



## Stadt Bad Wünnenberg

- Der Bürgermeister -

Kreis: Paderborn - Reg.-Bez.: Detmold

### Elimination von Mikroschadstoffen auf der Kläranlage Bad Wünnenberg Haaren

#### - Machbarkeitsstudie -

gefördert durch das  
Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur-  
und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen,  
Bezirksregierung Detmold, Dezernat 54.8



#### Aufgestellt im November 2018

Ingenieurbüro Dipl.-Ing. M. Danjes GmbH  
Herr Dipl.-Ing. Frank Waermer, Beratender Ingenieur  
Schubertplatz 15, 32756 Detmold, Telefon +49 5231 9799-0  
[info@danjes.de](mailto:info@danjes.de), [www.danjes.de](http://www.danjes.de)  
Proj.-Nr.: 0009.01.01



# Inhalt

## Erläuterungsbericht

## Anhang

- Analysen
- Verfahrenstechnische Berechnungen
- Ermittlung der Kosten

## Planunterlagen

Plan	Bezeichnung	Maßstab
1	Variante I GAK: Lageplan Kläranlage	1 : 1.000
2	Variante II PAK Vollstrom: Lageplan Kläranlage	1 : 1.000
3	Variante III Ozon: Lageplan Kläranlage	1 : 1.000

# Erläuterungsbericht



BERATENDE INGENIEURE  
BAUWESEN • DANJES GMBH  
Ingenieurgruppe Dr. Knollmann  
Hannover - Cottbus - Detmold

## Projektpartner

Vielen Dank für die hervorragende Zusammenarbeit:

Bauherr	Adresse	Mitarbeit
	Stadt Bad Wünnenberg Der Bürgermeister Kirchstraße 10, 33181 Bad Wünnenberg  <a href="mailto:Stadt@Bad-Wuennenberg.de">Stadt@Bad-Wuennenberg.de</a> <a href="http://www.bad-wuennenberg.de">http://www.bad-wuennenberg.de</a>	Herr König (vormals Herr Frericks, Verwaltung),  Herr Niggemeyer (Kläranlage)
<b>Machbarkeitsstudie</b>		
 <p>BERATENDE INGENIEURE BAUWESEN • DANJES GMBH Ingenieurgruppe Dr. Knollmann Hannover - Cottbus - Detmold</p>	Dipl.-Ing. M. Danjes GmbH Beratende Ingenieure Schubertplatz 15, 32756 Detmold Telefon +49 5231 9799-0  <a href="mailto:info@danjes.de">info@danjes.de</a> , <a href="http://www.danjes.de">www.danjes.de</a>	Herr Waermer Beratender Ingenieur (Projektleitung, Verfahrenstechnik), Herr Radeck (Studie, Kosten) Herr Finkemeyer (Konstruktion) Herr Nagel (Literatur)
<b>Probenahme und Analytik</b>		
	OWL Umweltanalytik GmbH Westring 93 33818 Leopoldshöhe Telefon +49 5202 92332-0  <a href="http://www.owlumwelt.de">www.owlumwelt.de</a>	Herr Dr. Noll

Außerdem bedanken wir uns bei den Kollegen der Ingenieurgruppe Dr. Knollmann, die uns wertvolle Erfahrungen aus anderen Projekten zur Elimination von Mikroschadstoffen auf kommunalen Kläranlagen zur Verfügung stellten.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Projektpartner</b> .....	<b>1</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>2</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>4</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>5</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>7</b>
<b>1 Veranlassung</b> .....	<b>9</b>
<b>2 Vorhandene Verhältnisse</b> .....	<b>11</b>
2.1 Kurzbeschreibung der Kläranlage .....	11
2.2 Analyse zu den Spurenstoffen.....	15
2.3 Aussagen zum Gewässer .....	18
<b>3 Abwasserparameter der Kläranlage (IST-Zustand)</b> .....	<b>19</b>
3.1 Vorhandene Datengrundlage .....	19
3.2 Abflüsse nach DWA A 198 .....	20
3.2.1 Auswertung Kläranlage Haaren 2016 und 2017.....	20
3.2.2 Fazit zu den Abflüssen .....	27
3.3 Frachten und Konzentrationen nach DWA A 198 .....	28
3.3.1 Auswertung Kläranlage Haaren 2017 .....	28
3.3.2 Fazit zu den Frachten .....	31
3.4 Tendenzen der Abflüsse und Frachten.....	32
<b>4 Weitere Anforderungen aus dem Bestand</b> .....	<b>33</b>
4.1 Einfluss von Wartung und Substanzerhalt.....	33
4.2 Überprüfung der Bemessung der Kläranlage .....	33
<b>5 Grundlagen der Mikroschadstoffelimination</b> .....	<b>36</b>
5.1 Verfahrenstechniken zur Mikroschadstoffelimination .....	36
5.2 Grundlagen der Aktivkohleadsorption.....	38
5.3 Anlagen zur Pulveraktivkohle-Adsorption .....	49
5.4 Anlagen mit granulierter Aktivkohle .....	51
5.5 Grundlagen der chemischen Oxidation mit Ozon .....	54
5.6 Anmerkung zu Oxidations- und Adsorptionsverfahren.....	58
5.7 Erforderliche Vor- und Nachbehandlung .....	59
5.7.1 Vorbehandlung bei Granulierter Aktivkohle.....	59
5.7.2 Nachbehandlung bei Pulveraktivkohle .....	59
5.7.3 Nachbehandlung bei Ozon .....	63
5.8 Kriterien zur Verfahrenswahl .....	63
5.9 Mögliche Verfahrenskombinationen .....	65

5.10	Erwartete Synergieeffekte .....	66
<b>6</b>	<b>Dimensionierung der Mikroschadstoffelimination .....</b>	<b>68</b>
6.1	Auslegungswassermenge .....	68
6.2	Verfahrenstechnische Auslegung .....	72
6.3	Erwartete Synergieeffekt bei Verfahren mit PAK .....	73
6.4	Laborversuche zum Bemessungsansatz.....	74
<b>7</b>	<b>Variantenbetrachtung für die Kläranlage Haaren .....</b>	<b>75</b>
7.1	Festlegung der Varianten .....	75
7.2	Ertüchtigung des Kläranlagenbestandes .....	77
7.3	Variante I GAK-Adsorber.....	79
7.4	Variante II PAK Vollstrom.....	80
7.5	Variante III Chemische Oxidation mit Ozon .....	81
<b>8</b>	<b>Kostenermittlung Kläranlage Haaren .....</b>	<b>83</b>
8.1	Kostengrundlagen.....	83
8.1.1	Varianten zur Mikroschadstoffelimination.....	83
8.2	Herstellungskosten.....	86
8.3	Laufende Kosten Mikroschadstoffelimination .....	88
8.4	Jahreskosten Mikroschadstoffelimination (KVR-Leitlinie) .....	90
<b>9</b>	<b>Bewertungsmatrix und Verfahrensempfehlung .....</b>	<b>93</b>
9.1	Bewertungskriterien .....	93
9.2	Anmerkungen zur CO2-Bilanz.....	94
9.3	Bewertungsmatrix .....	97
9.4	Verfahrensempfehlung.....	98
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>99</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>103</b>
	<b>Autorenverzeichnis.....</b>	<b>106</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>107</b>

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung	Einheit
AbwAG	Gesetz über Abgaben für das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserabgabengesetz)	
AF	Ablauf Filter	
$A_{\text{Filter}}$	Netto-Filterfläche	cm <sup>2</sup>
AFS	Abfiltrierbare Stoffe	mg/l
AK	Aktivkohle	
Al	Aluminium	
BB	Belebungsbecken	
BSB <sub>5</sub>	Biochemische Sauerstoffbedarf über 5 Tage	mg/l
BV	durchgesetzte Bettvolumina, als m <sup>3</sup> Abwasser pro m <sup>3</sup> Adsorbens	[-]
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf	mg/l
$C_{\text{XXX}}$	Konzentration des Parameters XXX, in der homogenisierten Probe	mg/l
$C_{\text{Zu}}$	Konzentration des Parameters im Zulauf	mg/l bzw. µg/l
$d_{\text{Filter}}$	netto Durchmesser der Aktivkohle-Filtersäule	cm
DOC	Gelöster organischer Kohlenstoff (dissolved organic carbon)	mg/l
EW	Einwohnerwerte	EW
FF	Flockungsfilter	
FHM	Flockungshilfsmittel	
FM	Fällmittel	
FTU	Trübung (Formazine Turbidity Unit), vorwiegend in der Wasseraufbereitung verwendete Einheit	
FzF	Fuzzy-Filter	
GAK	Granulierte Aktivkohle	
GC	Gaschromatograph	
$h_{\text{Filter}}$	Nettohöhe der Aktivkohle-Filtersäule	cm
$h_{\text{GAK}}$	Aktivkohle-Filterbetthöhe	cm
HPLS/MS	Flüssigchromatographie mit Massenspektrometrie-Kopplung	
HRT	Hydraulische Aufenthaltszeit	min
ISV	Schlammvolumenindex	l/kg
KB	Kontaktbecken: Dosierung und Mischung von PAK im Abwasser	
N	Stickstoff	
NH <sub>4</sub> -N	Ammonium-Stickstoff	mg/l
$N_{\text{ges}}$	$N_{\text{ges,anorg}}$ : Summe anorganischer Stickstoff, aus Ammonium, Nitrit und Nitrat	mg/l
NKB	Nachklärbecken, auch N oder NK	
NTU	Trübung (Nephelometric Turbidity Unit), vorwiegend gebräuchlich in der USA, identisch mit FTU	
OGewV	Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (Oberflächengewässerverordnung – OGewV)	

Abkürzung	Erläuterung	Einheit
P	Phosphor	
PAK	Pulveraktivkohle	
P <sub>ges</sub>	Summe P: aus Orthophosphat, Mono- und Polyphosphate sowie organisch gebundenem Phosphor	mg/l
P <sub>ges, gelöst</sub>	wie vor, jedoch aus der filtrierten Probe zwecks Entfernung von PAK für photometrische Küvettentest-Auswertung	mg/l
PO <sub>4</sub> -P	Orthophosphat	mg/l
Q <sub>Zu</sub>	Abwasserzufluss	l/h
RKM	Röntgenkontrastmittel	
RW	Regenwetter	
SAK	Spektraler Absorptionskoeffizient	
SB	Sedimentationsbecken, speziell für PAK-haltiges Abwasser	
S <sub>XXX</sub>	Konzentration des Parameters XXX in der filtrierten Probe (0,45 µm Membranfilter)	mg/l
TS	Konzentration der Trockensubstanz	kg/m <sup>3</sup>
TW	Trockenwetter	
ÜK	Überschussschlammschlamm aus der Adsorptionsstufe	
ÜS	Überschussschlamm aus der biologischen Reinigung	
V	Volumen	l
v <sub>f</sub>	Filtergeschwindigkeit	m/h
V <sub>GAK</sub>	Volumen der Aktivkohle	l
WRRL	„Richtlinie 2000/60/EG zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik“ (Wasserrahmenrichtlinie)	
ZF	Zulauf Filter	

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Luftbild Kläranlage Haaren (Quelle: Stadt Bad Wünnenberg 2017).....	11
Abbildung 2-2: Lageplan Kläranlage Haaren (Quelle: Stadt Bad Wünnenberg 2017)..	14
Abbildung 3-1: Jahresgang des täglichen Abflusses 2016 .....	21
Abbildung 3-2: Jahresgang des täglichen Abflusses 2017 .....	21
Abbildung 3-3: Tägliche Abflüsse in den Jahren 2016 und 2017.....	22
Abbildung 3-4: Jahresgang des Abflusses an Trockenwettertagen 2016 .....	22
Abbildung 3-5: Jahresgang des Abflusses an Trockenwettertagen 2017 .....	23
Abbildung 3-6: Polygon der niedrigsten Abflüsse in 21-Tage-Intervallen 2016.....	23
Abbildung 3-7: Polygon der niedrigsten Abflüsse in 21-Tage-Intervallen 2017.....	24
Abbildung 3-8: Abflüsse von berechneten Trockenwettertagen 2016.....	24
Abbildung 3-9: Abflüsse von berechneten Trockenwettertagen 2017.....	25



Abbildung 3-10: Unterschreitenshäufigkeit des Abflusses an Trockenwettertagen und an berechneten Trockenwettertagen 2016.....	25
Abbildung 3-11: Unterschreitenshäufigkeit des Abflusses an Trockenwettertagen und an berechneten Trockenwettertagen 2017.....	26
Abbildung 3-12: Maximale, mittlere und minimale stündliche Trockenwetterabflüsse 2016 .....	26
Abbildung 3-13: Verhältniswerte $Q_{T,h,max}/Q_{T,d}$ und $Q_{T,h,min}/Q_{T,d}$ 2016 .....	27
Abbildung 3-14: Temperaturganglinie im biologischen Reaktor (Einzelwerte und gleitendes 14-Tage-Mittel) 2017 .....	28
Abbildung 3-15: Jahresgang der CSB-Frachten Einzelwerte und 4-Wochenmittel 2017 .....	29
Abbildung 3-16: Unterschreitenshäufigkeit der CSB-Frachten 2017.....	29
Abbildung 3-17: Jahresgang des Verhältnisses $C_{TNb} / C_{CSB}$ 2017.....	30
Abbildung 3-18: Jahresgang des Schlammindezes ISV 2017 .....	30
Abbildung 3-19: Tendenzen der Abflüsse und Frachten KA Haaren, 2011 bis 2017 ...	32
Abbildung 5-1: Mikroschadstoffelimination in vorhandenen Reinigungsstufen einer Kläranlage .....	36
Abbildung 5-2: Verfahren zur gezielten Mikroschadstoffelimination.....	37
Abbildung 5-3: Verwendete Definitionen und Begriffe (nach Bathen 2001) .....	38
Abbildung 5-4: Gibbs'sche Phasengrenze (Bathen und Breitbach, 2001) .....	39
Abbildung 5-5: Prozessmodell zur Herstellung von Aktivkohle (Dr. Remy, Kompetenzzentrum Wasser Berlin, 2017).....	39
Abbildung 5-6: Porenstruktur von Aktivkohle (helsa, 2017) .....	40
Abbildung 5-7: Schematische Porenstruktur von Aktivkohle (Metzger, 2010).....	41
Abbildung 5-8: Abstandsabhängige potentielle Energie eines Adsorptivs an einem Adsorbens (Wedler, 1970) .....	43
Abbildung 5-9: Transportschritte der Aktivkohleadsorption (Metzger, 2010).....	45
Abbildung 5-10: Transportmechanismen bei der Aktivkohleadsorption (Hydroingenieure, 2012) .....	45
Abbildung 5-11: Teilschritte der Adsorption (nach Bathen 2001).....	46
Abbildung 5-12: Beladungsprofil eines Aktivkohlefilters (Hydroingenieure, 2012) .....	47
Abbildung 5-13: Aufnahme eines Isothermenpunktes (Metzger, 2010) .....	48
Abbildung 5-14: Möglichkeiten zur Einbindung der PAK-Dosierung (Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW, 2018) .....	50
Abbildung 5-15: Geschlossener einstufiger Aktivkohle-Druckfilter (Bathen, 2001) .....	52
Abbildung 5-16: Skizze Verfahren der Ozonung (Spurenstoffe 2015) .....	55
Abbildung 5-17: Schematische Darstellung Ozonerzeugungsanlage (Gujer 2007) .....	57

Abbildung 5-18: Schwarzgrad verschiedener PAK-Einwaagen (Metzger, 2010) .....	60
Abbildung 5-19: Vergleich von Trübungswerten mit Partikelkonzentrationen für verschiedene Roh- und Reinwässer (DVGW-Arbeitsblatt W 213-6), ergänzt durch Danjes .....	61
Abbildung 6-1: Ermittlung der behandelbaren Wassermenge für das Jahr 2016 .....	69
Abbildung 6-2: Ermittlung der behandelbaren Wassermenge für das Jahr 2017 .....	69
Abbildung 7-1: Voll- und Teilstrombehandlung bei Einsatz von GAK .....	76
Abbildung 7-2: Vollstrombehandlung bei Einsatz von PAK .....	76
Abbildung 7-3: Teil- bzw. Vollstrombehandlung bei Einsatz von Ozon .....	76
Abbildung 7-4: Verfahren Variante I - Fuzzy-Filter vor GAK-Adsorber.....	79
Abbildung 7-5: Verfahren Variante II - PAK mit nachgeschaltetem Fuzzy-Filter .....	80
Abbildung 7-6: Verfahren Variante III – Teilstrom Ozon mit biologischer Reinigung, danach Fuzzy-Filter im Vollstrom.....	81
Abbildung 9-1: CO <sub>2</sub> -Fußabdruck, Sensitivität über DOC-Gehalt im Klarlauf (Dr. Remy, Kompetenzzentrum Wasser Berlin, 2017).....	95
Abbildung 9-2: Ökobilanz verschiedener Verfahrensoptionen (Dr. Remy, Kompetenzzentrum Wasser Berlin, 2015).....	96

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Technische Kurzbeschreibung der Kläranlage Haaren.....	13
Tabelle 2-2: Vergleich der wichtigsten Parameter vorgefundener Mikroschadstoffe....	16
Tabelle 2-3: Auffällig hohe Ablaufwerte der Kläranlage im Vergleich .....	17
Tabelle 3-1: Abwassermengen Kläranlage: Vergleichswerte und Berechnung A 198 .	27
Tabelle 3-2: Frachten der Kläranlage: Entwurf und Berechnung A 198.....	31
Tabelle 5-1 Porengrößen .....	41
Tabelle 5-2: Vor- und Nachteile von PAK.....	53
Tabelle 5-3: Vor- und Nachteile von Ozonierung und PAK-Adsorption.....	64
Tabelle 6-1: arithmetisches 3-Jahresmittel der $Q_{T,h,max}$ der letzten 3 Jahre.....	68
Tabelle 6-2: Jahresschmutz-/abwassermenge der letzten 3 Jahre.....	70
Tabelle 6-3: Anteil der behandelbaren Wassermengen der letzten zwei Jahre .....	70
Tabelle 6-4: Berechnete Abwassermengen Ablauf Kläranlage nach A 198.....	71
Tabelle 6-5: Charakteristische Daten von PAK im Vergleich zum Belebtschlamm .....	73
Tabelle 7-1: Festlegung der Varianten für die Kläranlage Haaren.....	75
Tabelle 7-2: Vorbereitende Maßnahmen zur Ertüchtigung der Kläranlage .....	77
Tabelle 7-3: Bauwerkskonzept zu den vorbereitende Maßnahmen.....	78

Tabelle 8-1: Kostengrundlagen Ertüchtigung der Kläranlage zur Mikroschadstoffelimination.....	83
Tabelle 8-2: Kostengrundlagen Variante I bis III.....	84
Tabelle 8-3: Preisrecherche für Kostenermittlung .....	86
Tabelle 8-4: Ermittlung der Investitionskosten (gerundet) .....	86
Tabelle 8-5: Ermittlung der Investitionskosten (gerundet) .....	87
Tabelle 8-6: Kostengrundlage für die laufenden Kosten.....	88
Tabelle 8-7: Laufende Kosten der Mikroschadstoffelimination (brutto einschl. 19% Ust., gerundet) .....	89
Tabelle 8-8: Jahreskosten der Mikroschadstoffelimination nach KVR (brutto, gerundet) .....	92
Tabelle 9-1: Bewertungsmatrix der verschiedenen Varianten .....	97

# 1 Veranlassung

Die Stadt Bad Wünnenberg betreibt je eine Kläranlage in dem Ortsteil Bad Wünnenberg und in dem Ortsteil Haaren. Die hier zu untersuchende Kläranlage „Haaren“ verfügt über eine mechanisch-biologische Reinigung mit Nitrifikation und Phosphorelimination sowie aerober Schlammstabilisierung. Eine Schlamm entwässerungsanlage ist bis auf das Kalksilo nicht mehr vorhanden, da der Überschussschlamm zur benachbarten Kläranlage „Bad Wünnenberg“ abgefahren wird. Außerdem besitzt die Kläranlage keine Filtration. Nach Angaben des Auftraggebers beträgt die Ausbaugröße in Haaren 7.700 EW und in Bad Wünnenberg 9.300 EW. Damit sind sie der Größenklasse 3 nach Abwasserverordnung Anhang 1 zuzuordnen. Das Einzugsgebiet in Haaren wird im Mischsystem entwässert.

Das Einleitungsgewässer der Kläranlage „Haaren“ ist ein namenloses Gewässer. In den Internetseiten des Landes NRW, wie ELWAS-WEB und TIM-online, ist keine offizielle Bezeichnung oder eine Stationierung enthalten. Im wasserrechtlichen Erlaubnisbescheid vom 27.11.2015 lautet die Stationierung auf „11,860 km der Altenau + 4,560 km des Grabens B“. Der Ursprung dieses Einleitungsgewässers liegt im Ort Haaren nur wenige hundert Meter vor der Einleitungsstelle der Kläranlage. Das Gewässer ist in verschiedenen Karten als nur teilweise wasserführend bzw. versickernd gekennzeichnet. Es mündet nördlich von Haaren in der Nähe des Ortes Henglarn in das Gewässer Altenau. Die eingeleitete Jahresabwassermenge lag nach Angaben der Stadt Bad Wünnenberg im Jahr 2017 bei ca. 775.000 m<sup>3</sup>.

Als erste Einschätzung für die Mikroschadstoffbelastung im Ablauf der Kläranlage liegen Probenahmen der OWL Umweltanalytik vom 06. bis 09.07.2016 vor. Hierbei wurde die Probenahmestelle „Ablauf Nachklärung“ untersucht. Auffällig sind die sensitiven Indikatorsubstanzen Benzotriazol, Carbamazepin und Diclofenac.

