

Machbarkeitsstudie zur Spurenstoffelimination

auf dem

Gruppenklärwerk Kirspenich

Kurzfassung



Gefördert vom:

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 von:

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	19
4.1	Vorhandene Kläranlage.....	19
4.1.1	Verfahrenstechnik	21
4.1.2	Aktuelle Reinigungsanforderungen.....	21
4.2	Verfahrensauswahl für das GWK Kirspenich	22
4.3	Auslegungswerte der 4. Reinigungsstufe	23
4.4	Neuerrichtung PAK-Dosierung mit gemeinsamem Schlammkreislauf.....	26
4.5	Neuerrichtung Ozonbehandlung mit Nachbehandlung durch Sandfilter	28
5	Kostenermittlung und Variantenvergleich	32
5.1	Kostenansätze	32
5.2	Variantendiskussion und Verfahrensempfehlung.....	32
5.3	Variantenvergleich Vollstrombehandlung	34
5.4	Variantenvergleich Teilstrombehandlung.....	35
6	Betrachtung des Gewässers und sonstiger Umweltwirkungen.....	39
6.1	Ökologische Betrachtung des Gewässers	39
6.2	Erfordernis zur Mikroschadstoffelimination aus ökologischer Sicht	40
7	Fazit	42
8	Literaturverzeichnis	45

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 des GWK Kirspenich.....	14
Abbildung 5: Häufigkeitsverteilung der Tageszuflüsse für das Jahr 2015, GWK Kirspenich..	15
Abbildung 6: Erweiterungsflächen für die 4. Reinigungsstufe	20
Abbildung 7: gemessene Zulaufmengen des GWK Kirspenich mit bei Teilstrombehandlung behandeltem (blau) und nicht behandeltem Anteil (rot)	25
Abbildung 8: Lageskizze PAK-Dosierung (Vollstrom)	26
Abbildung 9: Lageskizze Ozonbehandlung (Vollstromverfahren)	29
Abbildung 10: Prinzipskizze Ozon-Kontaktreaktor	30
Abbildung 11: Lageskizze Ozonbehandlung (Teilstrom)	31
Abbildung 12: Technische Bewertung der untersuchten Verfahren.....	33
Abbildung 13: Behandelte Wassermenge und Bypassmenge bei der Teilstrombehandlung .	36
Abbildung 14: Vergleich Diclofenac-Ablaufkonzentrationen Vollstrom- vs. Teilstrombehandlung	37

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 des GWK Kirspenich	16
Tabelle 4: Konzentrationen der 7 Leitparameter in Zu- und Ablauf sowie im Gewässer.....	17
Tabelle 5: Auswahl von Verfahren für das GWK Kirspenich	22
Tabelle 6: Variantenvergleich Vollstromverfahren.....	34
Tabelle 7: Kostenvergleich Teilstromvarianten	38

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	-
GWK	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 dem Gruppenklärwerk Kirspenich 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 Sumpfungswässern, die aus den Tagebauen des rheinischen Braunkohlereviere stammen und die ein Vielfaches der natürlichen Wasserführung ausmachen. Durch die tagebaubedingten Grundwasserabsenkungen fehlt hier ebenfalls ein Kontakt zum Grundwasserleiter. Dies macht sich vor allem dadurch bemerkbar, dass einige Nebengewässer der Erft überwiegend durch Kühlwassereleitungen 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 Feldfrüchten und insbesondere Zuckerrüben 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 über 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 Gewässergütesimulationen 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 übrigen 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	Ausbaugröße [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 Entwässerungsgraben, 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 Flammenschutzmittel 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.

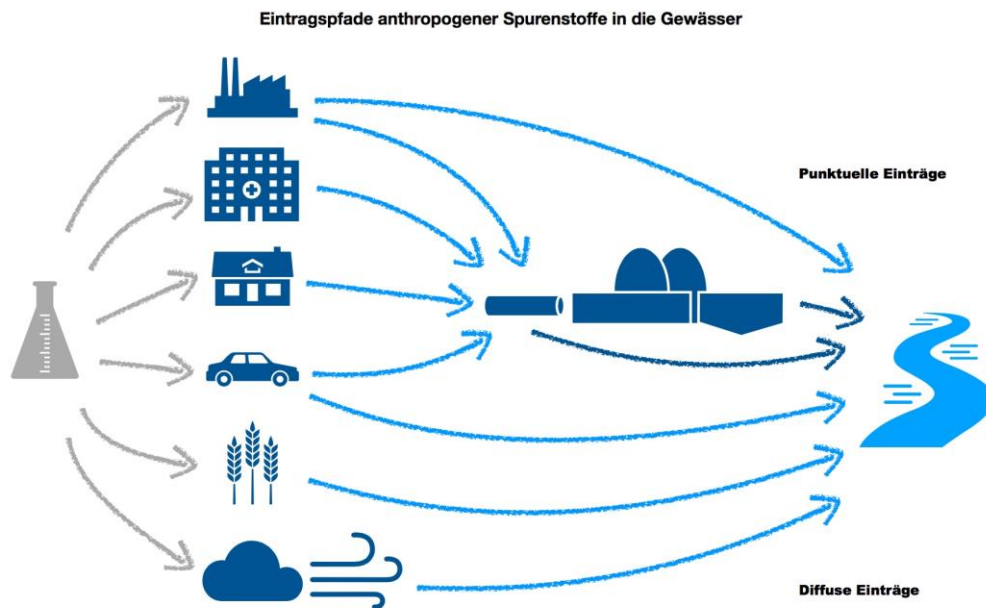


Abbildung 2: Eintragungspfade anthropogener Spurenstoffen in die Gewässer

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 Umweltrisikobewertung 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.

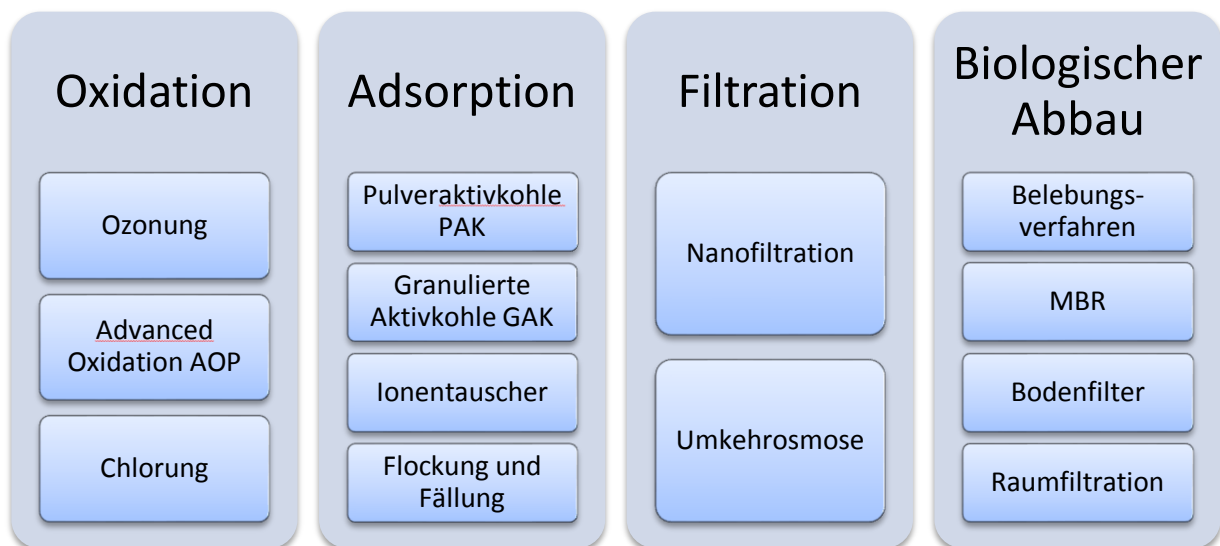


Abbildung 3: Verfahren der Spurenstoffentfernung aus Abwasser

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 Schönau (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	GWK 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 Einzugsgebiet der Kläranlage und Abwassereigenschaften

3.1 Beschreibung des Einzugsgebiets

Das GWK Kirspenich liegt nördlich der Ortslage Kirspenich, Stadt Bad Münstereifel.

Das Einzugsgebiet umfasst die Ortsteile Langscheid, Schönau, Mahlberg, Witscheiderhof, Weißenstein, Bergrath, Hohn, Kolvenbach, Eicherscheid, Gilsdorf, Nöthen, Bad Münstereifel, Rodert, Eschweiler, Iversheim, Arloff und Kirspenich (alle: Stadt Bad Münstereifel) sowie die Ortslage Pesch der Gemeinde Nettersheim. Der Zufluss zur Betriebsstelle erfolgt über den Hauptsammler der Ortslage Kirspenich.

Der überwiegende Teil der angeschlossenen Einwohnerwerte wird im Mischsystem entwässert.

Das Einzugsgebiet des GWK Kirspenich ist ländlich geprägt und weist bis auf die Stadt Bad Münstereifel oftmals dörfliche Strukturen auf.

