur Senkung der Mikroschadstoffemissionen aus der KA Grevenbroich wäre daher die Implementierung einer 4. Reinigungsstufe zur Mikroschadstoffelimination als End-of-Pipe Lösung die wirkungsvollste Methode.

Allerdings weist das Einleitgewässer (der Wevelinghovener Entwässerungsgraben, gespeist aus der Erft) bereits oberhalb der Einleitstelle eine deutliche Vorbelastung mit Spurenstoffen auf, da oberhalb bereits mehrere Kläranlagen einleiten. Hierbei handelt es sich vor allem um Medikamentenrückstände und ihre Metaboliten sowie Industriechemikalien. Insbesondere der Leitparameter Diclofenac überschreitet bereits oberhalb der Einleitstelle das Bewertungskriterium. Alle anderen gemessenen Mikroschadstoffe (insgesamt ca. 150 Einzelstoffe) kommen auch unterhalb der KA Grevenbroich nicht, oder in geringen Konzentrationen unterhalb der Bewertungskriterien vor. Eine nennenswerte Erhöhung der Gewässerkonzentrationen durch die Kläranlageneinleitung kann nicht festgestellt werden.

4 Ausarbeitung von technischen Anlagenkonzepten

4.1 Vorhandene Kläranlage

Die Kläranlage Grevenbroich (-Noithausen) wurde zwischen 1977 und 1979 errichtet und zuletzt Ende der 1990er Jahre umfangreich ertüchtigt und erweitert. Die Anlage arbeitet nach dem einstufigen Belebungsverfahren mit Nitrifikation und vorgeschalteter Denitrifikation und verfügt sowohl über eine biologische als auch chemische Phosphorelimination (siehe auch Kapitel 4.1.1).

Belastungssituation und zukünftige Auslastung

Die Ausbaugröße der Anlage von 97.100 Einwohnerwerten (EW) ist mit ca. 47.800 angeschlossenen Einwohnern zuzüglich 10.000 EW aus dem ansässigen Gewerbe zu ca. 60% ausgeschöpft. Damit sind große Reserven für die zukünftige Entwicklung der angeschlossenen Ortschaften vorhanden.

Diese Reserven sollen im Rahmen des Masterplans 2025 durch den Anschluss der nahegelegenen KA Wevelinghoven besser genutzt werden. Mit dem Anschluss würden die dort angeschlossenen ca. 24.000 EW auf der KA Grevenbroich mitbehandelt. Die maximal zu behandelnde Mischwassermenge soll nicht angepasst werden.

Mögliche Flächen für eine Erweiterung

Als weitere Randbedingung für die Planung einer 4. Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination ist die verfügbare Erweiterungsfläche zu berücksichtigen.

Auf der KA Grevenbroich stehen zum Zeitpunkt der Betrachtung diverse Flächen zur Verfügung, die für eine Erweiterung der Anlage vorgesehen sind (siehe Abbildung 6). Für die Einbindung einer 4. Reinigungsstufe bietet sich vor allem die zwischen den bestehenden Nachklärbecken und der Schlammbehandlung gelegene rechteckige Fläche an, für die Nachrüstung einer Filtration vorgesehen ist. Diese Fläche ermöglicht eine hydraulisch günstige Einbindung zwischen Nachklärung und Ablauf der Anlage.

Für Verfahren mit höherem Platzbedarf kann zusätzlich die größere Fläche östlich der Nachklärung genutzt werden. Diese Fläche wurde im Rahmen des Ausbaus der Anlage als Ausgleichsfläche genutzt und sollte möglich wenig in Anspruch genommen werden.

Für kleinere Bauwerke oder Betriebseinrichtungen könnten auch Freiflächen zwischen Belebung und Nachklärung bebaut werden, hierfür müssten jedoch z.T. auch Leitungen umgelegt werden.

Insgesamt stehen damit ausreichende Flächen für alle in Frage kommenden Verfahren zur Verfügung.

Klärschlamm Entsorgung

Der Klärschlamm der KA Grevenbroich wird vollständig thermisch verwertet. Die Verbrennung erfolgt, wie insgesamt für die beim Erftverband anfallenden Klärschlämme, in Form einer Mitverbrennung in Braunkohlekraftwerken. Die Mikroschadstoffelimination unterliegt daher keinen Einschränkungen aus der Klärschlamm Entsorgung.



Abbildung 6: Erweiterungsflächen für die 4. Reinigungsstufe

4.1.1 Verfahrenstechnik

Die Anlage umfasst heute folgende Anlagenteile:

- Zulaufpumpwerk 1 (zur Kläranlage)
 - 4 Tauchmotorpumpen je 22 kW
 - Förderleistung je 150 l/s, Förderleistung insgesamt 600 l/s
- Zulaufpumpwerk 2 (zum RÜB/RBF)
 - 3 Schneckenpumpen
 - Förderleistung 1x 305 l/s, 2x 660 l/s, Förderleistung insgesamt 1625 l/s
- Rechen
 - Feinrechen, 8 mm Stabweite
- Belüfteter Sand-/ Fettfang
- Vorklärung
 - 1 Rechteckbecken, $V = 1.208 \text{ m}^3$
- Biologische Reinigung
 - AN-Becken für biologische P-Elimination, $V = 1.083 \text{ m}^3$
 - AN-DN-Becken, $V_{\text{ges}} = 17.200 \text{ m}^3$
 - Vorgeschaltete Denitrifikation
- Nachklärbecken
 - 2 Rundbecken, $D = 35 \text{ m}$, $T = 3 \text{ m}$
 - 1 Rundbecken, $D = 34,0 \text{ m}$, $T = 4,73 \text{ m}$
- Simultanfällung
- getrennt anaerobe Schlammbehandlung

4.1.2 Aktuelle Reinigungsanforderungen

Die Erlaubnis zur Einleitung von gereinigtem Abwasser (max. 456,4 l/s) wurde am 05.03.2004 unter dem AZ.: 54.16.31-172/02 durch die Bezirksregierung Düsseldorf erteilt. Mit der Erlaubnis wurden folgende Überwachungswerte festgelegt:

- CSB: 90 mg/l
- BSB₅: 20 mg/l
- NH₄-N: 10 mg/l
- N_{ges}: 18 mg/l
- P_{ges}: 1 mg/l

Die Überwachungswerte werden mit der vorhandenen Verfahrenstechnik sicher eingehalten und im Mittelwert deutlich übertroffen (siehe auch Kapitel 3.3).

4.2 Verfahrensauswahl für die Kläranlage Grevenbroich

Zunächst wurde auf Grundlage der verfügbaren Verfahren zur Mikroschadstoffelimination und den örtlichen Gegebenheiten auf der KA Grevenbroich eine Vorauswahl an Verfahren zusammengestellt.

Aus dieser Vorauswahl wurden anschließend drei Hauptvarianten ausgewählt, die in den folgenden Kapiteln detailliert betrachtet werden.

Tabelle 5: Verfahrensauswahl für die Kläranlage Grevenbroich

Verfahren	Erforderliche Anlagentechnik
PAK-Dosierung in die Belegung mit gemeinsamen Schlammkreislauf (immer Vollstrombehandlung!)	PAK Lager und Dosierstation im Bereich Zulauf Biologie Neu zu errichtende Filtration als Nachbehandlung
PAK-Dosierung mit separatem Schlammkreislauf	Neuerrichtung PAK Lager und Dosierstation; Kontaktbecken und Sedimentationsbecken auf Freiflächen Neu zu errichtende Filtration als Nachbehandlung
GAK Filtration in zusätzlicher Filterstufe	Neuerrichtung GAK-Filteranlage auf Freiflächen
Ozon Behandlung	Neuerrichtung Sauerstofftank, Ozonerzeuger, Ozonreaktor und Steuerungstechnik Neu zu errichtende Filtration als Nachbehandlung

Die erste Verfahrensvariante eliminiert Mikroschadstoffe mittels Pulveraktivkohle, die in die Belegung (vergleichbar mit einer Simultanfällung) dosiert wird. Vorteile des Verfahrens sind die sehr geringen Investitionskosten und der Platzbedarf. Für dieses Verfahren muss lediglich ein Lagersilo sowie die erforderliche Dosiertechnik für die PAK und eine relativ

kompakte Sandfiltration zur Nachbehandlung neu errichtet werden. Nachteilig ist bei der Dosierung von PAK in die Belebung die aufgrund der erhöhten Hintergrundbelastung höhere erforderliche Dosiermenge. Die erforderliche Dosiermenge ist außerdem mit einer höheren Unsicherheit behaftet, da es weniger großtechnische Umsetzungen dieser Verfahrensvariante gibt. Zuletzt würde die hohe PAK-Dosierung zu einem ca. 20% höheren TS-Gehalt in der Belebung führen, da die PAK-Fracht nicht direkt zur biologischen Reinigungsleistung beiträgt. Vor dem Hintergrund, dass der PAK-Verbrauch einen großen Teil der Betriebskosten ausmacht und so eine große Rolle für die langfristige Wirtschaftlichkeit des Verfahrens spielt, wird diese Variante daher nicht weiter verfolgt.

Die PAK-Dosierung mit eigenem Schlammkreislauf erfordert neben der Errichtung von PAK-Silo und Dosierstation ein Kontaktbecken und ein Sedimentationsbecken, die nach der Nachklärung in den Prozess eingebunden werden. Die beladene und sedimentierte Kohle wird in die Biologie zurückgeführt und der normalen Schlammbehandlung zugeführt. Aufgrund der günstigen Anordnung im Kläranlagenprozess und der Möglichkeit einer internen Kreislaufführung der PAK kann diese sehr hoch beladen und sparsam dosiert werden. Zur Abtrennung fein suspendierter PAK, die nicht im Sedimentationsbecken absetzbar ist, muss der Ablauf der PAK-Stufe außerdem filtriert werden. Da auf der KA Grevenbroich keine Sandfiltration vorhanden ist, muss eine entsprechende Filteranlage errichtet werden. Die vorhandenen Freiflächen auf dem Kläranlagengelände reichen für die erforderlichen Becken und Einrichtungen aus und ermöglichen eine hydraulisch günstige Einbindung der PAK-Stufe. Diese Variante wird daher in Kapitel 4.4 näher untersucht.

Die GAK-Filtration in einer zusätzlichen Filterstufe kann aufgrund der sehr guten Ablaufwerte für AFS nach der Nachklärung in den Kläranlagenprozess eingebunden werden. Sie hat den Vorteil einer guten Vorreinigung und die verwendete GAK kann nach der Beladung zu einem großen Teil reaktiviert und wiederverwendet werden. Zudem erfolgt so auch ein Rückhalt des geringfügig vorhandenen AFS und gelöster organischer Verbindungen aus dem Ablauf der Nachklärung und somit eine weitere Verbesserung auch der konventionellen Abwasserparameter. Nachteilig sind die großen erforderlichen Filtervolumina und der damit verbundene hohe bauliche und maschinentechnische Aufwand. Die vorhandenen Erweiterungsflächen erlauben eine hydraulisch günstige Einbindung der GAK-Filtration auf dem Kläranlagengelände. Um die Wirtschaftlichkeit dieser Variante zu klären, wird sie in Kapitel 4.5 detailliert betrachtet.

Eine Ozonbehandlung lässt sich aufgrund der kleinen erforderlichen Beckenvolumina ebenfalls problemlos und hydraulisch günstig in die vorhandene Anlagentechnik einbinden. Allerdings erfordert eine Ozonierung nach bisherigem Kenntnisstand zwingend eine biologische Nachbehandlung zum Abbau unerwünschter Reaktionsprodukte. Diese kann z.B. durch eine Sandfiltration bereitgestellt und auf dem vorhandenen Gelände umgesetzt werden. Nachteilig sind der hohe Energieaufwand für die Ozonerzeugung und die noch unzureichend untersuchte Wirkung der Reaktions(neben)produkte. In Kapitel 4.6 werden die technischen und wirtschaftlichen Aspekte des Verfahrens näher untersucht.

Variante 1a: PAK-Dosierung mit separatem Schlammkreislauf, Neubau Kontakt- und Sedimentationsbecken, Neubau Sandfiltration (Vollstrom)

Variante 1b: PAK-Dosierung mit separatem Schlammkreislauf, Neubau Kontakt- und Sedimentationsbecken, Neubau Sandfiltration (Teilstrom)

Variante 2a: Neubau GAK-Filtration (Vollstrom)

Variante 2b: Neubau GAK-Filtration (Teilstrom)

Variante 3a: Neubau Ozonbehandlung, Neubau Sandfiltration (Vollstrom)

Variante 3b: Neubau Ozonbehandlung, Neubau Sandfiltration (Teilstrom)

Wie bereits in den Kapiteln 3.1 und 3.2 beschrieben soll im Zuge der Umsetzung des Masterplans 2025 des Erftverbandes die KA Wevelinghoven aufgegeben und an die KA Grevenbroich mit angeschlossen werden. Die KA Grevenbroich hat im Bereich der mechanischen und biologischen Abwasserreinigung große Kapazitätsreserven, da nach dem Ausbau ein großer, industrieller Einleiter weggefallen ist. In der vorliegenden Studie soll daher auch geprüft werden, wie groß die Behandlungsstufen zur Mikroschadstoffelimination zu dimensionieren sind und wie hoch die Kosten ausfallen, wenn zukünftig die zusätzlichen Frachten und Wassermengen aus Wevelinghoven mit behandelt werden sollen.

Da die maximal zu behandelnde Mischwassermenge nicht erhöht werden soll, ändert sich für die Dimensionierung der Verfahren für die Vollstromvarianten nichts. Für diese Varianten wirkten sich lediglich die deutlich höheren Jahreswassermengen (JAM bzw. JSM) auf die Betriebskosten aus.

Für die Teilstromvarianten ist damit zu rechnen, dass sich durch den Anschluss der KA Wevelinghoven das Tagesmaximum der Trockenwettermenge ($Q_{t,2h,max}$) deutlich erhöhen wird. Zur Abschätzung dieser für die Auslegung der Behandlungsstufen entscheidenden Größe wurden die entsprechende Wassermengen für die KA Grevenbroich und Wevelinghoven getrennt ermittelt und addiert.

Die Dimensionierung und Kostenberechnung der Voll- bzw. Teilstrombehandlung nach Anschluss der KA Wevelinghoven wird nachfolgend parallel zu den normalen Varianten durchgeführt:

Varianten 1-3c: Teilstromvariante KA Grevenbroich + Wevelinghoven

Varianten 1-3d: Vollstromvariante KA Grevenbroich + Wevelinghoven

4.3 Auslegungswerte der 4. Reinigungsstufe

Die Auslegungsziele einer 4. Reinigungsstufe sind bislang nicht abschließend geregelt, es gibt keine gesetzlichen Vorschriften zur Notwendigkeit einer Mikroschadstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen und zu den Anforderungen. In Nordrhein-Westfalen wurde durch das Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe eine „Anleitung Zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination“ herausgegeben, die als eine Art vorläufige technische Regel zur Auslegung im Rahmen von Machbarkeitsstudien angesehen werden kann (KOM-M 2016). Eine Kläranlage mit einer 4. Reinigungsstufe muss ausgehend vom Zulauf zur biologischen Reinigungsstufe im Jahresmittel eine 80%ige Elimination von sechs Indikatorsubstanzen erreichen. Dieses Eliminationsziel geht zwar nicht direkt in die

Bemessung mit ein, allerdings basieren die meisten Auslegungsempfehlungen auf dieser Zielmarke.