Aus geologischer Sicht befinden sich die Kläranlage und das Einleitungsgewässer im Karstgebiet (Paderborner Hochfläche). Mit dem teilweise im Untergrund versickernden Ablauf der Kläranlage werden damit auch die mitgeführten Mikroschadstoffe im Gewässer, Boden und Grundwasser eingetragen. Aus Vorsorge hat sich deshalb die Stadt Bad Wünnenberg entschieden, die Möglichkeit der Nachrüstung einer Mikroschadstoff-Eliminationsstufe auf der Kläranlage „Haaren“ in Form einer Machbarkeitsstudie untersuchen zu lassen.

Üblicherweise wird im Rahmen solcher Studien die Elimination von Mikroschadstoffen mit adsorptiven und oxidativen Verfahren erörtert. Hierbei stehen für die Erweiterung der Kläranlage „Haaren“ um eine solche Reinigungsstufe verschiedene Lösungen zur Verfügung. Es sind Verfahren mit Pulveraktivkohle (PAK) oder granulierter Aktivkohle (GAK), als auch Verfahren mit Ozon möglich. Das Ziel einer Machbarkeitsstudie ist es, die verschiedenen Konzepte hinsichtlich ihrer technischen Umsetzbarkeit, ihrer Wirtschaftlichkeit und der weiteren Vor- und Nachteile bewerten zu können.

Hierbei ist zu beachten, dass zurzeit der flüssige Klärschlamm nach „Bad Wünnenberg“ zur Entwässerung transportiert wird, da am Standort „Haaren“ keine eigene Anlagentechnik mehr besteht. Eine Lösung mit Pulveraktivkohle würde dort in „Bad Wünnenberg“ eine Trennung der Flüssig-bzw. Fest-Schlämme erfordern, weil der mit Pulveraktivkohle beladene Klärschlamm aus „Haaren“ in die Verbrennung gegeben werden muss.

Die Aufgabenstellung wurde mit der Bezirksregierung Detmold und der Stadt Bad Wünnenberg abgestimmt. Mittels Variantenbetrachtung zur Mikroschadstoff-Elimination sollen grundlegende Fragestellungen zu den Reinigungszielen, der notwendigen und wirtschaftlichen Verfahrenstechnik sowie den Investitions- und laufenden Kosten erörtert werden. Des Weiteren soll eine Vorzugslösung und deren Verfahrenstechnik unter räumlicher und verfahrenstechnischer Integration des Bestandes dargestellt werden.

Auf Antrag der Stadt Bad Wünnenberg wurde mit Datum von 19.12.2017 der Zuwendungsbescheid (Projektförderung) der NRW.Bank im Rahmen des Programms „Ressourceneffiziente Abwasserbeseitigung in NRW II (ResA II) - Zuschüsse - kommunal“ erlassen.

Die Stadt Bad Wünnenberg hat das Ingenieurbüro Danjes aus Detmold mit der Erarbeitung dieser Machbarkeitsstudie beauftragt. Für die Probenahme und Analytik hat die Stadt Bad Wünnenberg die OWL Umweltanalytik GmbH eingebunden.

## 2 Vorhandene Verhältnisse

### 2.1 Kurzbeschreibung der Kläranlage

Die Kläranlage der Stadt Bad Wünnenberg „Haaren“ (Luftbild Abbildung 2-1) liegt nördlich des Ortsteils Haaren im Kreis Paderborn. Mit einer Ausbaugröße von 7.700 EWG ist sie der Größenklasse 3 zuzuordnen. Das Einleitungsgewässer ist namenlos und lautet im Erlaubnisbescheid auf „Graben B“. Es fließt östlich an der Kläranlage mit den beiden Schönungsteichen vorbei, geht in ein Hochwasserrückhaltebecken mit Sedimentationsbauwerk über und mündet in das Gewässer Altenau.



Abbildung 2-1: Luftbild Kläranlage Haaren (Quelle: Stadt Bad Wünnenberg 2017)

Der Kläranlage sind ein Stauraumkanal und zwei Regenüberlaufbecken mit einem Gesamtvolumen von rund 1.700 m<sup>3</sup> vorgeschaltet (KSR Stadtecke, RÜB Tennisplatz und Helmern). Bei dem auf der Kläranlage Haaren ankommenden Abwasser handelt es sich um Mischwasser, welches über Rechen, Sand- und Fettfang direkt der biologischen Reinigungsstufe zugeführt wird.

Die Rechenanlage der KA Haaren besteht aus einem Rechen mit einem Stababstand von 5 mm. Das Rechengut gelangt zur Rechengutwaschpresse und wird anschließend in einen Container abgeworfen. Die Abtrennung der absetzbaren mineralischen und der schwimmenden Stoffe vom zufließenden Mischwasser erfolgt im belüfteten Langsand- und Fettfang.

Die biologische Reinigungsstufe besteht aus einem Belebungsbecken als Umlaufgraben (Typ Caroussel, Fa. Esmil) mit zwei Oberflächen-Kreiselpelüftern. Im Belebungsbecken finden unter Belüftung die Kohlenstoffelimination und die Nitrifikation statt, also der Abbau von organischen Kohlenstoffverbindungen und die Umwandlung von Ammoniumstickstoff in Nitrat. Am Belebungsbecken wird über eine Schneckenpumpe der Rücklaufschlamm mit dem zufließenden Abwasser gemischt. Durch Langzeitbelüftung und hohem Schlammalter wird eine aerobe Stabilisierung des Schlammes erreicht. Zur Phosphorelimination findet eine chemische Phosphatfällung im Belebungsbecken statt. Um ein Sedimentieren des Belebtschlammes im Belebungsbecken zu verhindern sind zwei Propellerrührwerke auf der Beckensohle angebracht.

Aus dem Belebungsbecken fließt das Schlammwassergemisch über eine Wehrschwelle und Dükerleitung dem runden Nachklärbecken zu. Durch Sedimentation setzt sich der Schlamm auf der Beckensohle ab und wird vom Wasser getrennt. Der sedimentierte Schlamm wird dem Rundbecken durch am Boden laufende Räumschilde in dem mittig angeordneten Schlammtrichter geräumt und dann mit der Rücklaufschneckenpumpe wieder dem Belebungsbecken zugeführt. Ein Teil des sedimentierten und aerob stabilisierten Schlammes, der sich bei den Reinigungsprozessen in der Belebungsstufe durch biologisches Wachstum gebildet hat, wird als Überschussschlamm abgepumpt und dem Schlammsilo zugeführt.

Der in den Eindicker gepumpte Überschussschlamm wird statisch entwässert und im Stapelbehälter gespeichert. Das anfallende Trübwasser wird der Kläranlage zurückgegeben. Der flüssige Schlamm wird mit Silofahrzeugen zur Kläranlage Bad Wünnenberg transportiert und dort weiter behandelt.

Das über eine gezahnte Ablaufrinne im Nachklärbecken gereinigte Abwasser fließt dem Ablauf-MID zu. Hier werden die Abwassermengen ermittelt und dem Prozessleitsystem zur Auswertung übertragen. Gleichzeitig dient dieser Messpunkt zur Probenahme, um die Parameter auszuwerten, die zur Einhaltung der Überwachungswerte notwendig sind. Der Probenahmepunkt dient dem LANUV NRW als amtliche Probenahmestelle. Das gereinigte Abwasser fließt über Verrohrungen den beiden Schönungsteichen zu und von dort in das Einleitungsgewässer.

Eine Kurzbeschreibung mit den wichtigsten Anlagen befindet sich in Tabelle 2-1. Ein Lageplan mit Legende (Abbildung 2-2) ergänzt die Beschreibung.

Tabelle 2-1: Technische Kurzbeschreibung der Kläranlage Haaren

Nr.	Bauwerk / Anlage	Beschreibung	Daten
1	Rechen	Rechenanlage (einstraßig)	Stab 5 mm
2a	Sandfang	belüfteter Sand-Fettfang (einstraßig)	B 1,40 m, L 12,0 m T 2,50 m V 41,4 m <sup>3</sup>
2b	Fettfang		B 0,90 m, L 9,0 m T 1,90 m V 10 m <sup>3</sup>
3	Belebungsbecken	Umlauf-Becken (einstraßig)	V 2.310 m <sup>3</sup> A 1.026 m <sup>2</sup> T 2,25 m
4	Nachklärbecken	Horizontal durchströmtes Rundbecken mit Schildräumer (einstraßig)	V 679 m <sup>3</sup> D 19,0 m, T 2,40 m A 283 m <sup>2</sup>
5	RS-ÜS-PW	RS-Schnecke	max. 99,4 l/s min. 39,7 l/s-
6	Ablaufmessung	MID	-
7a	Eindicker	Rundbehälter mit Trennwand	V 85 m <sup>3</sup> 1 Tag
7b	Stapelbehälter		V 300 m <sup>3</sup>
8	Fällmitteldosieranlage	PE-Lagertank mit Dosieranlage	V 10 m <sup>3</sup>
9	Betriebsgebäude	Leitwarte, Aufenthalts-Sanitärräume	-





Abbildung 2-2: Lageplan Kläranlage Haaren (Quelle: Stadt Bad Wünnenberg 2017)

## 2.2 Analyse zu den Spurenstoffen

Mit der Analyse der Spurenstoffe im Ablauf der Kläranlage sowie im Gewässer vor und hinter der Einleitungsstelle wurde von der Stadt Bad Wünnenberg die OWL Umweltanalytik GmbH, Leopoldshöhe, beauftragt.

Als erstes Ergebnis liegt vom Ablauf der Nachklärung eine mehrtägige Mischprobe (72 h) vom 06.07.2016 von 11.00 Uhr bis 09.07.2016 um 11:00 Uhr vor. Der Laboreingang war am 12.07.2016. Der Untersuchungsbefund vom Ablauf der Nachklärung befindet sich im Anhang 2-1.

Als aktuellstes Ergebnis liegt vom Ablauf der Nachklärung eine mehrtägige Mischprobe (72 h) vom 18.07.2018 von 08.00 Uhr bis 21.07.2018 um 08:00 Uhr vor. Der Laboreingang war am 24.07.2018. Auch dieser Untersuchungsbefund der OWL Umweltanalytik GmbH ist im Anhang wiedergegeben (Anhang 2-2), wobei auch hier ein Bezug zu internen Statistiken hergestellt wurde (Anhang 2-3).

In dieser internen Statistik werden für jeden Parameter die von der OWL Umweltanalytik GmbH am Ablauf von kommunalen Kläranlagen durchgeführte Anzahl an Messungen aufgeführt, danach der Anteil der Messungen, der oberhalb der jeweiligen Bestimmungsgrenze lag. Es folgt eine Spalte mit den Werten aller bisherigen Messungen für das Maximum, das Mittel sowie das 90%-Perzentil. Die Ergebnisse der Analyse für die hier untersuchte Kläranlage sind in die Statistik bereits eingeflossen.

An den Stellen, an denen ein von der OWL Umweltanalytik am Ablauf der Kläranlage ermittelter Wert den Mittelwert des jeweiligen Spurenstoffs überschreitet, ist das Ergebnis gelb markiert. Wird ein Wert das bisherige Maximum erreichen oder einen neuen Maximalwert bilden, so wird der Wert rot gekennzeichnet.

Die Betrachtung der Wasserqualität vor der Einleitungsstelle im Vergleich zu der Qualität nach der Einleitung durch die Kläranlage zeigt den Eintrag von Mikroschadstoffen in das Gewässer. Hierzu liegen vom Gewässer „Graben B Altenau“ ober- und unterhalb der Kläranlageneinleitung zwei qualifizierte Stichproben vom 19.07.2018 durch die OWL Umweltanalytik GmbH vor (Anhang 2-4). Im Vergleich mit den Analysen der Proben aus dem Ablauf der Kläranlage lässt sich damit bestimmen, welche Spurenstoffe sich aufgrund der Einleitung der Kläranlage in dem Gewässer befinden (unterhalb der Kläranlage) und welche schon vorher aus einer anderen Quelle stammen müssen.

Nach der Auslegungsrichtlinie „Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination“ (auch in der künftigen, neuen 3. Auflage für Juni 2018) sind die wichtigsten sechs Indikatorsubstanzen zur Ermittlung des Eliminationszieles:

- Arzneimittelwirkstoffe
  - Carbamazepin (Antiepileptikum)
  - Clarithromycin (Makrolidantibiotikum)
  - Diclofenac (Antirheumatikum)
  - Metoprolol (Betablocker)
  - Sulfamethoxazol (Antibiotikum)
- Korrosionsschutzmittel
  - 1H-Benzotriazol (Korrosionsschutzmittel)

Die Messergebnisse von Gewässer und Kläranlage aus der aktuellsten Untersuchung vom Juli 2018 sind in Tabelle 2-2 dargestellt. Zusätzlich zu den Indikatorsubstanzen wurden weitere, auffällige Stoffe mit betrachtet.

Tabelle 2-2: Vergleich der wichtigsten Parameter vorgefundener Mikroschadstoffe

Parameter	Einheit	Gewässer oberhalb KA	Ablauf KA	Gewässer unterhalb KA
<b>Carbamazepin</b>	µg/l	0,31	0,33	0,34
<b>Clarithromycin</b>	µg/l	k.A.	k.A.	k.A.
<b>Diclofenac</b>	µg/l	0,47	<b>1,10</b>	<b>0,76</b>
<b>Metoprolol</b>	µg/l	0,16	<b>0,55</b>	<b>0,24</b>
<b>Sulfamethoxazol</b>	µg/l	0,33	0,15	0,35
<b>Benzotriazol</b>	µg/l	<b>2,50</b>	<b>3,10</b>	<b>3,20</b>
Amidotrizoesäure	µg/l	0,73	0,14	0,68
Ciprofloxacin	µg/l	< 0,1	0,42	< 0,1
Iohexol	µg/l	< 0,05	0,23	< 0,05
Iopamidol	µg/l	0,15	<b>9,60</b> 72-h-Mischprobe	0,14 qual. Stichprobe

Etwa bei der Hälfte der gemessenen Stoffe sind die Konzentrationen im Gewässer vor der Einleitungsstelle sehr gering. Der erhöhte Wert der anderen - hier auszugsweise dargestellten Parameter - dürfte auf Mischwasserabschläge im Oberlauf zurückzuführen sein.

**Der Eintrag der festgestellten Mikroschadstoffe in das Gewässer wird deutlich durch die Abwassereinleitung aus der Kläranlage mit verursacht.**

Bei den Arzneimittelwirkstoffen ist eine Kläranlage in der Regel die Haupteintragsquelle in Oberflächengewässer. Die Mikroschadstoffe dieser Kategorie sind gut bis sehr gut eliminierbar. Das Ziel einer vierten Reinigungsstufe soll nach der Anleitung des Landes NRW die Reduzierung der Mikroschadstoffe um 80 % sein.

Besonders auffällig hohe Werte sind nach OWL Umweltanalytik GmbH im Vergleich zu deren internen Datenbanken in Tabelle 2-3 dargestellt. Über die Lokalitäten der Probenahme für die Mittelwertbildung ist dem Verfasser nichts bekannt.

Tabelle 2-3: Auffällig hohe Ablaufwerte der Kläranlage im Vergleich

Spurenstoff	Einheit	Ablauf Nachklärung		Vergleichswerte August 2018	
		06.-09.07.2016	18.-21.07.2018	Mittel	90 Perz.
<b>Ciprofloxacin</b>	ng/l	<b>390</b>	<b>420</b>	178	779
<b>Sulfamethoxazol</b>	ng/l	<b>410</b>	150	395	880
<b>Carbamazepin</b>	ng/l	<b>1.000</b>	330	768	1.500
Amidotrizoesäure	ng/l	<b>2.900</b>	140	2.359	6.760
Iopamidol	ng/l	750	<b>9.600</b>	3.346	8.420
Diclofenac	ng/l	1.300	1.100	1.972	3.400
Benzotriazol	ng/l	5.200	3.100	5.448	9.990

Insgesamt liegen die Konzentrationen von drei der sechs Leitparameter über den Vergleichs-Mittelwerten. Auch andere Spurenstoffe sind überdurchschnittlich im Ablauf der Kläranlage vertreten - einmal sogar über dem 90-Perzentil. Die Messwerte der Kläranlage sind als signifikant anzusehen, wie der Vergleich zu den Mittelwerten nach OWL Umweltanalytik zeigt.

## **2.3 Aussagen zum Gewässer**

Das namenlose Einleitungsgewässer trägt im Erlaubnisbescheid die Bezeichnung „Graben B“. Es entspringt im Ort Haaren, fließt in nördliche Richtung und mündet in das Gewässer Altenau. Die Altenau entspringt in Westfalen im südlichen Eggegebirge und südöstlich der Paderborner Hochfläche. Die Altenau mündet am nordwestlichen Ortsrand von Nordborchen in den Lippe-Zufluss Alme. Über die Lippe und den Rhein gelangt der Abfluss schließlich in die Nordsee.

Bereits im wasserrechtlichen Erlaubnisbescheid der Bezirksregierung Detmold vom 27.11.2015 wurde als Nebenbestimmung unter Punkt 7.6 erlassen, dass ein Mikroschadstoffscreening durchzuführen ist. Hierzu wurde angeführt, dass das Einleitungsgewässer im Karstgebiet liegt und im weiteren Verlauf unterhalb der Einleitungsstelle teilweise trocken fällt. Um eine nachteilige Veränderung der Gewässereigenschaft auszuschließen war unter Berücksichtigung des § 48 WHG – Reinhaltung des Grundwassers – das eingeleitete Abwasser intensiv zu überprüfen.

## 3 Abwasserparameter der Kläranlage (IST-Zustand)

### 3.1 Vorhandene Datengrundlage

Für die Einschätzung der Effizienz der vorhandenen Abwasserreinigung in Vorbereitung einer neuen Stufe zur Mikroschadstoffelimination ist eine Auswertung der sogenannten Standardabwasserparameter zwingend erforderlich. Hierzu gehören 1.) die Abflüsse und 2.) die Frachten und Konzentrationen. Als anerkanntes Verfahren sind die maßgebenden Werte nach dem DWA-Arbeitsblatt A 198 zu ermitteln. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse dienen im späteren Arbeitsschritt der Festlegung der Auslegungswassermenge.

Folgende aktuelle Daten standen zur Verfügung:

- Abflüsse der Kläranlage Haaren für das Jahr **2016** als 2-Stunden-Mittelwerte, Werte für Tages-Ablaufmenge, Maximum und Minimum der 2-Stunden-Mittelwerte sind gesondert ausgewiesen; insgesamt 366 Dateien!
- Betriebstagebuch der Kläranlage Haaren für das Jahr **2016**, u.a. mit Werten für, Temperatur Zulauf, CSB Zulauf, TNb Zulauf (LatoN), P<sub>ges</sub> Zulauf, Ablaufmenge Kläranlage, CSB Ablauf, TNb Ablauf (LatoN), P<sub>ges</sub> Ablauf, Temperatur Belebung, TS Belebung, Schlammindex, PO<sub>4</sub> Belebung, (Niederschlag fehlt leider!); wie vor 366 Dateien!
- Selbstüberwachung Diagramme Haaren **2017**, u.a. mit Werten für, TS Belebung, Schlammindex, Temperatur Belebung, CSB Zulauf, TNb Zulauf (LatoN), CSB Ablauf, NH<sub>4</sub>-N Ablauf
- Sürder JSM Haaren 2017, mit Werten für Niederschlag und täglicher Abfluss Q<sub>d</sub>

Folgende weitere Unterlagen standen zu Vergleichszwecken und zur Ermittlung der Baugrößen der Verfahrensstufen zur Verfügung:

- Selbstüberwachung 2017 Haaren: Selbstüberwachungsbericht gem. § 9 SüwV-kom, Berichtsjahr 2017, hieraus gehen folgende Werte hervor:
- Abwasseranfall
  - a) TW 39,70 l/s bzw. 142,92 m<sup>3</sup>/h bzw. 3.430,08 m<sup>3</sup>/d
  - b) RW 99,30 l/s bzw. 357,48 m<sup>3</sup>/h bzw. 8.579,52 m<sup>3</sup>/d

Die Herkunft der letztgenannten Werte ist unklar – vermutlich entstammen sie der ursprünglichen Planung.

Nach dem wasserrechtlichen Erlaubnisbescheid der Bezirksregierung Detmold vom 27.11.2015 ergeben sich folgende Grunddaten:

- Abwasserentsorgung der Ortsteile Helmern und Haaren
- Bemessung 7.700 EW, davon 3.400 E und 4.300 EGW
- Auslastung Stand 01.06.2014: 7.200 EW, davon 3.400 E und 3.800 EGW
- Höchstabwasserabfluss absolut 178,74 m<sup>3</sup> / 0,5 h  
(entspricht 99,30 l/s wie vor)
- Jahresschmutzwassermenge JSM = 305.000 m<sup>3</sup>/a (Basis 2010 bis 2014)

## 3.2 Abflüsse nach DWA A 198

### 3.2.1 Auswertung Kläranlage Haaren 2016 und 2017

Nach heutigem Standard sind die Abflussmengen für eine Kläranlage nach DWA-Arbeitsblatt A 198 (April 2003) zu ermitteln. Für das Jahr 2016 fehlen hierzu leider die Niederschlagsmengen und für das Jahr 2017 die stündlichen bzw. 2-stündlichen Abflussmengen.