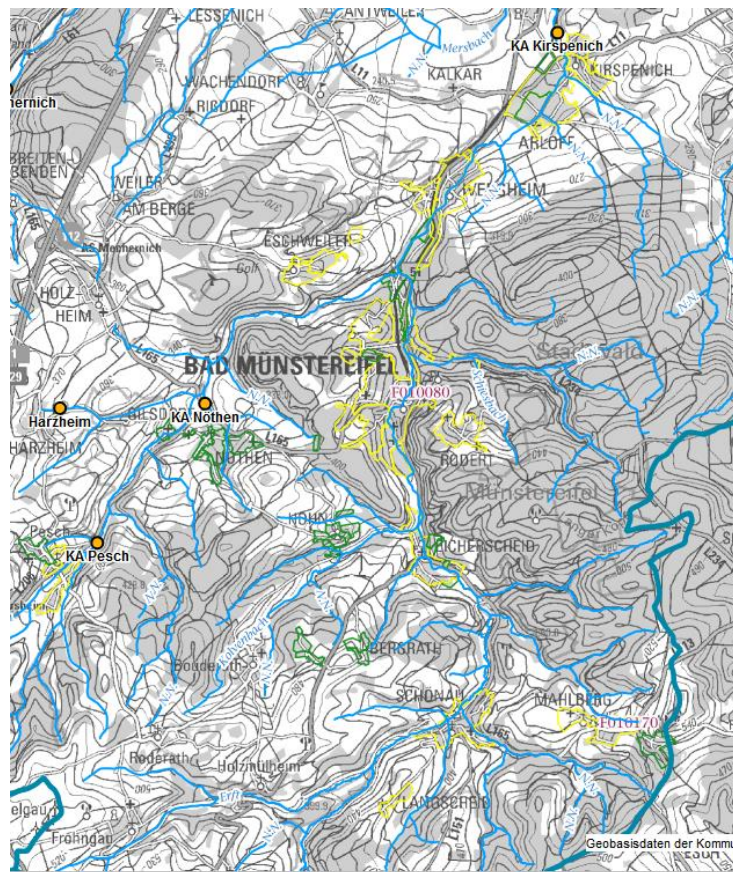


Abbildung 4: Einzugsgebiet des GWK Kirspenich

3.2 Abwassermenge und Zuflußcharakteristik

In den Jahren 2012 bis 2016 wurden im Mittel folgende Wassermengen behandelt.

Jahresabwassermenge: 2.565.659 m³/a
Jahresschmutzwassermenge: 2.053.358 m³/a

Bei Trockenwetter bewegt sich der Zufluss zur Kläranlage in einer Größenordnung von 4.000 m³/d bis 7.000 m³/d. Der maximale Zufluss bei Regenwetter betrug 2015 rund 18.000 m³/d

Aus der Häufigkeitsverteilung der Tageszuflüsse lässt sich allerdings keine klare Trennung zwischen Regenwetter und Trockenwetterzuflüssen ablesen. Dies ist durch den Fremdwasseranteil am Zufluss des GWK Kirspenich zu erklären, der mit ca. 65% deutlich höher als der Durchschnitt der Kläranlagen des Erftverbandes liegt (21%).

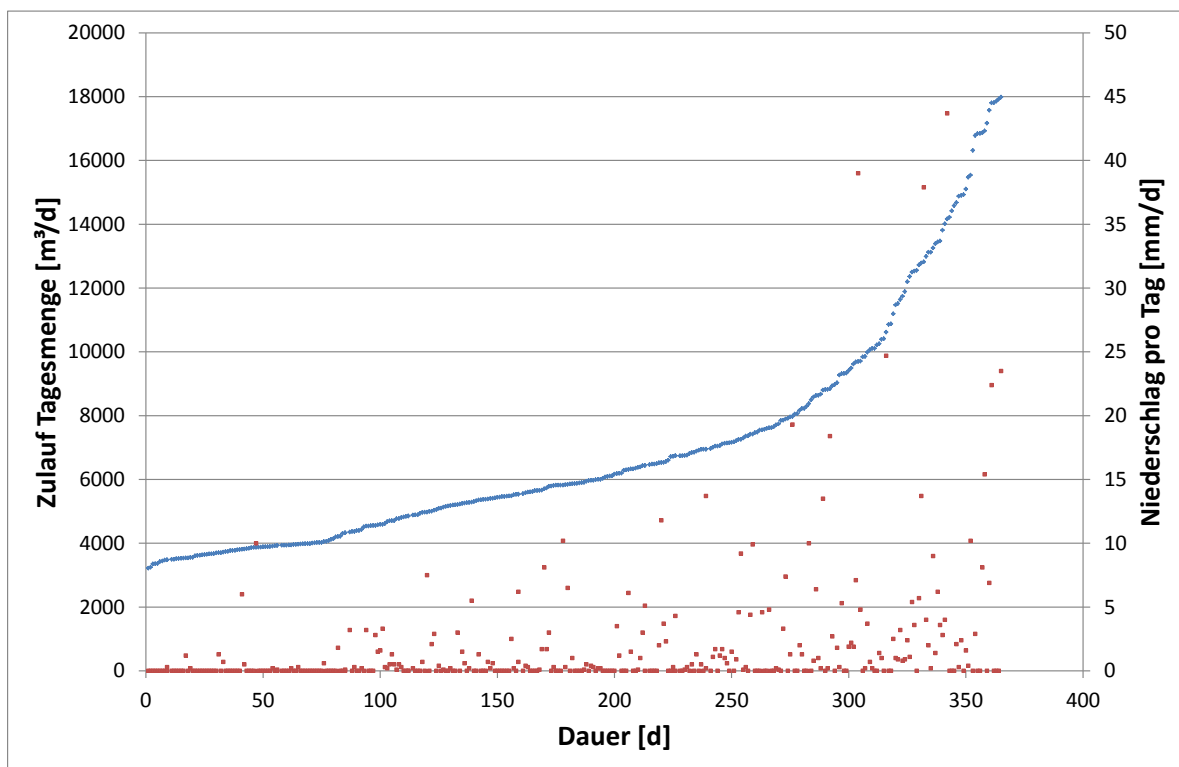


Abbildung 5: Häufigkeitsverteilung der Tageszuflüsse für das Jahr 2015, GWK Kirspenich

3.3 Abwasserzusammensetzung

Aufwand und Erfolg einer Mikroschadstoffelimination hängen, unter anderem von der Vorreinigung des Abwassers ab. Hohe Hintergrundbelastungen stören sowohl die Adsorption an Aktivkohle als auch die Oxidation mit Ozon.

Daher wird hier zunächst die Ablaufqualität der Kläranlage betrachtet, die den Zulauf zu einer nachgeschalteten Mikroschadstoffelimination darstellt.

Lt. Aussage des Betriebes bestehen keine Probleme mit Schlammabtrieb aus den Nachklärbecken. Dieser Befund sollte vor der Konkretisierung einer Planung mit einem Sondermessprogramm gestützt werden.

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. 130 Proben von Trockenwettertagen aus dem Zeitraum 2011-2016 ausgewertet.

Die Ergebnisse der statistischen Auswertung sind in Tabelle 3 dargestellt

Tabelle 3: Auswertung der Ablaufkonzentrationen des GWK Kirspenich

GWK 56 Kirspenich

			15%-Wert	Median	85%-Wert
pH-Wert (Vor-Ort-Messung)	pH.vO		7,4	7,5	7,7
Leitfähigkeit (Vor-Ort-Messung)	LF.vO	µS/cm	821,5	893,0	940,5
CSB, homogenisiert	CSB.h	mg/l	15,0	15,0	19,0
TOC, homogenisiert	TOC.h	mg/l	4,4	5,2	5,6
CSB/TOC			2,6	3,2	3,8
Ammonium-Stickstoff	NH4-N	mg/l	0,1	0,1	0,4
Stickstoff, gesamt (TNb)	TNb	mg/l	5,0	7,0	10,9
Phosphor, gesamt	P.g	mg/l	0,1	0,2	0,3
Orthophosphat-Phosphor (gelöst)	o-PO4-P.f	mg/l	0,05	0,12	0,17
Säurekapazität (pH 4.3)	kS4_3	mmol/l	3,0	3,3	3,7
Temperatur Biologie	TB	° C	10,8	12,6	16,2
Nitrit-Stickstoff	NO2-N	mg/l	0,1	0,1	0,1
Nitrat-Stickstoff	NO3-N	mg/l	3,7	5,9	9,9
Nges. i.S.d. AbwV, berechnet	N.AbwV	mg/l	4,0	6,1	10,3
Chlorid	Cl	mg/l	111,0	127,0	140,0
Sulfat	SO4	mg/l	53,3	58,8	73,1

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. Die ausgewerteten Ablaufmessungen geben keinen Hinweis auf Nitritbildung in der Belebung.

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 des GWK Kirspenich 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 = 5,2 mg/l
NO₂-N = 0,1°mg/l

Aus den gefundenen Konzentrationen der Standard Abwasserparameter 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 des GWK Kirspenich 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: Konzentrationen der 7 Leitparameter in Zu- und Ablauf sowie im Gewässer

Spurenstoffe (7- Leitparameter)	Zulauf KA	Ablauf KA			Alle KA Abläufe	Oberhalb Einleitung	Unterhalb Einleitung	Bewertungskriterium µg/L
	mittel µg/L	min µg/L	mittel µg/L	max µg/L	mittel µg/L	mittel µg/L	mittel µg/L	
1H-Benzotriazol	4,93	0,80	3,82	5,90	5,95	0,02	0,82	10,00
Carbamazepin	0,24	0,11	0,26	0,47	0,67	0,00	0,02	0,50
Clarithromycin	0,12	0,00	0,10	0,36	0,29	0,00	0,00	0,10
Diclofenac	1,41	0,28	1,04	1,50	2,13	0,03	0,19	0,05
Metoprolol	0,81	0,09	0,78	1,30	1,46	0,00	0,14	7,30
Sotalol	0,21	0,05	0,20	0,30	0,31	0,00	0,02	0,10
Sulfamethoxazol	0,02	0,00	0,16	0,48	0,19	0,00	0,02	0,60

Mit Blick auf die sieben Leitparameter kann festgestellt werden, dass sich die Konzentrationen von Spurenstoffen im Ablauf des GWK Kirspenich etwas unter dem üblichen Niveau für den Ablauf kommunaler Kläranlagen bewegen. Die mittleren Konzentrationen im Zu- und im Ablauf des GWK Kirspenich liegen für alle sieben Leitparameter unter den mittleren Ablaufkonzentrationen der betrachteten Anlagen im Erft Einzugsgebiet. Eine mögliche Erklärung für diese relativ niedrigen Zu- und Ablaufkonzentrationen ist der erhöhte Fremdwasseranteil im Einzugsgebiet des GWK Kirspenich. Während der durchschnittliche Fremdwasseranteil im Erft Einzugsgebiet 21% beträgt muss ist der Anteil auf dem GWK Kirspenich ca. 65%. Das mutmaßlich gering belastete Fremdwasser führt so zu einer Verdünnung des Schmutzwassers.