Alle hier diskutierten und für die Spurenstoffelimination in Frage kommenden Verfahren sind auf bestimmte Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten angewiesen, um die erforderlichen Prozesse durchzuführen. Maßgeblich für die Auslegung der 4. Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination ist daher die Wassermenge, die der Behandlung unterzogen werden soll (siehe auch Kapitel 3.2).

Grundsätzlich kann eine Mikroschadstoffelimination für den gesamten, behandelten Abwasserstrom umgesetzt werden (Vollstrombehandlung), oder nur für einen Teilstrom. Die Auslegungswassermenge für die Vollstrombehandlung entspricht der maximalen Mischwassermenge, die lt. Genehmigung auf der Kläranlage behandelt wird. Auch nach Anschluss der KA Wevelinghoven soll die maximale Wassermenge nicht erhöht werden:

Maximale Mischwassermenge: $Q_m = 1642 \text{ m}^3/\text{h}$ mit W.: $Q_m = 1642 \text{ m}^3/\text{h}$

Eine Teilstrombehandlung sollte lt. (KOM-M 2016) mindestens die maximale stündliche Abwassermenge bei Trockenwetter behandeln ($Q_{t,h,max}$, oder $Q_{t,2h,max}$). Mit dieser Vorgabe werden je nach Klärwerksstandort und abhängig von dem Fremdwasseranfall im Einzugsgebiet, unterschiedlich große Anteile der Jahresabwassermenge behandelt. Daher sollen zur Verbesserung der Vergleichbarkeit der Betriebskosten der Standorte untereinander außerdem mindestens 80% der Jahresabwassermenge behandelt werden (Vorgabe EV). Mit Ablaufmengendaten der Jahre 2013 bis 2015 wurde $Q_{t,2h,max}$ ermittelt:

Abwassermenge bei Trockenwetter: $Q_{t,2h,max} = 403 \text{ m}^3/\text{h}$

Mit dieser Abwassermenge würde mit ca. 72% der Jahresschmutzwassermenge bereits ein großer Teil des anfallenden Abwassers behandelt. Für die Behandlung von 80% der JAM ist folgende Behandlungskapazität erforderlich:

Abwassermenge für 80% JAM: $Q_{t,80\%} = 584 \text{ m}^3/\text{h} = Q_{bem,gewählt}$

Die größere Behandlungsmenge (hier: $Q_{t,80\%}$) wird als Auslegungsgröße für die Mikroschadstoffelimination im Teilstrom gewählt.

Die Anlage zur Teilstrombehandlung kann damit weniger als halb so groß ausfallen, wie eine entsprechende Vollstrombehandlung. Abbildung 7 zeigt anhand von 2h Messdaten des Kläranlagenablaufes den behandelten (blau) und nicht behandelten (rot) Anteil des Kläranlagenablaufes der KA Grevenbroich beispielhaft für einem Zeitraum von drei Jahren. Es ist deutlich zu erkennen, dass die normalen Tagesschwankungen des Trockenwetterzulaufes bei einer Behandlungsmenge von $584 \text{ m}^3/\text{h}$ und darüber hinaus ein Teil des Mischwassergeschehens abgedeckt werden.

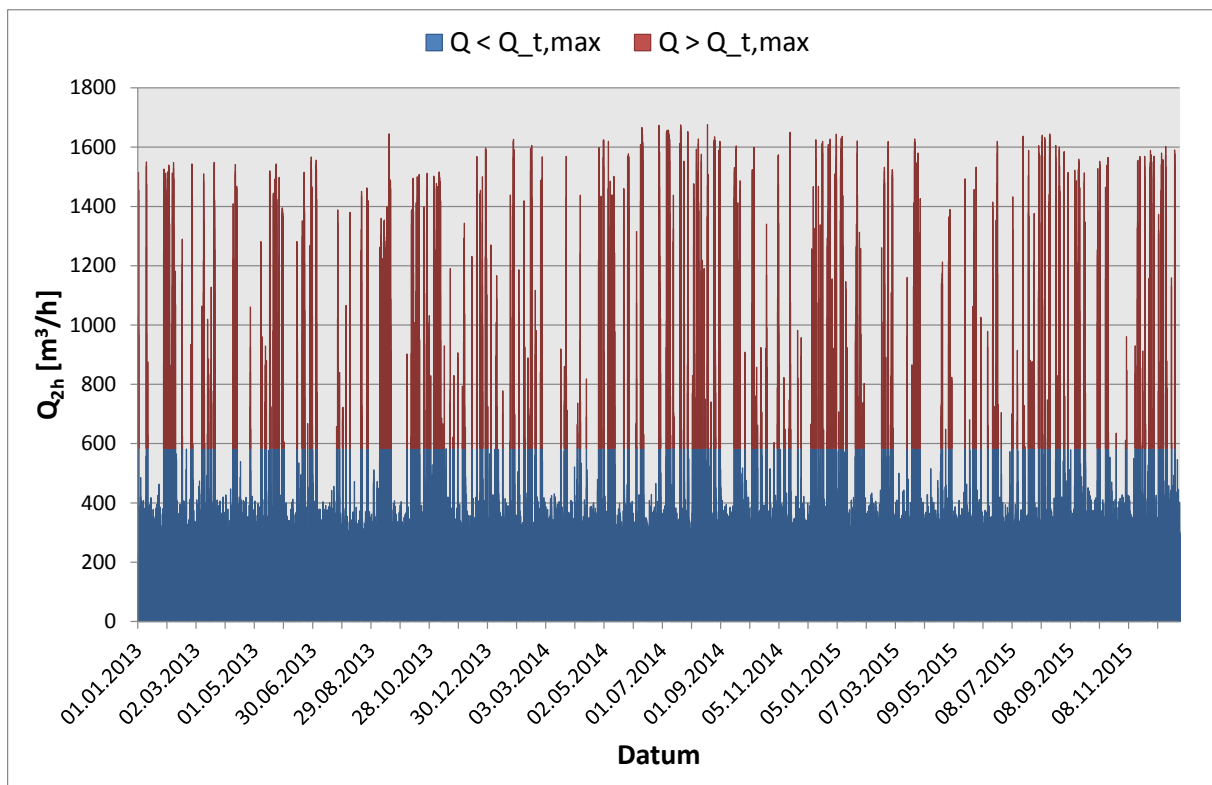


Abbildung 7: Gemessene Zulaufmengen der KA Grevenbroich mit bei Teilstrombehandlung behandeltem (blau) und nicht behandeltem Anteil (rot)

Für den Ausbauzustand inkl. Wevelinghoven wurden die maßgeblichen Wassermengen auf der KA Wevelinghoven ebenfalls ermittelt und mit den oben genannten Mengen der KA Grevenbroich addiert. Damit ergeben sich die zu erwartenden Wassermengen nach Anschluss der KA Wevelinghoven:

Abwassermenge bei Trockenwetter: $Q_{t,2h,max} = 609 \text{ m}^3/\text{h}$

Mit dieser Abwassermenge würde mit ca. 72% der Jahresschmutzwassermenge bereits ein großer Teil des anfallenden Abwassers behandelt. Für die Behandlung von 80% der JAM ist folgende Behandlungskapazität erforderlich:

Abwassermenge für 80% JAM: $Q_{t,80\%} = 924 \text{ m}^3/\text{h} = Q_{\text{bem,gewählt}}$

Auch für dieses Szenario wird die größere Behandlungsmenge ($Q_{t,80\%}$) wird als Auslegungsgröße für die Mikroschadstoffelimination im Teilstrom gewählt.

Für die Abschätzung der Verbrauchsmengen und Berechnung der Betriebskosten wird außerdem die Jahresabwassermenge, bzw. für die Teilstrombehandlung der behandelte Anteil der Jahresabwassermenge benötigt:

$$\begin{aligned} \text{JAM} &= 3,49 \text{ Mio m}^3/\text{a} \\ Q_{\text{behandelt}} &= 0,8 * 3,49 \text{ Mio m}^3/\text{a} = 2,79 \text{ Mio m}^3/\text{a} \end{aligned}$$

Für die Varianten mit Anschluss der KA Wevelinghoven werden folgende Behandlungsmengen abgeschätzt:

$$\begin{array}{ll} \text{JAM} & = 5,0 \text{ Mio m}^3/\text{a} \\ Q_{\text{behandelt}} = 0,8 * 5,0 \text{ Mio m}^3/\text{a} & = 4,0 \text{ Mio m}^3/\text{a} \end{array}$$

Um die Abwasserlast im Gewässer zu bestimmen und damit eine Festlegung zum Ausbau der Mikroschadstoffentfernung als Vollstrom- oder Teilstrombehandlung zu treffen schlagen die Autoren von (KOM-M 2016) vor, dass Abflussverhältnis MNQ (Gewässer) zur Jahresabwassermenge (Kläranlage) zu bestimmen.

Der Wevelinghovener Entwässerungsgraben wird aus der Erft gespeist und hat oberhalb der KA Grevenbroich eine niedrige, aber konstante Wasserführung. Der Kläranlagenablauf stellt daher einen hohen Anteil des Abflusses im Wevelinghovener Entwässerungsgraben unterhalb der Kläranlageneinleitung dar.

Für die Berechnung des Abwasseranteils im Gewässer wurde ein mittlerer Niedrigwasserabfluss (MNQ) von 150 l/s angesetzt, der der ständigen Wasserführung im Wevelinghovener Entwässerungsgraben entspricht. Die KA Grevenbroich behandelt eine Jahresabwassermenge (JAM) von ca. 3,49 Mio m³/a. Daraus ergibt sich ein Ablauf von 111 l/s im Jahresmittel (Q_{JAM}).

Das Verhältnis des Q_{JAM} zum MNQ beträgt somit ca. 74%.

Demnach wäre für den Ausbau der KA Grevenbroich gemäß der Empfehlung aus (KOM-M 2016) eine Vollstrombehandlung vorzusehen.

Ob sich durch den Ausbau der Mikroschadstoffentfernung im Vollstrom ein signifikanter Effizienzgewinn und entsprechende Potenziale zur Verbesserung der Gewässergüte erzielen lassen wird in der weiter unten folgenden Variantenuntersuchung nochmals eingehender betrachtet.

4.4 V1a-d: Neuerrichtung PAK-Dosierung mit eigenem Schlammkreislauf und Sandfiltration als Nachbehandlung

Die PAK-Dosierung mit eigenem Schlammkreislauf wird nach der Nachklärung in den Klärprozess eingebunden. Die PAK-Stufe besteht aus Lager- und Dosierstation, einem Kontaktbecken für den eigentlichen Adsorptionsprozess und einem Sedimentationsbecken zur Abscheidung der beladenen PAK. Aus diesem Sedimentationsbecken wird der Kohleschlamm zur Ermöglichung einer möglichst vollständigen Beladung der PAK in das Kontaktbecken über ein Pumpwerk zurückgeführt und bildet so einen vom Belebtschlammverfahren unabhängigen Schlammkreislauf. Um gut absetzbare PAK-Flocken zu erhalten, muss in der Regel zusätzlich Flockungsmittel und Flockungshilfsmittel dosiert werden. Da ein Abtrieb von fein suspendierter PAK ausgeschlossen werden muss, ist zusätzlich eine Filtration als Nachbehandlung erforderlich.



Abbildung 8: Lageskizze PAK-Stufe (Vollstrom)

Die auf dem Kläranlagengelände vorhandenen Erweiterungsflächen reichen für die Errichtung der erforderlichen Bauwerke aus, allerdings erfordern die hydraulischen Verhältnisse die Errichtung eines Zwischenpumpwerks. Das mechanisch-biologisch gereinigte Abwasser wird an dem Vereinigungsschacht südlich der Nachklärbecken abgezweigt und in Richtung der Freifläche südöstlich der Nachklärbecken geführt. Dieser Bereich wird bisher als ökologische Ausgleichsfläche genutzt und muss für die Maßnahme zunächst gerodet und freigemacht werden. Alternativ könnten Teile der Anlage auch nordwestlich der Nachklärung, zwischen Schlammbehandlung und Vorklärbecken umgesetzt werden. Hierfür wären allerdings einige Leitungen zu verlegen. Insgesamt wird jedoch nur ein Teil der verfügbaren Erweiterungsflächen in Anspruch genommen.

Das PAK-Lagersilo inkl. PAK-Dosiertechnik wird neben dem Kontaktbecken errichtet. Die FM- und FHM-Dosierung sowie die elektrotechnische Ausrüstung können im Maschinenhaus der Sandfiltration untergebracht werden.

Die Abwasserzusammensetzung der KA Grevenbroich ist vorwiegend durch häusliches Abwasser geprägt. Auch die Ablaufmessungen (insbesondere TOC) weisen nicht auf eine besonders ausgeprägte, organische Hintergrundbelastung hin. Daher kann die erforderliche spezifische Dosiermenge von PAK anhand von Literaturdaten auf zwischen 10 und 15 mg/l geschätzt werden. Gewählt wurde für die weiteren Berechnungen ein Wert von 13 mg/l. Die Dimensionierung der Dosiereinrichtung ergibt sich aus der Spannbreite der zu behandelnden Wassermenge. Der Jahresverbrauch wird anhand der durchschnittlichen Zulaufmenge berechnet. Die durchschnittliche Zulaufmenge errechnet sich für die Vollstrombehandlung

aus der JAM, für die Teilstrombehandlung wird hierfür der behandelte Anteil (80%) der JAM herangezogen.

Aus der durchschnittlich zu dosierenden PAK-Menge ergibt sich die erforderliche Lagerkapazität für PAK und die Standzeit. Hierbei ist zu beachten, dass eine Mindestgröße für das Lagersilo nicht unterschritten werden sollte, damit die Ladung eines Silo-LKW aufgenommen werden kann.

Neben der PAK müssen in der Regel auch Flockungsmittel (FM, z.B. Eisensalze) und Flockungshilfsmittel (FHM, Polymere) dosiert werden, um die fein dispergierten Aktivkohlepartikel in größere, absetzbare Flocken zu überführen. Hierbei wird auch gelöstes Phosphat gefällt, sodass im Bereich der auf der KA Grevenbroich normalerweise durchgeführten Simultanfällung FM eingespart werden kann. Die spezifischen Dosiermengen wurden anhand von Literaturwerten gewählt, müssen aber in jedem Abwasser und abhängig vom eingesetzten Produkt im Betrieb eingestellt und aufeinander abgestimmt werden.

Für die Vollstrombehandlung findet im Kopfbereich des Kontaktbeckens lediglich eine Verteilung des Zulaufs auf die Beckenbreite statt.

Im Falle der Teilstrombehandlung wird hier ein Trennbauwerk angeordnet, dass im Falle von Mischwasserzufluss den Zulauf zur 4. Reinigungsstufe begrenzt.

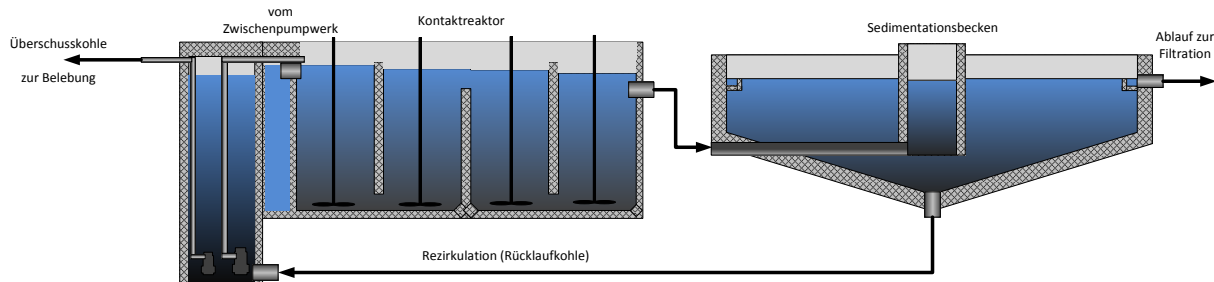


Abbildung 9: Systemskizze PAK-Stufe (hier: Teilstrombehandlung)

Das Kontaktbecken schließt direkt an das Verteil- bzw. Trennbauwerk an und setzt sich aus drei Teilen zusammen, die nacheinander durchflossen werden. Die Strömung wird dabei auf und ab geführt, sodass eine enge Verweilzeitverteilung erreicht wird und der Aufwand zur Durchmischung reduziert wird. Die Dimensionierung des Kontaktbeckens erfolgt in Anlehnung an Metzger 2010 auf eine Mindestaufenthaltszeit von 30 Minuten.