*Hinweis: Nach dem Handbuch „Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination“, 3. Auflage, soll die Auslegungswassermenge auf Basis der letzten drei Jahre bestimmt werden (Einfluss Niederschlag, Tendenzen). Für die JSM und JAM liegen die Daten vor.*

*Bei der Ermittlung des Jahresmittels des maximalen stündlichen Trockenwetterabflusses werden hier bei der Kläranlage Haaren hilfsweise die 2-Stunden-Mittelwerte herangezogen, da keine anderen Daten (Stundenwerte) vorliegen. Dieses wurde bereits bei anderen Kläranlagen mit Zustimmung der Bezirksregierung Detmold so durchgeführt. Die Abweichung von dem Stundenmittel ist hierbei gering und wird mit einem Sicherheitszuschlag korrigiert. Aufgrund der Struktur der Datenerfassung wird zudem nur das vollständig vorliegende Jahr 2016 ausgewertet, da die Bereitstellung weiterer Jahre zu unverhältnismäßigem Aufwand für die Mitarbeiter der Kläranlage führen würde (366 Dateien!).*

Nach Auswertung der Daten ergeben sich die folgenden Bilder.

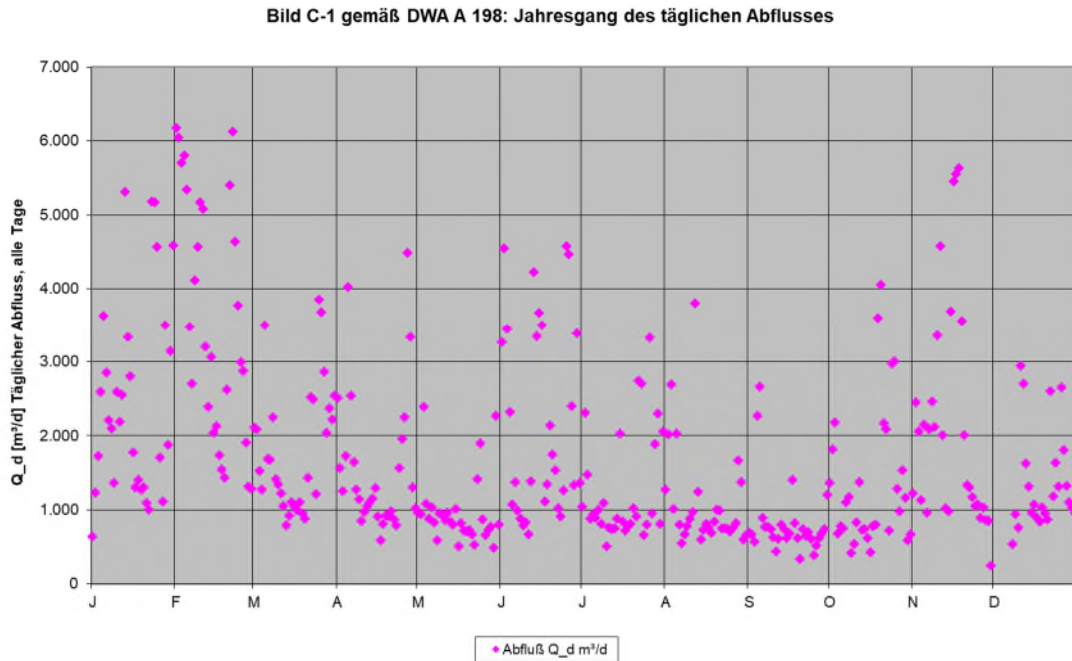


Abbildung 3-1: Jahrgang des täglichen Abflusses 2016

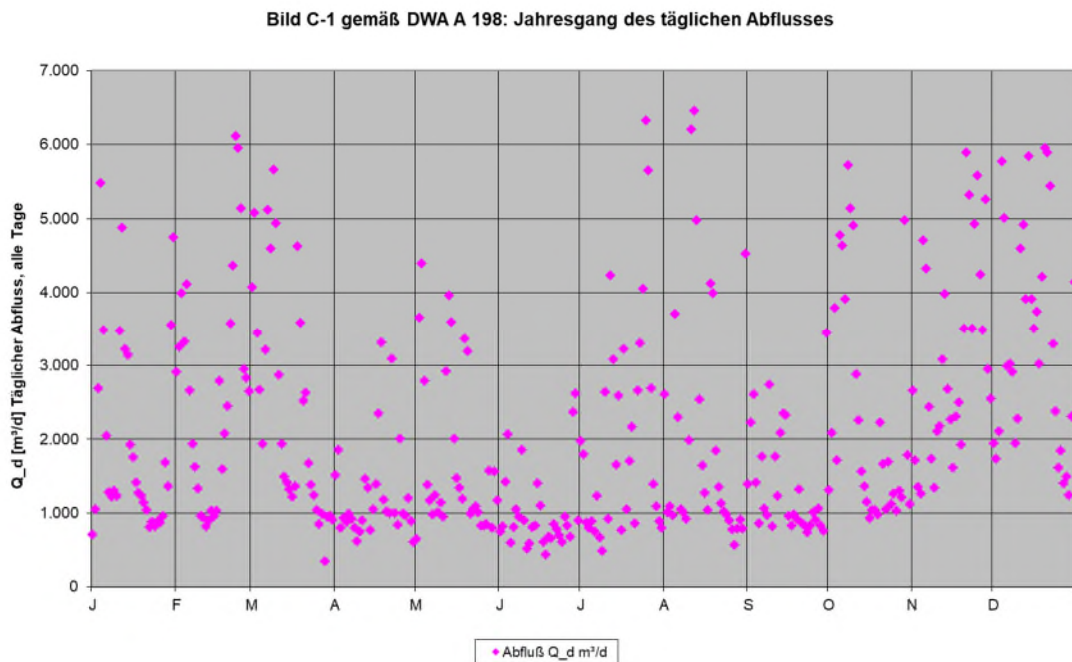


Abbildung 3-2: Jahrgang des täglichen Abflusses 2017



Bild C-2 gemäß DWA A 198: Tägliche Abflüsse in den letzten Jahren

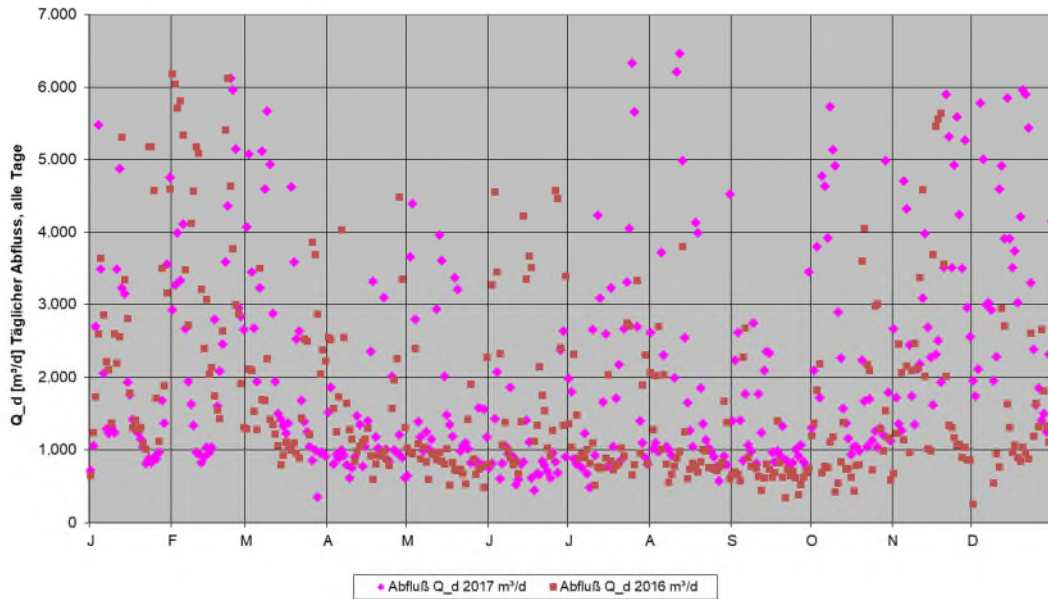


Abbildung 3-3: Tägliche Abflüsse in den Jahren 2016 und 2017

Bild C-3 gemäß DWA A 198: Jahrgang des Abflusses an Trockenwettertagen

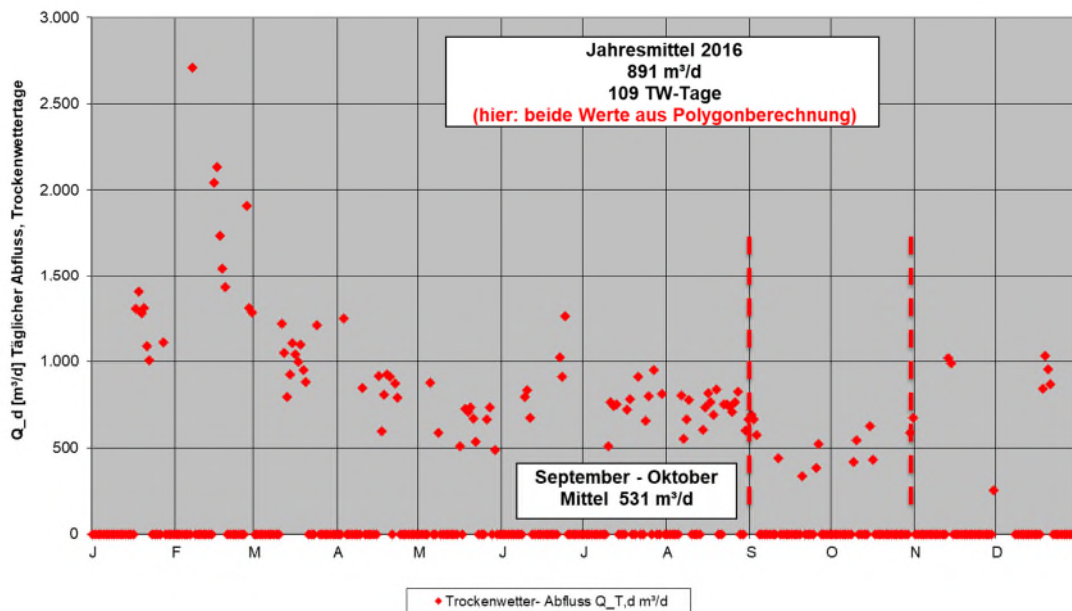


Abbildung 3-4: Jahrgang des Abflusses an Trockenwettertagen 2016

Bild C-3 gemäß DWA A 198: Jahrgang des Abflusses an Trockenwettertagen

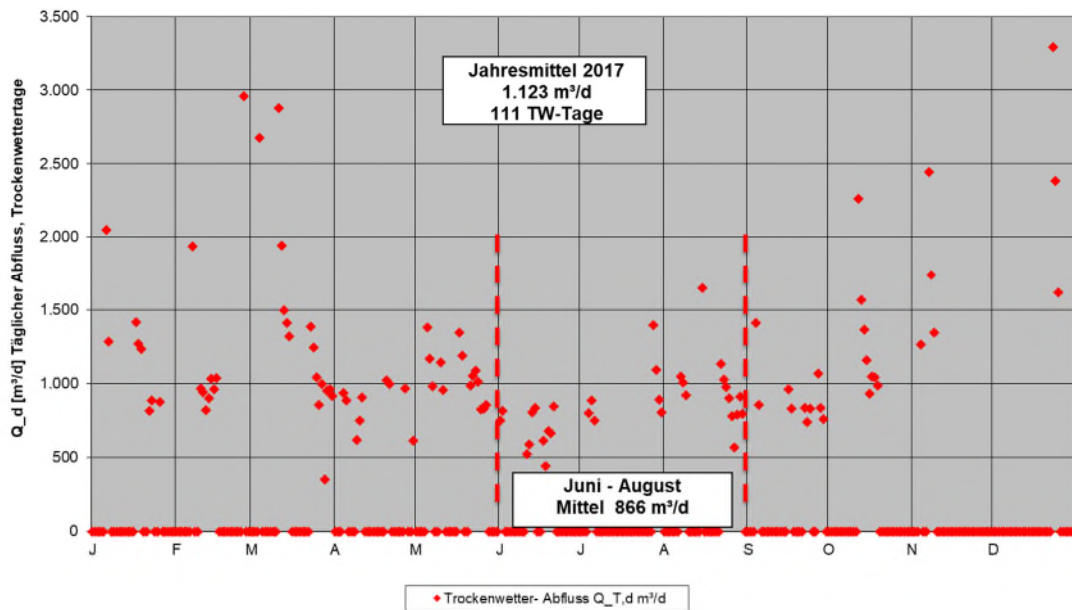


Abbildung 3-5: Jahrgang des Abflusses an Trockenwettertagen 2017

Bild C-4 gemäß DWA A 198: Polygon der niedrigsten Abflüsse in 21-Tage-Intervallen

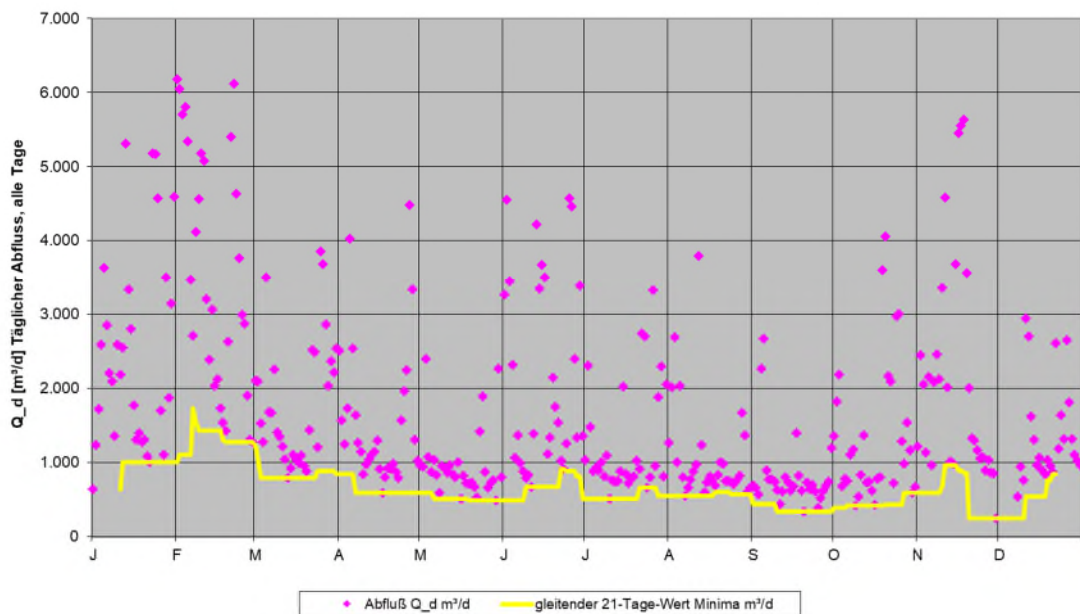


Abbildung 3-6: Polygon der niedrigsten Abflüsse in 21-Tage-Intervallen 2016

Bild C-4 gemäß DWA A 198: Polygon der niedrigsten Abflüsse in 21-Tage-Intervallen

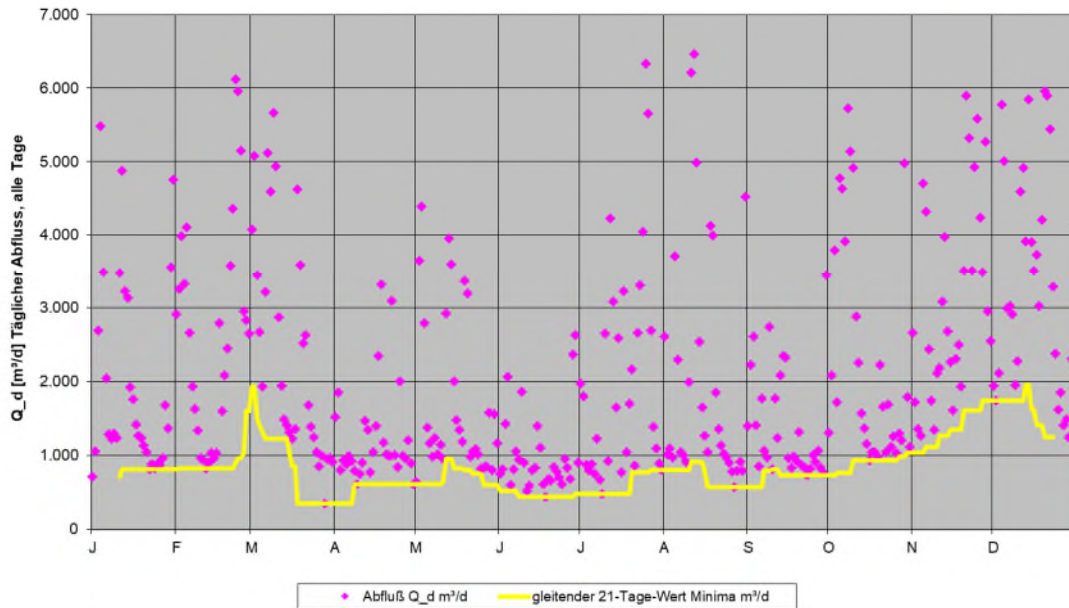


Abbildung 3-7: Polygon der niedrigsten Abflüsse in 21-Tage-Intervallen 2017

Bild C-5 gemäß DWA A 198: Abflüsse von berechneten Trockenwettertagen

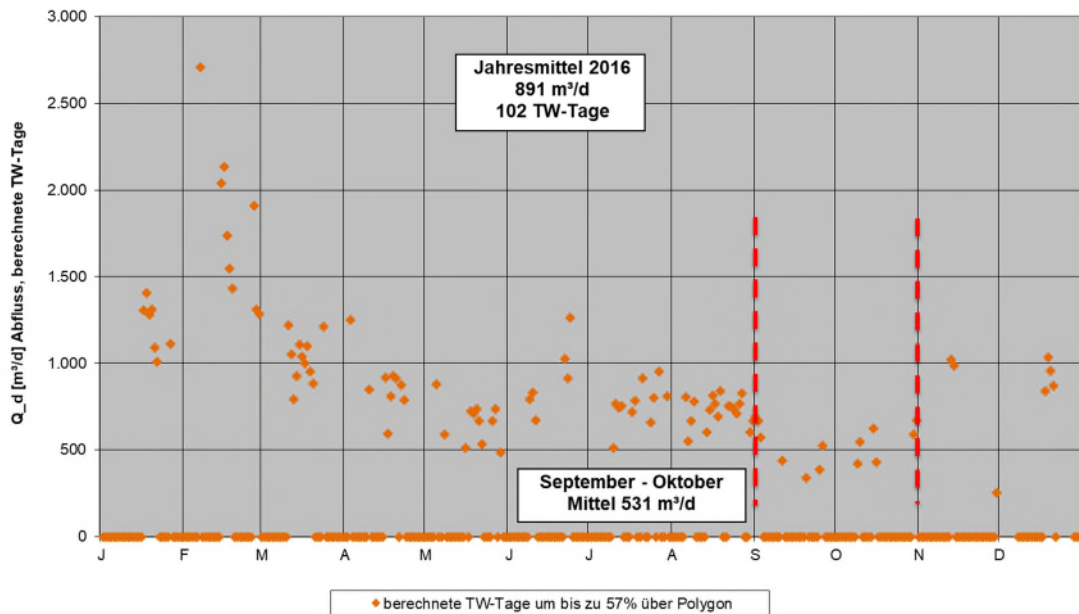


Abbildung 3-8: Abflüsse von berechneten Trockenwettertagen 2016

Bild C-5 gemäß DWA A 198: Abflüsse von berechneten Trockenwettertagen

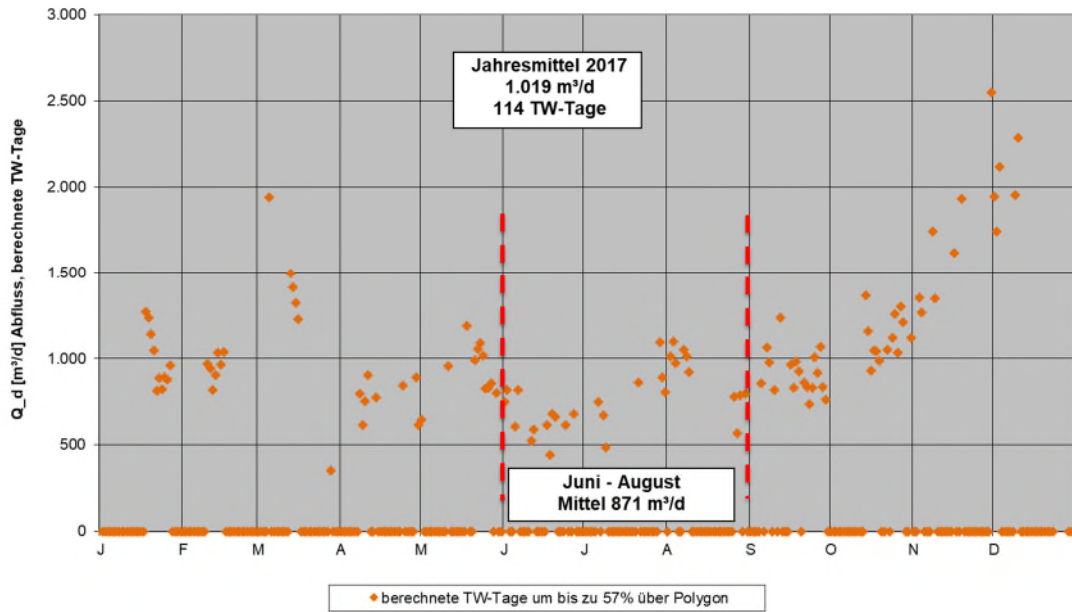


Abbildung 3-9: Abflüsse von berechneten Trockenwettertagen 2017

Bild C-6 gemäß DWA A 198: Unterschreithäufigkeit des Abflusses an Trockenwettertagen und an berechneten Trockenwettertagen