Oberhalb der Einleitstelle des GWK Kirspenich besteht nur eine sehr geringe Vorbelastung der Erft mit Mikroschadstoffen. Aufgrund der geringen natürlichen Wasserführung schwacher Verdünnungseffekt im Gewässer zu beobachten. Dennoch erreicht in der Erft unterhalb der KA-Einleitung nur Diclofenac mittlere Konzentrationen über dem Bewertungskriterium. Alle anderen Leitparameter liegen um ein Vielfaches unter ihrem Bewertungskriterium. Hierbei handelt es sich nicht um Grenzwerte sondern um sogenannte „Orientierungswerte“ oder „präventive Vorsorgewerte“, sodass hieraus kein Handlungsbedarf abzuleiten ist.

Insgesamt stellt das GWK Kirspenich dennoch eine wichtige Punktquelle für Mikroschadstoffemissionen in der oberen Erft dar, obwohl die Belastung des Kläranlagenablaufs im Vergleich mit anderen Anlagen des Erftverbandes eher unterdurchschnittlich ist.

Eine 4. Reinigungsstufe könnte als End-of-Pipe Lösung die Emissionen von Mikroschadstoffen in die Erft deutlich reduzieren. Allerdings ist das GWK Kirspenich zu klein, um eine merkliche Minderung für das gesamte Erfteinzugsgebiet zu erreichen. Nach ca. 11 km Fließstrecke leitet das mit 132.000 EW wesentlich größere GWK Kessenich in die Erft ein. Unterhalb dieser Einleitung wird der Einfluss des GWK Kirspenich durch die Frachten aus der größeren Kläranlage deutlich überprägt.

4 Ausarbeitung von technischen Anlagenkonzepten

4.1 Vorhandene Kläranlage

Das GWK Kirspenich wurde 1992 als A-B-Anlage mit zweistufigem Belebungsverfahren in Betrieb genommen. Zwischenzeitlich wurde das Belebungsverfahren auf das klassische, einstufige Belebungsverfahren umgestellt um eine bessere Denitrifikation zu ermöglichen.

Der Kläranlage ist ein Schneckenpumpwerk vorgelagert, dass bis zum maximal zulässigen Mischwasserzufluss von 222 l/s den Zulauf in das Rechengebäude hebt. Die darüber hinausgehende Wassermenge wird ebenfalls mit einem Pumpwerk in das auf dem Kläranlagengelände befindliche RÜB umgeleitet.

Die mechanische Reinigungsstufe der Kläranlage Rheinbach besteht aus zwei Trommelsieben, einem belüfteten Sand-/Fettfang sowie der Vorklärung in zwei parallelen Rechteckbecken.

Nach der Vorklärung fließt das Wasser der biologischen Reinigungsstufe zu, die nach dem einstufigen Belebtschlammverfahren mit vorgeschalteter Denitrifikation arbeitet. Die Belüftung der Nitrifikationsbecken erfolgt intermittierend. Die Nachklärung ist mit zwei vornehmlich vertikal durchflossenen Trichterbecken und einem horizontal durchströmten Rundbecken ausgerüstet. Nach der Nachklärung wird das biologisch gereinigte Abwasser mit einem Zwischenpumpwerk einer Flockungsfiltration zugeführt. Hier wird dem Abwasser FeCl_3 als Flockungsmittel zu dosiert, bevor es von oben nach unten durch einen Sandfilter fließt. Das filtrierte Wasser enthält nahezu keine abfiltrierbaren Stoffe und fließt über den Ablaufschacht und das Einleitbauwerk der Erft zu (siehe auch Kapitel 4.1.1).

Belastungssituation und zukünftige Auslastung

Von insgesamt 11.477 angeschlossenen Einwohnern werden 10.054 durch eine Mischkanalisation, 1423 durch eine Trennkanalisation entwässert. Der Zufluss aus gewerblichen Indirekteinleitungen beträgt ca. 8000 Einwohnergleichwerte, womit sich die Anschlussgröße auf 19.477 Einwohnerwerte beläuft. Die Auslastung der für 27.000 Einwohnerwerte ausgebauten Kläranlage beträgt damit etwa 72 %

Mögliche Flächen für eine Erweiterung

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

Auf dem Betriebsgelände des GWK Kirspenich stehen eine Erweiterung nur sehr kleine Flächen im Bereich der bestehenden Vorklärung zur Verfügung. Diese Flächen werden in Abbildung 6 blau dargestellt. Die Möglichkeiten zur Errichtung einer 4. Reinigungsstufe sind in diesem Bereich allerdings sehr begrenzt und auch die Lage der Fläche im Bereich der Vorklärung ist im Hinblick auf die übliche Anordnung der Mikroschadstoffelimination zwischen Nachklärung und Filtration nicht ideal.

Auch die Möglichkeiten zur Erweiterung des Betriebsgeländes sind begrenzt. Im Norden begrenzt ein asphaltierter Wirtschaftsweg das Anlagengelände und das Gelände steigt steil an. Auf der westlichen Seite grenzt direkt die Bahnlinie Euskirchen - Bad Münstereifel an das Betriebsgelände, dahinter fließt die Erft. Östlich ist wird das Kläranlagengelände durch die Zufahrtsstraße und einen steil ansteigenden Hang begrenzt. Eine Erschließung der westlich,

nördlich und östlich gelegenen Acker- und Waldflächen als Erweiterungsfläche ist daher wirtschaftlich nicht darstellbar.

Südlich des Kläranlagengeländes könnte eine Fläche erschlossen werden, die wiederum am südwestlichen Rand durch die Erft begrenzt wird (blau schraffiert). Trotz der Nutzung als Ausgleichsfläche und der zumindest teilweisen Lage im Überschwemmungsgebiet der Erft und des abschüssigen Geländes in diesem Bereich ist diese Fläche die einzige realistische Möglichkeit zur Erweiterung des Kläranlagengeländes. Die Fläche ist jedoch auf der Zulaufseite der Kläranlage und für die Errichtung einer 4. Reinigungsstufe denkbar ungünstig gelegen. Hierfür müsste das Abwasser entweder über das gesamte Kläranlagengelände zur Mikroschadstoffelimination hin und anschließend zur Filtration zurückgeführt, oder eine neue Nachbehandlungsstufe und Einleitstelle in die Erft errichtet werden.

Aus den vorgenannten Gründen werden in der vorliegenden Studie ausschließlich Varianten betrachtet, die auf der kleinen Freifläche auf dem Kläranlagengelände realisierbar sind.



Abbildung 6: Erweiterungsflächen für die 4. Reinigungsstufe

Klärschlamm Entsorgung

Der Klärschlamm des GWK Kirspenich 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.

4.1.1 Verfahrenstechnik

Die Anlage umfasst heute folgende Anlagenteile:

- Trennbauwerk / RÜB
 - Trennbauwerk mit Grobrechen (Stababstand 120 mm)
 - Zulaufpumpwerk RÜB 3 + 1 Pumpen, je 800 l/s
 - RÜB mit 3 rechteckigen Kammern, $V_{\text{ges}} = 5059 \text{ m}^3$
- Zulaufpumpwerk
 - Schnecke 1 DN700 (12 – 50 l/s)
 - Schnecke 2 DN1.100
 - Schnecke 3 DN1.200
- Rechengebäude
 - 2 Trommelsiebrechen, Spaltweite 7 mm, $Q = \text{je } 500 \text{ m}^3$
- Belüfteter Sand-/ Fettfang
- Vorklärbecken
 - 1 Rechteckbecken $A = 120 \text{ m}^2$, $V = 243 \text{ m}^3$
 - 1 Rechteckbecken $A = 180 \text{ m}^2$, $V = 360 \text{ m}^3$
 - parallele Beschickung, Längsräume
- Belebungsbecken
 - Anaerobbecken, $V = 190 \text{ m}^3$
 - 2 Beckengruppen, je ca. 2020 m^3 , $V_{\text{ges}} = 4040 \text{ m}^3$
 - vorgeschaltete Deni, intermittierende Belüftung der Nitribecken
- Nachklärbecken
 - 2 Trichterbecken, vertikal durchströmt, $D = 12 \text{ m}$, $A = 113 \text{ m}^2$, $T_{2/3} = 10,5 \text{ m}$
 - 1 Rundbecken, horizontal durchströmt, $D = 28 \text{ m}$, $A = 609 \text{ m}^2$, $T_{2/3} = 3,0 \text{ m}$
- Flockungsfiltration, abwärts durchströmt
 - 6 Filterkammern je $A_{\text{Filter}} = 8,3 \text{ m}^2$, $A_{\text{ges}} = 50 \text{ m}^2$
 - Filteraufbau: 0,1 m Stüttschicht, 0,4 m Filtersand, 1,2 m Blähschiefer
 - Spülwasserspeicher, Schlammwasserspeicher
- Anaerobe Schlammbehandlung

4.1.2 Aktuelle Reinigungsanforderungen

Die Erlaubnis zur Einleitung von biologisch gereinigtem Abwasser und zur Einleitung von Mischwasser wurde am 03.07.95 unter dem Az.: 54.1-3.1-(4.1)-1.2-Beh durch die Bezirksregierung Köln erteilt.

Die Erlaubnis enthält folgende Überwachungswerte:

- CSB: 60 mg/l
- BSB5: 15 mg/l
- $\text{NH}_4\text{-N}$: 3 mg/l (bei $T \geq 5^\circ\text{C}$)
- Nges: 18 mg/l (01.05. – 31.10.)
- Pges: 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 das GWK Kirspenich

Zunächst wurde auf Grundlage der verfügbaren Verfahren zur Mikroschadstoffelimination (siehe Kapitel 2) und den örtlichen Gegebenheiten auf des GWK Kirspenich eine Vorauswahl an Verfahren zusammengestellt.