Anschließend wird das Abwasser mit der beladenen Aktivkohle dem Sedimentationsbecken zugeführt. Dieses wird als Rundbecken mit umlaufendem Schildrömer konzipiert und ist lt. Metzger 2010 mit maximal 2 m/h Oberflächenbeschickung und einer Mindestaufenthaltszeit von 2 Stunden zu dimensionieren. Die weitere Dimensionierung erfolgt in Anlehnung an das DWA-A131 2016.

Der sedimentierte Kohleschlamm sollte zur weitgehenden Ausnutzung der Adsorptionskapazität wieder in das Kontaktbecken zurückgeführt werden. Das hierfür erforderliche Rücklaufschlammumpwerk wird analog zum Verteiler- bzw. Trennbauwerk im Kopfbereich des Kontaktbeckens angeordnet.

Ein Teil des Kohleschlammes muss aus dem PAK-Schlammkreislauf entnommen werden, um die Kohlekonzentration im Kontaktbecken konstant zu halten. Hierzu wird im Rücklauf-PAK-Pumpwerk zusätzlich eine Überschussschlammpumpe vorgesehen.

Da eine getrennte Entwässerung und Entsorgung des Kohleschlammes sehr aufwändig wäre, wird der überschüssige Kohleschlamm in die Belebung zurückgeführt und dort in den Belebtschlamm inkorporiert.

Die Überschussschlammleitung wird entlang der Nachklärbecken zum Rücklaufschlammwerk der Belebung geführt. Somit wird der Kohleschlamm zusammen mit dem normalen Überschussschlamm aus der Belebung zunächst der anaeroben Schlammbehandlung und Entwässerung zugeführt.

Mit der Zugabe des PAK-Schlammes in die Belebung erhöht sich der TS-Gehalt in der Belebung. Für die KA Grevenbroich ergibt sich bei Dosierung von 13mgPAK/l und einem durchschnittlichen TS-Gehalt im Istzustand von 2,2 mg/l ein TS inkl. PAK von ca. 2,5 mg/l. Der aufgrund der niedrigen Auslastung der Anlage sehr niedrige TS-Gehalt im Ist-Zustand führt so zu relativ hohen prozentualen Zuwächsen von 12-16% durch Zugabe der PAK. Da die Nachklärbecken für den Betrieb mit deutlich höheren TS-Gehalten ausgelegt sind, kann die Belebungsstufe der KA Grevenbroich diese zusätzlichen Schlammengen problemlos aufnehmen.

Für die Varianten inkl. der Wassermengen aus Wevelinghoven musste der TS-Gehalt für den Ausgangszustand geschätzt werden, da für die Behandlung der höheren Zulauffrachten in der Biologie auch ein größerer TS-Gehalt erforderlich wird. Aus Labor- und Pilotversuchen werden überwiegend positive Auswirkungen der PAK auf die Absetzeigenschaften des Belebtschlammes berichtet, sodass auch für diese Varianten die zusätzlichen Schlammengen aus der PAK-Stufe aufgenommen werden können.

Die Behandlung der zusätzlichen Schlammmenge in der Schlammbehandlung ist ebenfalls unproblematisch, da ausreichende Kapazitäten in den Eindick- und Entwässerungsaggregaten vorhanden sind. Auch für die Schlammbehandlung gilt, dass die Einbindung von PAK in den Schlamm tendenziell positive Effekte auf die Schlammeigenschaften wie z.B. die Entwässerbarkeit hat.

Darüber hinaus ist zu beachten und in die wirtschaftliche Betrachtung mit einzubeziehen, dass sich durch die gemeinsame Behandlung und Entsorgung von PAK-Schlamm und Belebtschlamm die zu entsorgende Schlammmenge erhöht.

Da die Klärschlämme beim Erftverband ausschließlich durch Mitverbrennung entsorgt werden, gibt es durch den Einsatz von PAK keine Einschränkungen für die Klärschlamm Entsorgung.

Der Klarwasserüberlauf des Sedimentationsbeckens wird der neu zu errichtenden Sandfiltration zugeführt, um fein suspendierte Kohlepartikel zurückzuhalten. Die Filtration wird südlich der vorhandenen Nachklärbecken auf der hierfür freigehaltenen Erweiterungsfläche angeordnet.

Aufgrund der knappen hydraulischen Verhältnisse auf der KA Grevenbroich und aufgrund des Filterwiderstandes der Sandfilter kann die 4. Reinigungsstufe nicht im freien Gefälle in

die bestehende Anlage eingebunden werden. Daher wird der Ablauf der Sedimentationsstufe durch ein Zwischenpumpwerk in den Zulauf der Filtration gefördert.

Das Zwischenpumpwerk wird mit trocken aufgestellten Pumpen im Keller der Sandfiltration angeordnet.

Die Sandfiltration zur Nachbehandlung des mit PAK behandelten Kläranlagenablaufes wird entsprechend der Vorgaben des Arbeitsblattes DWA-A203 ausgelegt.

Aufgrund der für diese Verfahrensvariante relativ großen erforderlichen Becken und Filterflächen, die in erster Linie nach der maximal zu behandelnden Wassermenge bemessen werden, ergeben sich für die Teilstromvarianten deutlich kleinere Beckenvolumina. Dies wird auch aus der Lageskizze ersichtlich.



Abbildung 10: Lageskizze PAK-Stufe (Teilstrombehandlung nur Grevenbroich)



Abbildung 11: Lageskizze PAK-Stufe (Teilstrombehandlung, Grevenbroich mit Wevelinghoven)

Die Teilstromvariante unter Einbeziehung der Wassermengen der KA Wevelinghoven ordnet sich vom Flächenverbrauch zwischen der normalen Teilstromvariante und den Vollstromvarianten ein, deren Beckengrößen identisch sind.

4.5 V2a-d: Neuerrichtung GAK-Filtration

Für die Einbindung einer GAK Filtration in den bestehenden Kläranlagenprozess gibt es verschiedene Möglichkeiten. Wie für die Behandlungsverfahren mit Pulveraktivkohle oder Ozon sollte eine möglichst gute Vorreinigung erfolgen, um die Beladungskapazität der Aktivkohlekörner zu schonen. Zusätzlich darf die Feststoffbelastung des Zulaufs nicht zu hoch sein, da die Filter ansonsten zu schnell verblocken und häufig rückgespült werden müssen. Die Konzentration der abfiltrierbaren Stoffe im Ablauf der Nachklärbecken wird nicht standardmäßig bestimmt, sodass hierfür keine langen Zeitreihen ausgewertet werden können. Die regelmäßigen Messungen für CSB und TOC im Ablauf der Nachklärung deuten jedoch auf ebenfalls gute Ablaufwerte in Bezug auf abfiltrierbare Stoffe hin. Auch lt. Aussage des Betriebes bestehen keine Probleme mit erhöhtem Schlammabtrieb aus der Nachklärung, sodass keine weitere Vorbehandlung des Kläranlagenablaufes vor der GAK-Filtration erforderlich ist.



Abbildung 12: Lageskizze GAK-Filtration (Vollstrom)

Bei der Planung der KA Grevenbroich wurde südlich der Nachklärung eine Fläche für die Nachrüstung einer Filtration vorgesehen. Diese reicht für die Errichtung einer GAK Filtration als Teilstromverfahren, für die Vollstromvariante muss die Fläche südöstlich der Nachklärung in Anspruch genommen werden. Diese wird zurzeit als Ausgleichsfläche genutzt und müsste gerodet und wieder ausgeglichen werden. Für alle Varianten können so lange Leitungswege vermieden und der Ablauf der drei Nachklärbecken direkt am Vereinigungsbauwerk abgegriffen werden. Trotz der kurzen Leitungswege kommt auch die GAK-Filtration aufgrund des Filterwiderstandes nicht ohne ein Zwischenpumpwerk aus. Dieses wird nicht als separates Bauwerk umgesetzt sondern kann im Maschinengebäude der GAK Filtration mit untergebracht werden.

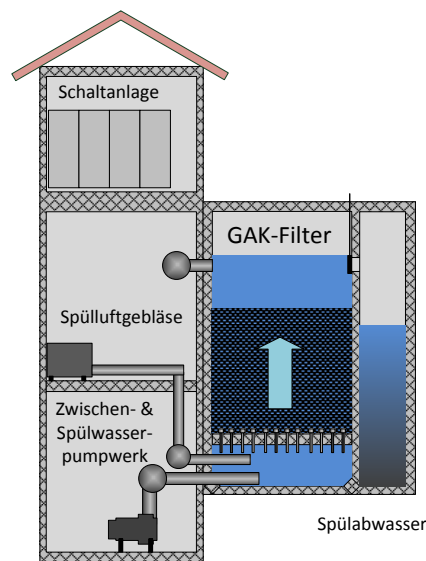


Abbildung 13: Bauwerksskizze GAK-Filtration

Die Reinigungsleistung der GAK-Stufe wird maßgeblich durch eine ausreichende Kontaktzeit von Abwasser und Aktivkohlekörnern erzielt, sodass die Adsorption von Mikroschadstoffen an die Aktivkohle erfolgen kann. In Pilotanlagen wurden 25-30 Minuten als günstige Größe für eine gute Reinigungsleistung festgestellt.

Zur Bereitstellung einer Leerbettkontaktzeit von mindestens 25 Minuten bei der Auslegungwassermenge (Q_M für Vollstrom-, $Q_{t,max}$ für Teilstrombehandlung) muss ein großes Filterbettvolumen vorgehalten werden. Um die Tiefe des Filterbettes auf praktikable ca. 2-2,5 m zu begrenzen muss zudem eine relativ geringe Filtergeschwindigkeit von 5 m/h gewählt werden.

Anzahl und Größe der Filterkammern werden so ausgelegt, dass $n-1$ Filterkammern für die maximal zu behandelnde Wassermenge ausreichen. So wird sichergestellt, dass bei Rückspülung einer der Filterkammern der Zulauf der Filtration nicht gedrosselt werden muss. Für die Teilstromvariante wurden insgesamt 6 Filterzellen gewählt, um ausreichende Reserven für Filterrückspülungen zu erhalten. Da die Ausnutzung der Adsorptionskapazität und die Möglichkeiten für eine günstige Betriebsführung mit der Anzahl der Filterkammern steigt, wurde für die erforderliche Filterfläche für die Vollstrombehandlung auf 8 Filterkammern verteilt.

Ein wichtiger Faktor für die Wirtschaftlichkeit einer GAK-Filtration ist die Menge an Abwasser, die bis zur Erschöpfung der GAK durchgesetzt werden kann. Hier ist damit zu rechnen, dass durch die Anordnung der GAK-Filtration direkt nach der Nachklärung etwas geringere Bettvolumen erreicht werden können als bei Anlagen, die eine Sandfiltration zur Vorbehandlung nutzen können. Der Durchsatz bis zum Tausch/zur Reaktivierung der Aktivkohle wurde daher mit 12.000 Bettvolumen etwas niedriger abgeschätzt als für Anlagen mit aufwändigerer Vorbehandlung (dann 15.000 BV).

Bei Beachtung der Regeln der Technik (DWA-A203) und Auslegungsempfehlungen für GAK-Filtrationen zur Mikroschadstoffelimination müssen im Vergleich zur Sandfiltration sehr große Filterflächen bereitgestellt werden. Bei Beschränkung der maximal zu behandelnden Abwassermenge auf $Q_{t,h,max}$ kann der Aufwand deutlich begrenzt, und die gesamte

Behandlungsstufe auf der für die Filtration vorgesehenen Erweiterungsfläche umgesetzt werden.



Abbildung 14: Lageskizze GAK-Filtration (Teilstrom, nur Grevenbroich)

Die Maschinentechnik wie Zulaufpumpwerk, Pumpen und Gebläse zur Rückspülung sowie die zugehörige elektrotechnische Ausrüstung wird in einem Betriebsgebäude zwischen den Filterkammern (Vollstromvariante) oder an der Kopfseite der Filterkammern (Teilstromvariante) untergebracht.

Das Schlammwasser aus der Rückspülung der GAK-Filter wird dem Zulauf der Kläranlage zugeführt. Aufgrund der potentiell sehr geringen Belastung des Rückspülwassers wird im Rahmen der Studie auf einen gesonderten Nachweis der Behandlungskapazität verzichtet.

Für die Teilstrombehandlung unter Einbeziehung der zu erwartenden Wassermenge nach Anschluss der KA Wevelinghoven werden nur unwesentlich größere Flächen benötigt, auch diese Variante kann auf der vorhandenen Erweiterungsfläche umgesetzt werden.



Abbildung 15: Lageskizze GAK-Filtration (Teilstrom, Grevenbroich mit Wevelinghoven)

Der Ablauf der GAK-Filtration kann ohne Nachbehandlung direkt in das Gewässer eingeleitet werden und wird daher in die bestehende Ablaufleitung geführt.

4.6 V3a-d: Neuerrichtung Ozonbehandlung mit Nachbehandlung durch Sandfilter

Die Ozonbehandlung wird zwischen Nachklärung und der Nachnitrifikation/Sandfiltration in die vorhandene Kläranlage eingebunden. Die Behandlungsstufe besteht aus einem Lagertank für flüssigen Sauerstoff, der Ozonerzeugeranlage und dem Ozonreaktor. Um Gefahren für die Umwelt auszuschließen muss die Abluft aus dem Ozonreaktor eine Restozonvernichtung durchlaufen und das behandelte Abwasser biologisch nachbehandelt werden. Dabei werden eventuell entstandene Reaktionsprodukte abgebaut. Auf der KA Grevenbroich gibt es keine vorhandene Behandlungsstufe, die sich hierfür eignet. Daher muss für diese Verfahrensvariante zusätzlich eine Sandfiltration errichtet werden, die dem Ozonreaktor nachgeschaltet wird. Sie leistet zusätzlich einen weitgehenden Rückhalt partikulärer Stoffe, sodass auch die Ablaufwerte für CSB und Phosphor positiv beeinflusst werden.

Das mechanisch-biologisch gereinigte Abwasser wird aus dem Vereinigungsbauwerk der Nachklärung abgezweigt und auf die Freifläche südöstlich der Nachklärung geführt. Für das

Kontaktbecken muss sowohl in der Teilstrom- als auch in der Vollstromvariante die bisher als ökologische Ausgleichsfläche genutzte Fläche auf dem Kläranlagengelände in Anspruch genommen werden. Alternativ könnte hierfür auch die Freifläche südwestlich der Nachklärung genutzt werden, allerdings liegen in diesem Bereich einige Leitungen, die im Rahmen der Maßnahme verlegt werden müssten. Beide möglichen Flächen sind günstig gelegen, sodass sich die Ozonierung mit kurzen Leitungswegen einbinden lässt und im freien Gefälle beschickt werden kann.