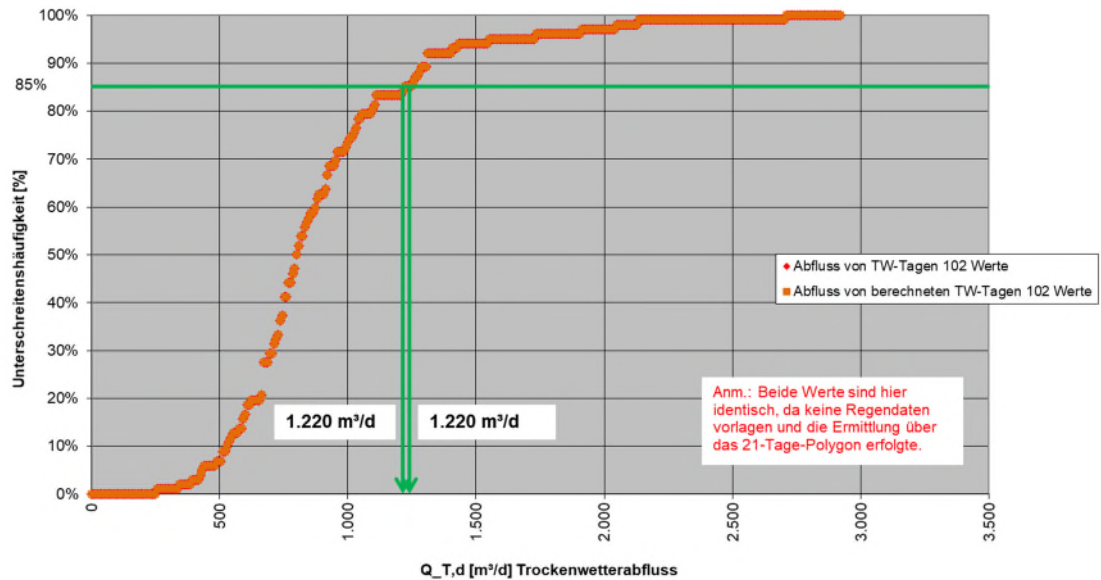


Abbildung 3-10: Unterschreithäufigkeit des Abflusses an Trockenwettertagen und an berechneten Trockenwettertagen 2016

Bild C-6 gemäß DWA A 198: Unterschreitenshäufigkeit des Abflusses an Trockenwettertagen und an berechneten Trockenwettertagen

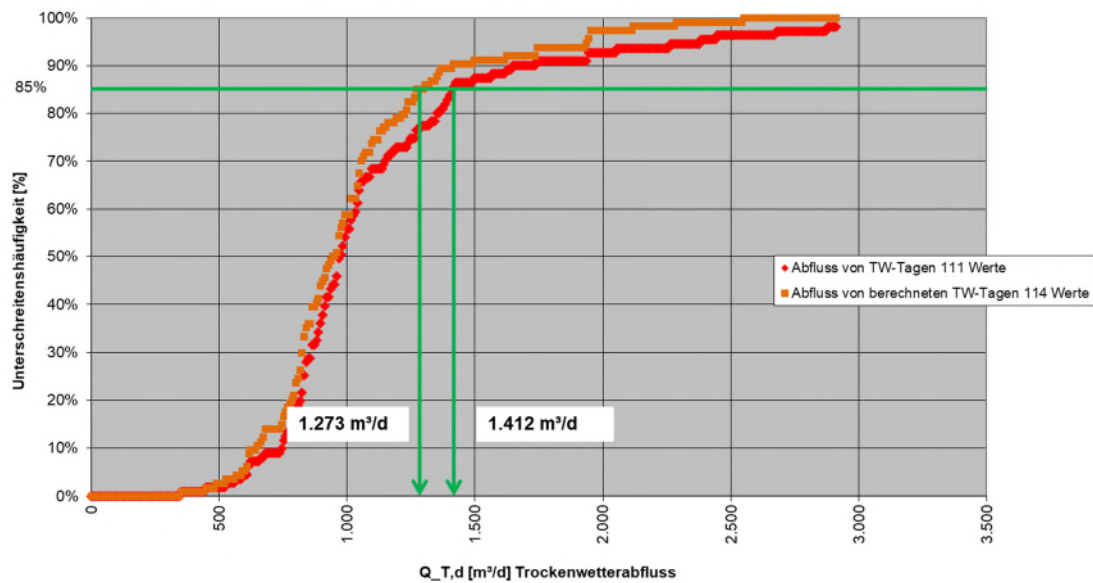


Abbildung 3-11: Unterschreitenshäufigkeit des Abflusses an Trockenwettertagen und an berechneten Trockenwettertagen 2017

Bild C-7 gemäß DWA A 198: Maximale, mittlere und minimale stündliche Trockenwetterabflüsse

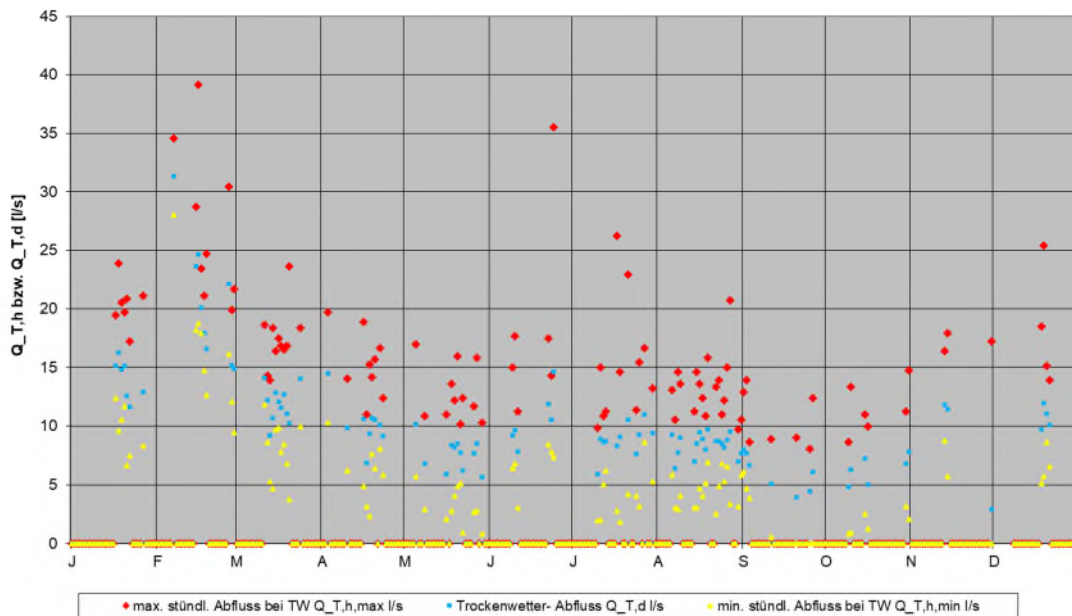


Abbildung 3-12: Maximale, mittlere und minimale stündliche Trockenwetterabflüsse 2016

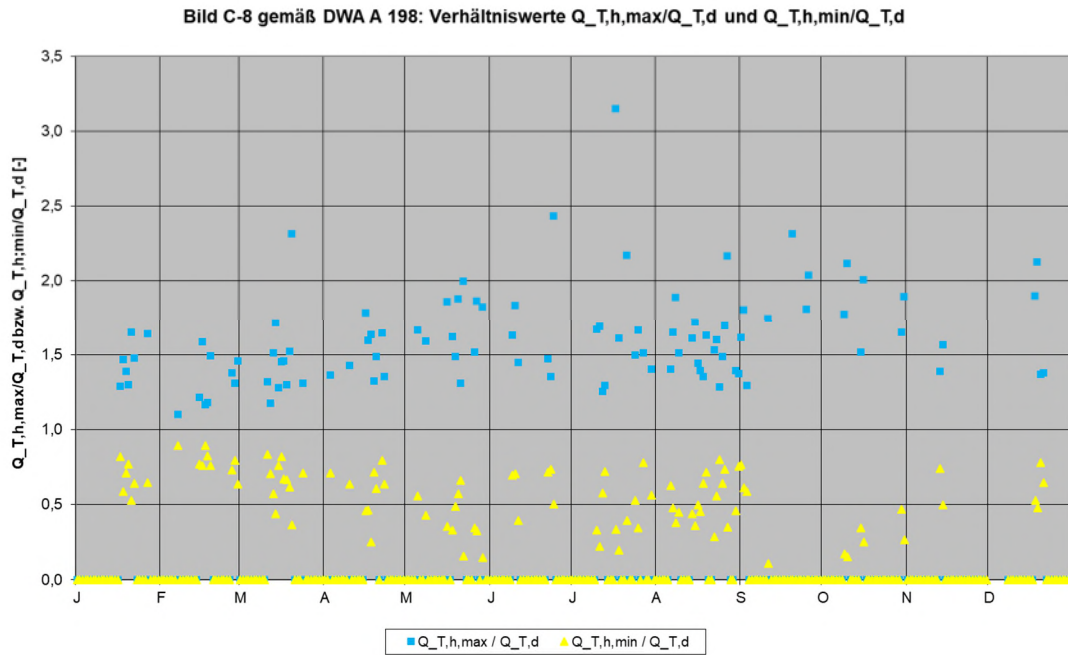


Abbildung 3-13: Verhältniswerte  $Q_{T,h,max}/Q_{T,d}$  und  $Q_{T,h,min}/Q_{T,d}$  2016

### 3.2.2 Fazit zu den Abflüssen

Die Ergebnisse der Auswertung nach DWA-Arbeitsblatt A 198 sind in Tabelle 3-1 zusammengestellt.

Tabelle 3-1: Abwassermengen Kläranlage: Vergleichswerte und Berechnung A 198

Wert	Vergleichswerte Ausbaugröße	Berechnung Jahr 2016	Berechnung Jahr 2017
Täglicher Abfluss im Jahresmittel $Q_{d,aM}$	<i>RW-Abfluss</i> $8.579,52 \text{ m}^3/\text{d}$	1.719 $\text{m}^3/\text{d}$	2.120 $\text{m}^3/\text{d}$
Mittlerer täglicher TW-Abfluss $Q_{T,d,aM}$	<i>TW-Abfluss</i> $3.430,08 \text{ m}^3/\text{d}$	891 $\text{m}^3/\text{d}$	1.123 $\text{m}^3/\text{d}$
Maximaler Trockenwetterabfluss (2-Stunden-Mittel bzw. Tagesmittel) $Q_{T,2h,max}$	39,70 l/s	39,2 l/s	38,1 l/s
Maximaler Trockenwetterabfluss der Monatsmittel als 2-Stunden-Mittel $Q_{T,h,max,mM}$	-	27,1 l/s	-
Trockenwetterabfluss im Jahresmittel (2-Stunden-Mittel bzw. Tagesmittel) $Q_{T,aM}$	-	10,3 l/s	13 l/s
<b>Mischwasserabfluss <math>Q_M</math></b>	<i>RW-Abfluss</i> 99,30 l/s	<b>62 l/s</b>	<b>69 l/s</b>

Für die Ermittlung des Mischwasserabflusses wurde ein Trinkwasserverbrauch mit einer einwohnerspezifischen Menge von ca. 120 l/(Exd) angesetzt. Dieser Wert liegt in vergleichbarer Größe zu anderen Kommunen in Ostwestfalen-Lippe.

Fazit: Die täglichen Abflüsse bei Trocken- und Regenwetter liegen gegenüber den Vergleichswerten zur Ausbaugröße, die damals als 86,4-fache der Spitzenwerte ermittelt wurden, deutlich niedriger. Hier sollten künftig die Werte nach DWA-A 198 angesetzt werden. Die Spitzenabflüsse bei Trocken und Regenwetter liegen nach A 198-Auswertung in dem Bereich der Vergleichswerte. Für eine kostenminimale Auslegung der neuen Stufe zur Mikroschadstoffelimination ist auch über eine Optimierung und Vergleichmäßigung des Zulaufs, z.B. durch eine Pufferung bei Regenwetter, nachzudenken.

### 3.3 Frachten und Konzentrationen nach DWA A 198

#### 3.3.1 Auswertung Kläranlage Haaren 2017

In der Statistik der Stadt Bad Wünnenberg und dem Erlaubnisbescheid wird die Ausbaugröße mit 7.700 EW angegeben. Auf Basis dieser Einwohnerwerte wird eine maximale Ausbau-CSB-Fracht von  $7.700 \text{ EW} \times 0,12 \text{ kg}/(\text{EWxd}) \text{ CSB} = 924 \text{ kg/d}$  ermittelt. Nach Auswertung der aktuellen Daten ergeben sich die folgenden Bilder.

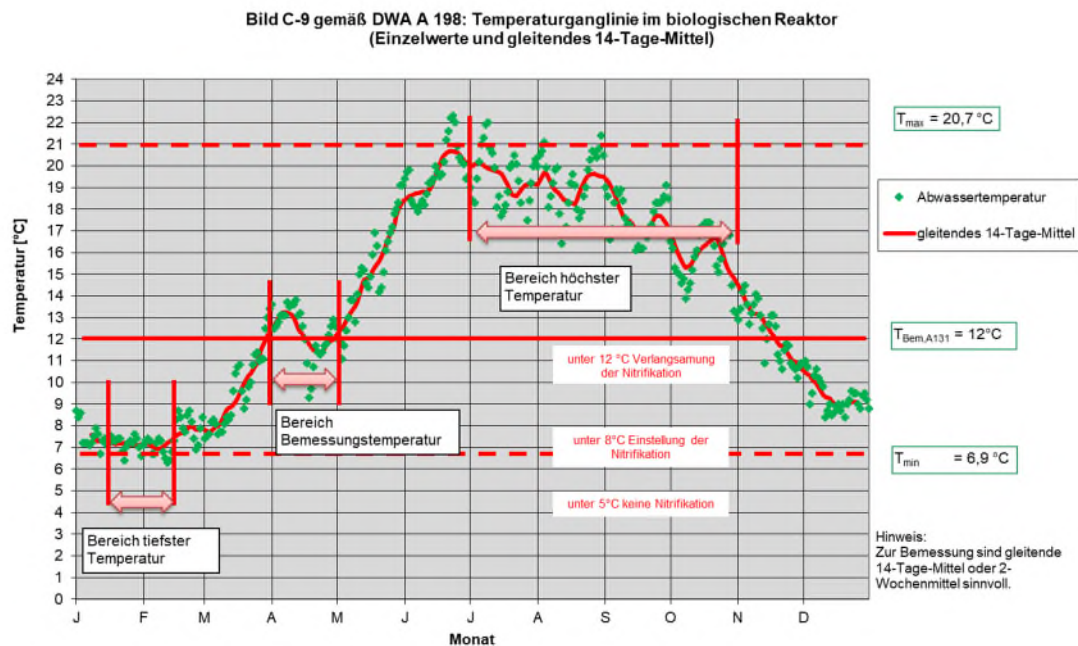


Abbildung 3-14: Temperaturganglinie im biologischen Reaktor (Einzelwerte und gleitendes 14-Tage-Mittel) 2017