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

Tabelle 5: Auswahl von Verfahren für das GWK Kirspenich

Verfahren	Erforderliche Anlagentechnik
PAK-Dosierung in die Belebung mit gemeinsamen Schlammkreislauf (immer Vollstrombehandlung!)	PAK Lager und Dosierstation im Bereich Zulauf Biologie Vorhandene Filtration als Nachbehandlung
PAK-Dosierung vor vorhandene Flockungsfilter (immer Vollstrombehandlung)	PAK Lager und Dosierstation im Bereich Filtration Vorhandene Filtration als Nachbehandlung
PAK-Dosierung mit separatem Schlammkreislauf	Neuerrichtung PAK Lager und Dosierstation; Kontaktbecken und Sedimentationsbecken auf Freiflächen Vorhandene Filtration als Nachbehandlung
GAK Filtration in zusätzlicher Filterstufe	Neuerrichtung GAK-Filteranlage auf Freiflächen Evtl. vorhandene Filtration als Vorbehandlung
GAK Filtration in vorhandenen Flockungsfiltern	Umrüstung und evtl. Erweiterung der vorhandenen Filtration
Ozon Behandlung	Neuerrichtung Sauerstofftank, Ozonerzeuger, Ozonreaktor und Steuerungstechnik Vorhand. Filtration als Nachbehandlung

Die ersten zwei Verfahrensvarianten eliminieren Mikroschadstoffe mittels Pulveraktivkohle, die entweder in die Belebung (vergleichbar mit einer Simultanfällung), oder in den Zulauf der vorhandenen Flockungsfiltration dosiert wird. Vorteil beider Verfahren sind die sehr geringen Investitionskosten und der Platzbedarf, da lediglich ein Lagersilo sowie die erforderliche Dosiertechnik für die PAK neu errichtet werden muss. Nachteilig ist bei der Dosierung von PAK in die Belebung die aufgrund der erhöhten Hintergrundbelastung höhere erforderliche Dosiermenge. Das GWK Kirspenich verfügt mit seiner relativ geringen Auslastung von 72% (Anschlussgröße/Ausbaugröße) noch über ausreichende Reserven in der Belebungsstufe, sodass ein ca. 20% höherer TS in Folge der PAK-Dosierung in Kauf genommen werden kann.

Die Dosierung von PAK in den Zulauf der Filter wurde zwar in halbtechnischen- und Pilotversuchen erfolgreich getestet, es liegen jedoch wenige und keine Langzeiterfahrungen vor. Generell sind bei nicht idealen Randbedingungen häufige Filterspülungen und Störungen des normalen Filterbetriebs zu besorgen. Diese Variante bietet allerdings das Potential zur Einsparung von PAK gegenüber der PAK-Dosierung in die Biologie. Die Umsetzbarkeit mit der vorhandenen, eher knapp dimensionierten Sandfiltration sollte daher

mit Hilfe von Vorversuchen geprüft werden. Da sich die Variante in den Investitionskosten nicht wesentlich unterscheidet wird sie nachfolgend nicht als separate Variante betrachtet.

Bei den Vorgenannten Verfahrensvarianten kann keine echte Teilstrombehandlung vorgenommen werden. Daher wird an Stelle der Teilstrombehandlung eine Deckelung der Dosierung bei hohen Zulaufmengen und entsprechend niedrigen Zulaufkonzentrationen untersucht.

Aufgrund der extrem beengten Platzverhältnisse auf dem Kläranlagengelände und dem Mangel an möglichen Erweiterungsflächen wäre die Umsetzung flächenintensiver Verfahren wie der PAK-Dosierung mit separatem Schlammkreislauf und die GAK-Filtration in einer zusätzlichen Filterstufe nur mit enormem Aufwand zu realisieren. Daher werden sie nicht mehr detailliert betrachtet.

Eine Verfahrensstufe zur Behandlung des Abwassers mit Ozon erfordert nach bisherigem Kenntnisstand zwingend eine biologische Nachbehandlung zum Abbau unerwünschter Reaktionsprodukte. Diese kann durch die vorhandene Nachnitrifikation und Sandfiltration bereitgestellt werden. Der Aufwand für erforderliche Anlagentechnik ist demnach begrenzt und auf den vorhandenen Freiflächen realisierbar. Nachteilig sind der hohe Energieaufwand für die Ozonerzeugung und die noch unzureichend untersuchte Wirkung der Reaktions(neben)produkte. Dennoch sollen die technischen und wirtschaftlichen Aspekte des Verfahrens weiter untersucht werden.

Variante 1a: PAK-Dosierung mit gemeinsamem Schlammkreislauf, Neubau PAK- und FHM-Dosierstation (Vollstrom)

Variante 1b: PAK-Dosierung mit gemeinsamem Schlammkreislauf, Neubau PAK- und FHM-Dosierstation (Dosiermenge begrenzt)

Variante 2a: Neubau Ozonbehandlung (Vollstrom)

Variante 2b: Neubau Ozonbehandlung (Teilstrom)

4.3 Auslegungswerte der 4. Reinigungsstufe

Die Auslegungsziele einer 4. Reinigungsstufe sind bislang nicht abschließend geregelt, es gibt keine gesetzliche und verbindliche Reinigungsanforderung, die eine Mikroschadstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen notwendig machen. 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 danach 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 3.3).

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.

Maximale Mischwassermenge: $Q_m = 800 \text{ m}^3/\text{h}$

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 2015 und 2016 wurde $Q_{t,2h,max}$ ermittelt:

Abwassermenge bei Trockenwetter: $Q_{t,2h,max} = 289 \text{ m}^3/\text{h}$

Mit dieser Abwassermenge würde mit ca. 79% der Jahresschmutzwassermenge bereits ein sehr großer Teil des anfallenden Abwassers behandelt. Für die Behandlung von 80% der JAM ist folgende Behandlungskapazität erforderlich:

Abwassermenge für 80% JAM: $Q_{t,80\%} = 303 \text{ m}^3/\text{h} = Q_{bem,gewählt}$

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 des GWK Flerzheim beispielhaft in einem Zeitraum von drei Monaten. Es ist deutlich zu erkennen, dass die normalen Tagesschwankungen des Trockenwetterzulaufes bei einer Behandlungsmenge von $303 \text{ m}^3/\text{h}$ und darüber hinaus ein Teil des Mischwassergeschehens abgedeckt werden.

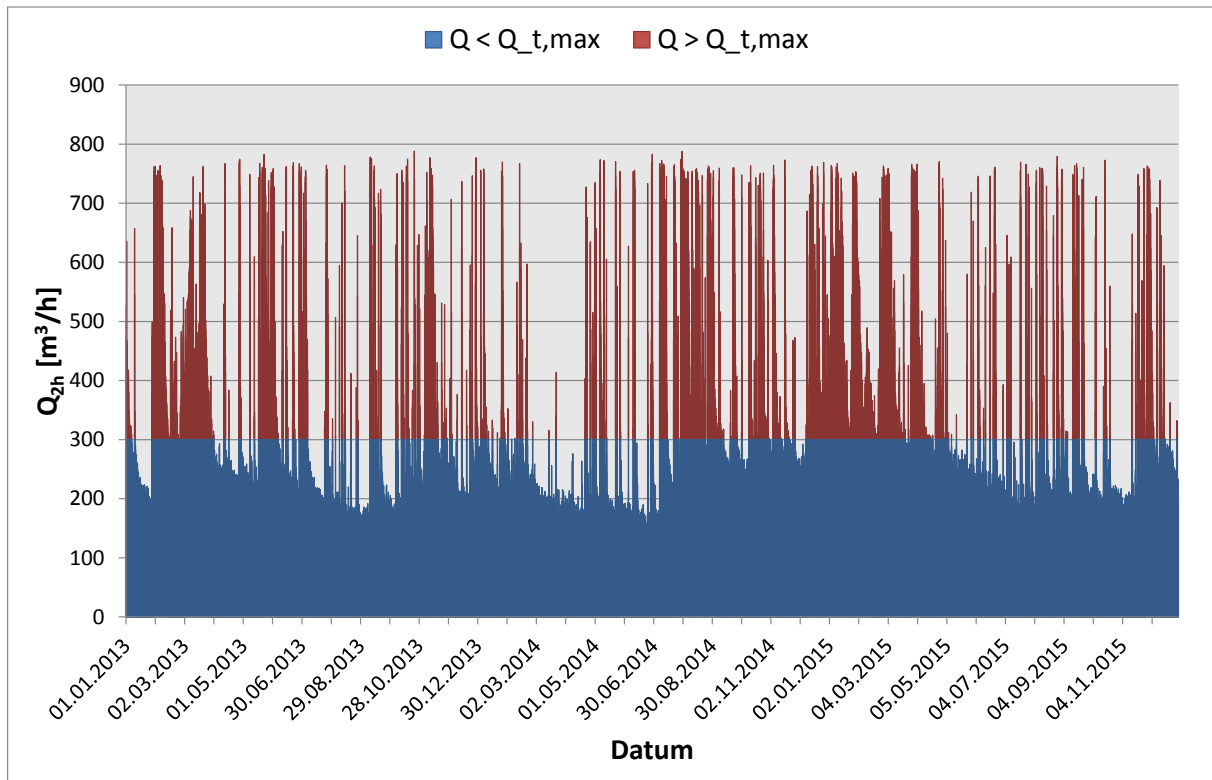


Abbildung 7: gemessene Zulaufmengen des GWK Kirspenich mit bei Teilstrombehandlung behandeltem (blau) und nicht behandeltem Anteil (rot)

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

$$\begin{aligned} \text{JAM} &= 2,565 \text{ Mio m}^3/\text{a} \\ \text{Q}_{\text{behandelt}} &= 0,8 * 1,985 \text{ Mio m}^3/\text{a} = 2,052 \text{ Mio m}^3/\text{a} \end{aligned}$$

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 NRW, 2016) vor, dass Abflussverhältnis MNQ (Gewässer) zur Jahresabwassermenge (Kläranlage) zu bestimmen.