Die ebenfalls neu zu errichtende Sandfiltration als Nachbehandlung kann im Bereich zwischen der Schlammbehandlung und dem Retentionsbodenfilter errichtet werden. Die Fläche war auch ursprünglich für die optionale Errichtung einer Sandfiltration vorgesehen. Insgesamt werden die verfügbaren Erweiterungsflächen nur in geringem Umfang in Anspruch genommen, sodass z.B. eine Erweiterung der Nachklärung weiterhin möglich ist.

Der Ozonerzeuger sowie die erforderliche Peripherie (Kühlung, Restozonvernichtung, Energieversorgung, Schaltanlagen) können im Betriebsgebäude der Sandfiltration untergebracht werden. Im Kopfbereich des Ozonreaktors wird auch eine Aufstell- bzw. Anlieferungsfläche für den Sauerstoff Lagertank gepflastert.



Abbildung 16: Lageskizze Ozonbehandlung (Vollstromverfahren)

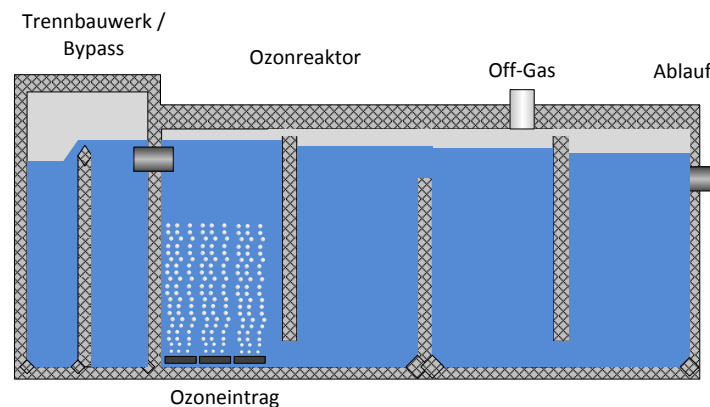


Abbildung 17: Prinzipskizze Ozon-Kontaktreaktor (hier Teilstromvariante mit Trennbauwerk)

Der Ozonreaktor wird mit mehreren Kammern ausgeführt, die abwärts und aufwärts durchflossen werden. Für die Vollstrombehandlung auf der KA Grevenbroich wird der Ozonreaktor zweistraßig, für die Teilstrombehandlung einstraßig ausgelegt. Für die Dimensionierung wurden die Auslegungsempfehlungen aus KOM-M 2016 herangezogen. Die Größe des Ozonreaktors richtet sich demnach nach der Reaktionszeit der Abwasserinhaltsstoffe mit dem Ozon und einem Sicherheitsfaktor, der die ungleichmäßige Durchströmung des Reaktors berücksichtigt.

Somit werden sowohl für die Teilstrombehandlung als auch für die Vollstrombehandlung minimale Aufenthaltszeiten von ca. 30 Minuten erzielt. Die mittlere Aufenthaltszeit liegt bei der Vollstrombehandlung deutlich höher als bei der Teilstrombehandlung, da sich die Dimensionierung nach der höheren maximal zu behandelnden Wassermenge richtet.

Der Ozonerzeuger wird für die grobe Auslegung auf die maximale und die durchschnittliche Ozonmenge bemessen, die für die Auslegungswassermenge benötigt wird. Die spezifische Dosiermenge für den Durchschnittsverbrauch wird zunächst anhand der vorhandenen Restorganik (gemessen am TOC) und Nitrit als dem wichtigsten zehrenden Stoff abgeschätzt. Dabei wird eine spezifische Dosierung von $0,8 \text{ mgO}_3/\text{mgTOC}$ angesetzt. Die tatsächliche Ozonzehrung des spezifischen Abwassers muss in einer weiterführenden Planung labortechnisch bestimmt werden.

Die Ozonerzeugung ist sehr flexibel zu betreiben, sodass die Bereitstellung kleinerer Ozonmengen z.B. bei Nachtzufluss problemlos auch mit einem Aggregat geleistet werden kann. Da eine Staffelung nicht erforderlich ist, wird in Anbetracht der Anlagengröße auf eine Redundanz bei der Ozonerzeugung verzichtet.

Als Ozon Eintragungssystem kommen Diffusoren oder Injektorsysteme in Frage. Da beide Systeme Vor- und Nachteile haben und die Wahl des Systems nicht wesentlich die Investitionskosten beeinflusst, sollte die Entscheidung für ein Eintragungssystem in der konkreten Planung getroffen werden. Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wird das Eintragungssystem kostenmäßig pauschal in der Maschinentechnik mit berücksichtigt.

Die Lageskizzen sowohl der Teilstrom- als auch der Vollstrombehandlung mit Ozon zeigen, dass die erforderliche Fläche für die entsprechenden Bauwerke und Einrichtungen relativ gering ist. Die Variante unter Berücksichtigung der zukünftigen Wassermengen nach

Anschluss der KA Wevelinghoven ordnet sich zwischen der einfachen Teilstrombehandlung und den Vollstromvarianten ein.



Abbildung 18: Lageskizze Ozonbehandlung (Teilstrom, nur Grevenbroich)



Abbildung 19: Lageskizze Ozonbehandlung (Teilstrom, Grevenbroich mit Wevelinghoven)

5 Kostenermittlung und Variantenvergleich

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Grundlagen und Ergebnisse der Kostenermittlung für die in Kapitel 4 entwickelten Verfahrensvarianten vorgestellt.

Es wurden zunächst die Investitionskosten getrennt nach Kosten für Bau-, Maschinen-, und Elektrotechnik ermittelt und zusätzlich Baunebenkosten wie Ingenieurhonorare oder Vermessungsleistungen berücksichtigt.

Anschließend werden die Betriebskosten ermittelt, die für den laufenden Betrieb aufgewendet werden müssen. Hierbei stellt der Material- bzw. Energieverbrauch für die Mikroschadstoffelimination den größten Teil dar. Aber auch Personalkosten, Wartungs- und Instandhaltungskosten sowie zusätzliche Kosten für den konventionellen Anlagenteil (z.B. Entsorgungskosten) finden hier Berücksichtigung.

5.1 Kostenansätze

Für die Investitionskosten wurden tatsächliche Kosten aus aktuellen, vergleichbaren Projekten (Kläranlagenertüchtigung, Pumpwerke etc.) ausgewertet und Kostenansätze für Betonbauwerke, Leitungen und übliche Maschinentechnik gebildet.

Für verfahrensspezifische Maschinentechnik (Ozonerzeuger, PAK-Dosierung) wurden Richtpreisangebote von verschiedenen Herstellern eingeholt.

Die Kosten für die elektrotechnische Ausrüstung der Mikroschadstoffelimination wurden Pauschal mit 20% der Investitionskosten für Maschinentechnik angesetzt.

Baunebenkosten wurden mit 30% der Investitionskosten angesetzt.

Zudem wurden in Abhängigkeit von der Planlage pauschale Kostenansätze für Vermessung des Bestandes, Suchgräben angesetzt. Je nach Größe und Lage des Baufeldes und der bisherigen Erschließung wurden außerdem Kosten für Baustelleneinrichtung angesetzt. Damit sind die wesentlichen Positionen für die Investitionskosten der 4. Reinigungsstufe erfasst.

5.2 Variantendiskussion und Verfahrensempfehlung

Nachfolgend sollen die wesentlichen Unterschiede der untersuchten Verfahren herausgestellt und eine Verfahrensempfehlung gegeben werden. Zu den wichtigsten Entscheidungskriterien zählen dabei:

- Wirksamkeit
- Einbindung in den vorhandenen KA-Betrieb
- weitere Faktoren wie Energiebedarf/Personalbedarf/Umweltaspekte
- Verfahrensspezifische Risiken
- Wirtschaftlichkeit

Um die nichtmonetären Faktoren möglichst transparent zu bewerten, wurde eine Bewertungsmatrix erstellt, die alle untersuchten Verfahrensvarianten enthält. Die Bewertung erfolgt mit 1 bis 5 Punkten, wobei eine höhere Punktzahl einer besseren Bewertung entspricht.

technische Kriterien	4. Reinigungsstufe, Verfahren / Varianten			Wichtung
	PAK Verfahren	GAK Verfahren	Ozon Verfahren	
	PAK, Dosierung mit Kontaktbecken & Sedimentation & SF	GAK Filtration, diskont. Filter	Ozonung mit Sandfiltration zur Nachbehandlung	
Eliminationsrate hinsichtl. relevanter Mikroschadstoffe	4	4	4	15%
Bildung von unerwünschten Reaktionsnebenprodukten (z.B. Bromat) und Transformationsprodukten	5	5	1	10%
Veränderung konventioneller Abwasserparameter (CSB, AFS, Pges)	5	5	4	5%
Großtechnische Erprobung des Verfahrens	4	4	4	15%
Regelbereich und Flexibilität des Verfahrens (auch im Hinblick auf zukünft. Anforderungen)	4	2	5	10%
Betriebs- und Wartungsaufwand	3	3	4	10%
Erforderl. Qualifikation des Betreibers	3	3	3	5%
Zusätzlicher Betriebsaufwand konventioneller Anlagenteil (z.B. Schlammfall, Kapazität Biologie)	1	3	3	10%
Zulaufqualität zur Behandlungsstufe	3	3	3	5%
Platzbedarf bei Anlage ohne Filtration	1	3	2	5%
Einbindung bestehender Bauwerke	3	3	3	5%
Carbon Footprint	3	4	4	5%
technische Bewertung des Verfahrens	3,40	3,55	3,45	100%

Abbildung 20: Technische Bewertung der untersuchten Verfahren

In der technischen Bewertung schneidet die GAK-Filtration am besten ab, da sie abgesehen von ihrer geringen Flexibilität kaum Nachteile mit sich bringt. Sie kann bis auf die gering belasteten Rückspülströme weitgehend unabhängig von der bestehenden Anlagentechnik errichtet und betrieben werden und benötigt dank der guten Ablaufqualität der Nachklärung keine zusätzlichen Vor- oder Nachbehandlungsschritte. Dadurch ist auch der Platzbedarf tendenziell kleiner als bei den anderen Verfahren. Auch die ausschließliche Entnahme von unerwünschten Stoffen und insgesamt tendenziell positive Effekte auf die konventionellen Abwasserparameter wirken sich positiv auf die Bewertung aus.

Die beiden anderen Verfahren haben für den Einsatz auf der KA Grevenbroich jeweils größere Nachteile, die eine bessere Gesamtbewertung verhindern.

Hauptnachteile der PAK-Variante sind der höhere Platzbedarf, potentiell höhere Treibhausgasemissionen und die höhere Inanspruchnahme von Kapazität in der Belebung und im Schlammweg der Kläranlage. Neben den zusätzlichen Kohleschlammengen, die in der Belebung mit behandelt werden müssen, muss auch das Schlammwasser aus der

Rückspülung des nachgeschalteten Sandfilters erneut in der Biologie gereinigt werden. Dies führt zu einer deutlichen Mehrbelastung der biologischen Reinigungsstufe. Der höhere Platzbedarf führt bei dem PAK-Verfahren dazu, dass auch für eine Teilstrombehandlung die Erweiterungsfläche im Bereich der ökologischen Ausgleichsfläche in Anspruch genommen werden müsste.

Vorteile des PAK-Verfahrens sind die ausschließlich positiven Effekte sowohl für die Mikroschadstoffelimination als auch die konventionelle Abwasserparameter. Auch die langjährige Betriebserfahrung auf bestehenden Anlagen sowie die Flexibilität durch die variierbare Dosiermenge sind positiv zu bewerten.

Die Ozonbehandlung des Abwassers hat ihren größten Nachteil in der Bildung von toxischen Reaktionsnebenprodukten und Transformationsprodukten. Durch die unkontrollierte Umwandlung der Abwasserinhaltsstoffe in neue Stoffe besteht trotz der Nachbehandlung im Sandfilter die Gefahr einer Erhöhung der Toxizität des gereinigten Abwassers. Auch bei dieser Variante müssen die Rückspülwässer aus der Sandfiltration in die Biologie zurückgeführt werden. Durch die zusätzlich erforderliche Sandfiltration liegt der Platzbedarf des ansonsten sehr kompakt realisierbaren Ozonverfahrens auf der KA Grevenbroich zwischen den beiden Aktivkohleverfahren.

Positiv wirken sich der sehr flexible Betrieb der Ozonanlage, die gute großtechnische Erprobung, sowie der geringe Betriebs und Wartungsaufwand für das Kläranlagenpersonal aus.

5.3 Variantenvergleich Vollstrombehandlung

Die monetäre Bewertung der untersuchten Varianten erfolgt mit Hilfe der in Kapitel 5 ermittelten Jahreskosten. Diese schließen sowohl die jährlichen Kosten für Abschreibung und Zinsen, als auch die laufenden (Betriebs-)Kosten mit ein. Nachfolgend werden zunächst die Kosten für die jeweiligen Vollstromvarianten gegenübergestellt. Aufgrund des hohen Anteils des Ablaufes der KA Grevenbroich am Abfluss im Wevelinghovener Entwässerungsgraben ist nach den Vorgaben in (KOM-M 2016) eine Vollstrombehandlung erforderlich.

Zusätzlich ist für die KA Grevenbroich zu klären, ob eine neue Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffelimination direkt auf die zukünftigen Wassermengen nach Anschluss der KA Wevelinghoven ausgelegt werden sollte.

Zunächst werden die Kosten der Mikroschadstoffelimination vorgestellt, die sich bei Dimensionierung der Anlagenteile auf Grundlage der aktuellen Auslastung und Wassermengen der KA Grevenbroich ergeben:

Variantenvergleich VS	V1a: PAK VS	V2a: GAK VS	V3a: Ozon VS
Investitionskosten (brutto)	10.170.887 €	8.510.966 €	10.821.755 €
Bautechnik	7.247.072 €	5.162.112 €	5.683.024 €
Maschinentechnik	2.436.512 €	2.790.712 €	4.110.984 €
E-Technik	487.302 €	558.142 €	1.027.746 €
Betriebskosten (brutto)	517.508 €	418.278 €	572.200 €
Material	239.621 €	197.342 €	208.116 €
Energie	24.813 €	26.029 €	116.618 €
Entsorgung	29.082 €	- €	- €
Personal	42.191 €	33.753 €	33.753 €
Instandhaltung	181.801 €	161.153 €	213.714 €
Jahreskosten	1.132.177 €	962.178 €	1.292.614 €

Die GAK-Variante V2a ist mit ca. 962.000 €/a Jahreskosten die günstigste Variante zur Spurenstoffelimination. Die Investitionskosten sind mit ca. 8,5 Mio € ebenfalls unterhalb der anderen Varianten angesiedelt und werden hauptsächlich durch die Bau- und Maschinentechnik für die Filtration bestimmt. Die Betriebskosten liegen bei dieser Variante bei 418.000 € und sind damit auch die niedrigsten im Vergleich.

Die PAK-Variante V1a ist mit ca. 1.132.000 €/a die zweitgünstigste Variante und ca. 20% teurer als V2a. Die Kosten für die PAK-Stufe enthalten auch die Kosten für eine zusätzlich erforderliche Sandfiltration und sind etwas höher als bei Variante V2a. Der Anteil an Maschinen und Elektrotechnik ist bei dieser Variante geringer, sodass der investive Anteil der Jahreskosten trotz der deutlich höheren Investitionssumme nicht wesentlich höher ausfällt. Die Betriebskosten der PAK-Anlage mit nachgeschalteter Sandfiltration liegen deutlich höher als für die GAK-Filtration, aber unter den Betriebskosten der Ozonung.