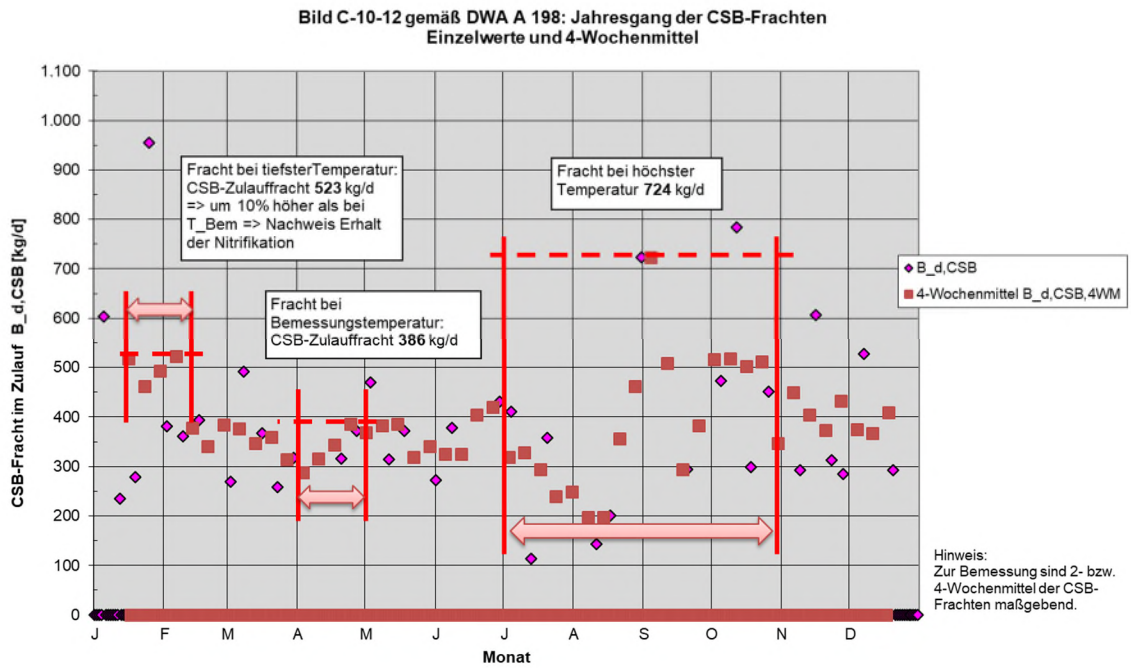


Abbildung 3-15: Jahrgang der CSB-Frachten Einzelwerte und 4-Wochenmittel 2017

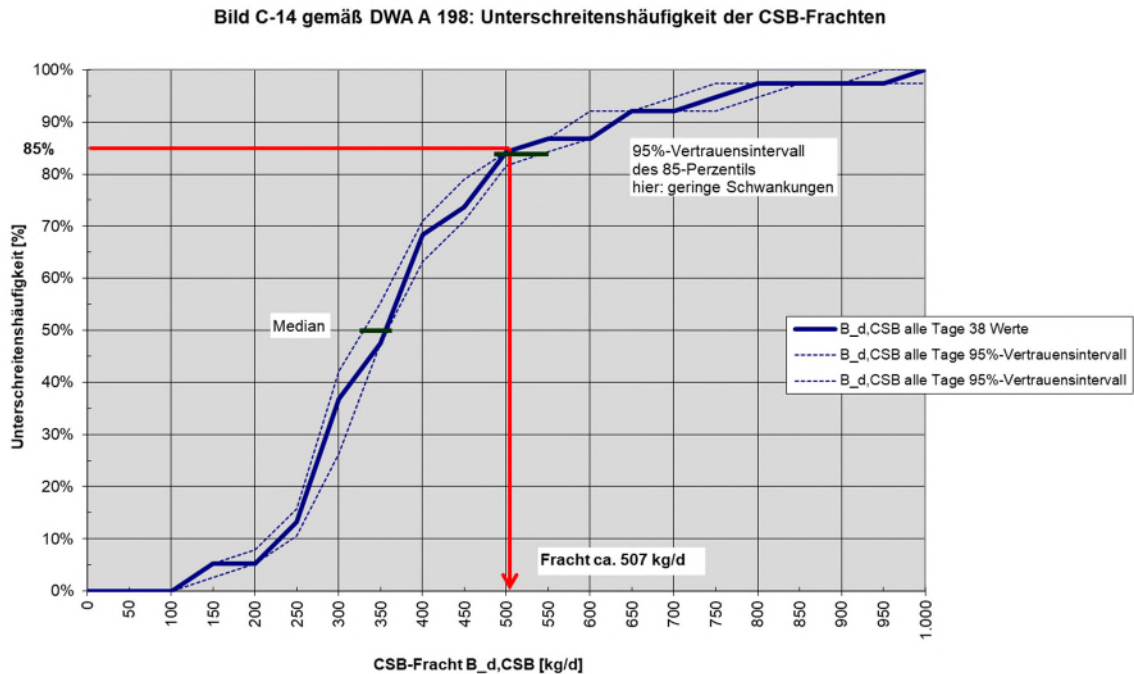


Abbildung 3-16: Unterschreitenshäufigkeit der CSB-Frachten 2017



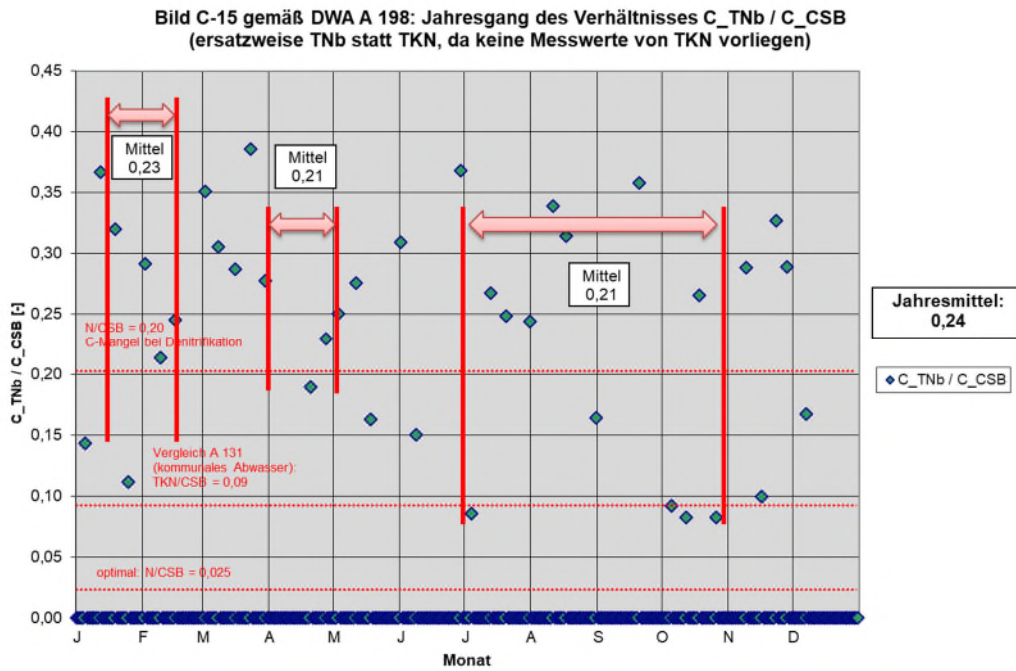


Abbildung 3-17: Jahrgang des Verhältnisses  $C_{TNb} / C_{CSB}$  2017

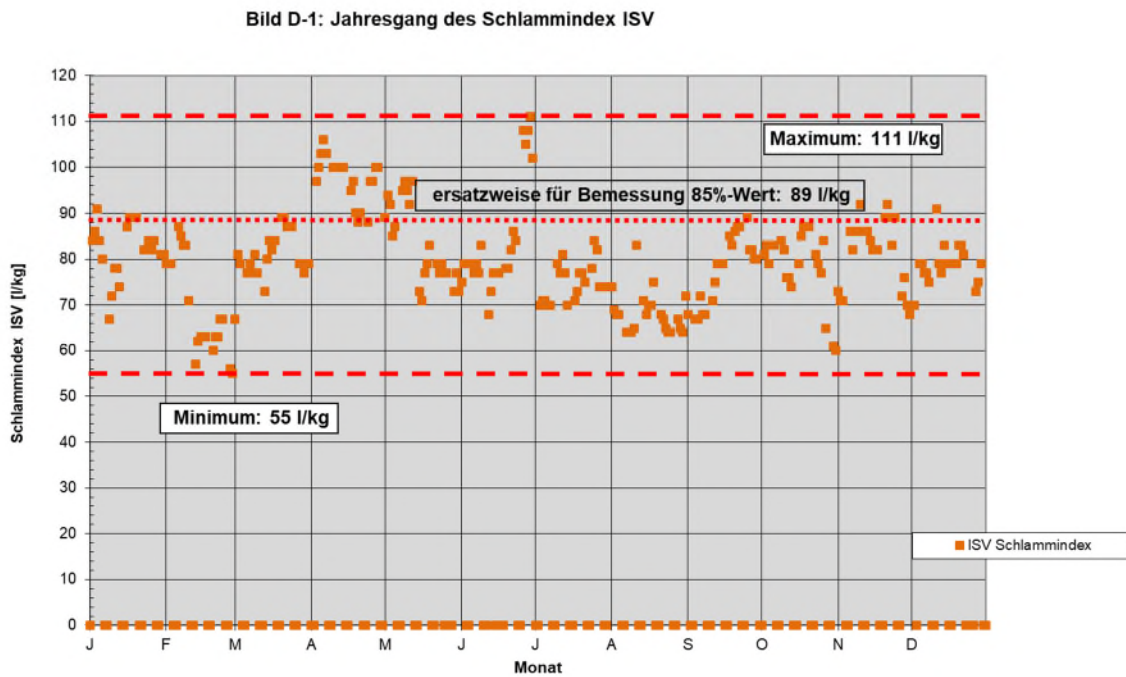


Abbildung 3-18: Jahrgang des Schlammindeix ISV 2017

### 3.3.2 Fazit zu den Frachten

Die Ergebnisse der Auswertung für das Jahr 2017 nach DWA-Arbeitsblatt A 198 sind auszugsweise in Tabelle 3-2 zusammengestellt.

Tabelle 3-2: Frachten der Kläranlage: Entwurf und Berechnung A 198

Wert	Vergleichswerte Ausbaugröße	Jahr 2017
Fracht bei Bemessungs- temperatur $B_{d,4wM,max}$	-	386 kg/d CSB
Fracht bei tiefster Tem- peratur $B_{d,4wM,tief}$	-	523 kg/d CSB
Fracht als 85%-Wert	924 kg/d CSB	507 kg/d CSB
Einwohnerwerte bei 120 g/(EWxd) CSB (jeweils 85%-Werte)	7.000 EW	4.225 EW
Verhältnis Stickstoff zu Kohlenstoff	-	0,24 [-]
Schlammindex ISV	-	89 l/kg

**Fazit:** Nach den Bemessungsvorschriften zur Einordnung von Kläranlagen in die Größenklassen und Festlegung der Ausbaugröße ist die an 85% der Trockenwettertage im Zulauf zur Kläranlage erreichte oder unterschrittene Fracht (hier: CSB) ohne interne Rückflüsse zuzüglich einer eingeplanten Kapazitätsreserve zu Grunde zu legen.

#### Demzufolge lag die Auslastung im Jahr 2017 bei 4.225 EW.

Auffällig ist das nach erster Sichtung hohe Verhältnis von Stickstoff zu CSB. Da keine Messwerte für TKN vorlagen, wurde ersatzweise der Parameter TN<sub>b</sub> angesetzt. Für eine künftige Neubemessung sind hier verdichtete Probenahmen und Analysen erforderlich. Nach dem wasserrechtlichen Erlaubnisbescheid der Bezirksregierung Detmold vom 27.11.2015 sind für Stickstoff bei NH<sub>4</sub>-N der Wert von 3,0 mg/l und bei N<sub>ges</sub> der Wert von 15,0 mg/l einzuhalten. Aus eigenen Ermittlung und Ergebnissen der Literatur hat die Bauform des Umlaufgrabens (hier: ESMIL-Becken) eine sehr hohe Denitrifikationskapazität, mit der sich der Wert für N<sub>ges</sub> einhalten lässt. Anderenfalls wären Maßnahmen zur externen Kohlenstoffdosierung erforderlich.

Als sehr günstig ist der Schlammindex zu bewerten, der als 85%-Wert bei 89 l/kg liegt und im Maximum des Jahres 2017 den Wert von 111 l/kg nicht überschritten hat.

### 3.4 Tendenzen der Abflüsse und Frachten

Zur Erkennung von langzeitlichen Tendenzen bei den Abflüssen und Frachten unter Vernachlässigung von Witterungseinflüssen wurden die verfügbaren statistischen Daten der Stadt Bad Wünnenberg für die Kläranlage Haaren ausgewertet.

Hierzu liegen die Werte für die Jahresabwassermenge, die Jahresschmutzwassermenge und die mittlere CSB-Fracht als 50%-Wert für die Jahre 2011 bis 2017 vor (Abbildung 3-19).

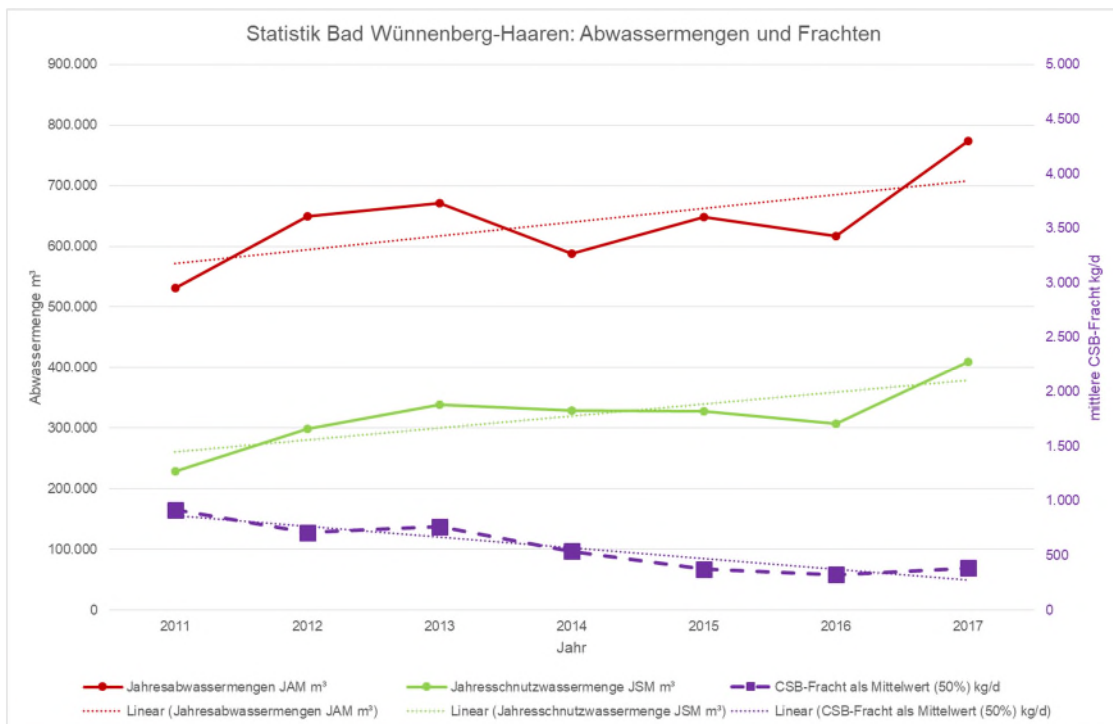


Abbildung 3-19: Tendenzen der Abflüsse und Frachten KA Haaren, 2011 bis 2017

**Fazit:** Die Abwassermengen haben eine steigende Tendenz, sowohl bei Trockenwetter- als auch beim ganzjährigen Abfluss. Anders hingegen verhält es sich bei der mittleren CSB-Fracht, die eine deutlich abnehmende Tendenz aufweist. Dies deutet darauf hin, dass ein zunehmender Anteil an geringer belastetem Schmutzwasser zugeführt wird.

Für die Festlegung der Auslegungswassermenge der neuen Stufe zur Mikroschadstoffelimination auf Basis der letzten drei Jahre ist die steigende Tendenz der Abwassermengen zu berücksichtigen. Bei einer Neukonzeption der biologischen Stufe sollte auf die tatsächlichen Frachten nach A 198 zuzüglich Prognose bemessen werden.

## **4 Weitere Anforderungen aus dem Bestand**

### **4.1 Einfluss von Wartung und Substanzerhalt**

Für eine wirkungsvolle Mikroschadstoffelimination ist eine effiziente Abwasserreinigung unbedingte Voraussetzung. Hierzu gehört auch der langfristige Erhalt der vorhandenen Anlagenteile, sowohl der Maschinenteknik als auch der Bausubstanz. Nach gegenwärtigen Kenntnissen ist dies nicht gegeben:

- Sowohl die Belebung als auch die Nachklärung sind nicht redundant ausgelegt.
- Ein dringend notwendiger Substanzerhalt, z.B. eine Betonsanierung an dem Belebungsbecken, sind damit nicht möglich.
- Insgesamt zeigt die Bausubstanz der kompletten Kläranlage einen überalterten Eindruck. An zahlreichen Stellen sind deutliche Betonschäden zu verzeichnen, die die Dichtigkeit der Abwasserbauwerke in Frage stellen. Viele Komponenten der maschinellen und verfahrenstechnischen Installation sind abgängig. Die elektrotechnische Ausrüstung lässt auf Grund der alten Motorbaureihen kaum einen energiesparenden Betrieb zu.

In Vorbereitung der Herstellung einer Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffelimination sind diese Punkt planerisch mit zu lösen. Die verfahrenstechnische Anordnung und neue räumliche Lage der Eliminationsstufe wird wesentlich davon beeinflusst, wie der künftige Raumbedarf der anderen Verfahrensstufen der Kläranlage sein wird.

### **4.2 Überprüfung der Bemessung der Kläranlage**

Üblicherweise erfolgt die Bemessung bzw. Überprüfung von einstufigen Belebungsanlagen nach dem DWA Arbeitsblatt A 131 mit den im vorherigen Kapitel nach DWA A 198 ermittelten maßgebenden Abflüssen, Frachten und Konzentrationen. Wichtig sind hierbei Erkenntnisse, ob die biologische Stufe, d.h. Belebung und Nachklärung, mit den vorhandenen Baugrößen die erwartete Reinigungsleistung erbringen können und welche Reserven bestehen. Mit den Ergebnissen wird die Voraussetzung für die optimale und effiziente Integration der neuen Reinigungsstufe zur Elimination von Mikroschadstoffen geschaffen.

Für kleine Kläranlagen bei Ausbaugrößen zwischen 1.000 und 5.000 EW ist auch die Anwendung des DWA Arbeitsblatt A 226 zulässig. Für eine erste überschlägige Betrachtung wird deshalb dieses Arbeitsblatt hier mit angewendet.

### 1) Bemessungsansatz nach A 226

Ausgangsdaten (siehe vor)

Ansatz für Jahr 2017: 4.225 EW + 20% Reserven = rund 5.000 EW

#### für Stabilisierungsanlage mit Nitrifikation

Belebungsbecken (BB): ISV < 100 l/kg, RV = 0,75, Rundbecken zur Nachklärung, Schlammalter 20 d, mit Fällung

**5.000 EW x 385 l/EW / 1.000 = 1.925 m<sup>3</sup> < vorh. Volumen 2.310 m<sup>3</sup> => BB ausreichend!**

#### für Stabilisierungsanlage mit intermittierender Denitrifikation

Belebungsbecken (BB): ISV < 100 l/kg, RV = 0,75, Rundbecken zur Nachklärung, Schlammalter 25 d, mit Fällung

**5.000 EW x 440 l/EW / 1.000 = 2.200 m<sup>3</sup> < vorh. Volumen 2.310 m<sup>3</sup> => BB ausreichend!**

*Hinweis: Eine überschlägige Bemessung der Nachklärung nach A 226 ist hier nicht möglich, da die darin empfohlene Mindesttiefe selbst für Nitrifikation bei 5,60 m ( $h_{ges}$ ) liegt.*

### 2) Bemessungsansatz nach A 131

Nachklärbecken (NKB) – für genaue Baumaße ist alte Planzeichnung erforderlich!

$Q_{bem} = 99,9$  l/s (IST)

ISV = 89 l/kg, RV = 0,75, Rundbecken D = 19 m abzgl. Mittelbauwerk D = 1,5 m, mit Denitrifikation, Schildräumer, Tiefe = 2,40 m am Rand (?), rund 2,60 m auf 2/3 Fließweg

Ergebnis: **Nachklärbecken zu flach! Schlammvolumenbeschickung herabsetzen!**

**$Q_{bem} = 53,9$  l/s**

ISV = 89 l/kg, RV = 0,75, Rundbecken D = 19 m abzgl. Mittelbauwerk D = 1,5 m, mit Denitrifikation, Schildräumer, Tiefe = 2,40 m am Rand (?), rund 2,60 m auf 2/3 Fließweg

Ergebnis nach iterativer Nebenrechnung: **Nachklärbecken zu flach, jedoch stimmt hierbei die rechnerische Tiefe mit der tatsächlichen Tiefe überein!**

**$Q_{bem} = 41,3$  l/s**

ISV = 89 l/kg, **RV = 1,0** für vertikale Durchströmung, Rundbecken D = 19 m abzgl. Mittelbauwerk D = 1,5 m, mit Denitrifikation, Schildräumer, Tiefe = 2,40 m am Rand (?), rund 2,60 m auf 2/3 Fließweg

Ergebnis nach iterativer Nebenrechnung: **Nachklärbecken zu flach, jedoch stimmt hierbei die rechnerische Tiefe mit der tatsächlichen Tiefe überein!**

Fazit: Nach überschlägiger Berechnung ist das Volumen des Belebungsbeckens für die nach DWA A 198 ermittelte Belastung von ca. 5.000 EW einschl. Reserve ausreichend. Für die Fracht in Höhe der Ausbaugröße von 7.000 EW wird das Belebungsbecken zu klein.

Erwartungsgemäß ist das Nachklärbecken nach den heutigen Erkenntnissen und Bemessungsregeln zu flach und wird damit nicht regelgerecht betrieben. Mit iterativer Berechnung wurde die Belastung so angepasst, dass die rechnerische Tiefe mit der tatsächlich vorhandenen übereinstimmt. Die iterative Herabsetzung der Abflussmenge auf Werte von 53,9 bzw. 41,3 l/s (bei  $RV=0,75$  bzw.  $1,0$ ) führt hierbei dazu, dass das Becken in der rechnerischen Tiefe mit der tatsächlichen Tiefe übereinstimmt und somit regelgerecht betrieben werden kann.

**Wichtig: Die künftige Bemessung der Kläranlage sollte mit fundierten, mehrjährigen Ergebnissen nach DWA A 198 auf Basis der Bemessungsregeln des DWA A 131 erfolgen!**

## 5 Grundlagen der Mikroschadstoffelimination

### 5.1 Verfahrenstechniken zur Mikroschadstoffelimination

Nach bisherigen Erkenntnissen ist eine Vielzahl der anthropogenen Mikroschadstoffe in den bestehenden Verfahrensstufen der Kläranlagen nach heutigem Stand der Technik nicht eliminierbar. Bei der mechanisch-biologischen Reinigung werden zwar einzelne Substanzen teilweise oder sogar vollständig entfernt, während andere Stoffe den Klärprozess ungehindert passieren. Nach TEXTE UBA 85 / 2014 ist die Elimination dabei im Wesentlichen auf drei Prozesse zurückzuführen (Abbildung 5-1).

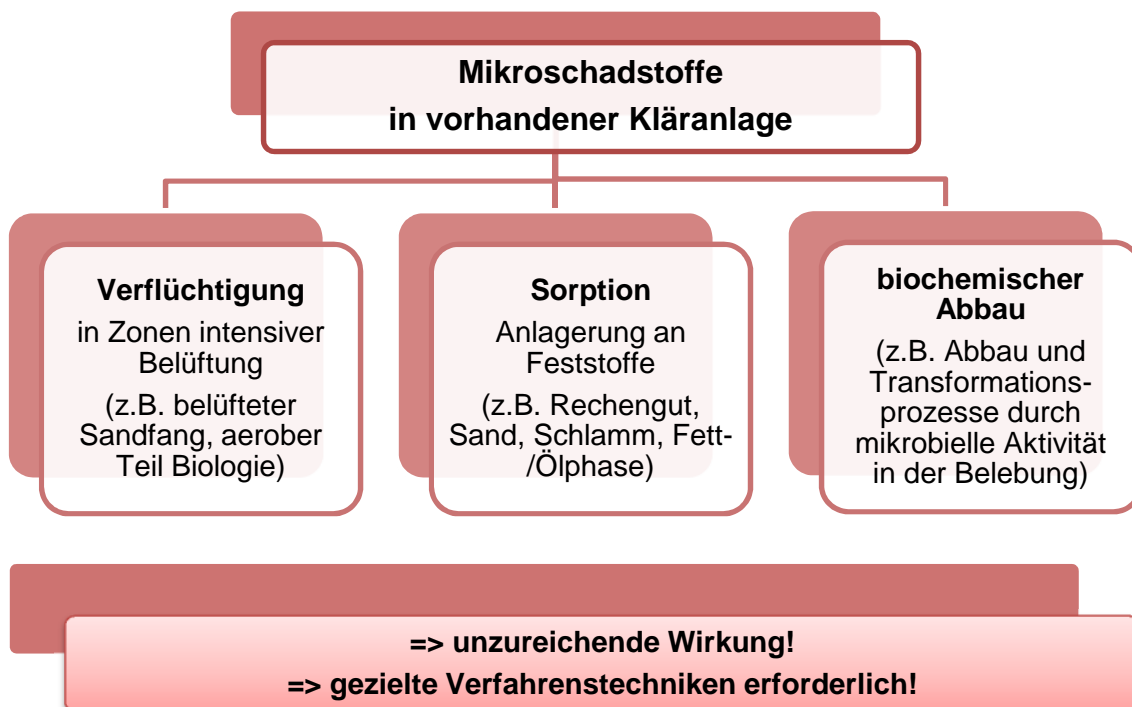


Abbildung 5-1: Mikroschadstoffelimination in vorhandenen Reinigungsstufen einer Kläranlage

Die Wirkung der Elimination in einer vorhandenen Kläranlage ist jedoch begrenzt, so dass es zur Entfernung der Vielzahl der – vor allem der schwer abbaubaren - Mikroschadstoffe einer zusätzlichen Reinigungsstufe mit gesonderter Verfahrenstechnik bedarf. Laut dem Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW besteht die Möglichkeit, mikroschadstoffkontaminiertes Wasser im Mischsystem einer Teilstrom- oder im Trennsystem einer Vollstrombehandlung zu unterziehen. Wird jedoch im Mischsystem aufgrund beispielsweise geringer Wasserführung im Gewässer, besonders sensibler Eigenschaften oder Nutzungen des aufzunehmenden Gewässers der immisionsbasierte Ansatz gewählt, muss eine Einzelfallbetrachtung zu Grunde gelegt werden.

Die wichtigsten Verfahren zur gezielten Mikroschadstoffelimination nach TEXTE UBA 85 / 2014 sind in Abbildung 5-2 dargestellt. Neben der Einzelanwendung der Verfahrenstechniken besteht die Möglichkeit der Kombination zur Steigerung der Wirksamkeit der Mikroschadstoffelimination. Besonders die Kombination von Ozonanlage mit nachgeschalteter GAK-Stufe wird in der Fachwelt als sehr gut geeignet für die Reinigung von Abwasser auch bei einer Vielzahl schwer abbaubarer Substanzen angesehen.