Die Erft hat oberhalb des GWK Kirspenich nur eine geringe Wasserführung. Der Kläranlagenablauf stellt daher häufig über die Hälfte des Abflusses in der Erft unterhalb der Kläranlageneinleitung dar.

Für die Berechnung des Abwasseranteils im Gewässer wurde ein mittlerer Niedrigwasserabfluss (MNQ) von 122 l/s angesetzt. Das GWK Kirspenich behandelt eine Jahresabwassermenge (JAM) von ca. 2,6 Mio m³/a. Daraus ergibt sich ein Ablauf von 81 l/s im Jahresmittel (Q_{JAM}).

Das Verhältnis des Q_{JAM} zum MNQ beträgt somit ca. 67%.

Demnach wäre für den Ausbau des GWK Kirspenich gemäß der Empfehlung aus (KOM-M NRW, 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 Neuerrichtung PAK-Dosierung mit gemeinsamem Schlammkreislauf

Bei der Dosierung von PAK direkt in das Belebungsbecken wird die Aktivkohle in den Belebtschlamm eingebunden und gemeinsam mit ihm in der Nachklärung zurückgehalten. Im Gegensatz zu einer getrennten PAK-Stufe ist kein separater Schlammkreislauf mit Kontaktbecken und Sedimentationsbecken erforderlich. Die PAK-Dosiereinrichtung besteht aus einem Lagersilo und einer Wäge- und Befeuchtungseinrichtung, die eine PAK-Suspension erzeugt. Diese wird proportional zur Zulaufmenge in das Belebungsbecken dosiert. Als Dosierort bietet sich auf dem GWK Kirspenich der Übergang von der Denitrifikation zu den Nitrifikationsbecken an, da durch die höhere Turbulenz die Einmischung und Verteilung gefördert wird. Alternativ könnte auch der Zusammenfluss der Belebungsstraßen vor der Nachklärung als Dosierort getestet werden. Generell sollte die Dosierung eher im hinteren Bereich der Belebungsbecken erfolgen, um die dort geringere Hintergrundbelastung zu nutzen. Um gut absetzbare PAK-Flocken zu erhalten, muss in der Regel zusätzlich Flockungsmittel und Flockungshilfsmittel dosiert werden. Auch hierfür muss der optimale Dosierort am durch Versuche vor Ort bestimmt werden. Da ein Abtrieb von fein suspendierter PAK ausgeschlossen werden muss, ist zusätzlich eine Filtration als Nachbehandlung erforderlich. Hierfür kann die vorhandene Flockungsfiltration genutzt werden.



Abbildung 8: Lageskizze PAK-Dosierung (Vollstrom)

Das PAK-Lagersilo inkl. PAK-Dosiertechnik sowie eine Beton Fertigteilstation für die elektrotechnische Ausrüstung werden auf der Freifläche am Kopf der Vorklärbecken

errichtet. Im Maschinenhaus der Filtration ist bereits eine FM-Dosierstation für die Flockungsfiltration vorhanden, die allerdings das Ende Ihrer technischen Lebensdauer bereits erreicht hat. Daher werden für die PAK-Abtrennung neue FM- und FHM-Dosieranlagen in den vorhandenen Räumen des Filterhauses eingeplant.

Die Abwasserzusammensetzung der GWK Kirspenich ist vorwiegend durch häusliches Abwasser geprägt. Auch die Ablaufmessungen (insbesondere TOC) weisen nicht auf eine besonders ausgeprägte, organische Hintergrundbelastung hin. Allerdings ist die organische Hintergrundbelastung im Bereich der geplanten Dosierstelle (Übergang Deni zu Nitri oder Zusammenfluss der Belebungsstraßen) noch höher als im Ablauf der Filtration. Aufgrund der konkurrierenden Adsorption organischer Abwasserinhaltsstoffe sind bei dieser Verfahrensvariante höhere spezifische Dosiermengen als bei einer nachgeschalteten PAK-Stufe erforderlich. Die erforderliche spezifische Dosiermenge von PAK kann anhand von Literaturdaten auf zwischen 15 und 25 mg/l geschätzt werden (nachgeschaltet: 10-15 mg/l). Gewählt wurde für die weiteren Berechnungen ein Wert von 20 mg/l. Die Dimensionierung der Dosiereinrichtung ergibt sich aus der Spannbreite der zu behandelnden Wassermenge. Der Jahresverbrauch wird anhand der durchschnittlichen Zulaufmenge berechnet, die aus der JAM abgeleitet wird.

Bei der untersuchten Verfahrensvariante wird immer der gesamte Abwasserstrom behandelt (Vollstrom). Im Sinne eines wirtschaftlichen PAK-Einsatzes erscheint jedoch die Beibehaltung der spezifischen Dosiermenge auch bei Mischwasserzufluss ungünstig, da in diesem Fall sehr viel PAK dosiert wird obwohl der Zulauf zur Kläranlage stark verdünnt wird. In Pilotvorhaben wurde daher die Deckelung der Dosiermenge ab einer gewissen Zulaufmenge erprobt, die bei Mischwasserzufluss in einer geringeren spezifischen Dosiermenge resultiert. Die ersten Erfahrungen mit dieser Betriebsweise sind sehr positiv und es konnte kein deutlicher Anstieg der Ablaufkonzentrationen bei Mischwasserzufluss festgestellt werden. Die Betriebsweise mit gedeckelter Dosiermenge wird daher nachfolgend wie eine Teilstromvariante behandelt und parallel gerechnet. D.h. für diese Untervariante wird ab der in Kapitel 4.3 festgelegten Wassermenge für die Teilstrombehandlung ($303 \text{ m}^3/\text{h} = 84 \text{ l/s}$) die PAK-Dosiermenge konstant gehalten.

Für die durchschnittliche PAK-Dosiermenge wird in diesem Fall der 80% der JAM herangezogen (ebenfalls analog zur Teilstrombehandlung bei anderen Verfahren).

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 des GWK Kirspenich 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.

Die Abscheidung des Belebtschlamm-PAK-Gemisches erfolgt nach wie vor weitgehend in der Nachklärung. Fein suspendierte PAK, die sich in der Nachklärung nicht absetzen lässt,

wird anschließend in der vorhandenen Sandfiltration zurückgehalten und dem Zulauf der Kläranlage zugeführt.

Der Kohleschlamm wird zusammen mit dem normalen Überschussschlamm aus der Belebung abgezogen und der Schlammbehandlung zugeführt. Das Schlammgemisch wird zunächst maschinell eingedickt und dann der getrennt anaeroben Schlammstabilisierung im Faulbehälter zugeführt.

Mit der Zugabe des PAK-Schlammes in die Belebung erhöht sich für die angesetzte Dosierung von 18 mgPAK/l der TS-Gehalt in der Belebung um ca. 10%. Für das GWK Kirspenich ergibt sich bei einem durchschnittlichen TS-Gehalt im Istzustand von 3,0 mg/l ein TS inkl. PAK von ca. 3,6-3,7 mg/l. Da aus Labor- und Pilotversuchen überwiegend positive Auswirkungen der PAK auf die Absetzeigenschaften des Belebtschlammes berichtet werden, kann die Belebungsstufe des GWK Kirspenich diese zusätzlichen Schlammengen aufnehmen.

Die Behandlung der zusätzlichen Schlammmenge in der Schlammbehandlung ist ebenfalls unproblematisch, da ausreichende Kapazitäten in den Eindick- und Entwässerungsaggregaten sowie im Faulbehälter 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.

4.5 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 dem GWK Kirspenich bietet sich hierfür die vorhandene Sandfiltration an, die dem Ozonreaktor nachgeschaltet wird. Hierfür sind keine weiteren Anpassungen erforderlich.

Das mechanisch-biologisch gereinigte Abwasser wird vor der vorhandenen Nachnitrifikation abgezweigt und in Richtung der Freifläche am Kopfende der Vorklärbecken geführt.



Abbildung 9: Lageskizze Ozonbehandlung (Vollstromverfahren)

Das GWK Kirspenich verfügt nicht über die erforderlichen hydraulische Reserven, um zwischen Nachklärung und dem Beschickungspumpwerk der Filtration die Ozonung einzubinden. Die Beschickung der Mikroschadstoffelimination muss daher über ein Zwischenpumpwerk erfolgen. Hierfür wird an der Zulaufseite des Ozonreaktors ein Pumpensumpf mit Tauchmotorpumpen vorgesehen.

Das erforderliche Volumen des Ozonreaktors für die Vollstrombehandlung kann auf der verfügbaren Fläche nur bereitgestellt werden, wenn eine eher hohe Bauform gewählt wird. Um die Einbindetiefe zu begrenzen muss der Reaktor für die Vollstrombehandlung etwas höher gebaut werden, wodurch sich eine größere Förderhöhe für das Zulaufpumpwerk ergibt.

Für den Ozonerzeuger sowie die erforderliche Peripherie (Kühlung, Restozonvernichtung, Energieversorgung, Schaltanlagen) werden zwei Beton Fertigteilstationen am Ablaufbereich der Ozonierung vorgesehen. In diesem Bereich wird auch eine Aufstell- bzw. Anlieferungsfläche für den Sauerstoff Lagertank gepflastert. Die energietechnische Anbindung könnte über die Niederspannungsschaltanlage der Filtration erfolgen.

