

# Machbarkeitsstudie zur Spurenstoffelimination

auf dem

## Gruppenklärwerk Flerzheim

Kurzfassung



**Gefördert von:**

Landesamt für Natur,  
Umwelt und Verbraucherschutz  
Nordrhein-Westfalen



Auftraggeber: Erftverband

Auftragnehmer: Erftverband aquatec GmbH  
Am Erftverband 6  
50126 Bergheim

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

Bearbeitung: Luk Beyerle  
Christoph Brepols  
Niklas Wachendorf

Bearbeitungszeitraum: 2016 - 2018

Gefördert von:

Landesamt für Natur,  
Umwelt und Verbraucherschutz  
Nordrhein-Westfalen



**Bildquelle Deckblatt:** Digitale Orthophotos, [www.tim-online.nrw.de](http://www.tim-online.nrw.de), Land NRW 2018,  
Datenlizenz Deutschland -Namensnennung - Version 2.0 ([www.govdata.de/dl-de/by-2-0](http://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 .....	18
4.1	Vorhandene Kläranlage.....	18
4.1.1	Verfahrenstechnik .....	19
4.1.2	Aktuelle Reinigungsanforderungen.....	20
4.2	Verfahrensauswahl für das GW Flerzheim .....	20
4.3	Auslegungswerte der 4. Reinigungsstufe .....	23
4.4	Neuerrichtung PAK-Dosierung mit eigenem Schlammkreislauf .....	25
4.5	Neuerrichtung GAK-Filtration.....	29
4.6	Neuerrichtung Ozonbehandlung mit Nachbehandlung durch Sandfilter.....	31
4.7	Umrüstung zur Membranbelebungsanlage mit PAK-Dosierung in die Belebung.....	34
5	Kostenermittlung und Variantenvergleich .....	36
5.1	Kostenansätze .....	36
5.2	Variantendiskussion und Verfahrensempfehlung.....	36
5.3	Variantenvergleich Vollstrombehandlung .....	38
5.4	Variantenvergleich Teilstrombehandlung.....	39
6	Betrachtung des Gewässers und sonstiger Umweltwirkungen.....	43
6.1	Ökologische Betrachtung des Gewässers .....	43
6.2	Erfordernis zur Mikroschadstoffelimination aus ökologischer Sicht .....	44
7	Fazit.....	46
8	Literaturverzeichnis .....	49

## Anlagen:

- Anlage 1: Mikroschadstoffkonzentrationen im Ablauf der KA / im Einleitgewässer  
Anlage 2: Betrachtung des Gewässers und sonstiger Umweltwirkungen

## 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 GW Flerzheim .....	14
Abbildung 5: Häufigkeitsverteilung der Tageszuflüsse und Niederschlagshöhen für das Jahr 2015, GW Flerzheim .....	15
Abbildung 6: Erweiterungsflächen für die 4. Reinigungsstufe .....	19
Abbildung 7: Gemessene Zulaufmengen des GW Flerzheim bei Teilstrom-behandlung behandeltem (blau) und nicht behandeltem Anteil (rot) .....	24
Abbildung 8: Lageskizze PAK-Stufe (Vollstrom).....	26
Abbildung 9: Systemskizze PAK-Stufe .....	27
Abbildung 10: Lageskizze PAK-Stufe (Teilstrombehandlung).....	28
Abbildung 11: Lageskizze GAK-Filtration (Vollstrom) .....	29
Abbildung 12: Bauwerksskizze GAK-Filtration.....	30
Abbildung 13: Lageskizze GAK-Filtration (Teilstrom).....	31
Abbildung 14: Lageskizze Ozonbehandlung (Vollstromverfahren).....	32
Abbildung 15: Prinzipskizze Ozon-Kontaktreaktor .....	32
Abbildung 16: Lageskizze Ozonbehandlung (Teilstrom).....	33
Abbildung 17: Lageskizze geplante Membranfiltration .....	34
Abbildung 18: Technische Bewertung der untersuchten Verfahren .....	37
Abbildung 19: Behandelte Wassermenge und Bypassmenge bei der Teilstrombehandlung.	40
Abbildung 20: Vergleich Diclofenac-Ablaufkonzentrationen Vollstrom- vs. Teilstrombehandlung.....	41

## 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 GW Flerzheim .....	16
Tabelle 4: Konzentrationen der 7 Leitparameter in Zu- und Ablauf sowie im Gewässer.....	17
Tabelle 5: Verfahrensauswahl für das GW Flerzheim.....	21
Tabelle 6: Variantenvergleich Vollstromverfahren.....	38
Tabelle 7: Variantenvergleich Teilstromverfahren.....	42

## Abkürzungsverzeichnis

AbwV	Abwasserverordnung	-
AFS	Abfiltrierbare Stoffe	mg/l
AOP	Advanced Oxidation Process (fortschrittlicher Oxidationsprozess)	-
DOC	Dissolved Organic Carbon (gelöster organischer Kohlenstoff)	mg/l
GAK	Granulierte Aktivkohle	-
GKW	Gruppenklärwerk	-
HazBREF	Projekt zu gefährlichen Industriechemikalien	-
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	-
vPvB	Persistente, bioakkumulierbare Stoffe	-
WRM	Wasch- und Reinigungsmittel	-

## 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 Flerzheim 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 m<sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup> 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 $N_{\text{anorg}}$ , $NH_4$ , $P_{\text{ges}}$	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 Analysetechnik in den letzten Jahrzehnten sind, neben den klassischen Kenngrößen zur Beschreibung der Wasserqualität wie Sauerstoffzehrung und Nährstoffkonzentrationen, auch Stoffe in den Fokus gerückt, die in der Umwelt als Spurenstoffe vorkommen (Ternes und Joss 2008).

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

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

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

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

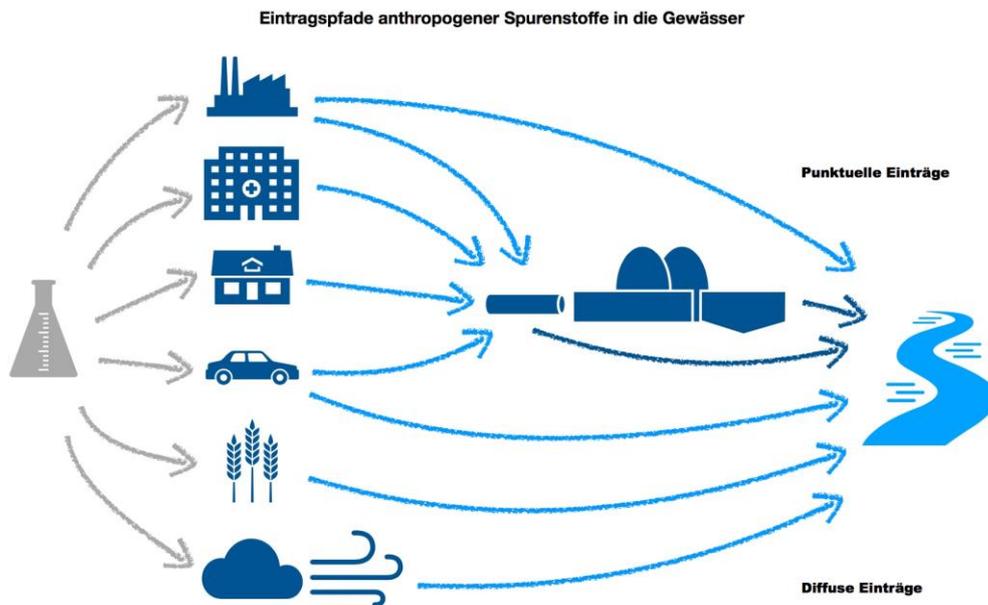


Abbildung 2: Eintragspfade anthropogener Spurenstoffen in die Gewässer

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

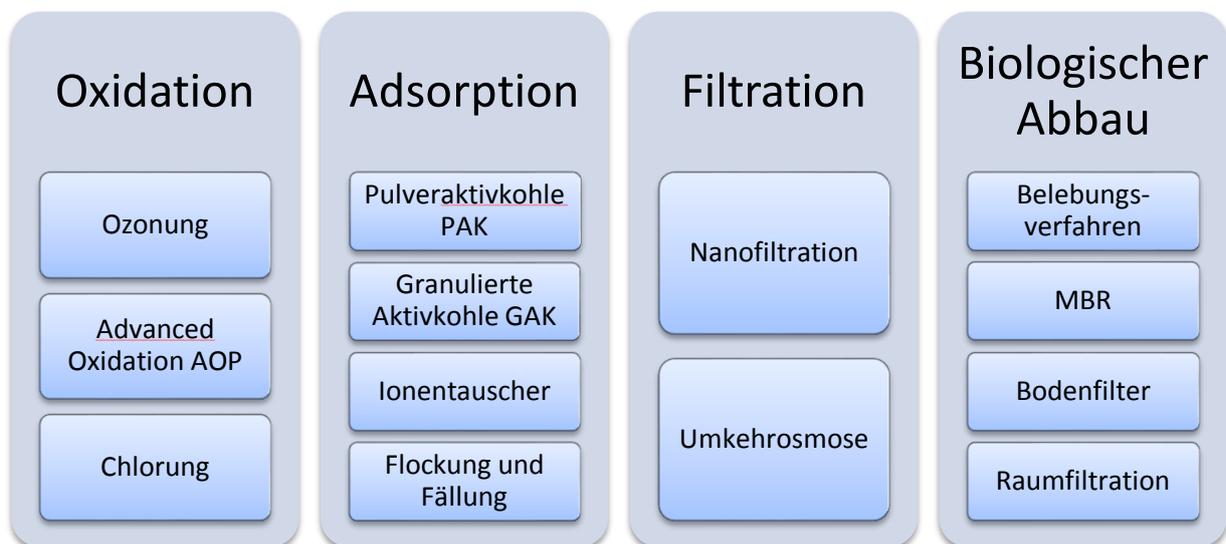


Abbildung 3: Verfahren der Spurenstoffentfernung aus Abwasser

### 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	<b>GWK Nordkanal, NRW, DE</b> / 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) / <b>Kläranlage Glessen (in Planung), NRW, DE</b>
Biologische Verfahren	Bodenfilter mit GAK als Zuschlagsstoff	P / G	<b>Retentionsbodenfilter Kläranlage Rheinbach (im Bau), NRW, DE</b>

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 Einzugsgebiet umfasst den Stadtkern Meckenheim, deren Stadtteile Lüftelberg, Altendorf und Ersdorf, sowie die Stadtteile Ramershoven, Flerzheim, Wormersdorf und Hilberath der Stadt Rheinbach. Die Orte Adendorf ( Gemeinde Wachtberg ), Kalenborn (Gemeinde Altenahr / Rheinland-Pfalz), Eckendorf, Gelsdorf, Vettelhoven, Holzweiler, Esch und Alteheck (Gemeinde Graftschaft / Rheinland-Pfalz) gehören ebenfalls zum Einzugsgebiet des GWK Flerzheim.

Der Anteil der im Trennsystem angeschlossenen Einwohnerwerte ist mit ca.40% relativ hoch, da große Teile des Meckenheimer Stadtgebietes im Trennsystem entwässert werden.

Im Zuge der Umsetzung seines Masterplans Abwasser 2025 beabsichtigt der Erftverband die nahe gelegene Kläranlage Miel stillzulegen und das derzeit dort anfallende Abwasser auf dem GWK Flerzheim mitzubehandeln.

Der Ortskern der Stadt Meckenheim ist städtisch geprägt, während das übrige Einzugsgebiet eine ländliche Prägung mit oftmals dörflichen Strukturen aufweist.