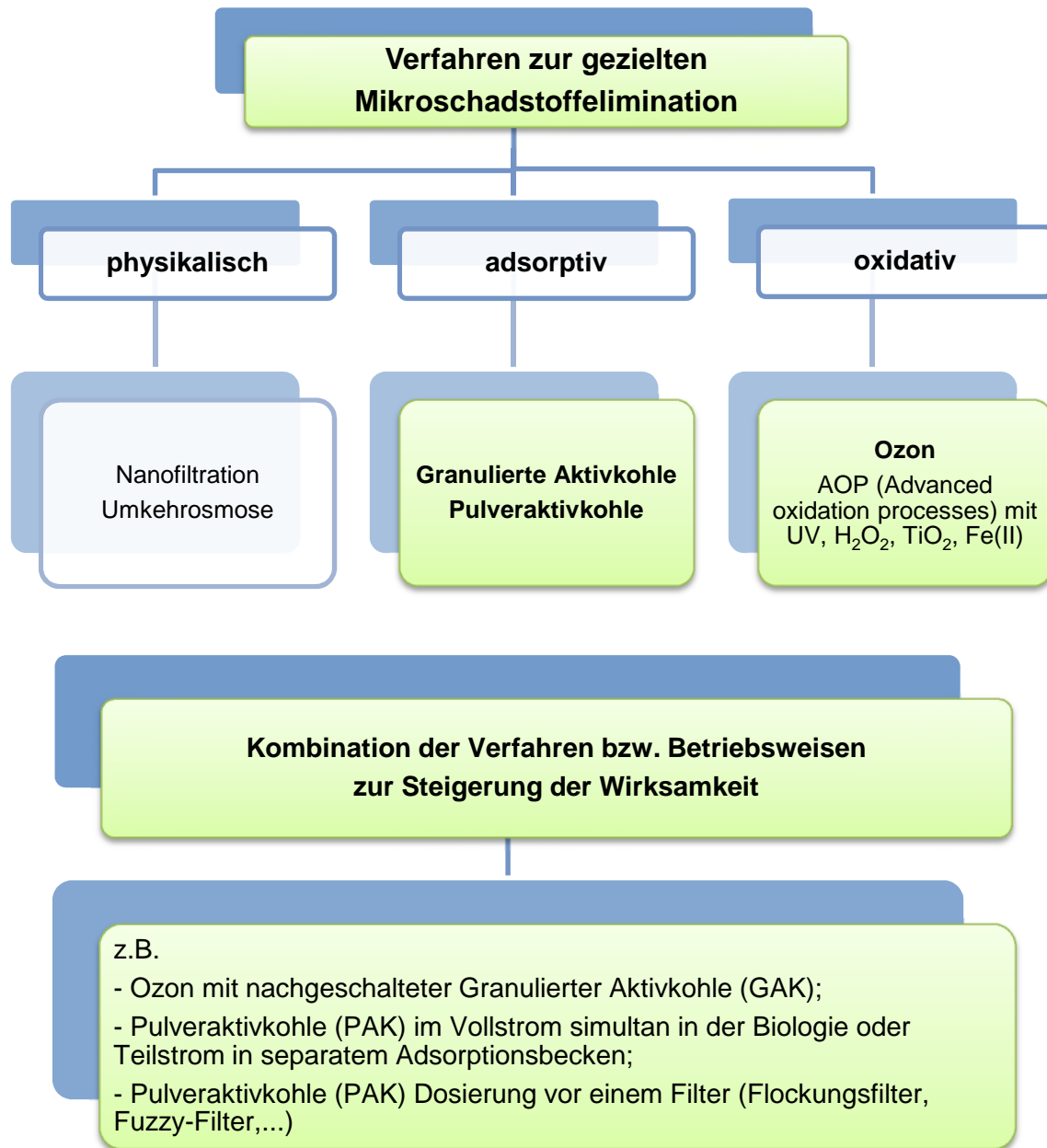


Abbildung 5-2: Verfahren zur gezielten Mikroschadstoffelimination



Ergänzend wird erwähnt, dass zusätzlich die Möglichkeit der Mikroschadstoffelimination mit Membranverfahren möglich ist. Von technischer und wirtschaftlicher Bedeutung haben sich jedoch die Lösungsansätze mit GAK, PAK und Ozon erwiesen. Diese grundlegenden Methoden zur Mikroschadstoffelimination werden im Folgenden untersucht.

## 5.2 Grundlagen der AktivkohleadSORPTION

Eine Möglichkeit der chemisch-physikalischen Wasseraufbereitung ist die AktivkohleadSORPTION. In den Trinkwasseraufbereitungsprozessen wird Aktivkohle seit fast 100 Jahren eingebunden, um Stoffe zu entfernen, die die Farbe und den Geschmack negativ beeinflussen (Arge, 2015). Bei der Adsorption handelt es sich um ein thermisches Trennverfahren, wobei die aus dem Wasser zu eliminierenden Stoffe an der Oberfläche eines Adsorbens (hier Aktivkohle) angelagert werden und dort akkumulieren. Die Definitionen und Begriffe sind in Abbildung 5-3 dargestellt.

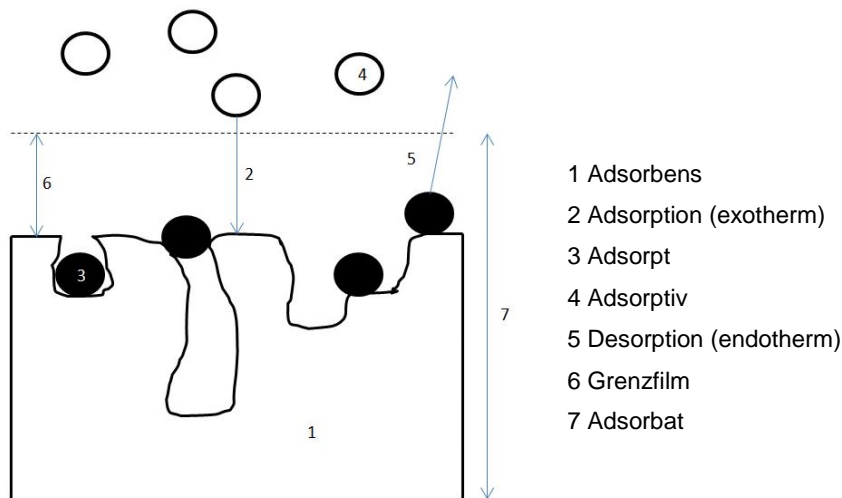


Abbildung 5-3: Verwendete Definitionen und Begriffe (nach Bathen 2001)

Laut Bathen besteht ein kontinuierlicher Übergang zwischen Adsorbat und der flüssigen Phase, woraus folgt, dass keine direkten Messwerte zur Konzentration im Adsorbat gemessen werden können und somit thermodynamische Modelle unanwendbar sind. Gibbs und Verschaffelt erstellten somit eine imaginäre Grenzfläche, die das System in eine Adsorbat- und in eine bulk-Phase einteilt, wie in Abbildung 5-4 dargestellt, um mathematische Beschreibungen und infolgedessen thermodynamische Modelle verwendbar zu machen.

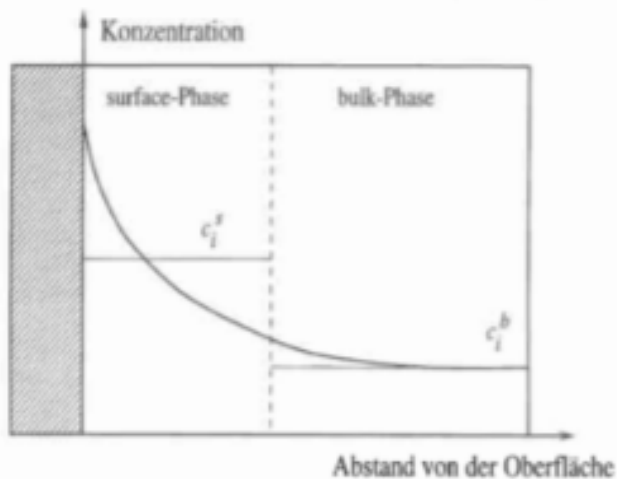


Abbildung 5-4: Gibbs'sche Phasengrenze (Bathen und Breitbach, 2001)

Bei der Definition von Aktivkohle nach Henning 1991 ist diese ein kohlenstoffhaltiges und poröses Produkt (Porenvolumen  $> 0,2 \text{ cm}^3/\text{g}$ , Porendurchmesser 0,3 bis einige 1.000 nm) mit großer innerer Oberfläche ( $> 400 \text{ m}^2/\text{g}$ ), an dessen innerer Oberfläche sich Moleküle anlagern können.

Die Aktivkohle kann je nach Verwendung pulverförmig als Pulveraktivkohle (PAK) oder körnig als Granulat (GAK) produziert werden. Ausgangsmaterialien für Aktivkohle sind verschiedene kohlenstoffhaltige Stoffe, zumeist Holz, Kokosnussschale, Steinkohle, Holzkohle und Torf. Die Kohle kann entweder chemisch oder mit Gas aktiviert werden. Der vereinfachte Modellprozess ist in der folgenden Abbildung 5-5 dargestellt.

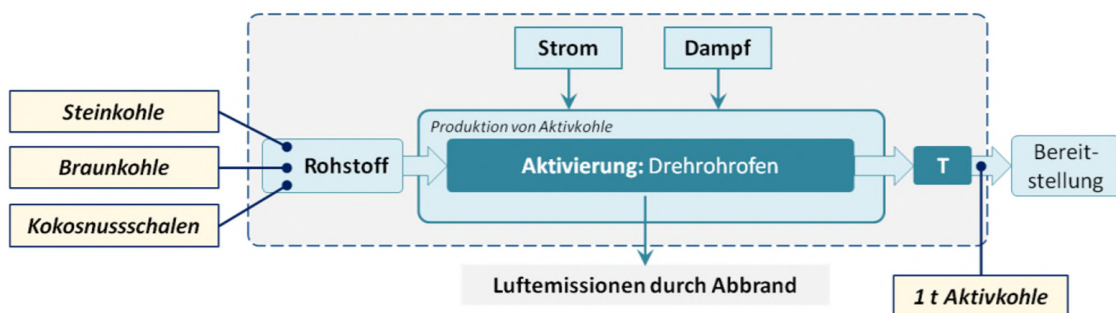


Abbildung 5-5: Prozessmodell zur Herstellung von Aktivkohle (Dr. Remy, Kompetenzzentrum Wasser Berlin, 2017)

Bevor die Aktivkohle genutzt werden kann, wird sie chemisch oder mithilfe von Gas aktiviert. Dieser Verfahrensschritt ist zur Vergrößerung der inneren Oberfläche nötig. Mithilfe von Energie werden flüchtige Komponenten aus der Kohle ausgetrieben, welche abundante Poren, Risse und Spalten hinterlassen. Der Prozess der chemischen Aktivierung wird zumeist bei Pulverkohlen verwendet. Es wird relativ grobporige Aktivkohle produziert, die sich besonders gut für die Wasserreinigung eignet. Nach der Trocknung und Behandlung mit wasserentziehenden Chemikalien wird das bis dahin unverkohlte Material unter Luftabschluss in einem 300 bis 600 °C heißen Ofen erhitzt. Wasserstoff- und Sauerstoffatome werden aus dem Holz entfernt, wobei parallel eine Aktivierung und Karbonisierung stattfindet. Im letzten Schritt wird die Kohle mit Phosphorsäure abgekühlt und gewaschen. Nach dem Trocknen kann sie gemahlen werden. Granulierte Aktivkohle wird mit der Gas-Aktivierung hergestellt. Im ersten Schritt wird aus einem kohlenstoffhaltigen Rohstoff ein Formkörper produziert. Dieser wird bei 800 bis 1.000 °C mit Hilfe von partieller Vergasung durch Wasserdampf oder Kohlendioxid aktiviert. Die innere Oberfläche vergrößert sich bei diesem Prozess erheblich. Bei 800 bis 900 °C wird das aktivierte Material unter Inertgasatmosphäre pyrolysiert, wonach es gebrochen und gesiebt wird (Bathen 2001).

Die innere Oberfläche des Adsorbens ist um ein Vielfaches größer als seine äußere Oberfläche. Die Aktivkohle zeichnet sich durch seine sehr große innere Oberfläche von etwa 1.000 bis 2.000 m<sup>2</sup>/g aus. In der nachstehenden Abbildung 5-6 ist die Oberflächenstruktur von Aktivkohle ersichtlich.

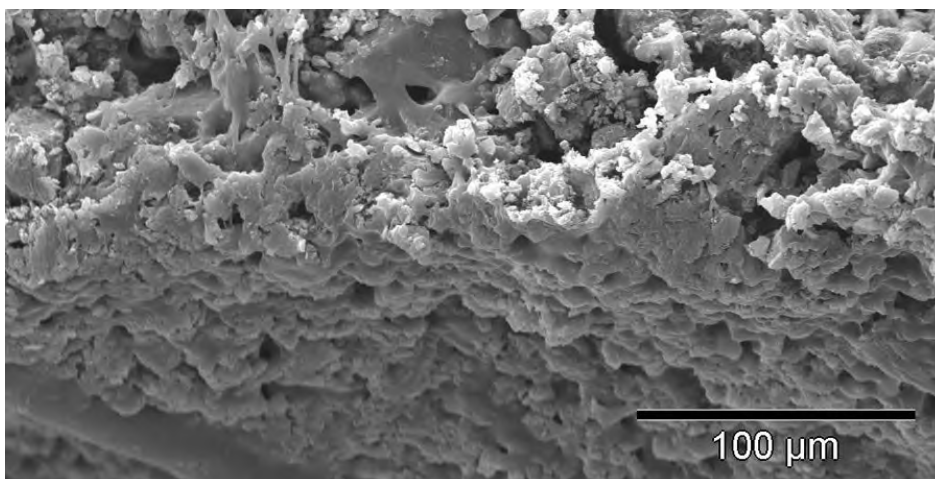


Abbildung 5-6: Porenstruktur von Aktivkohle (helsa, 2017)

Die Adsorptionsprozesse finden an der inneren Oberfläche statt. Ein Rückschluss auf die Adsorptionsleistung durch die innere Oberfläche ist jedoch nur bedingt möglich, da eine Vielzahl von weiteren Parametern die Leistung beeinflussen kann. Mit der Molekülgröße des Adsorptivs wird die untere Grenze des Porendurchmessers vorgegeben, bei der Adsorptivmoleküle noch in die Poren hinein diffundieren können (Bathen 2001).

Die Poren lassen sich nach dem IUPAC-Standard (International Union of Pure and Applied Chemistry) in vier verschiedene Porengrößen einteilen (Tabelle 5-1, Bathen 2001).

Tabelle 5-1 Porengrößen

Porenklasse	Porendurchmesser [nm]
Submikroporen	< 0,4
Mikroporen	0,1 - 2,0
Mesoporen	2,0 - 50
Makroporen	> 50

Die schematische Porenstruktur gegliedert in ihre Porendurchmesser sind in Abbildung 5-7 dargestellt.



Abbildung 5-7: Schematische Porenstruktur von Aktivkohle (Metzger, 2010)

Die Aktivkohle besteht laut Elementaranalysen zu über 95 % aus Kohlenstoff. Zu einem kleinen Prozentsatz sind Mineralien der Asche, Sauerstoff, Stickstoff und Wasserstoff enthalten. In Form von Graphitkristalliten mit Sechsringflächen von 2 bis 3 nm Durchmesser tritt der Kohlenstoff auf. Eine einheitliche Raumordnung weisen diese Kristallite im Gegensatz zu Graphit nicht auf. Die zufällige Anordnung, die gefalteten Aromateneinheiten und der amorphe Kohlenstoff erzeugen die Porenstruktur der jeweiligen Aktivkohle. Die Oberfläche aus Sorptionsplätzen bietet verschiedene Adsorptionspotentiale für die Aktivkohle. Sie ist hydrophob und organophil. Ein Adsorptiv kann, je weniger wasserlöslich es ist, besser aus wässriger Phase adsorbiert werden (Bathen, 2001).

Die Adsorptionswirksamkeit von Aktivkohle wird durch spezifische Substanzparameter des Adsorptivs und Adsorbens beeinflusst, welche nachstehend nach Metzger aufgezeigt werden sollen:

1. Molekularstruktur und –gewicht
2. Löslichkeit
3. Polarität
4. Ionisation
5. pH-Wert
6. Temperatur

Adsorptionsverfahren lassen sich nach physikalischen Kriterien wie Mechanismen, Selektivitäten und Bindungsenthalpien, sowie nach Verfahrenstechniken in Form von Bauart des Adsorbens, der Konzentration in der fluiden Phase oder auch der Regenerationsart des Adsorbens unterscheiden. Die Ausführungen der erwähnten Unterscheidungen folgen nach Bathen (2001).

Prinzipiell besteht der Adsorptionsvorgang laut Wedler aus der Überlagerung von sowohl abstoßenden als auch anziehenden Kräften. Ausgedrückt wird die Summe dieser abstandsabhängigen Überlagerungen als potentielle Energie.

Die Klassifizierung nach Bindungsenthalpien lässt sich wie folgt in drei Teilunterscheidungsbereichen beschreiben (Bathen, 2001). Zum einen existiert die Physisorption, welche durch physikalische Kräfte, überwiegend der Van-der-Waals-Kräfte, in die Wege geleitet wird und die erste Anlagerung des Adsorptivs an den Adsorbens bewirkt. Während dieses Prozesses finden keine Elektronenübergänge statt, sondern es dominieren Dipol-, Dispersions- oder Induktionskräfte. Zwar sind diese abstandsabhängigen Wechselwirkungen zwischen den Molekülen und Atomen sehr schwach, jedoch erstrecken sie sich über verhältnismäßig große Strecken und ermöglichen verstärkt in Kombination mit hohen relativen Drücken die Bildung von Polyschichten. Der Vorgang der Physisorption ist reversibel.

Anders verhält es sich mit der Chemisorption. Hierbei werden die Moleküle und Atome durch die im Verhältnis vielfach stärkere chemische Bindungsenergie an der Oberfläche des Adsorbens gebunden. Während laut Bathen Kümmel u. Worch 1990 die Bindungsenergien der Chemisorption in flüssiger Phase auf 60 bis 450 kJ/mol bezifferten, treten bei der Physisorption lediglich Bindungsenergien von <50 kJ/mol auf.

Die Elektronenübergänge zwischen Adsorbens und Adsorpt können zu Dissoziationen führen und der folgenden Entstehung einer Art chemischer Verbindungen, wobei sich die Adsorpts auf der Oberfläche des Adsorbens bewegen können. Währenddessen wird thermische Energie an die Umgebung abgegeben – man spricht daher von einer exothermen Reaktion.

Zwar kommt es bei der Abwasserbehandlung zu keiner Aufbereitung von gasförmigen Phasen, jedoch soll vollständigkeithalber auf das Bestehen einer dritten Adsorptionsercheinung, der Kapillarkondensation bei Gasadsorption, hingewiesen werden. Dieses Phänomen stellt den gasförmig-flüssig-Phasenübergang innerhalb der Kapillarporen dar, der bei voller Beladung durch molekulare Wechselwirkungen zwischen den Adsorps in die Wege geleitet wird.

In der folgenden Abbildung 5-8 sind nach Wedler typische Energieabläufe der Physisorption (gestrichelt) und der Chemisorption (durchgezogen) in Abhängigkeit des Abstands zwischen Adsorptiv zum Adsorbens dargestellt. Unter  $E_p$  ist die Physisorptionswärme, unter  $E_c$  die Chemisorptionswärme und unter  $E_D$  die Dissoziationsenergie zu verstehen.

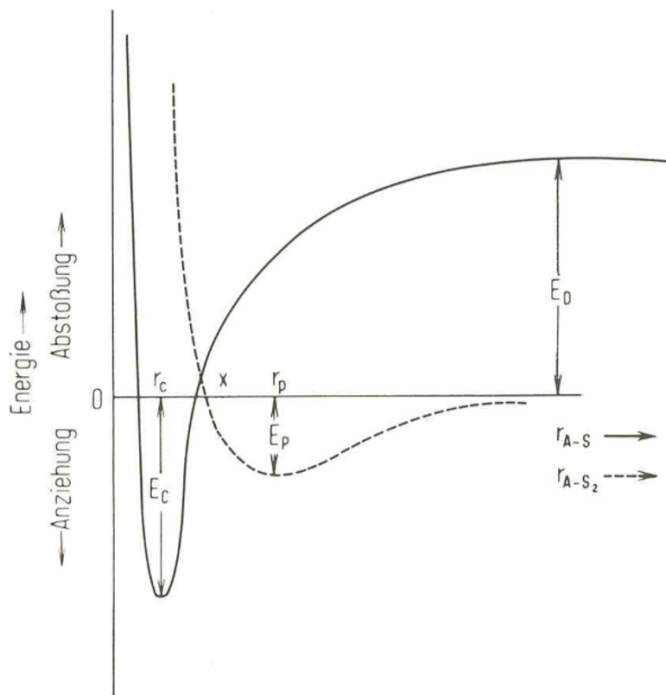


Abbildung 5-8: Abstandsabhängige potentielle Energie eines Adsorptivs an einem Adsorbens (Wedler, 1970)

Eine weitere Möglichkeit die Adsorptionsprozesse einzuteilen, ist die Klassifizierung nach Mechanismen bzw. Selektivitäten (Bathen, 2001). Einer dieser Mechanismen ist der statische Kapazitätseffekt. Sieht man den Adsorptionsprozess als einen angestrebten Gleichgewichtszustand aus Adsorption und Desorption ist zu schlussfolgern, dass Partikel mit geringer Desorptionsgeschwindigkeit besser adsorbiert werden. Auf dieser Annahme beruht zudem der Gleichgewichtseffekt, der beschreibt, dass Komponenten mit höherer Bindungsenthalpie bevorzugt adsorbiert werden. Eine weitere Einteilungssparte ist der sterische Effekt, der den Siebeffekt bei großen Molekülgrößenverteilungen aufzeigt. Während Moleküle mit kleiner Oberfläche in die Kapillarporen diffundieren und adsorbiert werden können, reichern sich Moleküle mit großen Oberflächen verhältnismäßig in der fluiden Phase an. Abschließend ist der kinetische Effekt zu erwähnen, der ein ähnliches Resultat aufweist wie der sterische. Komponenten mit geringen Oberflächen weisen größere Diffusionsgeschwindigkeiten auf und sind somit in der Lage, Adsorptionsplätze schneller zu besetzen.