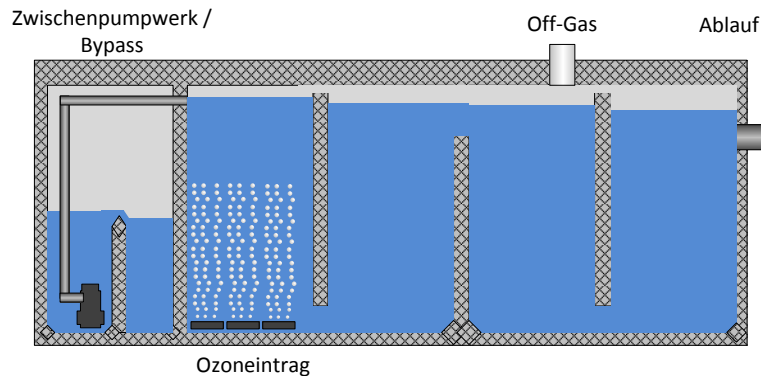


Abbildung 10: Prinzipskizze Ozon-Kontaktreaktor

Der Ozonreaktor schließt an das Zwischenpumpwerk an und wird mit mehreren Kammern ausgeführt, die abwärts und aufwärts durchflossen werden. Aufgrund der Größe GWK Kirspenich wird der Ozonreaktor sowohl für die Vollstrombehandlung als auch 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 deutlich 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 der Teilstrom- und der Vollstrombehandlung mit Ozon zeigen, dass die erforderliche Fläche für die entsprechenden Bauwerke und Einrichtungen relativ gering ist und dass die der bauliche Aufwand für beide Varianten ähnlich hoch ist.



Abbildung 11: Lageskizze Ozonbehandlung (Teilstrom)

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 (Kläranlagenerüchtigung, Pumpwerke etc.) ausgewertet und Kostenansätze für Betonbauwerke, Leitungen und übliche Maschinenteknik gebildet.

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

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

Baunebenkosten wurden mit 30% der Investitionskosten angesetzt.

Zudem wurden in Abhängigkeit 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 1-5 Punkten, wobei eine höhere Punktzahl einer besseren Bewertung entspricht.

technische Kriterien	4. Reinigungsstufe, Verfahren / Varianten			Wichtung
	PAK Verfahren		Ozon Verfahren	
	PAK, Dosierung in Belebungsbecken & SF	PAK, Dosierung vor Flockenfilter	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)	4	4	3	5%
Großtechnische Erprobung des Verfahrens	3	3	4	15%
Regelbereich und Flexibilität des Verfahrens (auch im Hinblick auf zukünft. Anforderungen)	4	3	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	2	3	10%
Zulaufqualität zur Behandlungsstufe	1	3	3	5%
Platzbedarf bei vorhandener Filtration	5	5	3	5%
Einbindung bestehender Bauwerke	5	5	5	5%
Carbon Footprint	2	3	4	5%
technische Bewertung des Verfahrens	3,35	3,50	3,55	100%

Abbildung 12: Technische Bewertung der untersuchten Verfahren

In der technischen Bewertung schneidet die PAK Dosierung in die Belebung (mit gemeinsamem Schlammkreislauf) etwas schlechter als die Ozonbehandlung ab. Beide Verfahren können auf dem GWK Kirspenich die vorhandene Sandfiltration als Nachbehandlung nutzen und können problemlos in den bestehenden Kläranlagenprozess eingebunden werden.

Hauptnachteile der PAK-Variante sind die schlechtere Zulaufqualität, potentiell höhere Treibhausgasemissionen und die Inanspruchnahme von Kapazität in der Belebung und im Schlammweg der Kläranlage. Vorteile sind die ausschließlich positiven Effekte sowohl für die Mikroschadstoffelimination als auch die konventionelle Abwasserparameter. Auch fehlen für diese Betriebsweise noch Betriebserfahrungen über längere Zeiträume und im großtechnischen Maßstab, sodass die Abschätzung der Dosiermenge mit Unsicherheiten behaftet ist. Die fehlende großtechnische Erprobung der PAK-Dosierung in die Belebung

könnte durch leicht durchführbare Vorversuche ausgeräumt werden. Einige der anderen negativen Aspekte dieses Verfahrens, wie z.B. die schlechte Zulaufqualität könnten durch eine Verlegung der Dosierstelle vor die Flockungsfiltration behoben werden. Hierfür sind jedoch mehr und aufwändigere Vorversuche erforderlich, da diese Verfahrensvariante noch wenig erprobt ist.

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.

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 0 ermittelten Jahreskosten. Diese schließen sowohl die jährlichen Kosten für Abschreibung und Zinsen, als auch die laufenden (Betriebs-)Kosten mit ein. In Tabelle 6 werden zunächst die Kosten für die jeweiligen Vollstromvarianten gegenübergestellt, da aufgrund der hohen Abwasserlast in der Erft und der Vorgaben in (KOM-M NRW 2016) eine Vollstrombehandlung am Standort Kirspenich erforderlich ist.

Tabelle 6: Variantenvergleich Vollstromverfahren

Variantenvergleich VS	PAK VS	Ozon VS
Investitionskosten (brutto)	758.479 €	3.431.894 €
Bautechnik	377.431 €	1.684.007 €
Maschinentechnik	317.540 €	1.398.310 €
E-Technik	63.508 €	349.577 €
Betriebskosten (brutto)	170.610 €	213.154 €
Material	99.807 €	76.460 €
Energie	12.745 €	50.860 €
Entsorgung	17.556 €	- €
Personal	25.315 €	16.876 €
Instandhaltung	15.188 €	68.957 €
Jahreskosten	221.785 €	445.490 €

Die PAK-Variante mit Dosierung in das Belebungsbecken ist mit ca. 222.000 €/a Jahreskosten die günstigste Variante zur Spurenstoffelimination. Die Investitionskosten sind mit ca. 0,76 Mio € sehr niedrig, da lediglich die Lager- und Dosierstation neu zu errichten ist. Die Betriebskosten dominieren die Jahreskosten bei dieser Variante deutlich und gehen hauptsächlich auf den PAK-Verbrauch zurück.

Die Variante mit Ozonbehandlung ist mit ca. 445.000 €/a ca. doppelt so teuer wie die PAK-Variante. Die Ozonbehandlung hat deutlich höhere Investitionskosten, wobei ein großer Teil der Investitionen auf Maschinen und Elektrotechnik verfällt. Gleichzeitig fallen für die

Ozonbehandlung höhere Betriebskosten als bei der PAK-Behandlung an, sodass die Jahreskosten im Betrachtungszeitraum deutlich über denen der PAK-Variante liegen.

Andere Verfahren, wie die GAK-Filtration oder die PAK-Dosierung mit einem separaten Schlammkreislauf kommen auf dem GWK-Kirspenich aufgrund der Platzverhältnisse nicht in Frage.

Führt man die Ergebnisse aus dem technischen und dem monetären Variantenvergleich zusammen, so **muss angesichts des krassen Preisunterschiedes die PAK-Variante als Vorzugslösung gesehen werden, obwohl sie in der technischen Bewertung schlechter abschneidet.**

Die Ozonbehandlung ist zwar technisch besser zu bewerten, führt jedoch aufgrund wesentlich höherer Investitions- und etwas höherer Betriebskosten über den Betrachtungszeitraum von 30 Jahren zu den zweifachen Kosten. **Vor dem Hintergrund der aktuellen Förderung der Investitionskosten (Förderquote 70%) einer 4. Reinigungsstufe könnte die Errichtung einer Ozonbehandlung dennoch wirtschaftlich interessant sein.**

5.4 Variantenvergleich Teilstrombehandlung

Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben ist für das GWK Kirspenich nach den aktuellen Dimensionierungsvorschlägen (KOM-M NRW 2016) eine Vollstrombehandlung vorzusehen, da der Ablauf der Kläranlage weit über 30% des natürlichen Abflusses an der Einleitstelle beträgt.

Die Kosten für die Vollstrombehandlung auf dem GWK Kirspenich betragen in der günstigsten Variante 222.000 €/a, obwohl die bestehende Sandfiltration in die 4. Reinigungsstufe mit eingebunden werden kann. Daher wurden zusätzlich auch Verfahrensvarianten als Teilstromlösungen untersucht. Diese weisen gegenüber der entsprechenden Variante in der Auslegung für die Vollstrombehandlung bis zu 25% geringeren Jahreskosten auf (Tabelle 7). Im Folgenden werden einige Überlegungen zum Vergleich der Wirksamkeit der Teil- bzw. Vollstromlösungen angestellt, so dass eine Bewertung der Effizienz ermöglicht wird.