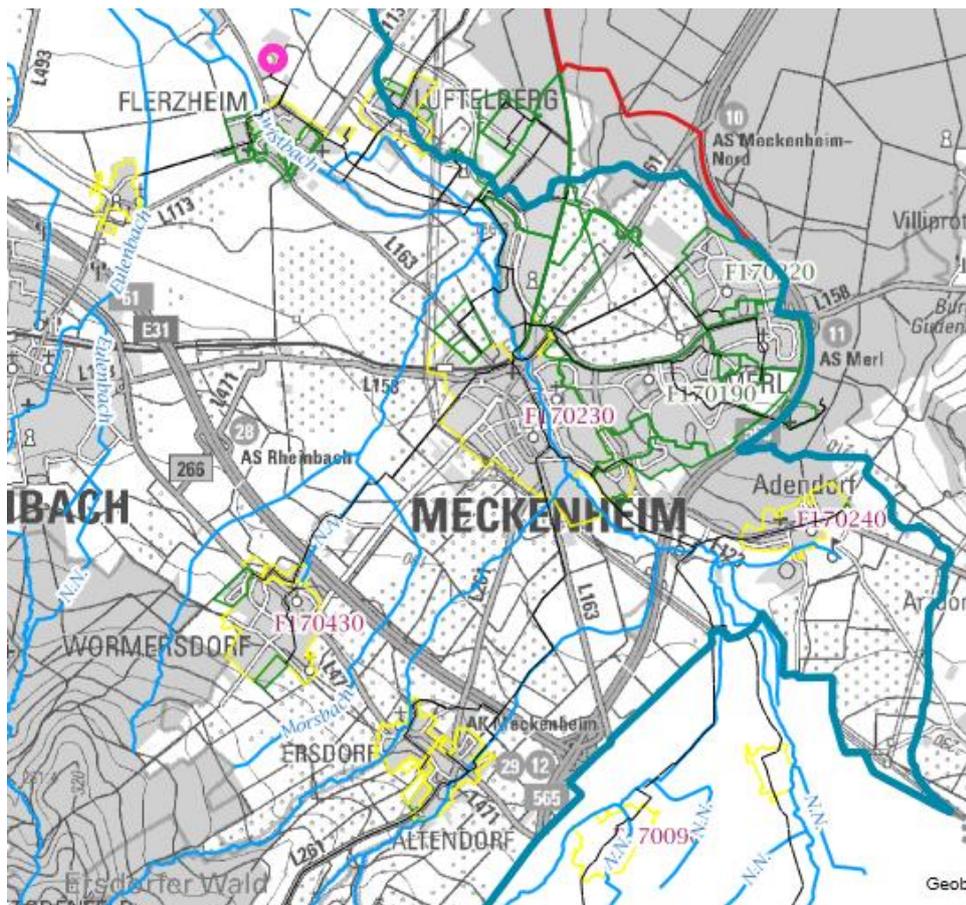


Abbildung 4: Einzugsgebiet des GWK Flerzheim

### 3.2 Abwassermenge und Zuflußcharakteristik

In den Jahren 2012 bis 2016 wurden im Mittel folgende Wassermengen behandelt. Nebenstehend und fett gedruckt sind die Größen für den Ausbauzustand nach Ertüchtigung der Kläranlage und nach Anschluss der KA Miel gemäß der Vorplanung für die Ertüchtigung.

Jahresabwassermenge:	4.267.953 m <sup>3</sup> /a	<b>zukünftig: ca. 5,2 Mio m<sup>3</sup>/a</b>
Jahresschmutzwassermenge:	3.115.406 m <sup>3</sup> /a	<b>zukünftig: ca. 3,7 Mio m<sup>3</sup>/a</b>

Bei Trockenwetter bewegt sich der Zufluss zur Kläranlage in einer Größenordnung von 5.000 m<sup>3</sup>/d bis 10.000 m<sup>3</sup>/d.

Der maximale Zufluss bei Regenwetter betrug 2015 rund 31.500 m<sup>3</sup>/d

Der Verlauf der Häufigkeitsverteilung deutet darauf hin, dass keine relevanten Fremdwassermengen im Zulauf vorhanden sind.

Der Fremdwasseranteil am Zufluss wurde vom Erftverband für das Jahr 2015 mit 34% angegeben.

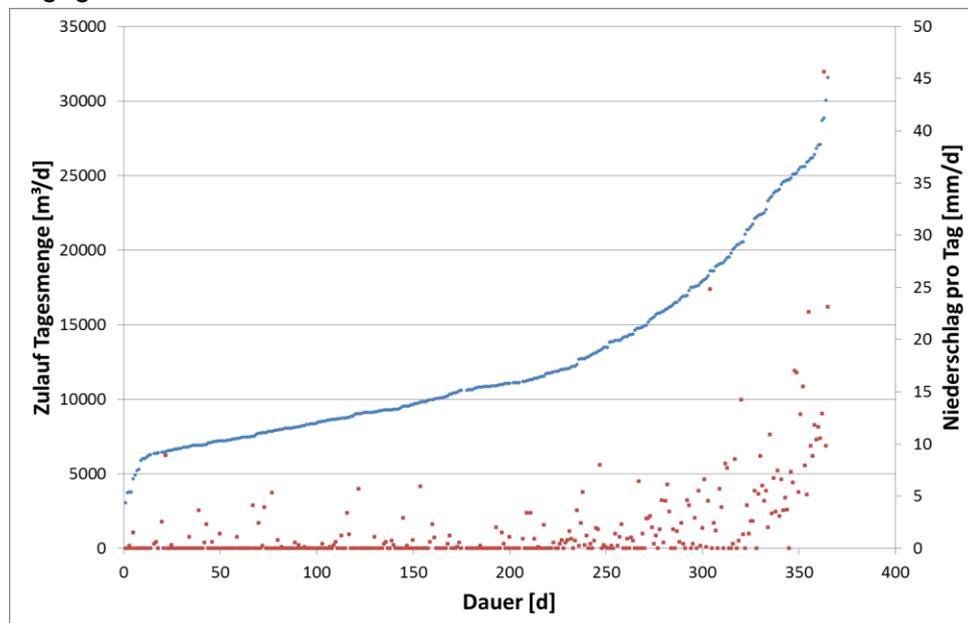


Abbildung 5: Häufigkeitsverteilung der Tageszuflüsse und Niederschlagshöhen für das Jahr 2015, GW Flerzheim

### 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.

Die Auswertung der Standard-Abwasserparameter erfolgt anhand regelmäßiger Messungen des eigenen Labors des Erftverbandes. Diese haben einen größeren Parameterumfang als die standardmäßigen Messungen zur Betriebsüberwachung und erlauben insbesondere eine Bewertung der organischen Hintergrundbelastung. Es wurden insgesamt ca. 100 Proben von Trockenwettertagen aus dem Zeitraum 2011-2016 ausgewertet.

Die Ergebnisse der statistischen Auswertung sind in Tabelle 3 dargestellt

**Tabelle 3: Auswertung der Ablaufkonzentrationen des GWK Flerzheim**

GWK 2 Flerzheim			Abwasserqualität bei Trockenwetter				
			Min	Quantil(0,15)	Median	Quantil(0,85)	Max
pH-Wert (Vor-Ort-Messung)	pH.vO		6,9	7,0	<b>7,3</b>	7,6	8,5
Leitfähigkeit (Vor-Ort-Messung)	LF.vO	µS/cm	798,0	866,8	<b>1.022,0</b>	1.088,6	1.152,0
CSB, homogenisiert	CSB.h	mg/l	16,0	23,0	<b>27,0</b>	29,0	33,0
TOC, homogenisiert	TOC.h	mg/l	5,5	8,5	<b>10,0</b>	11,1	12,2
Ammonium-Stickstoff	NH4-N	mg/l	0,1	0,1	<b>0,1</b>	0,1	1,5
Stickstoff, gesamt (TNb)	TNb	mg/l	8,4	10,7	<b>12,4</b>	15,3	17,0
Phosphor, gesamt	P.g	mg/l	0,2	0,3	<b>0,4</b>	0,5	0,5
Orthophosphat-Phosphor (gelöst)	o-PO4-P.f	mg/l	0,13	0,21	<b>0,30</b>	0,40	0,47
Säurekapazität (pH 4.3)	kS4_3	mmol/l	0,7	1,2	<b>2,3</b>	3,7	4,0
Temperatur Biologie	TB	° C	10,8	13,2	<b>14,5</b>	18,3	18,8
Nitrit-Stickstoff	NO2-N	mg/l	0,1	0,1	<b>0,1</b>	0,1	0,1
Nitrat-Stickstoff	NO3-N	mg/l	6,8	9,2	<b>10,6</b>	12,3	16,5
Nges. i.S.d. AbwV, berechnet	N.AbwV	mg/l	7,0	9,3	<b>11,0</b>	12,5	16,7
Chlorid	Cl	mg/l	91,7	131,2	<b>157,0</b>	170,0	181,0
Sulfat	SO4	mg/l	49,7	64,4	<b>82,1</b>	96,7	106,0

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 Flerzheim anhand einer 24h Mischprobe bestimmt. Dabei lag der Bromidgehalt kleiner der Bestimmungsgrenze von 50 µg/l.

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

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

**TOC** = 10 mg/l  
**NO<sub>2</sub>-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 unter 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 Flerzheim 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	7,85	1,80	3,17	5,60	5,95	0,01	1,43	10,00
Carbamazepin	0,50	0,29	0,49	0,73	0,67	0,00	0,22	0,50
Clarithromycin	0,49	0,00	0,13	1,10	0,29	0,00	0,00	0,10
Diclofenac	2,04	0,49	1,21	2,00	2,13	0,01	0,48	0,05
Metoprolol	1,36	0,43	0,93	1,80	1,46	0,00	0,38	7,30
Sotalol	0,35	0,15	0,28	0,44	0,31	0,00	0,12	0,10
Sulfamethoxazol	0,15	0,09	0,21	0,43	0,19	0,00	0,09	0,60

Mit Blick auf die sieben Leitparameter kann festgestellt werden, dass sich die Konzentrationen von Spurenstoffen im Ablauf des GWK Flerzheim auf dem üblichen Niveau für den Ablauf kommunaler Kläranlagen bewegen. Die mittleren Konzentrationen im Ablauf des GWK Flerzheim liegen bis auf Sulfamethoxazol unter den mittleren Ablaufkonzentrationen der betrachteten Anlagen im Erfteinzugsgebiet.

Allerdings weist das Einleitgewässer (die Swist) bereits oberhalb der Einleitstelle eine Vorbelastung mit Spurenstoffen auf, obwohl oberhalb der Einleitung keine anderen Kläranlagen einleiten. Hierbei handelt es sich vor allem um Pflanzenschutzmittel und ihre Metaboliten, Arzneimittelwirkstoffe (die Leitparameter) werden erst nach der KA-Einleitung in nennenswerten Konzentrationen gemessen.

In der Swist werden, wie im gesamten betrachteten Erfteinzugsgebiet, lediglich für den Arzneimittelwirkstoff Diclofenac die vorgeschlagenen Bewertungskriterien deutlich überschritten. Für alle anderen Spurenstoffe liegen die Konzentrationen im Gewässer unterhalb der Bewertungskriterien.

Eine 4. Reinigungsstufe könnte als End-of-Pipe Lösung die Emissionen von Spurenstoffen in die Swist / das Erfteinzugsgebiet deutlich reduzieren.

## 4 Ausarbeitung von technischen Anlagenkonzepten

### 4.1 Vorhandene Kläranlage

1967/68 wurde die Kläranlage Flerzheim, damals Abwasserzweckverband Obere Swist – heute dem Erftverband zugehörig, gem. Genehmigung des RP Köln vom 22.09.1966 gebaut. 1983 wurde die Erweiterung der biologischen Reinigungsstufe (je 3 neue Belebungs- und Nachklärbecken) abgeschlossen. 1995 wurde dann die umfangreiche 2. Ausbaustufe des Gruppenklärwerkes in Betrieb genommen. Diese umfasst neben dem neuen Nitrifikationsbecken auch eine Sandfiltration zur weitergehenden Phosphor-Elimination (siehe auch Kapitel 4.1.1).

### Belastungssituation und zukünftige Auslastung

Die Ausbaugröße der Anlage von 55.000 Einwohnerwerten (EW) ist mit ca. 36.000 angeschlossenen Einwohnern und ca. 10.000 Einwohnergleichwerten zu ca. 84% ausgeschöpft.

In den nächsten Jahren soll die Anlage umfassend ertüchtigt und die Ausbaugröße auf 65.000 EW erhöht werden. Anschließend kann der nahegelegene Kläranlagenstandort Miel aufgegeben und das Abwasser von weiteren ca. 10.000 Einwohnern auf dem GWK Flerzheim behandelt werden.

### Mögliche Flächen für eine Erweiterung

Als weitere Randbedingung für die Planung einer 4. Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination ist die verfügbare Erweiterungsfläche zu berücksichtigen. Auf dem GWK Flerzheim stehen zum Zeitpunkt der Betrachtung nur kleinere Flächen im Bereich der bestehenden Nachklärung und Filtration zur Verfügung, die bevorzugt verwendet werden sollten. Diese Flächen werden in Abbildung 6 blau dargestellt. Da in den nächsten Jahren eine neue Nachklärung im Bereich nord-westlich der Belebungsbecken errichtet wird (orange Fläche), steht nach der Ertüchtigung auch die Fläche der alten Nachklärbecken für eine 4. Reinigungsstufe zur Verfügung. Zuletzt wäre auch ein Flächenerwerb im Bereich der benachbarten Ackerfläche denkbar. Diese Alternativflächen sind blau schraffiert dargestellt. Die vorhandenen sofort verfügbaren Flächen im Bereich der Nachklärung und Filtration bieten sich auch im Hinblick auf die Anordnung der Mikroschadstoffelimination zwischen diesen Verfahrensstufen an und sollen daher bevorzugt geplant werden.