Der hohe maschinen- und elektrotechnische Aufwand für die Neuerrichtung einer Ozonanlage und der nachgeschalteten Sandfiltration führt bei Variante V3a dazu, dass sowohl der investive als auch der Betriebskostenanteil über dem der anderen Varianten liegt. Die Ozon-Variante ist mit Jahreskosten von 1.293.000 €/a die teuerste Variante.

Führt man die Ergebnisse aus dem technischen und dem monetären Variantenvergleich zusammen, so **ist Variante V2a mit GAK-Filtration sowohl technisch als auch wirtschaftlich das beste Verfahren zur Mikroschadstoffelimination auf der KA Grevenbroich.**

Sowohl die Ozonbehandlung als auch die PAK Stufe benötigen eine Sandfiltration als Nachbehandlung. Da diese auf der KA Grevenbroich nicht vorhanden ist, müssen für diese Varianten zwei zusätzliche Verfahrensstufen errichtet und betrieben werden. Durch den höheren Betriebsaufwand und den höheren Platzverbrauch schneiden diese Varianten auch in der technischen Bewertung schlechter ab. Auch die Betriebskosten werden durch den höheren (Personal-) Aufwand negativ beeinflusst.

Nachfolgend werden die Kosten einer Vollstrombehandlung nach dem geplanten Anschluss der KA Wevelinghoven an die KA Grevenbroich behandelt. Da die maximal zu behandelnde

Mischwassermenge und damit die wichtigste Auslegungsgröße der Vollstrombehandlung nicht verändert werden, steigen die Investitionskosten nicht. Aufgrund der dann insgesamt wesentlich höheren Auslastung der Kläranlage fallen jedoch auch höhere Betriebskosten an:

Variantenvergleich VS mit Wevelinghoven	V1c: PAK VS + W	V2c: GAK VS + W	V3c: Ozon VS + W
Investitionskosten (brutto)	10.170.887 €	8.510.966 €	10.821.755 €
Bautechnik	7.247.072 €	5.162.112 €	5.683.024 €
Maschinentechnik	2.436.512 €	2.790.712 €	4.110.984 €
E-Technik	487.302 €	558.142 €	1.027.746 €
Betriebskosten (brutto)	638.679 €	505.433 €	671.249 €
Material	343.174 €	282.625 €	271.745 €
Energie	29.863 €	27.902 €	152.038 €
Entsorgung	41.650 €	- €	- €
Personal	42.191 €	33.753 €	33.753 €
Instandhaltung	181.801 €	161.153 €	213.714 €
Jahreskosten	1.253.347 €	1.049.332 €	1.391.662 €

Die GAK-Variante V2c ist mit ca. 1.049.000 €/a Jahreskosten auch in dieser Betrachtung die günstigste Variante zur Spurenstoffelimination. Die Investitionskosten bleiben mit ca. 8,5 Mio € gleich. Die Betriebskosten liegen aufgrund der größeren, behandelten JAM bei dieser Variante bei 505.000 €. Sie sind damit ca. 20% höher als für Grevenbroich alleine und im Vergleich mit den anderen Verfahren nach wie vor am günstigsten.

Die PAK-Variante V1c ist mit ca. 1.253.000 €/a wieder die zweitgünstigste Variante und nun ca. 19% teurer als V2c. Bei gleichbleibenden Investitionskosten steigt mit der höheren Behandlungsmenge die Bedeutung der Betriebskosten für die Wirtschaftlichkeit der Varianten. Die Betriebskosten der PAK-Anlage mit nachgeschalteter Sandfiltration liegen spezifisch höher als für die GAK-Filtration, sodass sich der Abstand zur günstigsten Variante etwas vergrößert.

Die Ozon-Variante V3c ist mit Jahreskosten von 1.293.000 €/a wieder die teuerste Variante, allerdings vergrößert sich der Abstand zur günstigsten Variante mit der größeren, behandelten Abwassermenge nicht. Von allen betrachteten Varianten steigen die Betriebskosten bei der Ozonierung durch die größeren Wassermengen am geringsten.

Insgesamt liegen Mehrkosten (Jahreskosten) für die Mitbehandlung des Abwassers der KA Wevelinghoven in einem Bereich von +8% (Varianten V2c und V3c) und +11% (V1c). Auch für dieses Szenario **ist Variante V2a mit GAK-Filtration sowohl technisch als auch kostenmäßig das beste Verfahren.**

Angesichts einer Erhöhung des Anschlussgrades der KA Grevenbroich von 60% auf 85% und einer geschätzten Steigerung der JAM um ca. 40% wird der Anstieg der Jahreskosten als gering betrachtet. Da für die Vollstromvarianten zum Zeitpunkt der Ausrüstung der Anlage keine Mehrkosten für die Mitbehandlung der Abwassermenge aus Wevelinghoven entstehen, hätte ein Anschluss der KA Wevelinghoven für die Mikroschadstoffelimination aus

Sicht des Kläranlagenbetreibers nur Vorteile. Nachteilig wäre hierbei, dass die Abwasserlast im Wevelinghovener Entwässerungsgraben deutlich steigt.

5.4 Variantenvergleich Teilstrombehandlung

Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben ist für die KA Grevenbroich nach den aktuellen Dimensionierungsvorschlägen (KOM-M 2016) eine Vollstrombehandlung vorzusehen, da der Ablauf der Kläranlage mit ca. 74% deutlich über 30% des natürlichen Abflusses an der Einleitstelle beträgt und auch zukünftig, mit dem Anschluss der KA Wevelinghoven noch einmal steigt. Dennoch werden nachfolgend die Kosten für eine sehr weitgehende Teilstrombehandlung untersucht, die möglicherweise bei geringeren Kosten ebenfalls eine wirkungsvolle Mikroschadstoffreduktion ermöglicht.

Auch für die Teilstromvarianten wird zunächst das Szenario KA Grevenbroich ohne bzw. vor Anschluss der KA Wevelinghoven betrachtet.

Variantenvergleich TS	V1b: PAK TS	V2b: GAK TS	V3b: Ozon TS
Investitionskosten (brutto)	4.965.360 €	4.342.755 €	5.069.095 €
Bautechnik	3.477.078 €	2.978.744 €	2.735.239 €
Maschinentechnik	1.240.235 €	1.136.676 €	1.867.084 €
E-Technik	248.047 €	227.335 €	466.771 €
Betriebskosten (brutto)	364.665 €	285.253 €	393.302 €
Material	191.697 €	157.874 €	166.004 €
Energie	18.149 €	14.845 €	94.170 €
Entsorgung	23.266 €	- €	- €
Personal	42.191 €	33.753 €	33.753 €
Instandhaltung	89.363 €	78.781 €	99.375 €
Jahreskosten	666.736 €	551.489 €	728.357 €

Wie bei den Vollstromvarianten ist auch bei der Teilstrombehandlung die GAK Filtration (V2b) die günstigste Variante. Die Investitionskosten sind mit ca. 4,3 Mio € gegenüber 8,5 Mio € für die Vollstromvariante um etwa die Hälfte geringer. Die Betriebskosten verringern sich nicht im gleichen Maße, da trotzdem ca. 80% der Jahresabwassermenge behandelt werden. Zusammen ergeben sich ca. 551.000 €/a Jahreskosten, was etwa 57% der Jahreskosten der Vollstromvariante entspricht. **Damit ist auch bei den Teilstromvarianten die Variante V2b die günstigste und gleichzeitig technisch beste Variante.**

Die Teilstrombehandlung mit der PAK-Variante (V1b) benötigt eine zusätzliche Sandfiltration. Diese führt sowohl zu höheren Investitions- als auch Betriebskosten. Die Jahreskosten von ca. 667.000 €/a liegen damit ca. 20% höher als bei der GAK-1 Variante V2b.

Die Behandlung des Abwassers in einer Ozonbehandlung mit nachgeschalteter Sandfiltration ist die teuerste Teilstromvariante (V3b). Die Investitionskosten sind dabei nur unwesentlich höher als bei der Variante V1b. Allerdings ergibt sich durch den höheren Anteil

an Maschinen und EMSR-Technik, der kleineren Abschreibungsdauern unterliegt ein deutlich höherer investiver Anteil an den Jahreskosten. Auch die Betriebskosten sind bei dieser Variante am höchsten.

Trotz der eher kleinen Unterschiede in der technischen Bewertung der Verfahren können V1b und V3b damit aus wirtschaftlicher Sicht nicht für eine Umsetzung empfohlen werden.

Mit der geplanten Überleitung des Abwassers aus Wevelinghoven zur KA Grevenbroich wird der Auslastungsgrad und damit die zu behandelnden Wassermengen auf der KA Grevenbroich deutlich steigen. Um weiterhin den maximalen stündlichen Trockenwetterzufluss ($Q_{t,2h,max}$) und ca. 80% der JAM behandeln zu können, muss die Teilstrombehandlung zur Mikroschadstoffelimination größer dimensioniert werden. Im Gegensatz zu den Vollstromvarianten sind daher neben höheren Betriebskosten auch höhere Investitionskosten zu erwarten.

Nachfolgend werden die Kosten der Teilstromvarianten diskutiert, die die Behandlung der Wassermengen der KA Wevelinghoven mit einschließen.

Variantenvergleich TS mit Wevelinghoven	V1d: PAK TS + W	V2d: GAK TS + W	V3d: Ozon TS + W
Investitionskosten (brutto)	6.811.452 €	5.760.133 €	6.783.469 €
Bautechnik	4.795.277 €	3.710.682 €	3.709.118 €
Maschinentechnik	1.680.146 €	1.707.876 €	2.459.480 €
E-Technik	336.029 €	341.575 €	614.870 €
Betriebskosten (brutto)	495.700 €	387.437 €	505.864 €
Material	274.539 €	226.100 €	217.110 €
Energie	23.317 €	20.687 €	122.506 €
Entsorgung	33.320 €	- €	- €
Personal	42.191 €	33.753 €	33.753 €
Instandhaltung	122.334 €	106.897 €	132.496 €
Jahreskosten	909.246 €	748.434 €	952.637 €

Auch in dieser Betrachtung ist die GAK-Filtration (V2d) das günstigste Verfahren. Die Investitionskosten liegen mit ca. 5,7 Mio € zwischen den Kosten für Variante V2b (4,3 Mio €) und den Kosten für die Vollstromvarianten V2a und V2c (8,5 Mio €). Damit beträgt das Einsparpotential bei der Investition gegenüber den Vollstromvarianten immer noch gut 30%, die Mehrkosten gegenüber V2b betragen ebenfalls ca. 30%. Die Betriebskosten steigen gegenüber V2b sogar um 35%, liegen mit 387.000 € aber immer noch deutlich unter den Betriebskosten der Vollstromvariante mit Wevelinghoven. Neben den niedrigeren Kosten für Material und Energie machen sich vor allem auch die geringeren Kosten für Wartung und Instandhaltung positiv bemerkbar, die pauschal über die Investitionskosten abgeschätzt wurden. Zusammen ergeben sich ca. 748.000 €/a Jahreskosten, was etwa 70% der Jahreskosten der entsprechenden Vollstromvariante (V2c) entspricht.

Damit ist auch bei den Teilstromvarianten mit Berücksichtigung zukünftig höherer Wassermengen, die Variante V2b die günstigste und gleichzeitig technisch beste Variante.

Die Teilstrombehandlung mit der PAK-Variante (V1d) benötigt eine Sandfiltration zur Nachbehandlung. Dieser zusätzliche Behandlungsschritt führt sowohl zu höheren Investitions- als auch Betriebskosten. Die Jahreskosten von ca. 667.000 €/a liegen damit ca. 20% höher als bei der GAK-Variante V2d. Der kostenmäßige Abstand zur günstigsten Variante verändert sich mit der geänderten Wassermenge nicht.

Die Behandlung des Abwassers in einer Ozonbehandlung mit nachgeschalteter Sandfiltration ist die teuerste Teilstromvariante (V3d), obwohl die Investitionskosten minimal niedriger als bei der Variante V1b sind. Wie bei den vorangegangenen Betrachtungen ergibt sich durch den höheren Anteil an Maschinen und EMSR-Technik dennoch ein höherer investiver Anteil an den Jahreskosten. Auch die Betriebskosten sind bei dieser Variante am höchsten. Durch die höheren Wassermengen verringert sich bei dieser Variante der Abstand zur günstigsten Variante von +32% auf +27%.

Trotz der eher kleinen Unterschiede in der technischen Bewertung der Verfahren können V1d und V3d auch im Hinblick auf den zukünftigen Anschluss der KA Wevelinghoven aus wirtschaftlicher Sicht nicht für eine Umsetzung empfohlen werden.

In Anbetracht der großen Kostenunterschiede zwischen Teilstrom- und Vollstrombehandlung stellt sich die Frage, ob die höheren Kosten für eine bessere Reinigungsleistung in Kauf genommen werden sollten. Nachfolgend wird daher untersucht, in wie fern die Ablaufwerte von einer Vollstrombehandlung profitieren würden:

Der maximale Mischwasserzufluss tritt im Jahresverlauf nur selten, bei großen Regenereignissen im Einzugsgebiet der Kläranlage auf. Abbildung 21 verdeutlicht diesen Zusammenhang. Die Tageszuflüsse zur Kläranlage in m³/d sind hier für das Jahr 2016 der Größe nach geordnet aufgetragen. Im Jahr 2016 wurden im Einzugsgebiet an 143 Tagen des ausgewerteten Jahres Trockenwetterbedingungen (<0,3mm Niederschlag am Tag und am Vortag) registriert. Die Teilstrombehandlung kann mit einer Kapazität von 14.712 m³/d (gemäß Dimensionierung in Kapitel 4.3) kann aber sogar an 289 Tagen im Jahr den Abwasserstrom vollständig behandeln. Lediglich an 75 Tagen im Jahr wird die Kapazität der Teilstrombehandlung überschritten, so dass ein Teil des biologisch gereinigten Abwassers aus der konventionellen Reinigungsstufe an der 4. Reinigungsstufe vorbei geführt wird. Insgesamt können aber immer 80% der Jahresabwassermenge in der 4. Reinigungsstufe behandelt werden.

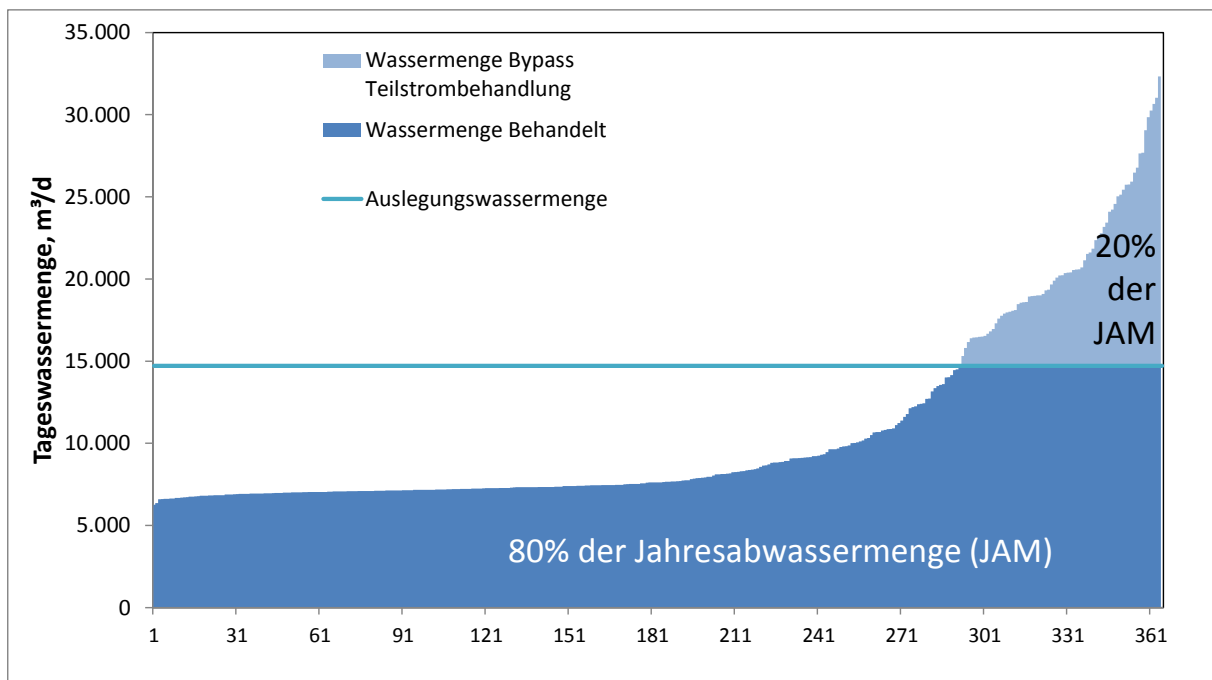


Abbildung 21: Behandelte Wassermenge und Bypassmenge bei der Teilstrombehandlung

Im Folgenden wird für das Arzneimittel Diclofenac beispielhaft untersucht welche Unterschiede sich zwischen Voll- und Teilstrombehandlung mit Blick auf die Konzentration an Spurenstoffen im Ablauf der Kläranlage ergeben.