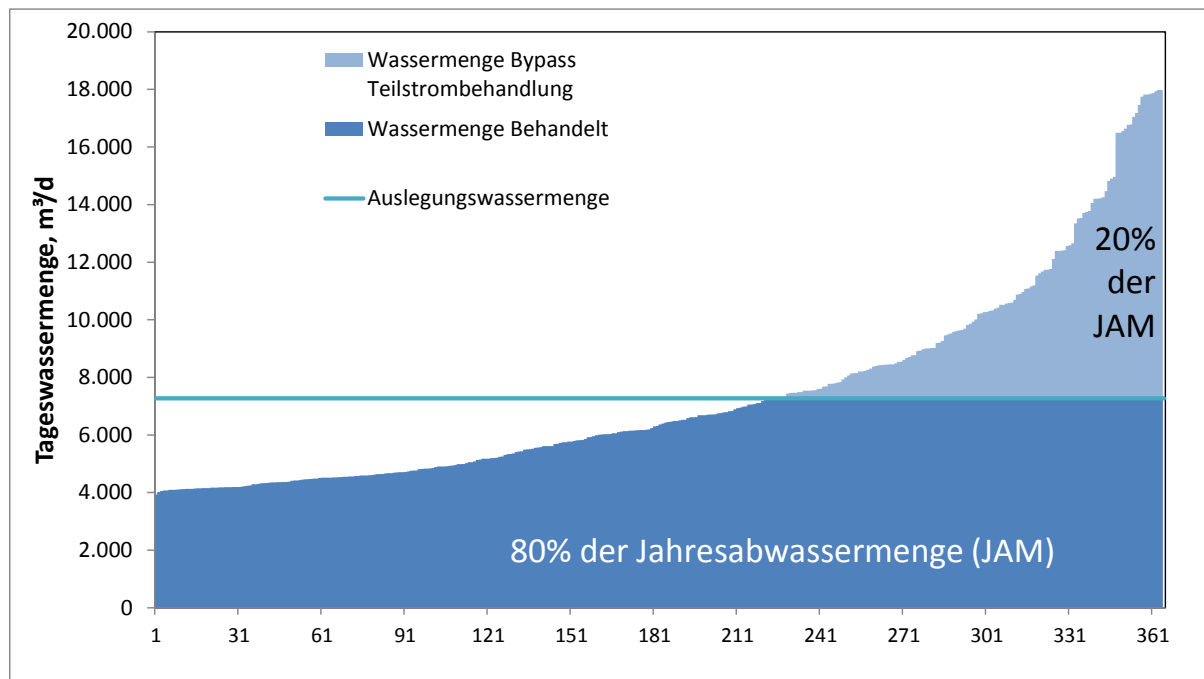


Abbildung 13: Behandelte Wassermenge und Bypassmenge bei der Teilstrombehandlung

Der maximale Mischwasserzufluss tritt im Jahresverlauf nur selten, bei großen Regenereignissen im Einzugsgebiet der Kläranlage auf. Abbildung 13 verdeutlicht diesen Zusammenhang. Die Tageszuflüsse zur Kläranlage in m³/d sind hier für das Jahr 2015 der Größe nach geordnet aufgetragen. Im Jahre 2015 wurden im Einzugsgebiet an 156 Tagen des ausgewerteten Jahres Trockenwetterbedingungen (<0,3mm Niederschlag am Tag und am Vortag) registriert. Die Teilstrombehandlung kann mit einer Kapazität von 7272 m³/d (gemäß Dimensionierung in Kapitel 4.3) kann aber sogar an 224 Tagen im Jahr den Abwasserstrom vollständig behandeln. Lediglich an 141 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. Insgesamt können aber immer 80% der Jahresabwassermenge in der 4. Reinigungsstufe behandelt werden.

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.

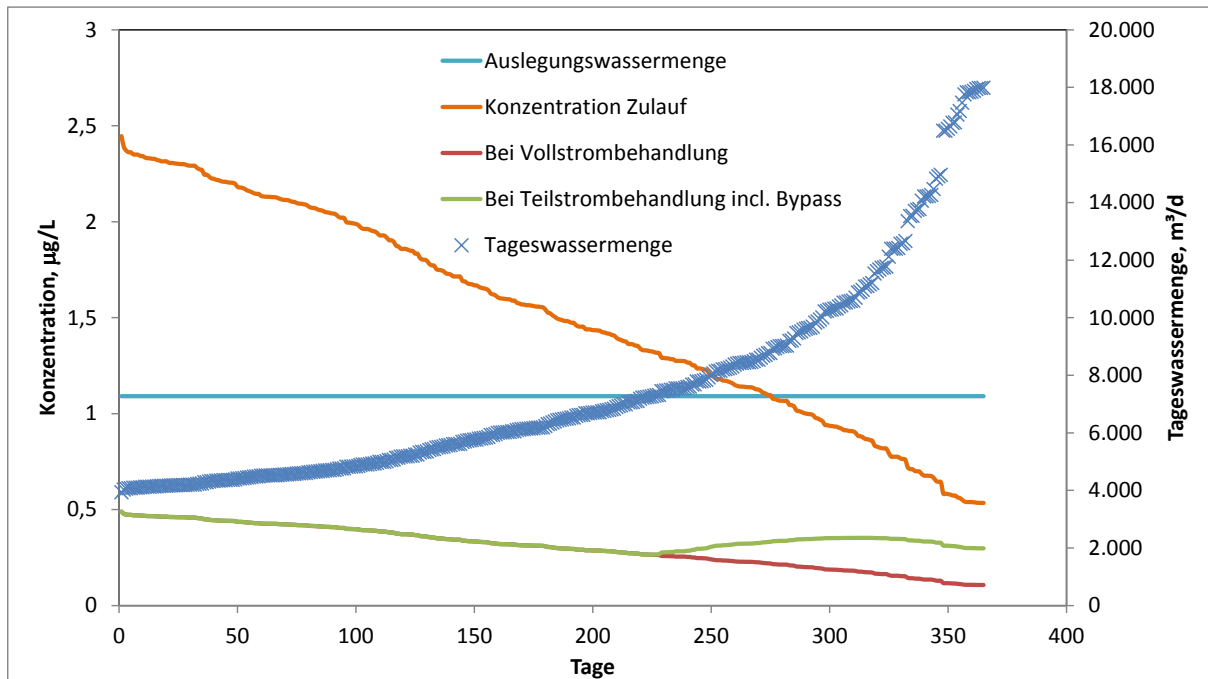


Abbildung 14: Vergleich Diclofenac-Ablaufkonzentrationen Vollstrom- vs. Teilstrombehandlung

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 14). Die mittlere Tagesfracht an Diclofenac im Zulauf der Kläranlage beträgt 9,6 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 2,5 µg/l bei Trockenwetter und 0,5 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 0,36 µg/l gegenüber 0,30 µg/l bei Vollstrombehandlung. Das entspricht dann mittleren Gesamtwirkungsgraden von 77% 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 71% 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 Mikroschad-

stoffkonzentrationen 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.

Tabelle 7: Kostenvergleich Teilstromvarianten

Variantenvergleich TS	PAK TS	Ozon TS
Investitionskosten (brutto)	758.479 €	2.482.449 €
Bautechnik	377.431 €	1.240.068 €
Maschinentechnik	317.540 €	993.905 €
E-Technik	63.508 €	248.476 €
Betriebskosten (brutto)	145.026 €	166.982 €
Material	79.846 €	61.211 €
Energie	10.634 €	39.234 €
Entsorgung	14.044 €	- €
Personal	25.315 €	16.876 €
Instandhaltung	15.188 €	49.661 €
Jahreskosten	196.201 €	334.323 €

Wie bei den Vollstromvarianten ist auch bei der Teilstrombehandlung die PAK Dosierung in die Belegung die günstigste Variante. Die Investitionskosten entsprechen denen der Vollstromvariante. Die Betriebskosten verringern sich dagegen um ca. 15%, ohne dass die Ablaufqualität nennenswert sinkt. Zusammen ergeben sich ca. 196.000 €/a Jahreskosten, was etwa 88% der Jahreskosten der Vollstromvariante entspricht. **Damit ist auch bei den Teilstromvarianten die PAK-Variante die günstigste, wenn auch technisch schlechter bewertete Variante.**

Die Teilstrombehandlung mit Ozon kostet ca. 334.000 €/a und damit ca. 70% mehr als die PAK-Variante. Der größte Teil der Preisdifferenz ist auf die wesentlich höheren Investitionskosten zurückzuführen. Die Betriebskosten sind nur wenig höher als bei der PAK-Variante. Unter Einbeziehung einer Förderung von 70% auf die Investitionskosten und mit Blick auf die bessere technische Bewertung ist die Ozonvariante als Teilstrombehandlung annähernd gleichwertig.

Zusammenfassend sind sowohl für eine Voll- als auch für eine Teilstrombehandlung die PAK-Verfahren deutlich günstiger, allerdings technisch nicht so ausgereift wie die Ozonbehandlung. Bei einer Teilstrombehandlung und unter Einbeziehung einer Investitionskostenförderung wird der Preisunterschied geringer. Gleichzeitig bestehen die technischen Vorteile weiterhin, sodass die Ozonbehandlung als Teilstromverfahren wirtschaftlich vertretbar erscheint.

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:

Das GWK Kirspenich liegt in der Stadt Bad Münstereifel nördlich der Ortslage Kirspenich und leitet bei Flusskilometer 85,2 in die Erft ein. Der Ablauf des GWK Kirspenich beträgt 66,7% des natürlichen Abflusses und prägt den Oberlauf der Erft bis zur Einleitung GWK Kessenich maßgeblich mit. Neben diesem Gewässerabschnitt wird auch der parallel verlaufende Kuchenheimer Mühlengraben betrachtet.

Die Erft und die folgenden Gewässerabschnitte werden bis zur Einleitstelle des GWK Kessenich als vollständig bis stark verändert bewertet.

Der chemische Zustand der betrachteten Gewässerabschnitte wurde im 3. Monitoringzyklus oberhalb der Einleitung des GWK Kirspenich mit „gut“ bewertet, Unterhalb der Einleitung wird der chemische Zustand der Erft mit „nicht gut“, der chemische Zustand des Kuchenheimer Mühlengrabens dagegen mit „gut“ bewertet.

Das für die „erheblich veränderten Oberflächenwasserkörper“ maßgebliche ökologische Potential wird unterhalb des GWK Kirspenich als „unbefriedigend“ klassifiziert. Die Wasserrahmenrichtlinie fordert die Erreichung eines guten ökologischen Potentials.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich der ökologische Zustand des Vorfluters unterhalb der Einleitstelle des GWK Kirspenich verschlechtert.

Bei Betrachtung der Konzentrationen der Standardabwasserparameter oberhalb und unterhalb der Einleitstelle kann für die Parameter „Stickstoff gesamt“ und für Phosphor gesamt keine nennenswerte Erhöhung der Gewässerkonzentration festgestellt werden. Allerdings ist die Datenlage für die Messstelle oberhalb des GWK Kirspenich mit vier Messungen im Zeitraum von 2008 bis 2017 sehr dünn. Insgesamt dürfte der Stickstoffeintrag aus der Landwirtschaft den Eintrag aus den Kläranlagen deutlich übersteigen.