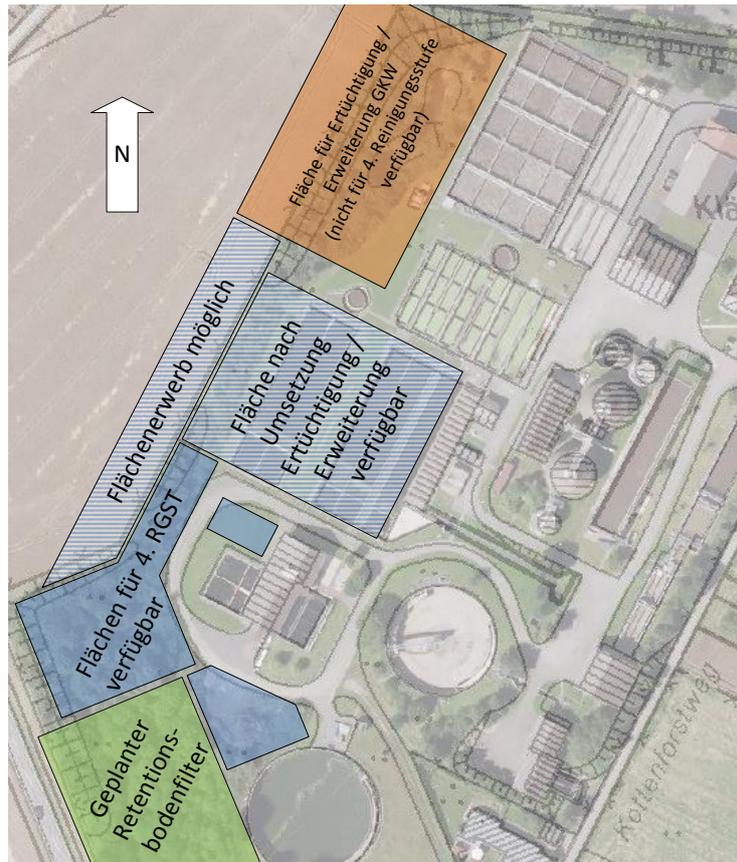


Abbildung 6: Erweiterungsflächen für die 4. Reinigungsstufe

### Klärschlamm Entsorgung

Der Klärschlamm des GWK Flerzheim 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:

- Zulaufpumpwerk
  - 2 Trockenwetterschnecken DN1000 + 2 Regenwetterschnecken DN2000
  - 4 Tauchmotorpumpen
- Drosselschieber auf 400 l/s + Abschlag zum RÜB
- Feinrechen
  - 1x Harkenumlaufrechen, 6 mm Stabweite, 400 l/s
  - 1x Filterstufenrechen, 6 mm Stabweite, 400 l/s
- Belüfteter Sand-/ Fettfang
- Vorklärbecken 544 m<sup>3</sup>
- Anaerobbecken 1600 m<sup>3</sup>
- Denitrifikationsbecken 4.450 m<sup>3</sup> (4-straßig)
- Nitrifikationsbecken 11.000 m<sup>3</sup> (4-straßig)
- Nachklärbecken
  - 3 Rechteckbecken je 60 x 8 x 2,3 m (LxBxT<sub>nutz</sub>)
  - 2 Rechteckbecken je 60 x 8 x 3,8 m (LxBxT<sub>nutz</sub>)

- Nachnitrifikation, belüftetes Festbett
  - Beckenvolumen: 1.000 m<sup>3</sup>
- Flockungsfiltration, abwärts durchströmt
  - 4 Filterkammern je 10,5 x 3,9 x 6 m (LxBxT), A<sub>Filter</sub> = 40 m<sup>2</sup>  
Gesamtfläche 160 m<sup>2</sup>
  - Filteraufbau: 0,2 m Stüttschicht, 0,5 m Filtersand, 1,3 m Hydro-Antrazit
  - Spülwasserspeicher, Schlammwasserspeicher
- Anaerobe Schlammbehandlung

#### 4.1.2 Aktuelle Reinigungsanforderungen

Aufgrund des Bewirtschaftungsplanes für den Swistbach wurden in den 90er Jahren sehr hohe Ablaufforderungen für das GWK Flerzheim formuliert.

Der Entwurf zur Einleitung von biologisch gereinigtem und filtriertem Abwasser (Höchstwasserabfluss = 720 m<sup>3</sup>/0,5h und 400 l/s bzw. Trockenwetterabfluss = 360 m<sup>3</sup>/0,5h und 200 l/s wurde am 24.02.2003 unter dem Az.: 54.1-3.1-(15.8.12)-6-Bi durch die Bezirksregierung Köln zugesandt.

Die Erlaubnis ist bis zum 31.12.2023 befristet und enthält folgende Überwachungswerte:

- CSB: 30 mg/l
- BSB5: 13 mg/l
- NH4-N: 1,3 mg/l
- Nges: 18 mg/l
- Pges: 0,6 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 Flerzheim

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

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

**Tabelle 5: Verfahrensauswahl für das GWK Flerzheim**

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. Die Bemessung der erforderlichen Dosiermenge ist außerdem mit einer höheren Unsicherheit behaftet, da es weniger großtechnische Umsetzungen dieser Verfahrensvariante gibt. Zuletzt würde die hohe PAK-Dosierung zu einem ca. 20% höheren TS-Gehalt in der Belebung führen, da die PAK-Fracht nicht direkt zur biologischen Reinigungsleistung beiträgt. Vor dem Hintergrund der besonders strengen Überwachungswerte und der bereits heute hohen Auslastung der Anlage wird diese Variante daher nicht weiter verfolgt.

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.

Da die Filtration auf dem GWK Flerzheim nur über 4 Filterkammern und dementsprechend während Rückspülungen über geringe Reserven verfügt, erscheint diese Verfahrensvariante nicht empfehlenswert und könnte nur nach umfangreichen Vorversuchen realisiert werden. Sie wird daher nachfolgend nicht weiter verfolgt.

Die PAK-Dosierung mit eigenem Schlammkreislauf erfordert neben der Errichtung von PAK-Silo und Dosierstation ein Kontaktbecken und ein Sedimentationsbecken, die nach der Nachklärung in den Prozess eingebunden werden. Die beladene und sedimentierte Kohle wird in die Biologie zurückgeführt und der normalen Schlammbehandlung zugeführt. Aufgrund der günstigen Anordnung im Kläranlagenprozess und der Möglichkeit einer internen Kreislaufführung der PAK kann diese sehr hoch beladen und sparsam dosiert werden. Die vorhandene Filtration als Nachbehandlung wird nur unwesentlich höher mit Feststoffen belastet und bedarf keiner Anpassung. Die vorhandenen Freiflächen auf dem Kläranlagengelände wären für die erforderlichen Becken und Einrichtungen ausreichend. Diese Variante wird daher in Kapitel 4.4 näher untersucht.

Die GAK-Filtration in einer zusätzlichen Filterstufe würde nach der vorhandenen Filtration in den Kläranlagenprozess eingebunden werden. Sie hat den Vorteil einer sehr weitgehenden Vorreinigung und die verwendete GAK kann nach der Beladung zu einem großen Teil reaktiviert und wiederverwendet werden. Nachteilig sind die großen erforderlichen Filtervolumina und der damit verbundene sehr hohe bauliche und maschinentechnische Aufwand. Um die Wirtschaftlichkeit dieser Variante zu klären, wird sie in Kapitel 4.5 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 problemlos 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 separatem Schlammkreislauf, Neubau Kontakt- und Sedimentationsbecken (Vollstrom)

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

Variante 2a: Neubau GAK-Filtration (Vollstrom)

Variante 2b: Neubau GAK-Filtration (Teilstrom)

Variante 3a: Neubau Ozonbehandlung (Vollstrom)

Variante 3b: Neubau Ozonbehandlung (Teilstrom)

Da die bestehende Nachklärung des GWK Flerzheim sanierungsbedürftig ist soll die Anlage in den nächsten Jahren ertüchtigt und erweitert werden. Im Rahmen der laufenden Vorplanung wurde als Alternative zur Errichtung neuer Nachklärbecken die Ausrüstung des GWK Flerzheim mit einer nachgeschalteten Membranfiltration zur Abtrennung des Belebtschlammes geprüft und als Vorzugsvariante für die weitere Planung festgelegt. Dadurch kann auf die vorhandene Sandfiltration verzichtet werden und die Flexibilität der Anlage für zukünftige Belastungen erhöht werden.

Alle zu untersuchenden Verfahren sind auch nach Umrüstung des GWK Flerzheim zu einer Membranbelebungsanlage mit geringfügigen Anpassungen umsetzbar und würden von der verbesserten Vorreinigung profitieren.

In Bezug auf die Mikroschadstoffelimination besteht auf Membranbelebungsanlagen zusätzlich die Möglichkeit zur Dosierung von PAK in die Belebung. Bei diesem Verfahren wird die Membranfiltration auch zum Rückhalt der PAK genutzt, sodass auf zusätzliche Sedimentationsstufen und Sandfiltration verzichtet werden kann. Auch der auf manchen Anlagen limitierende TS-Gehalt in den Belebungsbecken kann in einer Membranbelebung wesentlich flexibler eingestellt werden.

Mit der Kombination von Membran- und Aktivkohleverfahren können zusätzlich zu gelösten Mikroschadstoffen auch (multiresistente) Keime und Mikroplastik zurückgehalten werden.

Zudem ist die Umrüstung zu einer Membranbelebungsanlage mit PAK-Dosierung mit größeren Eingriffen in die vorhandene Anlagentechnik und einem höherem Betriebsaufwand verbunden.

Aufgrund der höheren Reinigungsleistung und des insgesamt höheren Aufwandes wird die Ausrüstung des GWK Flerzheim mit einer Membranfiltration und PAK-Dosierung in die Belebung als vierte Variante nicht im direkten Vergleich zu den herkömmlichen Varianten untersucht.

Variante 4: Umrüstung zur Membranbelebungsanlage und PAK-Dosierung

### 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 3.2).

Grundsätzlich kann eine Mikroschadstoffelimination für den gesamten, behandelten Abwasserstrom umgesetzt werden (Vollstrombehandlung), oder nur für einen Teilstrom. Die Auslegungswassermenge für die Vollstrombehandlung entspricht der maximalen Mischwassermenge, die lt. Genehmigung auf der Kläranlage behandelt wird.

Maximale Mischwassermenge:  $Q_m = 1.440 \text{ m}^3/\text{h}$       **zukünftig:  $Q_m = 1.440 \text{ m}^3/\text{h}$**

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:  $Q_{t,2h,max} = 550 \text{ m}^3/\text{h}$     **zukünftig:  $Q_{t,2h,max} = 700 \text{ m}^3/\text{h}$**

Mit dieser Abwassermenge würde mit ca. 87% der Jahresschmutzwassermenge bereits ein sehr großer Teil des anfallenden Abwassers behandelt. Die Anlage zur Teilstrombehandlung kann damit ca. 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  $700 \text{ m}^3/\text{h}$  und darüber hinaus ein Teil des Mischwassergeschehens abgedeckt werden.