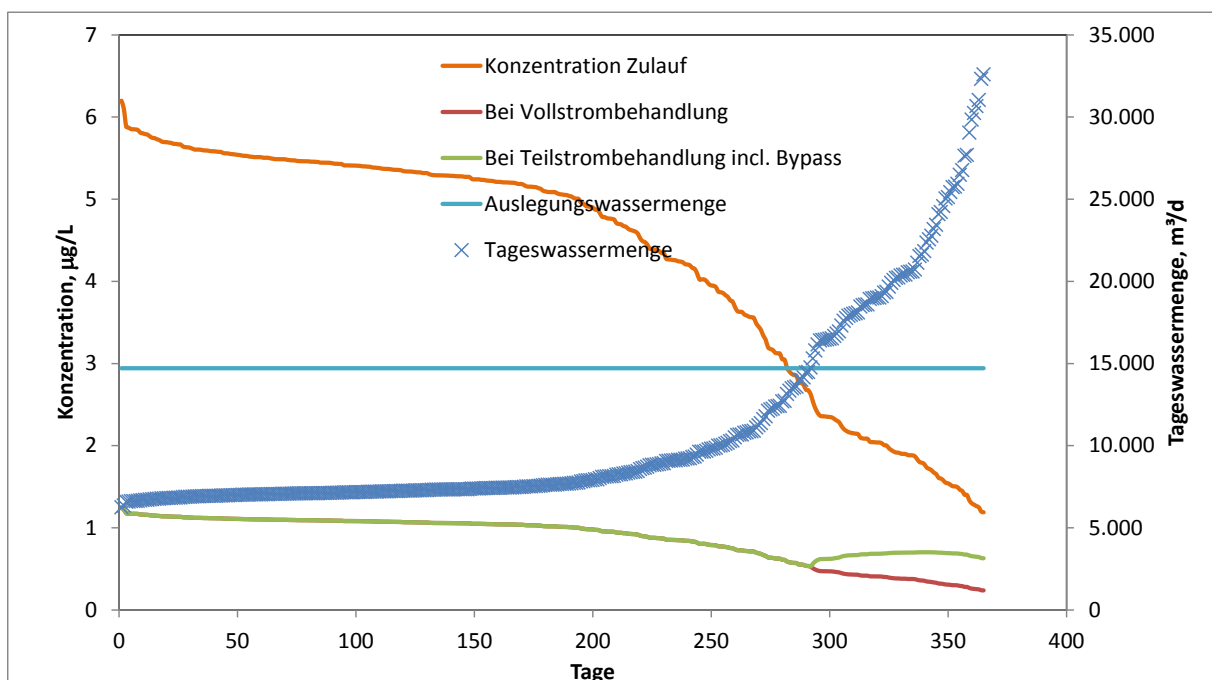


Abbildung 22: Vergleich Diclofenac-Ablaufkonzentrationen Vollstrom- vs. Teilstrombehandlung

Die Betrachtung basiert auf einer vereinfachten, statischen Mischungsrechnung für die tatsächlich auftretenden Tageswassermengen im Verlauf eines Jahres und eine mittlere Tagesfracht an Diclofenac (s. Abbildung 22). Die mittlere Tagesfracht an Diclofenac im

Zulauf der Kläranlage beträgt 38,7 g/d. Bei Regenwetter tritt bereits im Kanal eine Verringerung der Konzentration durch hinzutretendes Niederschlagswasser ein. Der mittlere Wirkungsgrad des konventionellen Anlagenteils bezogen auf Diclofenac beträgt schätzungsweise 20%. Die resultierende Zulaufkonzentration zur 4. Reinigungsstufe liegt damit zwischen 6 µg/l bei Trockenwetter und 1 µg/l bei Regenwetter. Die Entfernungswirkung der Anlage mit 4. Reinigungsstufe beträgt zwischen 80% und 100% (DWA 2015), im Beispiel wurden als unterer Wert 80% gewählt. Bis zum Überschreiten der maximalen Kapazität der Teilstrombehandlung sind Teilstrombehandlung und Vollstrombehandlung gleichwertig, da in beiden Fällen der gesamte Zufluss behandelt wird. Erst bei Zuflüssen oberhalb der maximalen Kapazität, wird bei Teilstrombehandlung ein Teil des biologisch gereinigten Zuflusses aus der konventionellen Reinigungsstufe an der 4. Reinigungsstufe vorbeigeführt. Aufgrund der bei Regenwetter unvermeidlich eintretenden Verdünnung des Zulaufs sind die Konzentrationen dieses Teilstroms aber ebenfalls gering. In der Gesamtbilanz ergibt sich somit eine mittlere Jahresablaufkonzentration bei Teilstrombehandlung von 0,92 µg/l gegenüber 0,87 µg/l bei Vollstrombehandlung. Das entspricht dann mittleren Gesamtwirkungsgraden von 79% bzw. 80% bezogen auf die Zulaufkonzentration. Bezogen auf die im Jahresmittel emittierten Konzentrationen an Spurenstoffen ist damit der zusätzliche Nutzen einer Vollstrombehandlung gering. Ein ähnliches Bild liefert die Frachtbetrachtung. Hier wird gegenüber einem Wirkungsgrad der Teilstrombehandlung von 76% in der Vollstrombehandlung nur eine Steigerung des Wirkungsgrades auf 80% erzielt. Tatsächlich können in einer 4. Reinigungsstufe für Diclofenac aber auch andere Mikroschadstoffe Eliminationsraten von durchschnittlich deutlich über 80% erzielt werden, was den ohnehin geringen Vorteil der Vollstrombehandlung weiter mindert. Eine durch Ausbau der Anlage zur Vollstrombehandlung hervorgerufene, signifikante Reduzierung der Mikroschadstoffkonzentrationen im Gewässer dürfte damit in der Praxis kaum nachweisbar sein. Wirtschaftlich gesehen weisen Vollstrombehandlungsanlagen einen stark abnehmenden Grenznutzen auf, da große Anlagen vorgehalten und betrieben werden müssen, deren volle Kapazität nur an wenigen Tagen pro Jahr benötigt wird.

6 Betrachtung des Gewässers und sonstiger Umweltwirkungen

6.1 Ökologische Betrachtung des Gewässers

Im Rahmen der vorliegenden Studie sollte auch eine Betrachtung des ökologischen Zustandes des Einleitgewässers und eine Einordnung der Mikroschadstoffbelastung und anderer Umweltwirkungen auf das Gewässer erfolgen. Die Untersuchung wurde durch das Ingenieurbüro Atemis durchgeführt und wurde der Studie als Anhang 2 beigelegt. Nachfolgend werden die wesentlichen Ergebnisse der Untersuchung zusammengefasst:

Die KA Grevenbroich liegt in Grevenbroich, nordöstlich des Stadtteils Noithausen und leitet bei Flusskilometer 3,34 in den Wevelinghovener Entwässerungsgraben ein. Da der Wevelinghovener Entwässerungsgraben im Zuge der Bestandsaufnahme für die Wasserrahmenrichtlinie nicht untersucht wurde, wird im Rahmen dieser Studie die Erft ab der Einmündung des Wevelinghovener Entwässerungsgrabens bis zur Mündung in den Rhein betrachtet. Damit deckt sich der Untersuchungsraum weitgehend mit dem der nahegelegenen KA Wevelinghoven. Der Anteil des Kläranlagenablaufes an dem Abfluss im Wevelinghovener Entwässerungsgraben beträgt 73,8%. Nach der Mündung in die Erft beträgt der Anteil nur noch ca. 2% am Abfluss in der Erft. Dementsprechend wirkt sich die Einleitung nur wenig auf das Gewässer aus.

Sowohl oberhalb der Mündung des Wevelinghovener Entwässerungsgrabens als auch unterhalb bis zur Mündung in den Rhein wird die Erft als stark bis vollständig verändert eingestuft.

Der chemische Zustand der betrachteten Gewässerabschnitte wurde ober- wie unterhalb der Einleitung im 3. Monitoringzyklus mit „gut“ bewertet (ohne ubiquitäre Stoffe).

Das für die „erheblich veränderten Oberflächenwasserkörper“ maßgebliche ökologische Potential wird oberhalb wie unterhalb der Mündung des Wevelinghovener Entwässerungsgrabens als unbefriedigend klassifiziert. Die Wasserrahmenrichtlinie fordert die Erreichung eines guten ökologischen Potentials.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich der ökologische Zustand der Erft durch die Einleitung der KA Grevenbroich nicht verändert.

Bei Betrachtung der Konzentrationen der Standardabwasserparameter oberhalb und unterhalb der Einleitstelle kann für alle Parameter ein leichter Anstieg der Gewässerkonzentration festgestellt werden. Hierbei ist zu beachten, dass durch die Lage der Messstellen in der Erft auch der Einfluss der KA Wevelinghoven mit erfasst wird. Insgesamt haben beide Einleitungen nur einen geringen Einfluss auf den Nährstoffgehalt in der Erft.

Dies spiegelt sich auch in der Betrachtung der Mikroschadstoffe wieder. Für die 7 Leitparameter wurde im Rahmen der Studie ein geringfügiger Anstieg der Gewässerkonzentrationen durch die Einleitung der Kläranlagen Grevenbroich und Wevelinghoven beobachtet. Für Diclofenac wird Bewertungskriterium von 0,05 µg/l allerdings bereits oberhalb der Einleitungen deutlich überschritten.

Da im WRRL-Arbeitsgebiet Erft 80% der Wasserkörper „erheblich verändert“ oder „künstlich“ sind, sind umfassende Maßnahmen zur Gewässersanierung und –renaturierung nötig, um einen guten ökologischen und chemischen Zustand bzw. ein gutes ökologisches Potential zu erreichen. Außerdem gilt es, die Erft darauf vorzubereiten, dass sich der Abfluss mit Aufgabe

der Bergbautätigkeit bis spätestens 2045 drastisch verringern wird. Hierzu wurde bereits 2005 das Perspektivkonzept Erft erarbeitet, dass unter anderem Maßnahmen zur Verkleinerung des Querprofils, zur Verbesserung der Gewässerstruktur, zur Entfernung von Stauhaltungen und zur Verbesserung der Durchgängigkeit enthält und sich zur Zeit in der Umsetzung befindet.

Zur Abschätzung der Auswirkungen einer Mikroschadstoffelimination wurde anhand der Messergebnisse für die Leitparameter im Ablauf der Kläranlage und im Einleitgewässer eine Mischungsrechnung aufgestellt. Neben dem IST-Zustand wurde so auch ein Szenario mit einer 80%igen Elimination der Mikroschadstoffe auf den KA Grevenbroich und Wevelinghoven betrachtet. Die beiden Anlagen wurden zusammen betrachtet, da das Abwasser der KA Wevelinghoven ab Mitte der 2020er Jahre auf der KA Grevenbroich mitbehandelt werden soll. Eine entsprechende Elimination führt zu einer Minderung der Konzentrationen der Leitparameter an der Mündung der Erft von ca. 3-7% und beeinflusst die Konzentrationen in der Erft unterhalb der Einleitung folglich nur wenig.

6.2 Erfordernis zur Mikroschadstoffelimination aus ökologischer Sicht

Für viele Stoffe werden kommunale Kläranlagen als Haupteintragspfad angesehen und stehen daher im Fokus der Mikroschadstoffdiskussion. Die im Rahmen von Spurenstoffe Erft durchgeführten Messungen deuten allerdings darauf hin, dass auch Mischwasserentlastungen und Regenwasserbehandlungsanlagen nennenswerte Quellen für Mikroschadstoffe sind. Gerade in landwirtschaftlich geprägten Einzugsgebieten ist die Landwirtschaft mit Abschwemmungen von Feldern und Wegen als diffusen Quellen ein bedeutender Eintragspfad für diverse Pflanzenschutzmittel, aber auch Medikamentenrückständen von Tierarzneimitteln. So wurden im Rahmen von Spurenstoffe Erft sogar im Quellbereich der Erft, oberhalb aller Einleitungen der Siedlungswasserwirtschaft Mikroschadstoffe nachgewiesen.

Im Verlauf der Erft ist Diclofenac derjenige der diskutierten Leitparameter, der regelmäßig über seinem Orientierungswert nachgewiesen werden konnte. Modellrechnungen zur Bilanzierung der Frachten und Konzentrationen in der Erft zeigen jedoch auch, dass nur durch den Ausbau einzelner Kläranlagen der Orientierungswert an der Mündung nicht gesichert eingehalten werden kann. Einseitige Ansätze, die ausschließlich auf eine Erhöhung der Kläranlagen mit 4. Reinigungsstufen zur Mikroschadstoffelimination zielen, erscheinen daher nicht geeignet die gewünschte Wirkung vollständig zu erzielen.

Dennoch kann die Ausrüstung bestimmter Anlagen einen wichtigen Beitrag zur Senkung der allgemeinen Mikroschadstofffracht im Gewässer leisten. Hierzu eignen sich Anlagen im Oberlauf eines Gewässers besser als im Unterlauf, da sie eine größere Gewässerstrecke positiv beeinflussen können. Zuletzt spielen die Größe sowie die örtlichen und technischen Gegebenheiten der Anlage eine wichtige Rolle für die spezifischen Kosten einer 4. Reinigungsstufe. Des Weiteren ist abzuwägen, ob die Vollstrombehandlung zur Mikroschadstoffentfernung gegenüber Teilstromlösungen tatsächlich besser dazu beitragen Konzentrationen im Gewässer erheblich zu mindern.

Weitet man den Blick darüber hinaus auf die Erreichung eines guten ökologischen Zustandes im Gewässer muss man anerkennen, dass auch auf anderen Handlungsfeldern, wie der Verbesserung der Gewässerstruktur und -morphologie, dem Rückgang diffuser

Nährstoffeinträge oder der Reduzierung von Schwermetalleinträgen in das Gewässersystem der Erft, Fortschritte erzielt werden müssen. Eine einseitige Fixierung auf die Reduktion der Mikroschadstoffkonzentrationen aus Kläranlagenabläufen erscheint als nicht zweckmäßig. Maßnahmen hierzu sind in der Diskussion genau abzuwägen, da die Mikroschadstoffentfernung mit Blick auf den Energieverbrauch und den Carbon-Footprint der Kläranlagen nicht nur potenziell positive Umweltwirkungen zeitigt.