Für die Mikroschadstoffe (die 7 Leitparameter) wurde im Rahmen der Studie ein deutlicher Anstieg der Gewässerkonzentrationen durch die Einleitung des GWK Kirspenich beobachtet. Während die Leitparameter oberhalb der Einleitung nicht oder nur in geringen Konzentrationen nachgewiesen werden konnten, wird unterhalb der Einleitung das Bewertungskriterium für Diclofenac (0,05µg/l) deutlich überschritten. Auch für die weiteren Mikroschadstoffe, die neben den Leitparametern betrachtet wurden, stammt der größte Teil der unterhalb der Anlage gemessenen Stoffe aus der Kläranlageneinleitung.

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. Insgesamt wurden in den jeweiligen Umsetzungsfahrplänen 51 Maßnahmengruppen für die Erft und 17 Maßnahmengruppen für den parallel verlaufenden Kuchenheimer Mühlengraben mit jeweils diversen Einzelmaßnahmen aufgenommen.

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 dem GWK Kirspenich betrachtet. Im Ergebnis könnten die Mikroschadstoffkonzentrationen in der Erft unterhalb der Einleitung bis zur Einleitung des GWK Kessenich mit dem Bau einer 4. Reinigungsstufe auf dem GWK Kirspenich deutlich gesenkt werden. Die Konzentration von Diclofenac könnte für den folgenden Gewässerabschnitt bis unter das Bewertungskriterium gesenkt werden. Bei Betrachtung des gesamten Erfteinzugsgebietes fallen die Effekte aufgrund der geringen Größe der Anlage jedoch deutlich geringer aus, sodass die Konzentrationen der sieben Leitparameter an der Mündung in den Rhein nur um ca. 2% gesenkt werden könnten.

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 Ertüchtigung 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.

Für das GWK Kirspenich erscheint die Ausrüstung mit einer Mikroschadstoffelimination sinnvoll. Die Anlage ist an der Erft die erste größere Einleitung aus der Siedlungswasserwirtschaft und stellt in Phasen mit geringem natürlichem Abfluss über die Hälfte des Abflusses im Gewässer dar. Bis zur Einleitung des GWK Kessenich prägt das Abwasser des GWK Kirspenich die Wasserqualität der Erft maßgeblich mit.

Der Einfluss auf die Wasserqualität im Erfteinzugsgebiet insgesamt ist auf Grund der Anlagengröße jedoch gering. Gleichzeitig sind die spezifischen Kosten für die Nachrüstung einer kleinen Anlage höher und die Voraussetzungen auf dem GWK Kirspenich durch die fehlenden Erweiterungsflächen schwierig. Im Sinne des wirtschaftlichen Einsatzes verfügbarer (Förder-)Mittel sollten 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.

Das GWK Kirspenich ist mit einer Ausbaugröße von 27.000 EW eine kleine bis mittelgroße Anlage am Oberlauf der Erft. Sie hat mit ihrem großen Anteil am Abfluss der Erft maßgeblichen Einfluss auf die Gewässerqualität. Nach ca. 11 km Fließstrecke leitet das mit 132.000 EW wesentlich größere GWK Kessenich in die Erft ein. Unterhalb dieser Einleitung wird der Einfluss des GWK Kirspenich durch die Frachten aus der größeren Kläranlage deutlich überprägt.

Das GWK Kirspenich hat durch die beengten Platzverhältnisse auf dem Kläranlagengelände und durch fehlende Erweiterungsmöglichkeiten schlechte Voraussetzungen für Implementierung einer Mikroschadstoffeliminierungsstufe.

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde 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. Aufgrund der beengten Platzverhältnisse wurden nur zwei Verfahren detailliert auf ihre Umsetzbarkeit und die Kosten untersucht:

- V1: PAK-Dosierung in die Belebung und vorhandener Sandfiltration als Nachbehandlung
- V2: Ozonbehandlung mit vorhandener Sandfiltration als Nachbehandlung

Für beide Verfahren wurde eine Untervariante zur Vollstrom- und zur Teilstrombehandlung betrachtet, sodass insgesamt 4 Untervarianten betrachtet wurden.

Die grundsätzlichen, technischen Voraussetzungen zur Errichtung einer 4. Reinigungsstufe auf dem GWK Kirspenich sind gegeben, allerdings lassen die vorhandenen Erweiterungsflächen im Bereich der Vorklärbecken nur sehr platzsparende Verfahren zu. Die hydraulische Einbindung einer Behandlungsstufe zur Mikroschadstoffeliminierung in diesem Bereich ist nur mit einem Zwischenpumpwerk möglich. Das Betriebsgelände wird zu allen

Seiten durch die Erft, eine Bahnlinie und steil ansteigendes Gelände samt Zufahrtsstraße begrenzt, sodass eine Erweiterung des Geländes wirtschaftlich nicht darstellbar ist.

Die vorhandene Sandfiltration eignet sich als Nachbehandlung für Ozon- oder PAK-Verfahren. Sie ist aufgrund der knappen Dimensionierung nicht für eine Umrüstung zu einer GAK-Filtration geeignet. Die Neuerrichtung einer GAK-Filtrationsstufe ist auf den vorhandenen Erweiterungsflächen nicht möglich.

Nach der technischen Bewertung sind die beiden untersuchten Verfahren grundsätzlich in der Lage die diskutierte 80%ige Elimination der Leitparameter zu leisten. Unterschiede bestehen vor allem in dem Erprobungsstatus der Verfahren. Während die PAK-Verfahren mit Dosierung in das Belebungsbecken oder vor die Flockungsfiltration bislang nur wenige großtechnische Umsetzungen erfahren haben, existieren für die Ozonierung zahlreiche Pilotanlagen. Auch der Betriebsaufwand ist bei den PAK-Verfahren höher anzusetzen, da diese einen stärkeren Eingriff in die bestehende Abwasserreinigung darstellen.

Insgesamt stellt sich die Variante 2 (Ozonung) vor allem auf Grund der guten Wissenslage und der geringeren Eingriffe in die vorhandene Anlage in der technischen Bewertung besser dar, während für die Umsetzung der PAK-Varianten nach heutigem Kenntnisstand größere Unsicherheiten existieren. Diese Nachteile der PAK-Verfahren könnten jedoch durch Versuche mit provisorischen Dosieranlagen auf der Anlage ausgeräumt werden.

Bei den Kosten muss zwischen Vollstrom und Teilstromlösungen unterschieden werden. Bei den Teilstromlösungen wird der Ablauf des GWK Kirspenich nur bis zu einem Durchfluss von 303 l/s in der 4. Reinigungsstufe behandelt, wodurch in der Becken- und Pumpwerksdimensionierung deutliche Einsparungen erreicht werden können. Trotz der wesentlich kleineren Auslegung der Reinigungsstufe können mit den Teilstromvarianten über 80% der Jahresabwassermenge behandelt werden. Für die PAK-Dosierung wurde anstatt einer echten Teilstrombehandlung die Begrenzung der Dosiermenge ab der oben genannten Wassermenge untersucht.

Für die monetäre Bewertung werden die Jahreskosten als maßgeblich betrachtet, da sie sowohl Investitions- als auch Betriebskosten berücksichtigen.

Sowohl Vollstrom- als auch Teilstrombehandlung mit der PAK-Dosierung erfordern lediglich die Errichtung einer Lager- und Dosierstation für die PAK. Aufgrund der sehr niedrigen Investitionskosten führen in Verbindung mit den moderaten Betriebskosten für beide Untervarianten zu sehr niedrigen Jahreskosten. Die PAK-Dosierung in die Belebung ist damit für die Vollstrom- und Teilstrombehandlung das mit Abstand günstigste Verfahren.

Die Ozondosierung hat aufgrund der beengten Bausituation und dem erforderlichen Zwischenpumpwerk für die Vollstrombehandlung doppelt so hohe Jahreskosten wie die PAK-Variante.

Die Kosten der Teilstrombehandlung mit Ozon sind deutlich günstiger, dennoch sind die Jahreskosten ca. 70% höher als bei der PAK-Variante. Da die hohen Jahreskosten der Ozonbehandlung unter anderem durch die hohen Investitionskosten begründet sind, könnte die Wirtschaftlichkeit durch Einbeziehung der aktuell gewährten 70%igen Förderung auf die Investitionskosten deutlich verbessert werden.

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 des GWK Kirspenich an der Wasserführung der Swist käme demnach an diesem Standort nur die Vollstrombehandlung in Frage. Die Variantenuntersuchung hat gezeigt, dass die Umsetzung einer Vollstrombehandlung gegenüber einer Teilstrombehandlung zu ca. 25% höheren Investitionskosten führen kann, ohne dass die mittlere Konzentration an Mikroschadstoffen noch signifikant abgesenkt wird. Die betrachteten Varianten mit Teilstrombehandlungen können 80% der Jahresabwassermenge behandeln. Mittels Modellrechnungen wurde gezeigt, dass eine Vollstrombehandlung auf dem GWK Flerzheim in einer Jahresbilanz eine zusätzliche Verminderung des Eintrags von Diclofenac von 3% (Konzentrationsbetrachtung) bzw. 9% (Frachtbetrachtung) gegenüber der Teilstrombehandlung bietet.

Angesichts der deutlichen Kostenvorteile der Teilstrombehandlung gegenüber der Vollstrombehandlung sollte die Entscheidung in dieser Frage daher im Rahmen eines Gesamtkonzeptes für das Gewässereinzugsgebiet 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. Zugegriffen 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 Zwickpflug, 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, C., H. Schäfer, und N. Engelhardt. 2013. „A new regional strategy for wastewater and sludge treatment“. In *Conference Proceedings IWA HSM 2013*. Västerås, Sweden.
- 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. Honnef: 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.
- Falás, 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 Sobaszekiewicz. 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.
- Gschöbl, 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“. Zugegriffen 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 Aktivkohleadsorptionsverfahren“. *GW 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>.
- 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/anlagenprojekte/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 Schönau –

- 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. Zugegriffen 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. Zugegriffen 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>.