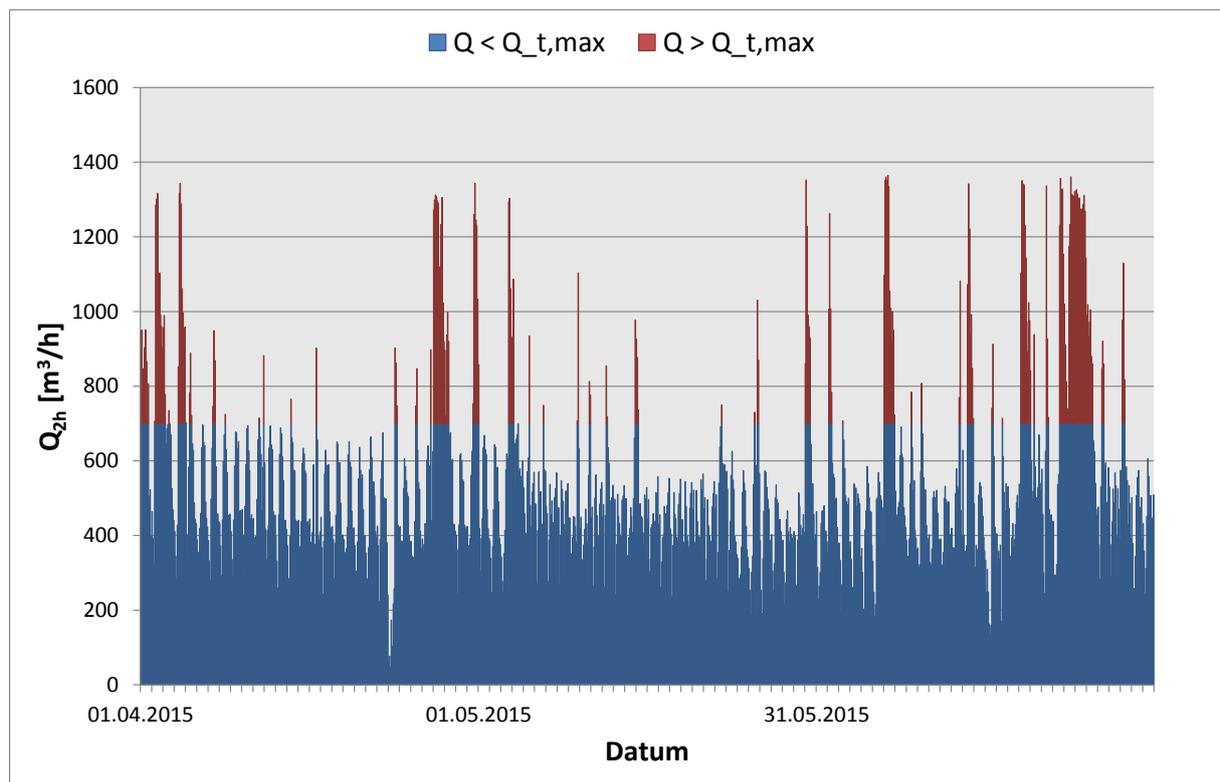


Abbildung 7: Gemessene Zulaufmengen des GWK Flerzheim bei Teilstrom-behandlung behandeltem (blau) und nicht behandeltem Anteil (rot)

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

$$\begin{aligned}
 \text{JAM} &= 5,2 \text{ Mio m}^3/\text{a} \\
 Q_{\text{behandelt}} &= 0,87 * 5,2 \text{ Mio m}^3/\text{a} = 4,524 \text{ Mio m}^3/\text{a}
 \end{aligned}$$

Für die nachfolgende Auslegung der Mikroschadstoffelimination sowie die Berechnung von (spezifischen) Investitions- und Betriebskosten werden die Einwohnerzahlen und Ausbaugröße des Ausbauzustandes inkl. Miel angesetzt.

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.

Der Swistbach hat oberhalb des GW Flerzheim keine dauerhafte Wasserführung und fällt zeitweise trocken. Der Kläranlagenablauf stellt daher häufig den größten Teil des Abflusses im Swistbach unterhalb der Kläranlageneinleitung dar.

Für die Berechnung des Abwasseranteils im Gewässer wurde ein mittlerer Niedrigwasserabfluss (MNQ) von 1 l/s angesetzt. Zukünftig wird das GW Flerzheim inkl. Miel eine Jahresabwassermenge (JAM) von ca. 5,3 Mio m<sup>3</sup>/a behandeln. Daraus ergibt sich ein Ablauf von 168 l/s im Jahresmittel ( $Q_{JAM}$ ).

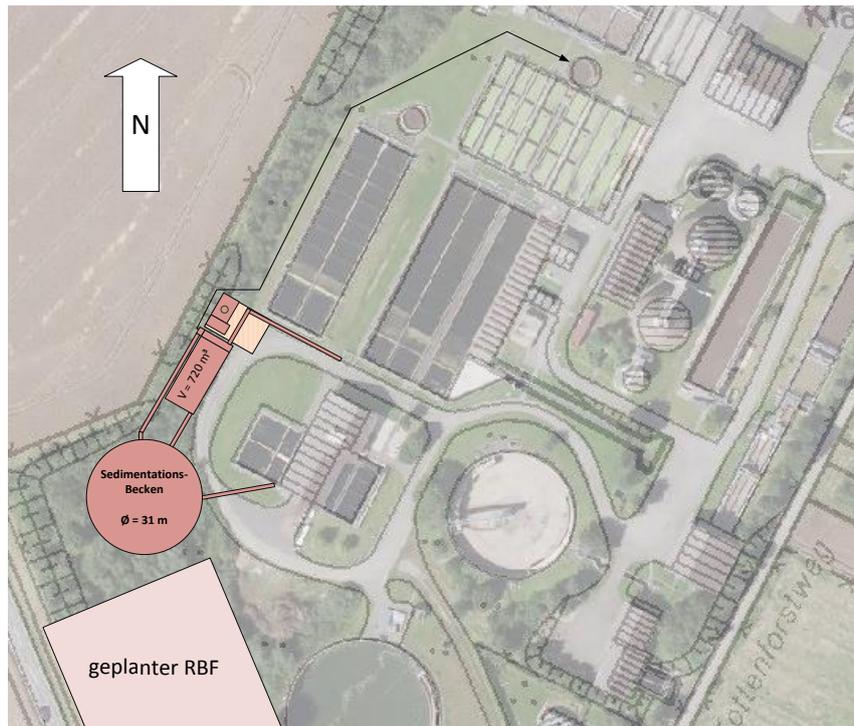
Das Verhältnis des  $Q_{JAM}$  zum MNQ beträgt somit >10.000%.

Demnach wäre für den Ausbau des Gruppenklärwerkes Flerzheim 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 eigenem Schlammkreislauf**

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



**Abbildung 8: Lageskizze PAK-Stufe (Vollstrom)**

Das mechanisch-biologisch gereinigtes Abwasser wird an dem Vereinigungsschacht an der Ablaufseite der rechteckigen Nachklärbecken abgezweigt und in Richtung der Freifläche nordwestlich der Filtration geführt. Nach der geplanten konventionellen Ertüchtigung des GWK mit zwei großen Rundbecken als Nachklärung im Norden der Anlage würde die gemeinsame Ablaufleitung noch näher an die PAK Stufe heranrücken und die Einbindung erleichtern.

Im Zulaufbereich der PAK-Stufe wird das PAK-Lagersilo inkl. PAK-Dosiertechnik sowie zwei Beton Fertigteilstationen für die FM- und FHM-Dosierung und die elektrotechnische Ausrüstung errichtet.

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

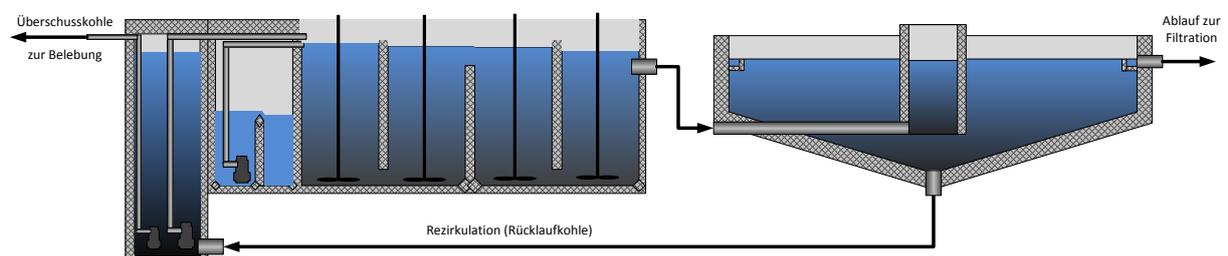
Aus der durchschnittlich zu dosierenden PAK-Menge ergibt sich die erforderliche Lagerkapazität für PAK und die Standzeit. Hierbei ist zu beachten, dass eine Mindestgröße für das Lagersilo nicht unterschritten werden sollte, damit die Ladung eines Silo-LKW aufgenommen werden kann.

Neben der PAK müssen in der Regel auch Flockungsmittel (FM, z.B. Eisensalze) und Flockungshilfsmittel (FHM, polymere) dosiert werden, um die fein dispergierten Aktivkohlepartikel in größere, absetzbare Flocken zu überführen. Hierbei wird auch gelöstes

Phosphat gefällt, sodass im Bereich der auf dem GWK Flerzheim 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.

Da die Hydraulik des GWK Flerzheim insgesamt sehr knapp ist und bereits im Ist-Zustand ein leichter Rückstau aus der Filtration und den NKB in die Belebung zu beobachten ist, kann die PAK-Stufe nicht im freien Gefälle in die bestehende Anlage eingebunden werden.

Stattdessen wird im Kopfbereich des Kontaktbeckens ein Zwischenpumpwerk mit Tauchmotorpumpen angeordnet, das im Falle einer Teilstromlösung auch als Trennbauwerk und Zulaufbegrenzung für die PAK-Stufe dient.



**Abbildung 9: Systemskizze PAK-Stufe**

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

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

Der Klarwasserüberlauf des Sedimentationsbeckens wird wieder an den Zulauf der vorhandenen Nachnitrierung angeschlossen, der sich zwischen den Festbettbecken und der Filtration befindet.

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

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

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

Die Überschussschleimleitung wird entlang der vorhandenen Nachklärbecken zum Verteilerbauwerk für die Denitrifikationsbecken geführt. Somit wird der Kohleschlamm zusammen mit dem normalen Überschussschlamm aus der Belebung 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 13 mgPAK/l der TS-Gehalt in der Belebung um ca. 10%. Für das GWK Flerzheim ergibt sich bei einem durchschnittlichen TS-Gehalt im Istzustand von 3,1 mg/l ein TS inkl. PAK von ca. 3,4 mg/l. Da aus Labor- und Pilotversuchen überwiegend positive Auswirkungen der PAK auf die Absetzeigenschaften des Belebtschlammes berichtet werden, kann die Belebungsstufe des GWK Flerzheim 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.

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

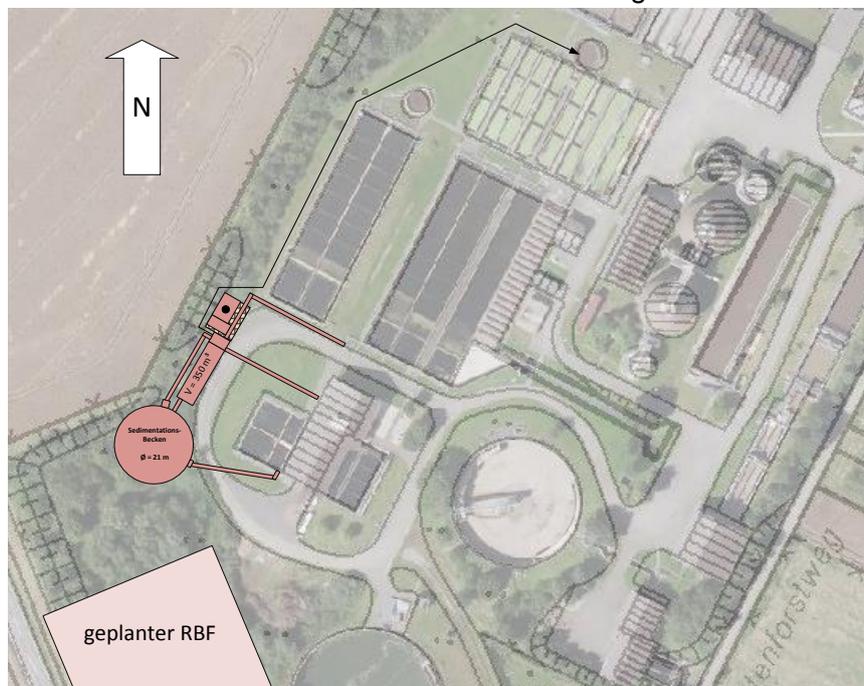


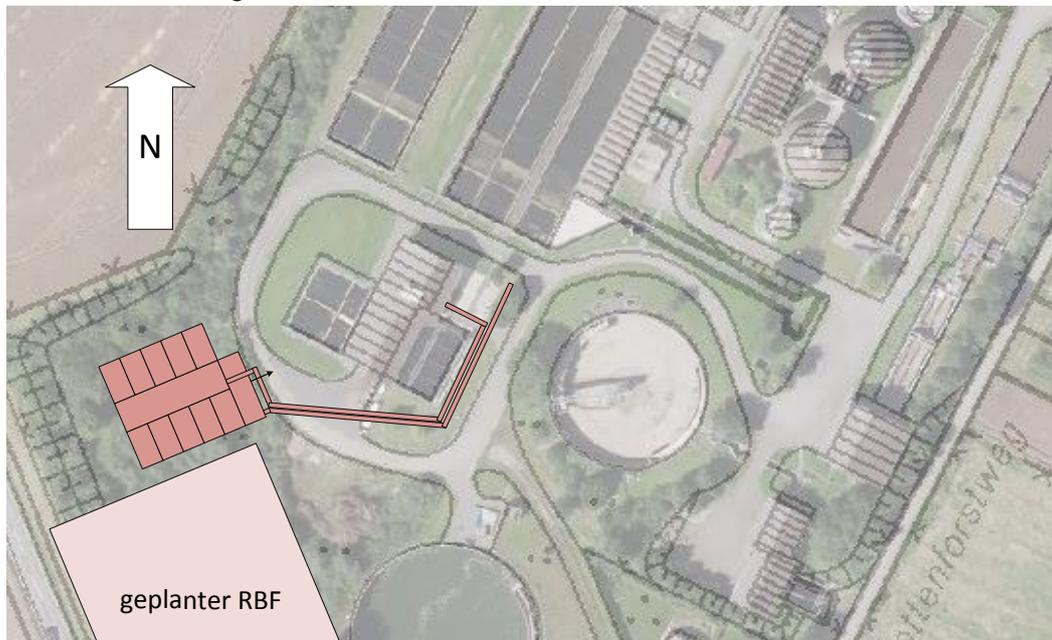
Abbildung 10: Lageskizze PAK-Stufe (Teilstrombehandlung)