Eine zusätzliche Klassifizierung kann nach der Bauform der Adsorber getroffen werden. Die möglich auszuführenden Bauformen zur Adsorption in der flüssigen Phase unterscheiden sich allgemein hauptsächlich durch die relative Bewegung zwischen Adsorbens und Adsorptiv. Diese sollen folgend aufgezeigt werden (Bathen, 2001):

1. Festbetten
2. Rührkessel-Adsorber
3. Pulverkohledosierungsverfahren
4. Bewegte Adsorberbecken
5. Wirbelschichten mit Schwebebetten
6. Karusseladsorber
7. Adsorberbecken mit simulierter Gegenstromführung

Abschließend ist die Klassifizierung nach prozesstechnischen Kriterien zu erwähnen. Diese anwendungsspezifischen Kriterien beziehen sich beispielsweise auf die Unterscheidung zwischen Reinigung und Trennung, zudem nehmen sie seltener Bezug auf Adsorbens oder Adsorptiv (Bathen, 2001).

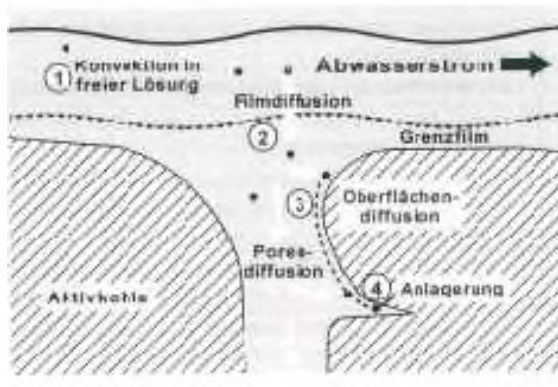


Abbildung 5-9: Transportschritte der Aktivkohleadsorption (Metzger, 2010)

Metzger (2010) beschreibt den zeitlichen Verlauf des Adsorptionsvorgangs bis zum Einstellen des Gleichgewichtszustands mit dem Begriff der Adsorptionskinetik wie in Abbildung 5-9 dargestellt.

Der Stofftransport des Adsorptivs gliedert sich zeitlich in folgende Teilschritte:

1. Transport des Adsorptivs aus der Lösung in die Nähe des Adsorptivs (Diffusion bzw. Konvektion)
2. Transport durch die das Adsorbens umhüllende Grenzschicht (Filmdiffusion)
3. Transport innerhalb des Kohlekorns (Porendiffusion)
4. Anlagerung an die freie Oberfläche (Oberflächendiffusion)

Die modelltechnischen Konzentrations- und Beladungsverläufe, gegliedert in die verschiedenen Transportmechanismen sind in der folgenden Abbildung 5-10 dargestellt.

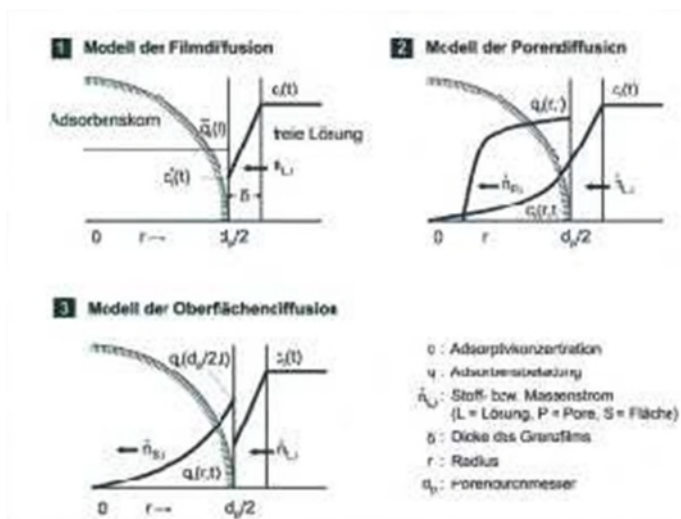


Abbildung 5-10: Transportmechanismen bei der Aktivkohleadsorption (Hydroingenieure, 2012)



Laut Wedler (1970) wirken die zur Bindung zwischen Adsorpt und Adsorbens verantwortlichen Kräfte ähnlich, wie zwischen Atomen und Molekülen wirkende Kräfte, mit dem Unterschied, dass das Adsorbens als eine im Feststoff eingebundene Atomgruppierung zu sehen ist. Grundsätzlich können folgende Kräfte wirksam werden:

1. Dispersionskräfte
2. Abstoßungs- oder Repulsionskräfte
3. Dipol-Wechselwirkungen
4. Valenzkräfte
5. Wechselwirkungskräfte

Im Reinigungsprozess werden die angelagerten Stoffe zusammen mit der Aktivkohle aus dem Wasser abgesondert. Das Entfernen eines des am Adsorbens angelagerten Moleküls nennt sich Desorption. Adsorption bzw. Desorption bestehen aus einem komplexen Zusammenspiel von verschiedenen konvektiven und diffusiven Stofftransportprozessen. Die Prozesse sind mit der Adsorption und verschiedenen Wärmetransport- und Wärmeleitungsvorgängen verbunden, wobei die einzelnen Teilschritte in Abbildung 5-11 abgebildet sind. Bei der Adsorption handelt es sich um eine exotherme Anlage- rung, welche sich in Form einer Art Reaktionsgleichung darstellen lässt:

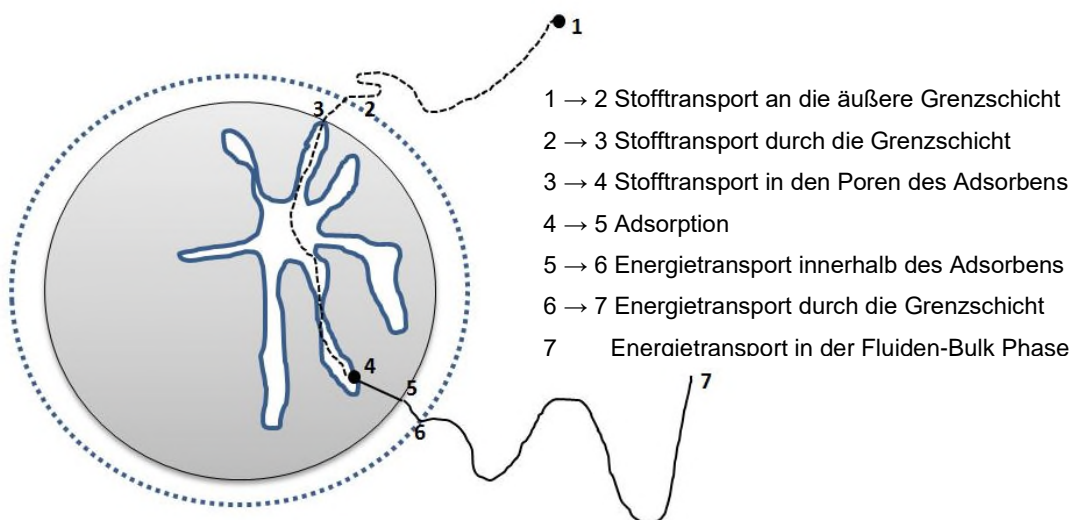


Abbildung 5-11: Teilschritte der Adsorption (nach Bathen 2001)

Während die Kinetik außerhalb des Adsorbens durch hydrodynamische Bedingungen beeinflussbar ist, kommen bei der Diffusion innerhalb des Kornes nur die Porosität des Adsorbens und die Adsorptionseigenschaften des Adsorps zum Tragen (Metzger, 2010).

Zusätzlich kommt es bei der Adsorption in Festbetten zu dynamischen Prozessen, die sich praktisch anhand von Durchbruchkurven sichtbar machen lassen (Bathen, 2001). Während des Betriebs einer Adsorptionsstufe werden Teilstoffe der Lösung von im Festbett befindlicher Aktivkohle zurückgehalten, bis ein Gleichgewichtszustand erreicht wird. Anschließend ist eine Erhöhung der Konzentration des zu adsorbierenden Stoffes im Ablauf der Adsorptionsstufe nachzuweisen. Zu diesem Zeitpunkt wird von einem Durchbruch des Filters gesprochen. Der zeitliche Ablauf der Beladung eines Aktivkohlefilters ist in der folgenden Abbildung 5-12 dargestellt.

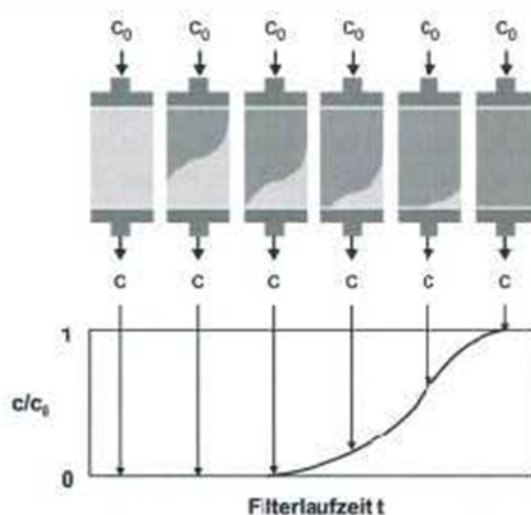


Abbildung 5-12: Beladungsprofil eines Aktivkohlefilters (Hydroingenieure, 2012)

Der Prozess der Adsorption lässt sich auf einen Gleichgewichtszustand, den das Adsorptions-System anstrebt, zurückführen. Die Triebkraft für die Adsorption ist ein Ungleichgewicht. Aufgrund kürzerer Diffusionswege stellt sich bei PAK ein schnellerer Gleichgewichtszustand ein als bei GAK. Die Lage des Gleichgewichtszustandes wird durch die Thermodynamik definiert und kann auf drei Arten beschrieben werden:

1. Adsorptionsisothermen
2. Adsorptionsisosteren
3. Adsorptionsisobaren

Üblicherweise werden die Adsorptionsisothermen für die Beschreibung des thermodynamischen Gleichgewichts verwendet. Das bedeutet, die Beziehung des adsorbierten Volumens und dem Partialdruck des Adsorptivs in der Gasphase bzw. der Konzentration des Adsorptivs in der flüssigen Phase. Während der Gasphase ist die Abbildung der Beladung des Adsorbens über dem Partialdruck des Adsorptivs die Isotherme. Die Isotherme in der Flüssigphase ist die Funktion der Beladung des Adsorbens in Abhängigkeit von der Konzentration des Adsorptivs in der Flüssigphase (Bathen, 2001).

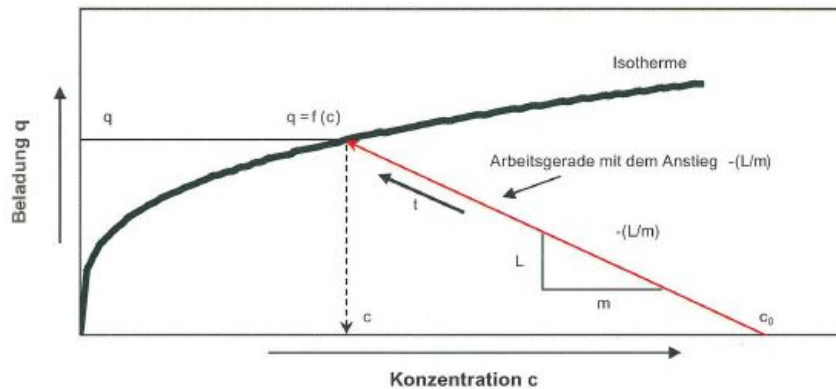


Abbildung 5-13: Aufnahme eines Isothermenpunktes (Metzger, 2010)

Für die Darstellung des Verlaufs einer Isotherme sind mehrere Messpunkte erforderlich. Die Ermittlung eines Isothermenpunktes ist in Abbildung 5-13 dargestellt. Nach Metzger (2010) gibt man für die Aufnahme eines Isothermenpunktes einer bestimmten Lösungsmittelmenge  $L$  mit einer bekannten Konzentration  $c_0$  eines Sorptivs eine definierte Menge an Adsorbens  $m$  hinzu und durchmischt die Lösung. Nach der Einstellung des Gleichgewichtszustandes kann die Beladung  $q$  des zuvor unbeladenen Adsorbens durch eine Massenbilanz unter Kenntnis der Restkonzentration  $c$  wie folgt berechnet werden:

$$q = \frac{L}{m} \cdot (c_0 - c)$$

Nachdem die Aktivkohle vollständig beladen ist, kann sie regeneriert bzw. reaktiviert werden. Eine thermische Regeneration findet bei Temperaturen bis 500 °C statt, eine Reaktivierung ist bei Temperaturen um 800 °C möglich. Bei etwa 150 °C werden adsorbierte Substanzen verdampft. Es findet eine Desorption statt, die eine Umkehrung der Adsorption darstellt. An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, dass Desorptionen nicht zwingend durch thermische Energie vollzogen werden müssen.

Allgemein werden Desorptionen aufgrund ihres Energieeintrags unterschieden (Chemielexikon, o. J.):

1. Thermische Desorption
2. Optische Desorption (Photonen)
3. Akustische Desorption (Ultraschall)
4. Elektrische Desorption
5. Ionenstimulierte Desorption
6. Drucktechnische Desorption
7. Technische Desorption
8. Verdrängungsdesorption

Laut Bathen haben sich bei der Flüssigphasenadsorption Konzentrationswechselverfahren durchgesetzt, da thermische Desorptionsverfahren aufgrund der großen Wärmekapazitäten sehr kostenintensiv sind.

Durch den Energieeintrag besitzen die desorbierenden Adsorbats genügend Energie, um die Bindungsenergie zum Adsorbens zu überwinden (Chemielexikon, o. J.). Die meisten organischen Substanzen werden zwischen 150 und 600 °C pyrolysiert. Bei Temperaturen bis zu 1.000 °C werden die verbleibenden Stoffe mit Hilfe einer gezielten Oxidation eliminiert (Bathen 2001).

### **5.3 Anlagen zur Pulveraktivkohle-Adsorption**

Eine Adsorptionsstufe zur Mikroschadstoffelimination mit Hilfe von pulverisierter Aktivkohle erfordert eine PAK-Silo- und Dosiereinheit. Die sinnvollerweise auf Gravimetrie basierende PAK-Dosierung kann verfahrenstechnisch unterschiedlich in den Reinigungsablauf einbezogen werden. Einige Verfahrensvarianten zur Einbindung der PAK-Dosierung sind in der folgenden Abbildung 5-14 dargestellt.

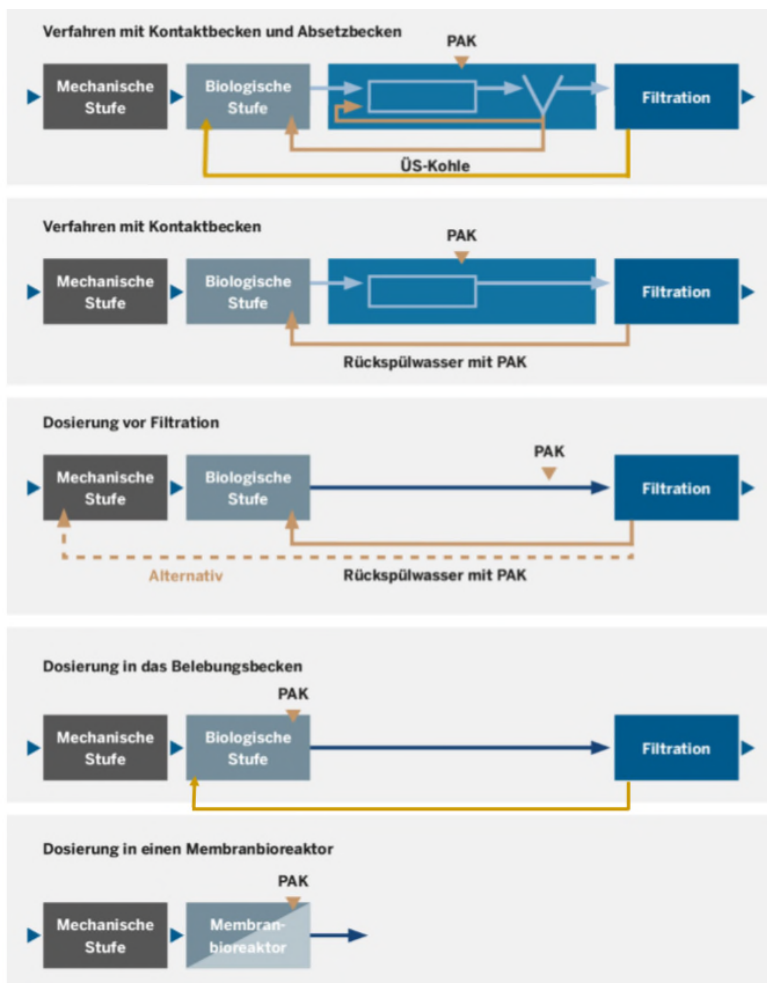


Abbildung 5-14: Möglichkeiten zur Einbindung der PAK-Dosierung (Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW, 2018)

Die Wirksamkeit von Pulveraktivkohle hängt stark von den spezifischen Werten der Aktivkohle ab. Charakterisierende Werte wie Rohstoffart, die Art der Aktivierung oder der Partikelgröße sowie der Qualität der Aktivkohle nehmen starken Einfluss auf das Reinigungsverhalten der Anlage. Jedoch auch durch Parameter wie der Dosiermenge, dem PAK-Typ, der Platzierung des Dosierorts und einer zu erwägenden Rezirkulation zur weiteren Beladung und zur Entkopplung der Aktivkohle von der hydraulischen Aufenthaltszeit sind Ansätze, den Verfahrensablauf zu optimieren. Übliche Dosiermengen liegen laut Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW zwischen 10 und 20 mg PAK/L und sollten durch Labortests festgelegt werden. Da PAK eine sehr kleine Korngrößenverteilung aufweist, kommt es durch die kurzen Diffusionswege und den damit einhergehenden guten Stoffaustausch zu kurzen benötigten Mindestkontaktzeiten, in der Regel werden 15 – 30 Minuten als ausreichend angesehen (Bathel, 2001).

Während der Kontaktzeit wird die PAK in der Adsorptionsstufe mit Mikroschadstoffen beladen, die wiederum infolge von Sedimentation und Filtration aus dem System entfernt wird.

In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass eine Verwertung von PAK-Überschussschlamm auf landwirtschaftliche Flächen nicht empfohlen wird, da die adsorbierten Schadstoffe durch die Nahrungsaufnahme der Kohlepartikel in Tieren und Insekten akkumulieren oder ein Teil der Schadstoffe durch UV-Strahlung und wohlmöglich eintretender optischen Desorption erneut in die Umwelt abgegeben werden könnten. Bei PAK-Dosierverfahren müssten ansonsten zusätzliche, bauliche Vorkehrungen getroffen werden, um den Schlamm aus der biologischen Reinigungsstufe nicht mit der beladenen PAK zu kontaminieren und ihn somit landwirtschaftlich nutzbar zu halten.

Bei der Mikroschadstoffelimination mit Hilfe von PAK ist es auch möglich, eine anaerobe Schlammstabilisierung zu betreiben oder künftig nachzuschalten, da sie sich positiv auf das Entwässerungsverhalten und den Heizwert auswirkt. Im Falle einer Schlammverbrennung lässt sich ferner ein leichter Energiegewinn verzeichnen (MULNVNRW, o. J.).

## **5.4 Anlagen mit granulierter Aktivkohle**

Eine Adsorptionsanlage mit granulierter Aktivkohle ist der biologischen Stufe nachzuschalten. Dem Nachklärbecken folgend sollte ein Vor-Filter angeordnet werden, der pasierte, suspendierende Partikel aus dem System entfernt, um die nachfolgende GAK-Filterstufe zu entlasten beziehungsweise nicht vorzeitig zu verstopfen.

Der GAK-Festbettadsorber selbst besitzt einen ähnlichen Aufbau wie ein üblicher Sandfilter, jedoch wird das Filterbett teilweise oder vollständig durch granuliert Aktivkohle ausgetauscht. Allgemein soll eine Schütthöhe von 0,8 – 2 m und eine Kontaktzeit von 10 – 30 Minuten gewährleistet sein (Bathen, 2001). Bautechnisch kann dieser als offener konventioneller Festbettfilter, in der Regel aus Beton, oder alternativ als Druckkessel aus Edelstahl, sowohl im Aufstrom-, als auch im Abstrombetrieb ausgeführt werden (Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW, 2016).

Die technische Darstellung eines Aktivkohledruckfilters ist in der folgenden Abbildung 5-15 zu finden.