Die KA Grevenbroich emittiert durch Ihre mittlere Größe eine nennenswerte Fracht von Mikroschadstoffen, hat aber mit ca. 2% einen sehr geringen Anteil am Abfluss in der Erft. Insgesamt hat sie damit einen moderaten Einfluss auf die Mikroschadstoffkonzentrationen in den unterhalb gelegenen Gewässerabschnitten. Dabei ist auch zu beachten, dass die Erft im gesamten Unterlauf aufgrund der Sumpfungswasser- und Kühlwassereinleitungen eine erhöhte Wasserführung sowie eine erhöhte Wassertemperatur aufweist. In diesem Bereich ist die Erreichung eines guten ökologischen Zustandes bzw. Potentials auf absehbare Zeit nicht möglich.

Zudem sind die Voraussetzungen für die Errichtung einer Reinigungsstufe zur Mikroschadstoffelimination auf der KA Grevenbroich im Vergleich mit anderen Anlagen des Erftverbandes eher schlecht. Dadurch, dass keine bestehende Anlagenstufe (z.B. Sandfiltration) in die 4. Reinigungsstufe mit einbezogen werden kann, sind insbesondere die Investitionskosten für eine Nachrüstung sehr hoch. Im Gegensatz dazu könnten auf den größeren Anlagen Kessenich und Kerten größere Frachtreduzierungen zu geringeren Kosten realisiert werden.

Aus den vorgenannten Gründen sollten, im Sinne des wirtschaftlichen Einsatzes verfügbarer (Förder-)Mittel, zunächst andere Anlagen ausgerüstet werden, auf denen mit geringeren spezifischen Kosten ein größerer Effekt im Erfteinzugsgebiet erzielt werden kann.

7 Fazit

Noch in den 1990er Jahren konzentrierte sich die Wasserwirtschaft auf die Sanierung der Gewässer im Hinblick auf Nährstoffe im Milligrammbereich. Viele der heute diskutierten Stoffe wie Arzneimittelrückstände und Pflanzenschutzmittel konnten noch nicht ausreichend fein detektiert werden, um sie in den sehr kleinen Konzentrationen im Mikro- und Nanogrammbereich bestimmen zu können.

In den letzten Jahren hat sich dank zahlreicher Messungen und Studien das Wissen um die Belastung mit Mikroschadstoffen deutlich vergrößert, sodass in Gewässern und Kläranlagenabläufen eine Vielzahl von unterschiedlichen Substanzen nachgewiesen werden kann. Auch wenn bei bestimmten Stoffen eindeutig negative Auswirkungen auf das aquatische Leben nachgewiesen werden können, steht die ökotoxikologische Bewertung vor allem von Stoffgemischen noch am Anfang. Im Sinne des Vorsorgegedankens wird vielfach angestrebt bereits heute Emissionen zu vermeiden, wo dies mit vertretbarem Aufwand möglich erscheint.

Die KA Grevenbroich ist mit einer Ausbaugröße von 97.100 EW die drittgrößte Anlage im Erfteinzugsgebiet und gemeinsam mit der KA Wevelinghoven die letzte Anlage vor der Mündung in den Rhein. Sie leitet zunächst in den mit Erftwasser gespeisten Wevelinghovener Entwässerungsgraben ein und hat aufgrund des hohen Anteils am Abfluss maßgeblichen Einfluss auf die Gewässerqualität an und unterhalb der Einleitstelle. Allerdings mündet der Wevelinghovener Entwässerungsgraben nach wenigen Kilometern Fließstrecke in die Erft, wo die Einleitung aufgrund der wegen der Sumpfungswassereinleitungen ständig sehr hohen Wasserführung keinen großen Einfluss auf die Gewässerqualität hat.

Letztlich muss ein Gewässereinzugsgebiet ganzheitlich betrachtet werden. Die Entscheidung zur Ausrüstung einzelner Anlagen sollte in einem Gesamtkonzept bewertet werden, für das die vorliegende Studie Grundlagendaten liefert.

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden zunächst der Stand der Forschung und Technik und die verfügbaren, wirksamen Verfahren dargestellt. Aus der Vielzahl der möglichen Verfahren und Verfahrensvarianten wurde eine Vorauswahl getroffen und drei Verfahren detailliert auf ihre Umsetzbarkeit und die Kosten untersucht:

- V1: PAK-Dosierung mit Sedimentation und neu zu errichtender Sandfiltration als Nachbehandlung
- V2: GAK-Filtration in neuerrichteten Filterkammern
- V3: Ozonbehandlung mit neu zu errichtender Sandfiltration als Nachbehandlung

Für jedes der drei Verfahren eine Untervariante zur Vollstrom- und zur Teilstrombehandlung betrachtet. Zusätzlich wurde untersucht, wie sich der zukünftig geplante Anschluss der KA Wevelinghoven mit ca. 24.000 zusätzlichen EW auf die Dimensionierung und Kosten einer Mikroschadstoffelimination auswirken würde. Insgesamt wurden 12 Untervarianten betrachtet.

Die grundsätzlichen, technischen Voraussetzungen zur Errichtung einer 4. Reinigungsstufe auf der Grevenbroich sind gegeben. Die vorhandenen Erweiterungsflächen im Bereich Ablauf Nachklärung ermöglichen eine hydraulisch günstige Einbindung aller oben genannter

Verfahren. Da auf der Anlage bislang keine (Sand-)filtration betrieben wird, sind für die Varianten 1 und 3 zusätzlich Sandfilter als Nachbehandlung zu errichten, was den Aufwand deutlich erhöht. Andererseits werden mit der vorhandenen Nachklärung gute Feststoffgehalte im Ablauf der Kläranlage erreicht, sodass eine GAK-Filtration direkt nach der Nachklärung angeordnet werden kann. Alle betrachteten Verfahren erfordern ein Zwischenpumpwerk.

Nach der technischen Bewertung sind alle betrachteten Verfahren grundsätzlich in der Lage die diskutierte 80%ige Elimination der Leitparameter zu leisten. Unterschiede ergeben sich vor allem in der Flexibilität im Hinblick auf sich zukünftig verändernde Anforderungen, dem Betriebsaufwand und die Einbindung in die vorhandene Anlagentechnik.

Insgesamt stellt sich die Variante V2 (GAK Filtration) vor allem auf Grund der geringeren Komplexität als technisch beste Variante dar. Für diese Variante ist nur eine zusätzliche Verfahrensstufe ohne Vor- oder Nachbehandlung erforderlich. Auch hat die GAK-Filtration ausschließlich positive Effekte auf die Ablaufqualität und führt nur zu geringen zusätzlichen Belastungen für die bestehenden Behandlungsstufen. Die Variante V1 (PAK-Dosierung und Sandfiltration) erreicht trotz der höheren Flexibilität, durch den höheren Flächenverbrauch und die stärkere Belastung der biologischen Reinigungsstufe eine etwas schlechtere Bewertung. Auch die Ozonbehandlung (V3) wird durch die Gefahr der Bildung unerwünschter Nebenprodukte und das Erfordernis einer Nachbehandlung in technischer Hinsicht leicht schlechter bewertet.

Bei den Kosten muss zwischen Vollstrom und Teilstromlösungen, sowie zwischen den Varianten mit und ohne Berücksichtigung zusätzlicher Wassermengen aus Wevelinghoven unterschieden werden. Hier werden die Jahreskosten als maßgeblich betrachtet, da sie sowohl Investitions- als auch Betriebskosten berücksichtigen.

Bei allen Vollstromlösungen (Varianten V1a-3a) stellt V2a (GAK-Filtration) bei Betrachtung der Jahreskosten die günstigste Variante dar. **Die GAK-Filtration ist damit sowohl aus technischer als auch aus wirtschaftlicher Sicht die beste Variante.**

Die PAK-Dosierung (V1a) und die Ozonbehandlung haben aufgrund der zusätzlich erforderlichen Sandfiltration sowohl höhere Investitionskosten als auch höhere Betriebskosten und sind damit in den Jahreskosten ca. 15 bzw. 30 Prozent teurer.

Für den Anschluss der KA Wevelinghoven müsste aufgrund großer Reservekapazitäten der KA Grevenbroich die maximale Mischwassermenge (Q_m) voraussichtlich nicht angepasst werden. Dadurch muss im Falle der Vollstrombehandlung die Reinigungsstufe zur Mikroschadstoffelimination nicht größer ausgelegt werden. Durch die steigende Auslastung erhöhen sich allerdings die Betriebskosten um 17% bis 23% gegenüber den Kosten für die heutige Abwassermenge. Die Jahreskosten steigen in der Folge um 8% bis 11%, wobei die favorisierte GAK-Variante 9% teurer wird.

Bei den Teilstromvarianten (V1b-3b) wird der Ablauf der KA Grevenbroich nur bis zu einem Durchfluss von 584 m³/h (etwa 35% Q_m) in der 4. Reinigungsstufe behandelt. Bei höherem Zufluss (bei größeren Regenereignissen) wird die darüber hinaus gehende Wassermenge an der 4. Reinigungsstufe vorbeigeführt. Dadurch kann trotz wesentlich kleinerer Auslegung der Reinigungsstufe über 80% der Jahresabwassermenge behandelt werden.

In der Folge fallen die Investitionskosten für die Teilstrom-Varianten deutlich geringer aus, während die Betriebskosten nur unwesentlich kleiner als bei der Vollstrombehandlung sind.

Die GAK-Filtration (V2b) stellt auch bei der Teilstrombehandlung die günstigste Variante dar. Die PAK-Stufe (V1b) erreicht auch bei dieser Betrachtung die nächstniedrigeren Jahreskosten. Die Ozonbehandlung (V3b) hat auch als Teilstromverfahren die höchsten Jahreskosten, schließt jedoch etwas zu den anderen Varianten auf.

Die GAK-Filtration ist damit auch als Teilstromverfahren sowohl das günstigste als auch das technisch beste Verfahren.

Unter Berücksichtigung der zusätzlichen Abwassermenge bei Überleitung der KA Wevelinghoven verändert sich der maximale stündliche Zufluss bei Trockenwetter. Die Behandlungsstufe zur Mikroschadstoffelimination muss dann für einen Durchfluss von 924 m³/h ausgelegt werden, um 80% der Jahresabwassermenge behandeln zu können.

Die resultierenden Jahreskosten der Teilstromvarianten mit Wevelinghoven (V1d-3d) liegen zwischen 31% und 36% höher als bei den Teilstromvarianten ohne die Wassermenge aus Wevelinghoven (V1b-3b). Aufgrund der größeren Dimensionierung der Anlagenteile steigen hierbei neben den Betriebskosten auch die Investitionskosten.

Die vorgestellte Bewertung stellt den aktuellen Kenntnisstand dar. Für alle betrachteten Verfahren gibt es bereits großtechnische Umsetzungen, allerdings gibt es lediglich für die PAK-Dosierung langjährige Betriebserfahrungen von kommunalen Kläranlagen. Es ist daher nicht auszuschließen, dass sich die Kenntnislage oder die Kostensituation in den nächsten Jahren noch verändert.

Weitere Unsicherheiten für die Planung und Betrieb einer Stufe zur Mikroschadstoffelimination ergeben sich aus den bislang fehlenden, rechtlich verbindlichen Vorgaben für die Reinigungsleistung von 4. Reinigungsstufen und ihrer Überwachung. Auch gibt es bislang keine Grenzwerte für Mikroschadstoffe in Gewässern. Das Land NRW hat mit der „Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination“ lediglich eine Diskussionsgrundlage herausgegeben, die wichtige Punkte offen lässt.

Aufgrund des hohen Anteils des Ablaufs der KA Grevenbroich an der Wasserführung des Wevelinghovener Entwässerungsgrabens ist an diesem Standort eine Vollstrombehandlung erforderlich. Allerdings verfügt der Wevelinghovener Entwässerungsgraben lediglich durch eine Ausleitung aus der Erft eine ständige Wasserführung und mündet nach wenigen Kilometern wieder in die Erft.

Angesichts des verhältnismäßig kleinen Einflusses der Anlage auf die Gewässerqualität der Erft insgesamt sollte die Entscheidung über die Ausrüstung der Anlage im Rahmen eines Gesamtkonzeptes erfolgen, für das die vorliegende Studie wichtige Grundlagendaten liefert.

Weitet man den Blick darüber hinaus auf die Erreichung eines guten ökologischen Zustandes im Gewässer muss man anerkennen, dass auch auf anderen Handlungsfeldern wie der Verbesserung der Gewässerstruktur- und morphologie, dem Rückgang diffuser Nährstoffeinträge oder der Reduzierung von Schwermetalleinträgen in das Gewässersystem der Erft Fortschritte erzielt werden müssen. Eine einseitige Fixierung auf die Reduktion der Mikroschadstoffkonzentrationen aus Kläranlagenabläufen erscheint als nicht zweckmäßig.

Maßnahmen hierzu sind in der Diskussion genau abzuwägen, da die Mikroschadstoffentfernung mit Blick auf den Energieverbrauch und den Carbon-Footprint der Kläranlagen nicht nur potenziell positive Umweltwirkungen zeitigt.

8 Literaturverzeichnis

- Abwasserverband LEE. 2016. „Wegweisende Forschung zum Trinkwasserschutz“. 2016. <http://www.abwasserlee.de/aktuelles/presse/127-wegweisende-forschung-zum-trinkwasserschutz.html>.
- „ARA_Factsheet10_2.pdf“. o. J. Zugriffen 26. April 2018. http://www.neugut.ch/scms/upload/Text/Ozonung/ARA_Factsheet10_2.pdf.
- Bester, K., und D. Schäfer. 2009. „Activated soil filters (bio filters) for the elimination of xenobiotics (micro-pollutants) from storm-and waste waters“. *Water research* 43 (10): 2639–2646.
- Boehler, Marc, Ben Zwickepflug, Mariangela Grassi, Markus Behl, Silvio Neuenschwander, und Hansruedi Siegrist. 2011. „Aktivkohledosierung in den Zulauf zur Sandfiltration Kläranlage Kloten/Opfikon“. Dübendorf, CH: EAWAG.
- Benstöm, Frank, Nahrstedt, Andreas, Böhler, Marc, Knopp, Gregor, Montag, David, Siegrist, Hansruedi, Pinnekamp, Johannes. 2016. „Leistungsfähigkeit granulierter Aktivkohle zur Entfernung organischer Spurenstoffe aus Abläufen kommunaler Kläranlagen - Ein Überblick über halb- und großtechnische Untersuchungen, Teil 1“. KA Korrespondenz Abwasser Abfall, Jahrg. 63, 3/2016: 187–192.
- Benstöm, Frank, Nahrstedt, Andreas, Böhler, Marc, Knopp, Gregor, Montag, David, Siegrist, Hansruedi, Pinnekamp, Johannes. 2016. „Leistungsfähigkeit granulierter Aktivkohle zur Entfernung organischer Spurenstoffe aus Abläufen kommunaler Kläranlagen - Ein Überblick über halb- und großtechnische Untersuchungen, Teil 2“. KA Korrespondenz Abwasser Abfall, Jahrg. 63, 4/2016: 276–289.
- Brepols. 2013. „Nachrüstung einer Faulungsanlage auf der MBA Nordkanal - Zwischenergebnisse“. In *10. Aachener Tagung Wasser und Membranen*. Aachen: Aachener Verfahrenstechnik, RWTH Aachen.
- Brepols, Christoph. 2010. *Operating Large Scale Membrane Bioreactors for Municipal Wastewater Treatment*. London: Iwa Publishing.
- Brepols. 2018. „Chapter 3: Membran Bioreactors - Design, Operation, Maintenance“. In *Membrane Biological Reactors: Theory, Modeling, Design, Management and Applications to Wastewater Reuse*, herausgegeben von Faisal I. Hai, Kazuo Yamamoto, und Chung-Hak Lee. In Vorbereitung.
- Brunner, P.G. 2002. „Bodenfilter zur Regenwasserbehandlung im Misch- und Trennsystem“. 2. Auflage. Karlsruhe: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg.
- Brunsch, Andrea F., Thomas L. ter Laak, Huub Rijnaarts, und Ekkehard Christoffels. 2018. „Pharmaceutical Concentration Variability at Sewage Treatment Plant Outlets Dominated by Hydrology and Other Factors“. *Environmental Pollution* 235 (April): 615–24. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.12.116>.
- Bundschuh, Mirco, Torsten Hahn, Mark O. Gessner, und Ralf Schulz. 2017. „Antibiotic Mixture Effects on Growth of the Leaf-Shredding Stream Detritivore Gammarus Fossarum“. *Ecotoxicology* 26 (4): 547–54. <https://doi.org/10.1007/s10646-017-1787-2>.
- Christoffels, E., A. Brunsch, J. Wunderlich-Pfeiffer, und F. M. Mertens. 2016. „Monitoring Micropollutants in the Swist River Basin“. *Water Science and Technology* 74 (10): 2280–96. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.392>.
- Deng, Yang, und Renzun Zhao. 2015. „Advanced Oxidation Processes (AOPs) in Wastewater Treatment“. *Current Pollution Reports* 1 (3): 167–76. <https://doi.org/10.1007/s40726-015-0015-z>.
- Die Zeit. 2018. „Umweltverschmutzung: Mikroplastik schwimmt in allen deutschen Gewässern“, 15. März 2018, Abschn. Wissen. <https://www.zeit.de/wissen/umwelt/2018-03/umweltverschmutzung-mikroplastik-kunststoffe-wasser-studie>.