## 4.5 Neuerrichtung GAK-Filtration

Für die Einbindung einer GAK Filtration in den bestehenden Kläranlagenprozess gibt es verschiedene Möglichkeiten. Wie für die Behandlungsverfahren mit Pulveraktivkohle oder Ozon sollte eine möglichst gute Vorreinigung erfolgen, um die Beladungskapazität der Aktivkohlekörner zu schonen. Zusätzlich darf die Feststoffbelastung des Zulaufs nicht zu hoch sein, da die Filter ansonsten zu schnell verblocken und häufig rückgespült werden müssen.

Lt. Messungen des Erftverbandes erreicht die Nachklärung des GW Flerzheim eine AFS-Konzentration von im Mittel 9,6 mg/l, was für den Betrieb der GAK-Filtration ausreichend wäre. Jedoch wird aufgrund der niedrigen Überwachungswerte für P die Sandfiltration als Flockungsfilter genutzt und eine Simultanfällung alleine als nicht ausreichend angesehen. Aus diesem Grund kommt eine Umrüstung der bestehenden Filtration nicht in Frage.

Nachfolgend wird daher die Errichtung einer separaten GAK-Filtration als Vollstrom- und Teilstromverfahren geprüft und vordimensioniert. Da die Anzahl der durchsetzbaren Bettvolumina bei höherer AFS-Zulaufkonzentration deutlich sinkt, sollte die GAK-Filtration nach dem Sandfilter angeordnet werden.



**Abbildung 11: Lageskizze GAK-Filtration (Vollstrom)**

Hierzu kann der Ablauf der Sandfilter direkt aus dem Filtrat-Speicherbecken der vorhandenen Sandfiltration abgegriffen werden. Die Platzverhältnisse auf dem GW Flerzheim erlauben keine Platzierung der GAK Filtration direkt zwischen Sandfiltration und Ablauf der Kläranlage. Ausreichende Flächen stehen für die Teilstrombehandlung südlich der vorhandenen Sandfiltration, für die Vollstrombehandlung nur westlich der Sandfiltration zur Verfügung.

Das Zulaufpumpwerk der GAK-Filtration muss gegenüber den übrigen Varianten eine größere Ausgangshöhe bereitstellen, da neben den höheren Leitungsverlusten auch der Filterwiderstand zu höheren hydraulischen Verlusten führt:

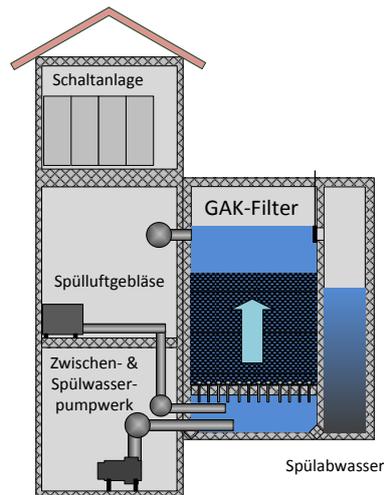


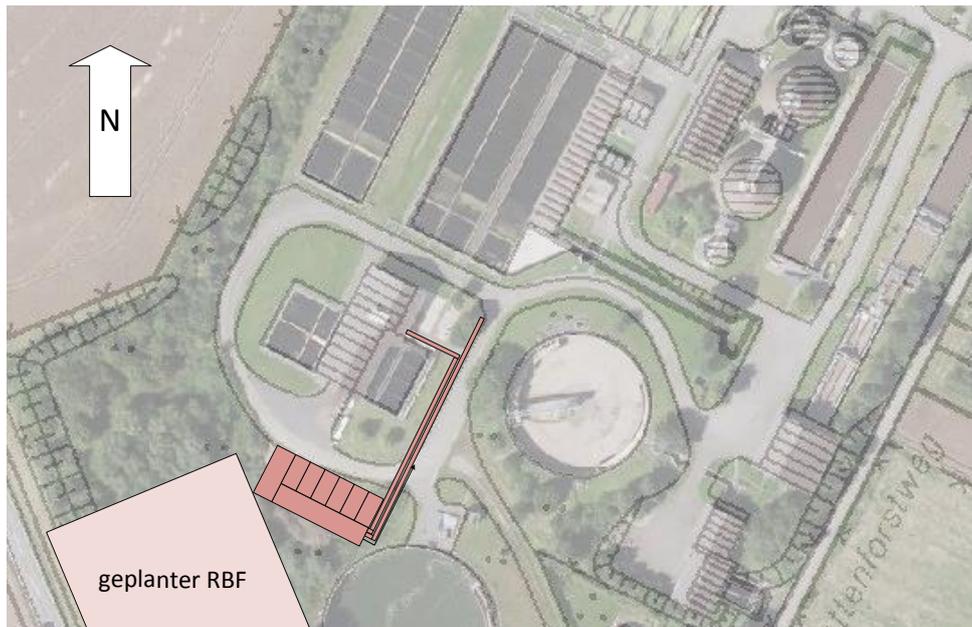
Abbildung 12: Bauwerksskizze GAK-Filtration

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

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

Anzahl und Größe der Filterkammern werden so ausgelegt, dass  $n-1$  Filterkammern für die maximal zu behandelnde Wassermenge ausreichen. So wird sichergestellt, dass bei Rückspülung einer der Filterkammern der Zulauf der Filtration nicht gedrosselt werden muss. Für die Teilstromvariante wurden insgesamt 6 Filterzellen gewählt, um ausreichende Reserven für Filtrerrückspülungen zu erhalten. Da die Ausnutzung der Adsorptionskapazität und die Möglichkeiten für eine günstige Betriebsführung mit der Anzahl der Filterkammern steigt, wurde für die erforderliche Filterfläche für die Vollstrombehandlung auf 10 Filterkammern verteilt.

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



**Abbildung 13: Lageskizze GAK-Filtration (Teilstrom)**

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

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

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

#### **4.6 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 GW Flerzheim bieten sich hierfür die vorhandene Nachnitrifikation und Sandfiltration an, die dem Ozonreaktor nachgeschaltet wird. Hierfür sind keine weiteren Anpassungen erforderlich.

Das mechanisch-biologisch gereinigte Abwasser wird an dem Vereinigungsschacht an der Ablaufseite der rechteckigen Nachklärbecken abgezweigt und in Richtung der Freifläche nordwestlich der Filtration geführt. Nach der geplanten konventionellen Ertüchtigung des GW Flerzheim mit zwei großen Rundbecken als Nachklärung im Norden der Anlage würde die gemeinsame Ablaufleitung noch näher an die Ozonbehandlung heranrücken und die Einbindung erleichtern.

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

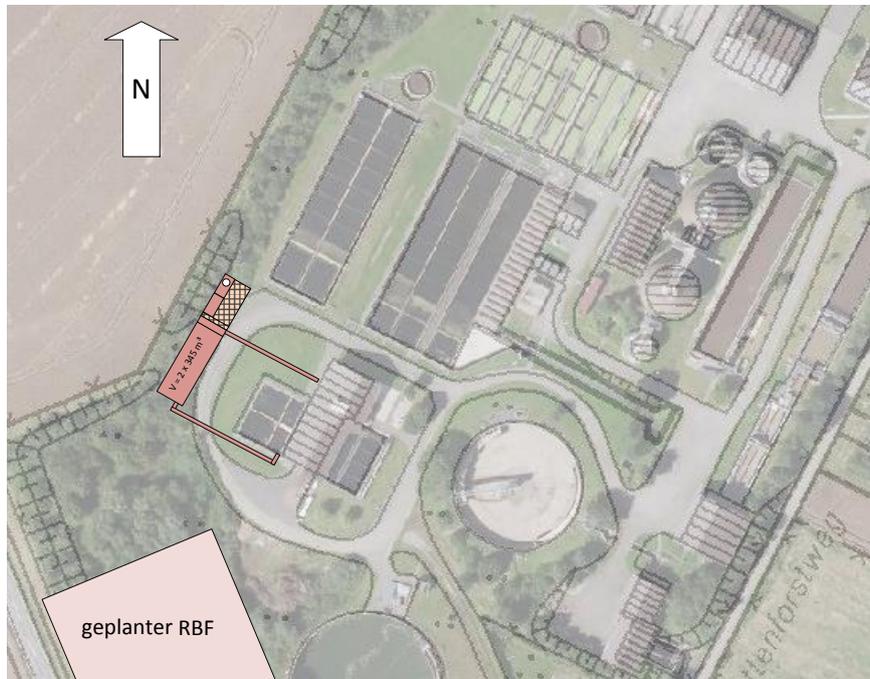


Abbildung 14: Lageskizze Ozonbehandlung (Vollstromverfahren)

Das GWK Flerzheim 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.

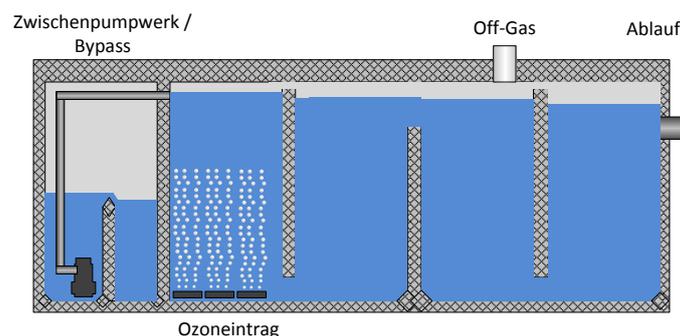


Abbildung 15: Prinzipskizze Ozon-Kontaktreaktor

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

Somit werden sowohl für die Teilstrombehandlung als auch für die Vollstrombehandlung minimale Aufenthaltszeiten von ca. 30 Minuten erzielt. Die mittlere Aufenthaltszeit liegt bei der Vollstrombehandlung deutlich höher als bei der Teilstrombehandlung, da sich die Dimensionierung nach der 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 sowohl der Teilstrom- als auch der Vollstrombehandlung mit Ozon zeigen, dass die erforderliche Fläche für die entsprechenden Bauwerke und Einrichtungen relativ gering ist. Eine Ozonbehandlung ließe sich daher sowohl im Ist-Zustand als auch nach der Ertüchtigung des GWK Flerzheim auf den vorhandenen Erweiterungsflächen umsetzen.

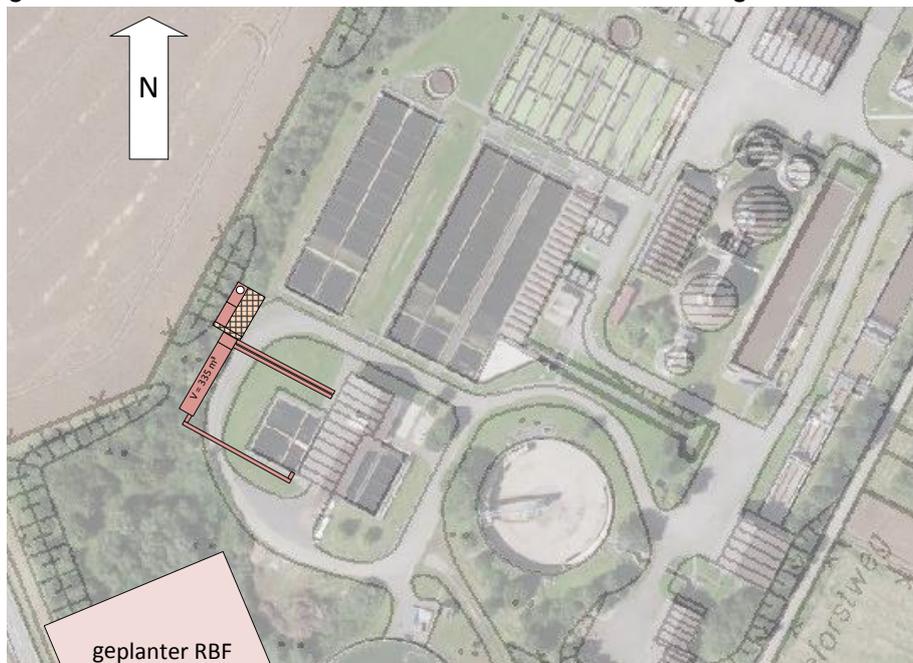


Abbildung 16: Lageskizze Ozonbehandlung (Teilstrom)

#### 4.7 Umrüstung zur Membranbelebungsanlage mit PAK-Dosierung in die Belebung

Im Rahmen der Vorplanung für die Ertüchtigung der Nachklärung des GWK Flerzheim wurde als Alternativvariante zum Neubau zweier Nachklärbecken auch die Errichtung einer Membranfiltrationsstufe untersucht. Diese bietet die Möglichkeit der PAK-Dosierung direkt in die Belebung und könnte neben den gelösten Mikroschadstoffen auch Keime und Mikroplastik zurückhalten. Aufgrund der sehr geringen Leistungsfähigkeit des Swistbachs als Einleitgewässer, den bereits heute hohen Einleitanforderungen und den höheren möglichen Ausbaureserven fiel die Entscheidung für die Membrananlage.

Für die Umrüstung des GWK Flerzheim zur Membranbelebungsanlage müssen nachfolgende Anlagenteile neu errichtet oder umgebaut werden: Neben der eigentlichen Membranfiltration mit der maschinentechnischen Peripherie (Filtrationspumpen, Crossflow-Belüftung) ist ein Rezirkulationspumpwerk und einer Siebanlage zur Vorbehandlung erforderlich. Für die Spurenstoffelimination ist eine kompakte PAK-Lager- und Dosierstation im Bereich der Belebungsbecken erforderlich.

Die Siebanlage wird gemäß der Vorplanung hinter der Vorklärung, im Bereich des im Zuge der Umbaumaßnahmen entfallenden Anaerobbeckens errichtet und kann im freien Gefälle in den Klärprozess eingebunden werden. Hier sollen vor allem leichte Störstoffe entfernt werden, die die Vorklärung passieren, sich in der Membranbelebung aufkonzentrieren und Verzopfungen an den Membranmodulen bilden können.

Die vorhandenen Belebungsbecken können weiter genutzt werden, allerdings müssen die Leitungen zwischen den Denitrifikationsbecken und den Nitrifikationsbecken für erhöhte Rezirkulationsströme vergrößert werden.

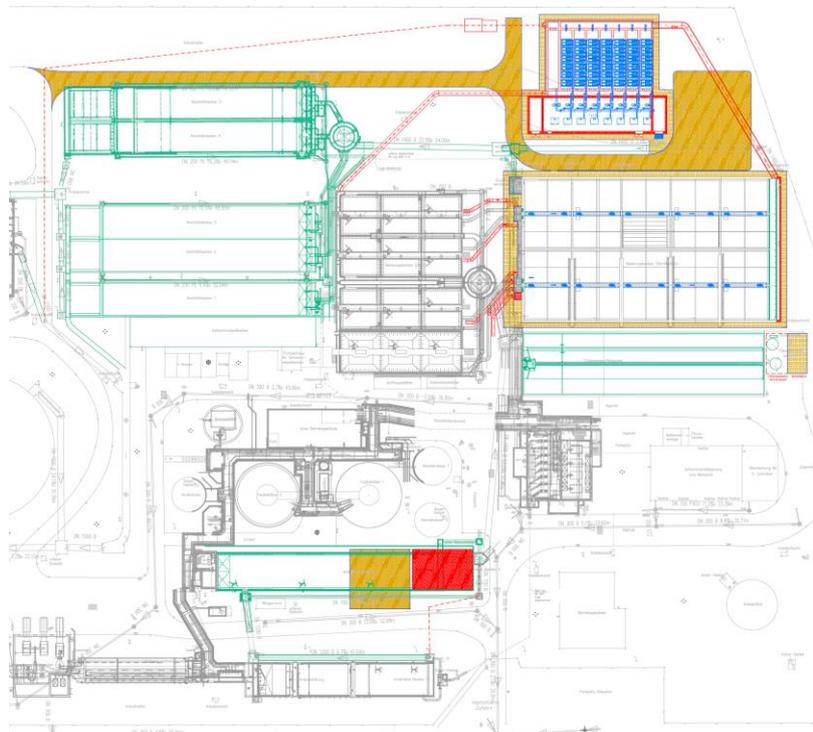


Abbildung 17: Lageskizze geplante Membranfiltration

Die Membranfiltrationsstufe soll 7-straßig ausgelegt und westlich der vorhandenen Belebung auf der in Kapitel 4.1 orange dargestellten Erweiterungsfläche errichtet werden. Die

einzelnen Membranstraßen sollen mit je einer Pumpe beschickt werden, damit der aufkonzentrierte Belebtschlamm im freien Gefälle in die Belebung rezirkuliert werden kann. Am Kopfende der Membranstraßen befindet sich das Maschinenhaus der Membranfiltration, dass die Extraktionspumpen, Belüftungsgebläse und die erforderliche elektrotechnische Ausrüstung aufnimmt.

Das Filtrat der Membranfiltration wird entlang der Nachklärbecken in Richtung der vorhandenen Ablaufleitung geführt. Die Nachklärbecken sowie die Nachnitrifikation und Sandfiltration können nach dem Umbau umgenutzt oder abgerissen werden.

Für die Mikroschadstoffelimination wird in dieser Variante eine PAK Lager- und Dosierstation im Bereich des Verteilerbauwerks zwischen der Denitrifikation und der Nitrifikation errichtet. Die PAK-Suspension wird im Bereich der Nitrifikation zugegeben, um eine geringere Hintergrundbelastung und eine gute Einmischung der PAK zu erzielen. Die PAK wird anschließend in den Belebtschlamm inkorporiert und an den Membranen zurückgehalten bzw. rezirkuliert. Die Entnahme der beladenen PAK erfolgt mit dem normalen Überschussschlammabzug. Die erforderlichen Dosiermengen für die 80%ige Elimination der Leitparameter sind aufgrund der konkurrierenden Adsorption im Belebungsbecken etwas höher als bei der Nachgeschalteten PAK-Dosierung.

## 5 Kostenermittlung und Variantenvergleich

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

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

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

### 5.1 Kostenansätze

Für die Investitionskosten wurden tatsächliche Kosten aus aktuellen, vergleichbaren Projekten (Kläranlagenertüchtigung, Pumpwerke etc.) ausgewertet und Kostenansätze für Betonbauwerke, Leitungen und übliche 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 bis 5 Punkten, wobei eine höhere Punktzahl einer besseren Bewertung entspricht.

technische Kriterien	4. Reinigungsstufe, Verfahren / Varianten			Wichtung
	PAK Verfahren	GAK Verfahren	Ozon Verfahren	
	PAK, Dosierung mit Kontaktbecken & Sedimentation & SF	GAK Filtration, diskont. Filter	Ozonung mit Sandfiltration zur Nachbehandlung	
Eliminationsrate hinsichtl. relevanter Mikroschadstoffe	4	4	4	15%
Bildung von unerwünschten Reaktionsnebenprodukten (z.B. Bromat) und Transformationsprodukten	5	5	1	10%
Veränderung konventioneller Abwasserparameter (CSB, AFS, Pges)	4	4	3	5%
Großtechnische Erprobung des Verfahrens	4	4	4	15%
Regelbereich und Flexibilität des Verfahrens (auch im Hinblick auf zukünft. Anforderungen)	4	2	5	10%
Betriebs- und Wartungsaufwand	3	2	4	10%
Erforderl. Qualifikation des Betreibers	3	3	3	5%
Zusätzlicher Betriebsaufwand konventioneller Anlagenteil (z.B. Schlammfall, Kapazität Biologie)	2	3	3	10%
Zulaufqualität zur Behandlungsstufe	3	4	3	5%
Platzbedarf bei vorhandener Filtration	1	2	3	5%
Einbindung bestehender Bauwerke	5	4	5	5%
Carbon Footprint	2	3	3	5%
<b>technische Bewertung des Verfahrens</b>	<b>3,50</b>	<b>3,40</b>	<b>3,50</b>	<b>100%</b>

**Abbildung 18: Technische Bewertung der untersuchten Verfahren**

Technisch sind die PAK Dosierung mit Kontaktbecken und Sedimentation mit der Ozonbehandlung gleichwertig. Beide können auf dem GWK Flerzheim die vorhandene Sandfiltration als Nachbehandlung nutzen und können problemlos in den bestehenden Kläranlagenprozess eingebunden werden.

Hauptnachteile der PAK-Variante sind der höhere Platzbedarf, potentiell höhere Treibhausgasemissionen und die geringfügige 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 die langjährige Betriebserfahrung auf bestehenden Anlagen sowie die Flexibilität durch die variierbare Dosiermenge sind positiv zu bewerten.

Die Ozonbehandlung des Abwassers hat ihren größten Nachteil in der Bildung von toxischen Reaktionsnebenprodukten und Transformationsprodukten. Durch die unkontrollierte Umwandlung der Abwasserinhaltsstoffe in neue Stoffe besteht trotz der Nachbehandlung im Sandfilter die Gefahr einer Erhöhung der Toxizität des gereinigten Abwassers.

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

Die GAK-Filtration stellt sich in der technischen Bewertung des Verfahrens leicht schlechter dar. Dies ist hauptsächlich in der mangelnden Flexibilität des Verfahrens begründet, die

kaum Anpassungen an sich zukünftig evtl. verändernde Anforderungen zulässt. Zudem ist durch zahlreiche mechanische Anlagenbestandteile und den regelmäßigen Tausch der beladenen GAK ein höherer Aufwand für das Betriebspersonal zu erwarten. Schließlich ist die Einbindung nach der Sandfiltration auf dem GWK Flerzheim räumlich schwierig. Die ausschließliche Entnahme von unerwünschten Stoffen, tendenziell positive Effekte auf die konventionellen Abwasserparameter und die besonders hohe Zulaufqualität durch die vorgelagerte Sandfiltration wirken sich positiv auf die Bewertung aus.

### 5.3 Variantenvergleich Vollstrombehandlung

Die monetäre Bewertung der untersuchten Varianten erfolgt mit Hilfe der in Kapitel 5 ermittelten Jahreskosten. Diese schließen sowohl die jährlichen Kosten für Abschreibung und Zinsen, als auch die laufenden (Betriebs-)Kosten mit ein. In Tabelle 6 werden zunächst die Kosten für die jeweiligen Vollstromvarianten gegenübergestellt, da aufgrund der hohen Abwasserlast in der Swist und der Vorgaben in (KOM-M NRW 2016) eine Vollstrombehandlung am Standort Flerzheim erforderlich ist.

**Tabelle 6: Variantenvergleich Vollstromverfahren**

Variantenvergleich VS	V1a: PAK VS	V2a: GAK VS	V3a: Ozon VS
Investitionskosten (brutto)	6.522.017 €	7.904.127 €	5.144.952 €
Bautechnik	5.101.967 €	5.099.778 €	2.378.841 €
Maschinentechnik	1.183.375 €	2.336.958 €	2.212.888 €
E-Technik	236.675 €	467.392 €	553.222 €
Betriebskosten (brutto)	316.221 €	434.672 €	542.928 €
Material	129.089 €	228.264 €	274.599 €
Energie	15.080 €	26.050 €	146.617 €
Entsorgung	34.707 €	- €	- €
Personal	25.315 €	33.753 €	16.876 €
Instandhaltung	112.031 €	146.605 €	104.835 €
Jahreskosten	695.478 €	929.779 €	896.009 €

Die PAK-Variante V1a ist mit ca. 700.000 €/a Jahreskosten die günstigste Variante zur Spurenstoffelimination. Die Investitionskosten sind mit ca. 6,5 Mio € zwischen den anderen Varianten angesiedelt und werden hauptsächlich durch die Bautechnik für das Kontakt- und Sedimentationsbecken bestimmt. Die Betriebskosten liegen bei dieser Variante unter den Kosten für Kapitaldienst.