- Drensla, Kinga, und Andreas Janot. 2017. „Neue Kenndaten einer Membrananlage als Bilanz des progressiven Betriebs und technischer Entwicklung“. In *Wassertechnologie in der Wasseraufbereitung und Abwasserbehandlung*. Aachen.
- DWA. 2013. „Merkblatt DWA-M 205, Desinfektion von biologisch gereinigtem Abwasser“. M 205. Hennef: DWA.
- DWA. 2014. „Membran-Bioreaktor-Verfahren (MBR-Verfahren)“. Merkblatt DWA-M 277. DWA-Regelwerk. Hennef: DWA.
- DWA, Hrsg. 2015. *Möglichkeiten der Elimination von anthropogenen Spurenstoffen*. Stand: April 2015. DWA-Themen, 2015,3. Hennef: DWA.
- Erftverband. 2004. „Optimierung einer Belebungsanlage mit Membranfiltration (Kläranlage Rödingen)“. Technical report 1–3. Bergheim / Erft: Erftverband.
- Falås, Per, Arne Wick, Sandro Castronovo, Jonathan Habermacher, Thomas A. Ternes, und Adriano Joss. 2016. „Tracing the Limits of Organic Micropollutant Removal in Biological Wastewater Treatment“. *Water Research* 95 (Mai): 240–49. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.03.009>.
- Frank, Kerstin, Jean-Marc Stoll, Deborah von Arx, Dr Michael Thomann, Johanna Obrecht, und Markus Sobaszkiewicz. 2015. „PAK im Belebtschlammbecken Elimination von Mikroverunreinigungen in der ARA mit Pulveraktivkohle im Belebtschlammbecken“. Forschungsbericht. Rapperswil, CH.
- Grotehusman, Dieter, Matthias Uhl, Stephan Fuchs, und Benedikt Lambert. 2015. „Retentionsbodenfilter - Handbuch für Planung, bau und Betrieb, aktualisierte 2. Auflage“. Düsseldorf.
- Gschößl, T, J Neustifter, N Jablonowski, U Raeder, und P Schröder. 2005. „Bepflanzte Bodenfilter zum Rückhalt endokrin wirksamer Substanzen und Sekundärbelastungen im Ablauf von Abwasserteichen“. In . Dresden.
- Hillenbrand, Thomas, Felix Tettenborn, Eve Menger-Krug, Frank Marscheider-Weidmann, Stephan Fuchs, Snezhina Tochovski, Steffen Kittlaus, u. a. 2014. „Maßnahmen zur Verminderung des Eintrages von Mikroschadstoffen in die Gewässer“. TEXTE 85/2014. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Hollert, Henner, Tilman Floehr, und Sibylle Maletz. 2013. „Ökotoxikologische Bewertung von Spurenstoffen — Konzeptionelle Ansätze und eine Fallstudie zur Überprüfung der Abwasserreinigungseffizienz weiterführender Abwasserbehandlungsmethoden bezüglich endokriner Schadstoffe“. In *46. Essener Tagung „Ressourcenschutz als interdisziplinäre Aufgabe“*, herausgegeben von Johannes Pinnekamp. Gewässerschutz - Wasser - Abwasser 232. Aachen.
- Jones, Oliver A. H., Pat G. Green, Nikolaos Voulvoulis, und John N. Lester. 2007. „Questioning the Excessive Use of Advanced Treatment to Remove Organic Micropollutants from Wastewater“. *Environmental Science & Technology* 41 (14): 5085–89. <https://doi.org/10.1021/es0628248>.
- Joost, Lena. 2014. „Mikroplastik- Stichprobenhafte Untersuchungen zum Vorkommen in ausgewählten Kläranlagen-Abflüssen“.
- Joss, Adriano, und Thomas Ternes. 2008. *Human Pharmaceuticals, Hormones and Fragrances: The Challenge of Micropollutants in Urban Water Management*. London [u.a.]: IWA Publ.
- Judd & Judd, S. o. J. „Membrane Bioreactor MBR | The MBR Site“. Zugriffen 11. Mai 2018. <http://www.thembrsite.com/>.
- Knopp, Gregor, Fei Yang, und Peter Cornel. 2016. „Elimination von Mikroverunreinigungen aus biologisch gereinigtem Kommunalabwasser mittels kombinierter Membran- und Aktivkohleabsorptionsverfahren“. *GWF Wasser - Abwasser*, Nr. 1/2016 (Januar): 46–59.
- KOM-M NRW. 2016. „Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination, 2. Auflage“. Herausgegeben von ARGE Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW, Köln.

- KOM-M NRW. 2018. „Das Kompetenzzentrum“. Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe NRW. 2018. <http://www.masterplan-wasser.nrw.de/das-kompetenzzentrum/>.
- „Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg“. o. J. <http://www.koms-bw.de/>.
- Langlais, Bruno, David A. Reckhow, Deborah R. Brink, AWWA Research Foundation, und Compagnie générale des eaux (Paris, France), Hrsg. 1991. *Ozone in water treatment: application and engineering: cooperative research report*. Chelsea, Mich: Lewis Publishers.
- Meckes, J., S. Metzger, und H. Kapp. 2014. „Untersuchungen zum Spurenstoffbindungsverhalten von Pulveraktivkohle unter anaeroben Bedingungen“. Abschlussbericht UM-Vorhabennr. 352/2013. http://koms-bw.de/pulsepro/data/img/uploads/Bericht%20PAC_Faulung_Desorption.pdf.
- Mertens, Franz Michael, Ekkehard Christoffels, Christiane Schreiber, und Thomas Kistemann. 2012. „Rückhalt von Arzneimitteln und Mikroorganismen am Beispiel des Retentionsbodenfilters Altendorf“. *Korrespondenz Abwasser Abfall, GFA, Hennef*. http://www.bueroberg.com/newsletter/ka_122012_RBF_Altendorf.pdf.
- Metzger, Steffen. 2010. „Einsatz von Pulveraktivkohle zur weitergehenden Reinigung von kommunalem Abwasser – Verfahrenstechnische, betriebliche und ökonomische Aspekte bei der Entfernung von Spurenstoffen“. Oldenbourg Industrieverlag München.
- Mintenig, Svenja, Ivo Int-Veen, Martin Löder, und Gunnar Gerds. 2014. „Mikroplastik in ausgewählten Kläranlagen des Oldenburgisch- Ostfriesischen Wasserverbandes (OOWV) in Niedersachsen Probenanalyse mittels Mikro-FTIR Spektroskopie“. Abschlussbericht. Helgoland: Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) Biologische Anstalt Helgoland.
- Nafo, Issa. 2017. „Spurenstoffe in der Abwasserbehandlung“. gehalten auf der tag der Wasserwirtschaft, Magdeburg, November 9. http://www.wasserverbandstag.de/fileadmin/user_upload/Intern/Tagungen/Sonstige/2017-11-09_Vortrag_Herr_Dr._Nafo__Spurenstoffe_.pdf.
- NDR. o. J. „Plastik in der Schlei: Streit um Verantwortung“. Zugegriffen 26. April 2018. [/nachrichten/schleswig-holstein/Plastik-in-der-Schlei-Streit-um-Verantwortung,plastik192.html](http://nachrichten/schleswig-holstein/Plastik-in-der-Schlei-Streit-um-Verantwortung,plastik192.html).
- Neugut. o. J. „ARANEugut - Der Weg zu sauberem Wasser“. Zugegriffen 3. Mai 2018. <http://www.neugut.ch/>.
- Nguyen, Luong N., Faisal I. Hai, Jinguo Kang, William E. Price, und Long D. Nghiem. 2013. „Coupling Granular Activated Carbon Adsorption with Membrane Bioreactor Treatment for Trace Organic Contaminant Removal: Breakthrough Behaviour of Persistent and Hydrophilic Compounds“. *Journal of Environmental Management* 119 (April): 173–81. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.01.037>.
- O'Shea, Kevin E., und Dionysios D. Dionysiou. 2012. „Advanced Oxidation Processes for Water Treatment“. *The Journal of Physical Chemistry Letters* 3 (15): 2112–13. <https://doi.org/10.1021/jz300929x>.
- „Ozon - VSA Micropoll“. o. J. Zugegriffen 11. Mai 2018. <https://www.micropoll.ch/anlagen-projekte/ozon/>.
- Petrie, Bruce, Ruth Barden, und Barbara Kasprzyk-Hordern. 2015. „A Review on Emerging Contaminants in Wastewaters and the Environment: Current Knowledge, Understudied Areas and Recommendations for Future Monitoring“. *Water Research* 72 (April): 3–27. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.08.053>.
- Pinnekamp, Johannes, und Catrin Bornemann. 2012. „Ertüchtigung kommunaler Kläranlagen, insbesondere kommunaler Flockungsfiltrationsanlagen durch den Einsatz von Aktivkohle (MIKROFlock)“. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben Projekt Nr. 5 AZ IV 7 042 600 001E. Aachen: MUNLV NW.
- Rößler, Anette, und Steffen Metzger. 2015. „Untersuchungen zur Spurenstoffelimination mittels simultaner Pulveraktivkohledosierung auf der ARA Schönaun – Abschlussbericht – im Auftrag des Gewässerschutzverbands der Region Zugersee-Küssnachtersee-Ägerisee, Cham“. Stuttgart.

- https://www.micropoll.ch/fileadmin/user_upload/Redaktion/Dokumente/01_Berichte/02_Technische_Verfahren/03_Aktivkohle/150626_Untersuchungen_zur_Simultandosierung_ARA_Sch%C3%B6nau.pdf.
- Rundschau, Frankfurter. o. J. „Umwelt: Plaste im Fluss“. Frankfurter Rundschau. Zugriffen 26. April 2018. <http://www.fr.de/wirtschaft/umwelt-plaste-im-fluss-a-1471855>.
- Satyawali, Yamini, und Malini Balakrishnan. 2009. „Performance enhancement with powdered activated carbon (PAC) addition in a membrane bioreactor (MBR) treating distillery effluent“. *Journal of Hazardous Materials* 170 (1): 457–65. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.04.074>.
- Schäfer, Heinrich, Christoph Brepols, und Norbert Engelhardt. 2013. „Innovative Energiekonzepte für die Kläranlagen des Erftverbandes“. *wasserwirtschaft - wassertechnik WWT* Modernisierungs Report (2013/14): 31–35.
- Schatz, Regine, und Martina Hanke. 2016. „Kläranlage Weißenburg Pilotprojekt 4. Reinigungsstufe Planung der ersten großtechnischen 4. Reinigungsstufe in Bayern mit Ozonung und zweistraßiger Nachbehandlung auf der Kläranlage Weißenburg“. Düsseldorf, September 20. http://www.masterplan-wasser.nrw.de/fileadmin/user_upload/Aktuell/Veranstaltungsdokumentation/Bericht_2016_ArzneimittelundMikroschadstoffe/00_PDF_-_Vortraege/6-3-Hanke.pdf.
- Sperlich, A., und R. Gnirß. 2016. „Forschungsergebnisse zur weitergehenden Abwasserreinigung (Teil 2)“. *WWT wasserwirtschaft wassertechnik*, Juni. <http://www.wwt-online.de/sites/default/files/fachartikel/wwt0616-aw-gnirss-t2.pdf>.
- Schreiber, Christiane, Zacharias Nicole. 2015. „Fünfzehn Jahre transdisziplinäre Forschung zur Gewässerhygiene im Einzugsgebiet der Swist“. *KW - Korrespondenz Wasserwirtschaft*, Nr. 10 (Oktober): 606–612. <https://doi.org/10.3243/kwe2015.10.001>.
- tagesschau.de. o. J. „Gefährliche Keime in Gewässern entdeckt“. tagesschau.de. Zugriffen 26. April 2018. <https://www.tagesschau.de/inland/keime-103.html>.
- Ternes, Thomas, und Adriano Joss, Hrsg. 2008. *Human Pharmaceuticals, Hormones and Fragrances: The Challenge of Micropollutants in Urban Water Management*. Reprinted. London: IWA Publ.
- Ternes, Thomas, Adriano Joss, und Jörg Oehlmann. 2015. „Occurrence, Fate, Removal and Assessment of Emerging Contaminants in Water in the Water Cycle (from Wastewater to Drinking Water)“. *Water Research* 72 (April): 1–2. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.02.055>.
- UBA, Hrsg. 2015. „Organische Mikroverunreinigungen in Gewässern Vierte Reinigungsstufe für weniger Einträge - Positionspapier“. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- UBA 2018. „Empfehlungen zur Reduzierung von Mikroverunreinigungen in den Gewässern“. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- Wu, Haiming, Jian Zhang, Huu Hao Ngo, Wenshan Guo, Zhen Hu, Shuang Liang, Jinlin Fan, und Hai Liu. 2015. „A Review on the Sustainability of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Design and Operation“. *Bioresource Technology* 175 (Januar): 594–601. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.068>.
- Zhang, Dong Qing, K.B.S.N. Jinadasa, Richard M. Gersberg, Yu Liu, Wun Jern Ng, und Soon Keat Tan. 2014. „Application of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Developing Countries – A Review of Recent Developments (2000–2013)“. *Journal of Environmental Management* 141 (August): 116–31. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.03.015>.
- Zubrod, Jochen P., Dominic Englert, Simon Lüderwald, Sandra Poganiuch, Ralf Schulz, und Mirco Bundschuh. 2017. „History Matters: Pre-Exposure to Wastewater Enhances Pesticide Toxicity in Invertebrates“. *Environmental Science & Technology* 51 (16): 9280–87. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b01303>.