Die Variante V3a mit Ozonbehandlung ist mit ca. 900.000 €/a die zweitgünstigste Variante und ca. 30% teurer als V1a. Die Ozonbehandlung hat deutlich günstigere Investitionskosten, wobei der größte Teil der Investitionen auf Maschinen und Elektrotechnik verfällt. Gleichzeitig fallen für die Ozonbehandlung die höchsten Betriebskosten unter den betrachteten Verfahren an, sodass die Jahreskosten im Betrachtungszeitraum über denen der Variante V1a liegen.

Der hohe bauliche und maschinentechnische Aufwand für die Neuerrichtung einer GAK-Filtration führt bei Variante V2a dazu, dass die GAK-Filtration trotz moderater Betriebskosten in den Jahreskosten am teuersten erscheint.

Führt man die Ergebnisse aus dem technischen und dem monetären Variantenvergleich zusammen, so **ist Variante V1a mit PAK-Dosierung sowohl technisch als auch kostenmäßig das beste Verfahren zur Mikroschadstoffelimination auf dem GWK Flerzheim.**

Die Ozonbehandlung ist zwar technisch gleichwertig, führt jedoch aufgrund höherer Betriebskosten über den Betrachtungszeitraum von 30 Jahren zu 30% höheren Kosten.

Die Mikroschadstoffelimination mit granulierter Aktivkohle kann wegen der im Vergleich geringeren Flexibilität und dem höheren Wartungsaufwand nicht empfohlen werden. Für die Vollstrombehandlung müssen zudem sehr große Filterflächen vorgehalten werden, wodurch die Variante V2a auch in der Kostenbetrachtung am schlechtesten abschneidet.

Da im Rahmen der Ertüchtigung des GWK Flerzheim zur Membranbelebungsanlage umgesetzt werden soll, ist die PAK-Dosierung in die Belebung eine sowohl in den Investitions- als auch in den laufenden Kosten eine sehr günstige Alternative zu den nachgeschalteten Verfahren. Aufgrund der höheren Hintergrundbelastung im Belebungsbecken ist bei der Dosierung von PAK in die Belebung eine höhere Dosiermenge zur Erreichung der geforderten 80%igen Elimination erforderlich. Durch die geringen zusätzlichen Investitionskosten und entsprechend niedrige Ansätze für Wartung und Instandhaltung sind die Betriebs- und Jahreskosten dennoch sehr niedrig für eine Vollstrombehandlung.

Gegenüber den Varianten 1-3 werden im PAK-MBR zusätzlich zu den gelösten Mikroschadstoffen auch (multiresistente) Keime und Mikroplastik zurückgehalten und eine deutlich höhere Ablaufqualität erzeugt.

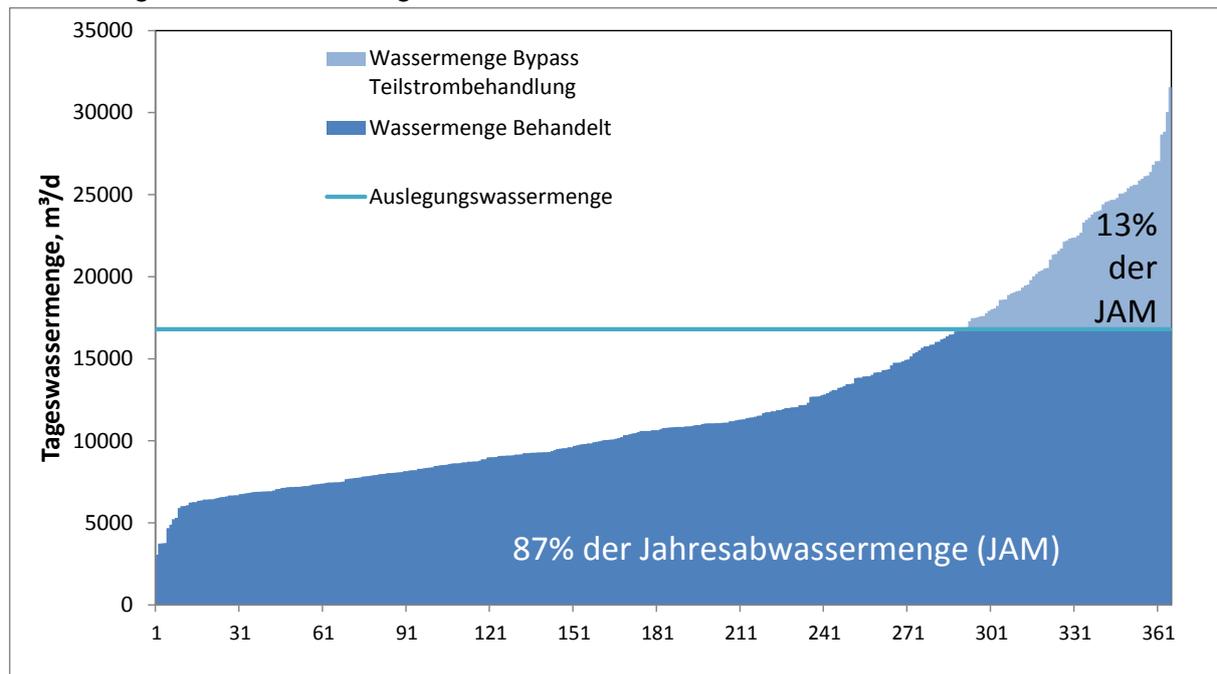
Aufgrund der hohen Investitionskosten und Betriebskosten der Membranbelebung kommt diese Verfahrensvariante als Lösung allein für die Mikroschadstoffelimination nicht in Frage. Wenn allerdings hohe Sanierungsbedarfe bei der Nachklärung und/oder Sandfiltration bestehen oder eine Kapazitätserhöhung erforderlich ist, kann bei Anlagen mit hohen Ablaufanforderungen eine Membranfiltration wirtschaftlich sein.

#### 5.4 Variantenvergleich Teilstrombehandlung

Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben ist für das GWK Flerzheim 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 Flerzheim betragen in der günstigsten Variante 700.000 €/a, obwohl bereits eine Sandfiltration vorhanden ist, die 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 36% geringeren Jahreskosten auf (Tabelle 7). Im Folgenden werden einige Überlegungen zum

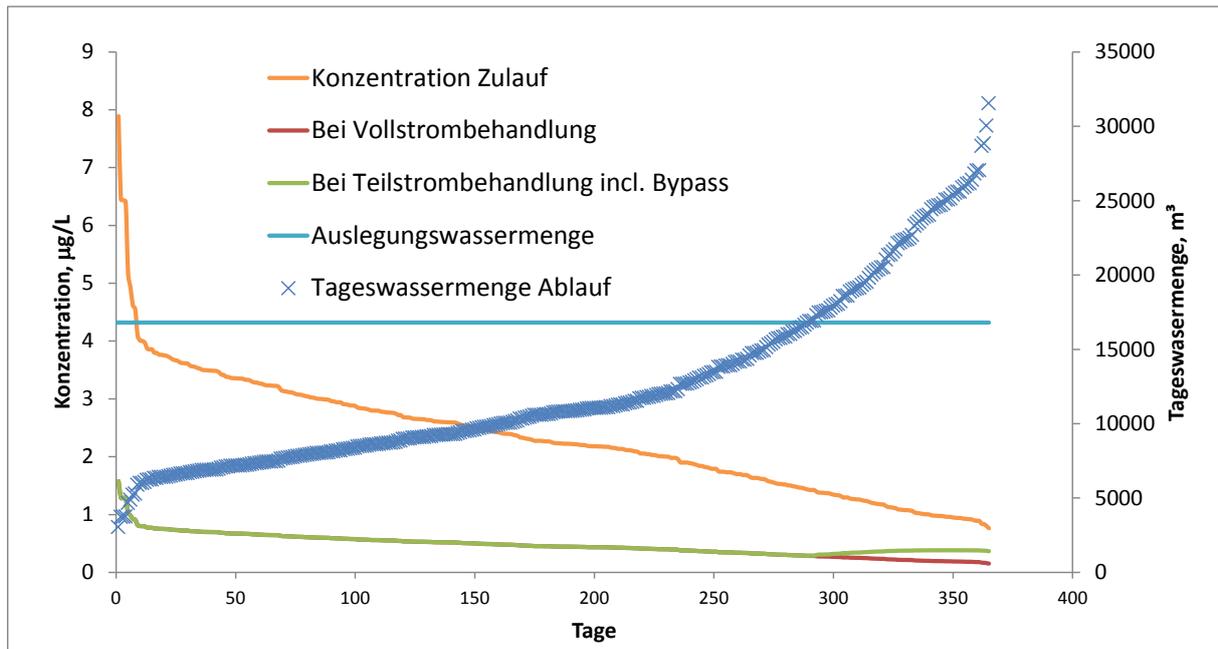
Vergleich der Wirksamkeit der Teil- bzw. Vollstromlösungen angestellt, so dass eine Bewertung der Effizienz ermöglicht wird.



**Abbildung 19: Behandelte Wassermenge und Bypassmenge bei der Teilstrombehandlung**

Der maximale Mischwasserzufluss tritt im Jahresverlauf nur selten, bei großen Regenereignissen im Einzugsgebiet der Kläranlage auf. Abbildung 19 verdeutlicht diesen Zusammenhang. Die Tageszuflüsse zur Kläranlage in m<sup>3</sup>/d sind hier für das Jahr 2015 der Größe nach geordnet aufgetragen. Im Jahre 2015 wurden im Einzugsgebiet an 146 Tagen des ausgewerteten Jahres Trockenwetterbedingungen (<0,3mm Niederschlag am Tag und am Vortag) registriert. Die Teilstrombehandlung kann mit einer Kapazität von 16800 m<sup>3</sup>/d (gemäß Dimensionierung in Kapitel 4.3) kann aber sogar an 287 Tagen im Jahr den Abwasserstrom vollständig behandeln. Lediglich an 77 Tagen im Jahr wird die Kapazität der Teilstrombehandlung überschritten, so dass ein Teil des biologisch gereinigten Abwassers aus der konventionellen Reinigungsstufe an der 4. Reinigungsstufe vorbei geführt wird. Insgesamt können aber immer 87% 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 20: 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 20). Die mittlere Tagesfracht an Diclofenac im Zulauf der Kläranlage beträgt 50,75 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 4 µg/l bei Trockenwetter und 0,8 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 0,45 µg/l gegenüber 0,43 µg/l bei Vollstrombehandlung. Das entspricht dann mittleren Gesamtwirkungsgraden von 79% bzw. 80% bezogen auf die Zulaufkonzentration. Bezogen auf die im Jahresmittel emittierten Konzentrationen an Spurenstoffen ist damit der zusätzliche Nutzen einer Vollstrombehandlung gering. Ein ähnliches Bild liefert die Frachtbetrachtung. Hier wird gegenüber einem Wirkungsgrad der Teilstrombehandlung von 75% in der Vollstrombehandlung nur eine Steigerung des Wirkungsgrades auf 80% erzielt. Tatsächlich können in einer 4. Reinigungsstufe für Diclofenac aber auch andere Mikroschadstoffe Eliminationsraten von durchschnittlich deutlich über 80% erzielt werden, was den ohnehin geringen Vorteil der Vollstrombehandlung weiter mindert. Eine durch Ausbau der Anlage zur Vollstrombehandlung hervorgerufene, signifikante Reduzierung der Mikroschadstoffkonzentrationen im Gewässer dürfte damit in der Praxis kaum nachweisbar sein.

Wirtschaftlich gesehen weisen Vollstrombehandlungsanlagen einen stark abnehmenden Grenznutzen auf, da große Anlagen vorgehalten und betrieben werden müssen, deren volle Kapazität nur an wenigen Tagen pro Jahr benötigt wird.

**Tabelle 7: Variantenvergleich Teilstromverfahren**

Variantenvergleich TS	V1b: PAK TS	V2b: GAK TS	V3b: Ozon TS
Investitionskosten (brutto)	3.752.120 €	4.350.016 €	3.310.788 €
Bautechnik	2.808.190 €	2.812.974 €	1.540.930 €
Maschinentechnik	786.608 €	1.280.868 €	1.415.886 €
E-Technik	157.322 €	256.174 €	353.971 €
Betriebskosten (brutto)	235.176 €	317.050 €	451.046 €
Material	103.271 €	182.611 €	238.683 €
Energie	13.103 €	20.066 €	128.126 €
Entsorgung	27.765 €	- €	- €
Personal	25.315 €	33.753 €	16.876 €
Instandhaltung	65.721 €	80.621 €	67.360 €
Jahreskosten	457.520 €	589.323 €	677.921 €

Analog zu den Vollstromvarianten ist auch bei der Teilstrombehandlung die PAK Dosierung in ein Kontaktbecken mit anschließender Sedimentation die günstigste Variante. Die Investitionskosten sind mit 3,75 Mio € gegenüber 6,5 Mio € für die Vollstromvariante annähernd halb so groß. Die Betriebskosten verringern sich nicht im gleichen Maße, da trotzdem ca. 87% der Jahresabwassermenge behandelt werden. Zusammen ergeben sich ca. 460.000 €/a Jahreskosten, was etwa 66% der Jahreskosten der Vollstromvariante entspricht. **Damit ist auch bei den Teilstromvarianten die Variante V1b die günstigste und gleichzeitig technisch beste Variante.**

Die Behandlung des Abwassers in einer nachgeschalteten GAK-Filtration ist die zweitgünstigste Teilstromvariante (V2b). Durch die geringere Auslegungswassermenge fällt die erforderliche Filterfläche deutlich kleiner aus, was sich in den Investitionskosten widerspiegelt. Diese Variante profitiert daher am meisten von der geringeren Auslegungswassermenge. Der einzige Vorteil gegenüber Variante V1b sind die tendenziell geringeren Treibhausgasemissionen.

Die Teilstrombehandlung mit Ozon kostet ca. 680.000 €/a und damit fast 50% mehr als die PAK-Variante. Dies lässt sich zum einen durch die höheren spezifischen Betriebskosten erklären. Zum anderen ist der Anteil an Maschinen- und Elektrotechnik in den Investitionskosten höher. Dieser skaliert im Gegensatz zu den Betonbecken der PAK- und GAK-Varianten weniger stark mit der Auslegungswassermenge.

Zusammenfassend sind sowohl für eine Voll- als auch für eine Teilstrombehandlung die PAK-Verfahren technisch und wirtschaftlich am besten auf dem GWK Flerzheim anwendbar. Für eine Vollstrombehandlung wäre eine Ozonbehandlung, für die Teilstrombehandlung die GAK-Filtration das zweitbeste Verfahren.

## 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 GW Flerzheim liegt in der Stadt Rheinbach nördlich der Ortslage Flerzheim und leitet bei Flusskilometer 21,3 in den Swistbach ein. Der Ablauf des GW Flerzheim beträgt in der Regel ein Vielfaches des natürlichen Abflusses und prägt den Swistbach bis zur Mündung in die Erft maßgeblich mit. Neben dem Swistbach wurde auch der parallel verlaufende Liblarer Mühlengraben betrachtet.

Der Swistbach und die folgenden Gewässerabschnitte sind bis zur Einmündung in die Erft als vollständig bis mäßig stark verändert bewertet.

Der chemische Zustand der betrachteten Gewässerabschnitte wurde im 3. Monitoringzyklus oberhalb der Einleitung des GW Flerzheim mit „gut“, unterhalb der Einleitung mit „nicht gut“ bewertet.

Das für die „erheblich veränderten Oberflächenwasserkörper“ maßgebliche ökologische Potential wird unterhalb des GW Flerzheim 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 GW Flerzheim verschlechtert.

Bei Betrachtung der Konzentrationen der Standardabwasserparameter oberhalb und unterhalb der Einleitstelle kann für die Parameter „Stickstoff gesamt“ und für Phosphor gesamt ein deutlicher Anstieg der Gewässerkonzentration festgestellt werden. Insgesamt dürfte der Stickstoffeintrag aus der Landwirtschaft den Eintrag aus den Kläranlagen jedoch deutlich übersteigen.

Für die Mikroschadstoffe (die 7 Leitparameter) wurde im Rahmen der Studie ein deutlicher Anstieg der Gewässerkonzentrationen durch die Einleitungen der Kläranlagen Flerzheim und Rheinbach beobachtet. Während die Leitparameter oberhalb der Einleitung nicht oder nur in geringen Konzentrationen nachgewiesen werden konnten, werden unterhalb der Einleitung die Bewertungskriterien für Sotalol (0,1µg/l) und Diclofenac (0,05µg/l) überschritten. An der Mündung des Wallbachs steigen alle betrachteten Mikroschadstoffkonzentrationen nochmals deutlich an. Werden neben den Leitparametern auch andere Stoffe betrachtet, gibt es bereits oberhalb des GW Flerzheim eine nennenswerte Belastung mit Mikroschadstoffen, darunter z.B. Pflanzenschutzmittel.

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 25 Maßnahmen für die Swist und 12 Maßnahmen für den parallel verlaufenden Liblarer Mühlengraben.

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 Flerzheim betrachtet. Im Ergebnis könnten die Mikroschadstoffkonzentrationen im Swistbach mit dem Bau einer 4. Reinigungsstufe auf dem GWK Flerzheim deutlich gesenkt werden. Dennoch läge unterhalb des GWK Flerzheim die Konzentration von Diclofenac über dem Bewertungskriterium.

## 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 GW Flerzheim erscheint die Ausrüstung mit einer Mikroschadstoffelimination sinnvoll. Die Anlage ist am Swistbach die erste größere Einleitung aus der Siedlungswasserwirtschaft und stellt in Phasen mit geringem natürlichem Abfluss den weitaus größten Anteil des Abflusses im Gewässer dar. Zusammen mit der nahegelegenen KA Rheinbach prägt der Abwassereinfluss die Wasserqualität des Swistbachs bis zur Mündung in die Erft.

Mit Inbetriebnahme des nachgeschalteten Bodenfilters 2019 erhält die KA Rheinbach eine Behandlungsstufe zur Mikroschadstoffelimination. Vor dem Hintergrund, dass die kleineren Kläranlagen Heimerzheim und Miel in den kommenden Jahren geschlossen und zu größeren Anlagen übergeleitet werden, steigt die Bedeutung des GW Flerzheim für die Wasserqualität im Swistbach weiter. Würde das GW Flerzheim mit einer 4. Reinigungsstufe ausgerüstet, könnte der Eintrag von abwasserbürtigen Mikroschadstoffen in den Swistbach sehr weitgehend minimiert werden.

## 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 Flerzheim ist mit einer Ausbaugröße von zukünftig 65.000 EW eine mittelgroße Anlage an der Swist im Oberlauf des Erfteinzugsgebietes. Es hat mit seinem großen Anteil am Abfluss in der Swist maßgeblichen Einfluss auf die Gewässerqualität und hat durch die vorhandene Sandfiltration gute Voraussetzungen für die Implementierung einer Mikroschadstoffeliminationsstufe. Erst nach ca. 4 km Fließstrecke mündet der Wallbach mit dem Einfluss der KA Rheinbach in die Swist. Die KA Rheinbach wird zur Zeit im Rahmen eines Forschungsprojektes mit einem Bodenfilter zur Mikroschadstoffelimination ausgerüstet, sodass bei Ausrüstung des GWK Flerzheim auf ca. 11 km Fließstrecke bis zur KA Heimerzheim die Mikroschadstoffemissionen aus der Siedlungswasserwirtschaft deutlich gesenkt werden könnten.

Letztlich muss ein Gewässereinzugsgebiet jedoch ganzheitlich betrachtet werden. Die Entscheidung zur Ausrüstung einzelner Anlagen sollte in einem Gesamtkonzept bewertet werden.

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 und drei Verfahren detailliert auf ihre Umsetzbarkeit und die Kosten untersucht:

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

Für jedes der drei Verfahren eine Untervariante zur Vollstrom- und zur Teilstrombehandlung betrachtet, sodass insgesamt 6 Untervarianten untersucht wurden.

Die grundsätzlichen, technischen Voraussetzungen zur Errichtung einer 4. Reinigungsstufe auf dem GWK Flerzheim sind gegeben. Die nach Errichtung eines geplanten Bodenfilters noch vorhandenen Erweiterungsflächen im Bereich Ablauf Nachklärung und Sandfiltration ermöglichen eine hydraulisch günstige Einbindung einer Ozon- oder PAK-Stufe. Die vorhandene Sandfiltration eignet sich zudem als Nachbehandlung für die vorgenannten

Verfahren. Die vorhandene Sandfiltration ist aufgrund der geringen Anzahl von Filterzellen und fehlender, verfügbarer Reserven nicht für eine Umrüstung zu einer GAK-Filtration geeignet. Eine neu zu errichtende GAK-Filtration sollte für eine möglichst gute Vorbehandlung hinter der Sandfiltration angeordnet werden. Hierfür ist die Lage der Erweiterungsflächen nicht ideal, sodass längere Leitungswege und höhere hydraulische Verluste in Kauf genommen werden müssen.

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

Insgesamt stellen sich die Varianten V1 (PAK-Dosierung) und V3 (Ozonung) vor allem auf Grund der höheren Flexibilität als technisch beste Varianten dar und liegen in der Bewertung gleich auf. Die V2 (GAK-Filtration) erreicht eine etwas schlechtere Bewertung.

Bei den Kosten muss zwischen Vollstrom und Teilstromlösungen unterschieden werden. Hier werden die Jahreskosten als maßgeblich betrachtet, da sie sowohl Investitions- als auch Betriebskosten berücksichtigen.

Bei den Vollstromlösungen (Varianten V1**a-3a**) stellt V1a (PAK-Dosierung) bei Betrachtung der Jahreskosten die günstigste Variante dar. Die PAK-Dosierung ist damit sowohl aus technischer als auch aus wirtschaftlicher Sicht die beste Variante.

Die Ozon-Dosierung (V3a) erreicht trotz geringerer Investitionskosten aufgrund der höheren Betriebskosten höhere Jahreskosten bei gleicher technischer Bewertung.

Variante V2a (GAK-Filtration) hat aufgrund der sehr hohen Investitionskosten und der mittleren Betriebskosten die höchsten Jahreskosten und fällt damit auch in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung hinter die anderen Varianten zurück.

Bei den Teilstromvarianten (V1**b-3b**) wird der Ablauf des GWK Flerzheim nur bis zu einem Durchfluss von 195 l/s (etwa 50%  $Q_m$ ) in der 4. Reinigungsstufe behandelt. Bei höherem Zufluss (bei größeren Regenereignissen) wird die darüber hinaus gehende Wassermenge an der 4. Reinigungsstufe vorbeigeführt. Dadurch kann trotz wesentlich kleinerer Auslegung der Reinigungsstufe über 80% der Jahresabwassermenge behandelt werden.

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

Die PAK-Dosierung (V1b) stellt auch bei der Teilstrombehandlung die günstigste Variante dar.

Die GAK-Filtration (V2b) erreicht bei dieser Betrachtung die nächstniedrigeren Jahreskosten, die Ozonbehandlung (V3b) hat als Teilstromverfahren die höchsten Jahreskosten.

Die PAK-Dosierung ist damit auch als Teilstromverfahren sowohl das günstigste als auch das technisch beste Verfahren. V2b und V3b können sich nicht eindeutig voneinander absetzen.

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 GW Flerzheim 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. 40% höheren Investitionskosten führen kann, ohne dass die mittlere Konzentration an Mikroschadstoffen noch signifikant abgesenkt wird. Die betrachteten Varianten mit Teilstrombehandlungen können 87% der Jahresabwassermenge behandeln. Mittels Modellrechnungen wurde gezeigt, dass eine Vollstrombehandlung auf dem GW Flerzheim in einer Jahresbilanz eine zusätzliche Verminderung des Eintrags von Diclofenac von 1% (Konzentrationsbetrachtung) bzw. 5% (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](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. Hennef: DWA.
- DWA. 2014. „Membran-Bioreaktor-Verfahren (MBR-Verfahren)“. Merkblatt DWA-M 277. DWA-Regelwerk. Hennef: DWA.
- DWA, Hrsg. 2015. *Möglichkeiten der Elimination von anthropogenen Spurenstoffen*. Stand: April 2015. DWA-Themen, 2015,3. Hennef: DWA.
- Erftverband. 2004. „Optimierung einer Belebungsanlage mit Membranfiltration (Kläranlage Rödingen)“. Technical report 1–3. Bergheim / Erft: Erftverband.
- 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“. *GWK 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](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](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](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. „ARANEgut - 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-Küssnachersee-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](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](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>.