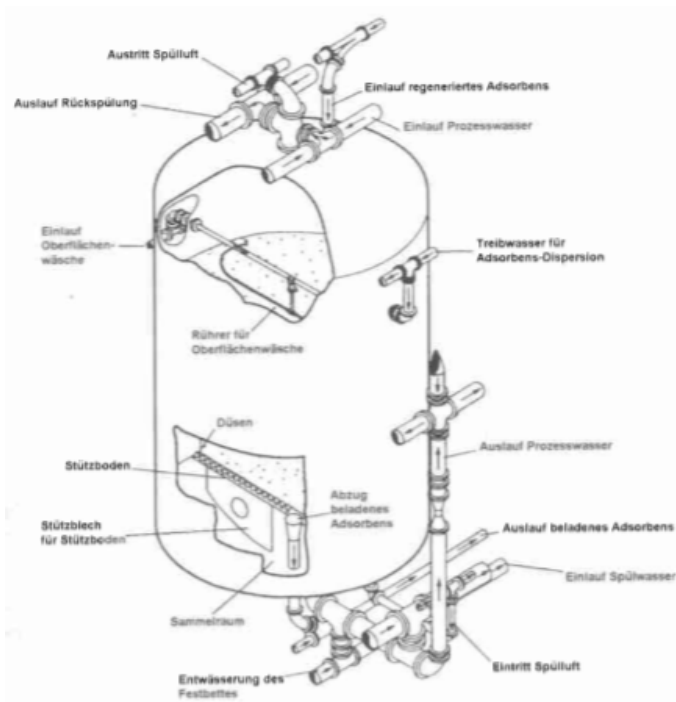


Abbildung 5-15: Geschlossener einstufiger Aktivkohledruckfilter (Bathen, 2001)

Bei der Planung von mehreren Filtern kann zusätzlich eine Parallel- oder Reihenschaltung in Betracht gezogen werden. Gemäß Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW sollten die Filterbetten, ähnlich wie in der Trinkwasseraufbereitung, eine Filterbettgeschwindigkeit von 5 bis 15 m/h aufweisen. Beim limitierten Betrieb von GAK-Filtern als Primärreinigung, die somit zusätzlich suspendierende Stoffe zurückhalten sollen, haben sich Filtrationsgeschwindigkeiten von 2 bis 8 m/h durchgesetzt. Die Leistungsfähigkeit eines GAK-Filters wird mit der Korngrößenverteilung und dem Bettvolumen ausgedrückt, welches das Volumen an Abwasser im Verhältnis zum Volumen an GAK beschreibt. Ferner wirkt sich die Leerrohrkontaktzeit auf das Reinigungsverhalten aus. Sie wird mit EBCT abgekürzt und beschreibt die porenunabhängige rechnerische Aufenthaltszeit eines Wasserteilchens (Arge, 2012). Wird im Ablauf des Filters die vorgegebene Durchbruchkonzentration gemessen, muss die erschöpfte GAK ausgetauscht oder reaktiviert werden, um das Eliminationsziel aufrecht zu erhalten. Im Regelfall wird der GAK-Filter in festen Intervallen oder beim Erreichen des zulässigen Filterwiderstands rückgespült um drohenden Verstopfungen aufgrund von Ablagerungen abfiltrierbarer Stoffe entgegen zu wirken – die Leistungsfähigkeit des Filters steigt abermals. Üblich sind Rückspüldauern von 10 – 15 Minuten mit scheinbaren aktivkohledichteabhängigen Wassergeschwindigkeiten von 25 – 35 m/s (Bathen, 2001).

Zur Auswahl stehen ausschließliche Wasserspülungen oder diese in Kombination mit Luft, welche zwischen den Körnern größere Scherkräfte aktivierten und somit bessere Bettreinigungsleistungen aufweisen können. Jedoch sollte in diesem Zusammenhang auf den größeren Abrieb der Aktivkohle hingewiesen werden. Um eine vollständige Säuberung der Aktivkohle gegebenenfalls zuzüglich des Filterbetts zu gewährleisten, muss ein ausreichender Rückspülraum als eine Art Freiboard in die Dimensionierungsplanung einbezogen werden.

Laut Ingenieurbüro Rummler und Hartmann sollte die Anwendung von PAK der GAK vorgezogen werden. Folgend sollen die Vorteile und Nachteile von PAK im Reaktorbecken gegenüber der GAK im Festbett aufgeführt werden (Tabelle 5-2).

Tabelle 5-2: Vor- und Nachteile von PAK

Vorteile	Nachteile
Deutlich geringere Kohlemenge bei vergleichbarer Reduktion der Spurenstoffe	Regeneration der PAK derzeit nicht möglich. Verfahren noch in der Testphase
Schnellere Adsorptionskinetik	Nachgeschaltete Behandlungsstufe zur Entfernung der PAK erforderlich
Dosiermenge variierbar	Bei einstufiger Anwendung: Schlechte Auslastung der Adsorptionskapazität
Bei mehrstufiger Anwendung: Gute Auslastung der Adsorptionskapazität	Keine weitere Reinigungswirkung durch biologischen Abbau im Filterbett
Förderliche Wirkung der Überschussskohle hinsichtlich der Schlammbehandlung und Schlammmentwässerung	Kein Recycling und somit keine Wiederverwertung der PAK nach dem derzeitigen Stand möglich
Verringerung des Schlammvolumenindex (ISV)	
Keine Kolmation	
Keine sinkende Reinigungswirkung	
Keine weitere Reinigungswirkung durch biologischen Abbau im Filterbett (keine Metabolitenbildung)	



## 5.5 Grundlagen der chemischen Oxidation mit Ozon

Eine weitere Behandlungsmöglichkeit von Wasser ist die chemische Oxidation. Stoffe, die in der biologischen Aufbereitung noch nicht eliminiert werden konnten, sollen hier mit Hilfe von Oxidationsmitteln umgewandelt werden. Unter Oxidation allgemein versteht man den Entzug von Elektronen aus einzelnen Teilchen wie Atomen, Ionen oder Molekülen (Hydroingenieure, 2012). Das Ozon ( $O_3$ ) ist ein sehr starkes Oxidationsmittel, welches schon langjährig für die Elimination von organischen Stoffen in der Trinkwasseraufbereitung sowie bei der Behandlung von industriellen und kommunalen Abwässern eingesetzt wird. In der Trinkwasseraufbereitung trägt sie den Nutzen im Hinblick auf Entfärbung, Desinfektion und zur Beseitigung von Geruchs- und Geschmacksstoffen. Ergänzend zur Desinfektion ist jedoch darauf hinzuweisen, dass trotz der Abtötung beziehungsweise Inaktivierung von Bakterien und Viren die immense Anfälligkeit zur Wiederverkeimung besteht. Daher sollte der Ozonung zu Desinfektionszwecken in der Trinkwasseraufbereitung eine Chlorung als letzte Reinigungsstufen nachgeschaltet werden (Maier, 1993).

Ozon hat eine hohe Reaktivität und damit einhergehend eine kurze Lebensdauer. Es ist nicht transportfähig und muss somit am Einsatzort erzeugt werden. Primär die Herstellung des Ozons ist im Vergleich zu den Adsorptionsverfahren sehr energieintensiv und macht sich somit durch erhöhte Energiekosten der Kläranlage bemerkbar. Zusätzlich trägt auch der Energieaufwand für den Ein- und Austrag sowie für die Restozonvernichtung einen Beitrag zu kalkulatorischen Mehrkosten (MULNVNRW, o. J.).

Die Löslichkeit und Stabilität von Ozon im Wasser hängt hauptsächlich von vier Faktoren ab (Spurenstoffe 2015):

1. Ozon-Partialdruck
2. Wassertemperatur (höherer Löslichkeit bei niedriger Temperatur)
3. pH-Wert (höhere Stabilität bei niedrigem pH-Wert)
4. Gehalt organischer Verbindungen (höhere Stabilität bei geringer Konzentration)

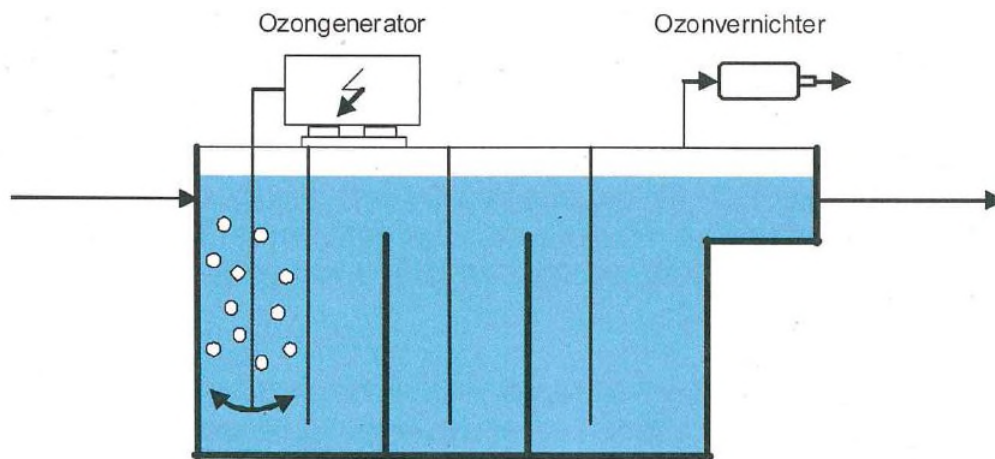


Abbildung 5-16: Skizze Verfahren der Ozonung (Spurenstoffe 2015)

Die Komponenten, welche für das Ozonungsverfahren benötigt werden, sind in Abbildung 5-16 anhand einer Anlage mit Kerzenbegasung dargestellt. Es sei darauf hingewiesen, dass alternativ Eintragsvorrichtungen mit Druckkammern, Injektoren, Mischern oder anderen gewählt werden können (Maier, 1993). Bei der Ozonerzeugung wird der Ozon über die stille elektrische Entladung aus  $O_2$ -Molekülen gereinigter Luft oder reinem Sauerstoff direkt vor Ort erzeugt, wie in Abbildung 5-17 zu sehen.

Ein alternativer Grundstein zur Erzeugung des Ozons ist eine Pressure-Swing-Adsorption-Anlage (Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW, 2016). Zur Ausführung des Reaktionsraums sind kaskadierte Beckenvolumen, Schlaufenreaktoren mit Leitwänden oder Rohrreaktoren typische Bauweisen. Es ist jedoch bei jeder Ausführungsform zu beachten, dass ozonbeständige Materialien für das Reaktionsbecken selbst, sowie für Dichtungen und sonstige Werkstoffe die mit Ozon in Berührung kommen, verbaut werden, da sich Oxidationsmittel wie Ozon negativ auf das Korrosionsgeschehen auswirken. Sofern die Oberflächen der Anlagenteile keine ozonresistenten Beschichtungen aufweisen, sind Werkstoffe wie nichtrostende Stähle, Aluminium, Kunststoffe, Keramik, Glas oder Beton zu wählen (Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW, 2016; Maier, 1993). Zusätzlich sind Kühleinrichtungen zu verbauen, um die Abführung der bei der Ozonerzeugung entstehende Wärme zu gewährleisten. Das Lösen von Ozon in Wasser ist ein Absorptionsvorgang, dessen Eintrag sich aufgrund geringer Löslichkeit und Ozonausbeute schwierig gestaltet.

Der zeitliche Ablauf kann sich in die drei folgenden Teilschritte gliedern (Maier, 1993):

1. Transport der Gasteilchen an die Grenzfläche zwischen Gas und Flüssigkeit
2. Durchbrechen der Grenzschicht und
3. Transport der Gasteilchen in das Flüssigkeitsinnere

Physiologisch wirken geringe Ozongaskonzentrationen in der Luft reizend und kreislaufstörend, bei Konzentrationen ab  $20 \text{ mg/m}^3$  sind Folgen von Bewusstlosigkeit und Lungenblutungen bis hin zum Tod zu verzeichnen. Dies macht ein Unschädlichkeitsverfahren des nach der Oxidation ozonhaltigen Abgases über Ozon-Entfernungsanlagen unerlässlich. Die gebräuchlichsten Methoden wirken thermisch, katalytisch oder adsorptiv mit Hilfe von Aktivkohlefiltern (Maier, 1993). Die Ozondosierung selbst sollte primär aus kostenminimierenden Faktoren bedarfsgerecht gesteuert werden und effizient ablaufen. Die Kosten der Ozon-Absorption im Wasser hängen laut Maier ab von:

1. der Ozonkonzentration in der angebotenen Gasphase,
2. der Gas-Geschwindigkeit,
3. der Größe der Austauschfläche für Gas und Wasser,
4. der Wassergeschwindigkeit,
5. dem Volumen-Verhältnis von Wasser zu Gas,
6. den Wasserinhaltsstoffen,
7. der Differenz zwischen der möglichen Sättigungskonzentration und der tatsächlichen Konzentration des Ozons im Wasser,
8. der Gas- und Wassertemperatur,
9. der Anzahl der theoretischen Böden des Eintragsapparates.

Laut Empfehlungen des Kompetenzzentrums Mikroschadstoffe.NRW kann die Steuerung in Abhängigkeit von der DOC-Konzentration im Zulauf der Verfahrensstufe gewählt werden. Dies setzt jedoch eine stabile Nitrifikation in der biologischen Reinigungsstufe voraus, da ansonsten ein unergiebig großer Anteil des Ozons zur Oxidation von Nitrit zu Nitrat aufgebraucht wird. Das MULNV NRW zeigt zusätzlich die Dosiermengenabhängigkeit in Bezug auf die Rest-Nitrit-Konzentration auf und benennt alternativ die Konzentrationsmessungen des Restozons im Ablauf des Reaktors oder die durchflussproportionale Dosierung als Grundlage der Steuereinheit.

Ferner gibt das Ministerium Ansätze zur Optimierung von Ozonungsanlagen an, von denen ein Teil im Anschluss genannt werden sollen:

1. Minimierung der DOC- und Nitritkonzentrationen im Ablauf des Reaktors
2. Ozondosierung in Abhängigkeit von Qualität und Quantität des Abwassers
3. Wahl des energetisch optimierten Ozongenerators
4. Kühlung des Ozongenerators mit Abwasser anstatt gesondertem Kühlaggregat
5. Wirkungsgraderhöhung bei der Ozonerzeugung aus Reinsauerstoff durch Zugabe von geringen Mengen Stickstoff zum Rohgas
6. Und andere

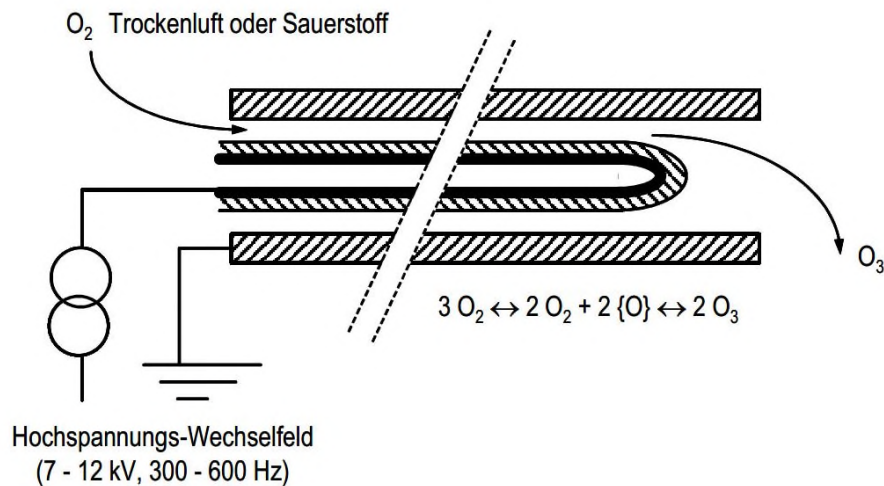


Abbildung 5-17: Schematische Darstellung Ozonerzeugungsanlage (Gujer 2007)

Durch den Ozonungsprozess können biologisch abbaubare Produkte entstehen, sogenannte Transformationsprodukte der zu eliminierenden Mikroschadstoffe. Das Verhalten dieser Produkte im Wasserkreislauf und deren Toxizität ist bisher weitgehend unbekannt (Spurenstoffe, 2015). Bromhaltiges Wasser beispielsweise kann durch die Ozonung zu Bromat aufoxidiert werden, das als persistent und potentiell kanzerogen gilt. Es kann nur unter anaeroben Bedingungen biologisch reduziert werden und stellt einen limitierenden Faktor in Form eines Schwellenwertes dar (Kompetenzzentrum Mikroschadstoff.NRW).

## 5.6 Anmerkung zu Oxidations- und Adsorptionsverfahren

Bei Lösungen mit Pulveraktivkohle sollte eine Nachbehandlung in einem Filter erfolgen, um Ausspülungen der mit Mikroschadstoffen beladenen Aktivkohle zu verhindern. Bei der granulierten Aktivkohle sollte eine Vorbehandlung installiert werden, um einer vorzeitigen Verschlammung der Kohle vorzubeugen. In jedem Fall besteht in der Fachwelt die einheitliche Auffassung, dass das Abwasser nach dem Ozonkontakt aufgrund von Transformationsprodukten nicht ohne Nachbehandlung in das Gewässer eingeleitet werden soll.

Bei der Ozonung und Pulveraktivkohle lassen sich Belastungsschwankungen mit einer jeweiligen Dosierungsanpassung entgegenreten. Pulveraktivkohle ist flexibel einsetzbar und bietet in der Regel eine hohe Kontaktzeit, wenn sie in die Biologie dosiert wird. Der Einsatz von granulierter Aktivkohle scheint besonders bei geringem Feststoffgehalt im Ablauf praktikabel. Wenn die Aktivkohle voll beladen ist, muss sie ausgetauscht werden. Aufwändig bei diesem Verfahren ist hier die notwendige Regenerierung der Aktivkohle.

Die Oxidations- und Adsorptionsverfahren weisen eine hohe Effektivität zur Eliminierung von Spurenstoffen (teils über 90 %) auf. Einige Spurenstoffe (Röntgenkontrastmittel, Perfluorierte Tenside, EDTA) können hingegen kaum eliminiert werden (Spurenstoffe 2015).

Zur Optimierung des Verfahrensablaufs sollte gerade im Hinblick auf die Nachbehandlung der PAK jedoch gegebenenfalls auch auf die Vorbehandlung der GAK zusätzlich Fällungs- und Flockungshilfsmittel dosiert werden. Fällungen beschreiben ein chemisches Verfahren um im Wasser gelöste Verbindungen in ungelöste Flocken zu wandeln. Treten diese Substanzen folglich suspensiv auf, können sie mithilfe von physikalischen Verfahren wie Sedimentation, Flotation oder Filtration aus dem Wasser entfernt werden. Bekannt ist dieser Trennungsansatz bei der chemischen Phosphorelimination. Üblich sind Fällmittel bestehend aus Aluminium- oder Eisensalzen. Zusätzlich werden Flockungshilfsmittel dosiert, bestehend aus Polymeren, die zum einen den Sedimentationsbeziehungsweise Flotationsprozess beschleunigen und zum anderen zu besseren Entwässerungs- und Eindickungsvermögen führen.

## **5.7 Erforderliche Vor- und Nachbehandlung**

### **5.7.1 Vorbehandlung bei Granulierter Aktivkohle**

Da einem GAK-Filterbett keine Behandlung nachgeschaltet werden muss, soll im folgenden Abschnitt auf die Vorbehandlungsmöglichkeiten eingegangen werden. Vielfach wird von den großtechnischen Anlagen berichtet, dass die Standzeit der GAK infolge der Verschlammung durch partikuläre Stoffe bei zum Teil nur zwei bis drei Monaten liegen (Firk, 2013). Aus diesem Grund wird es als notwendig erachtet, den GAK-Festbett-Adsorbern einen Filter vorzuschalten.

Der Vorbehandlungsfilter der GAK-Anlage schließt sich direkt der biologischen Reinigungsstufe an. Nachdem das geklärte Wasser im Nachklärbecken von dem belebten Schlamm getrennt wurde, fließt es der Vorbehandlung der GAK-Stufe zu. Dieses Filterbecken, in der Regel als Flockenfilter ausgebautes Becken, ist zuständig für die Abscheidung von Suspensafrachten, die entweder das Nachklärbecken passiert haben, oder aufgrund von Fällungen aus der flüssigen Phase separiert wurden. Das partikelbehaftete Wasser fließt durch die Poren des Sandfilters, wobei Feststoffe zwischen den Sandkörnern zurückgehalten werden. Infolgedessen wird die Partikelbelastung der folgenden GAK-Stufe auf ein Minimum reduziert. Üblicherweise wird diese Vorstufe als Sandfilter ausgebaut.

Eine Alternative bei beispielsweise begrenzten Platzverhältnissen zeigt der Fuzzy Filter als Vorstufe des GAK-Festbett-Adsorbers auf. Ideale Voraussetzungen ohne Suspensa benennt das Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW mit der Vorschaltung eines Membranbioreaktors.

### **5.7.2 Nachbehandlung bei Pulveraktivkohle**

Die PAK wird in das Abwasser gegeben und kann auch nach einem Sedimentationsbecken noch zu Teilen im Abwasser enthalten sein. Bei den PAK-Verfahren, bei dem die Aktivkohle im gesamten System der Kläranlage oder auch nur innerhalb einer eigenen Adsorptionsstufe zirkuliert, ist eine Filtration unabdingbar, um das Abtreiben der Aktivkohle zu unterbinden. Die Aktivkohle selbst ist vermutlich für das Ökosystem nicht gefährlich, gehört dennoch nicht in das Gewässer und die Natur, zumal sie mit Mikroschadstoffen beladen ist.

Die Separation der Aktivkohle von der flüssigen Phase erfolgt mit den physikalischen Verfahren der Sedimentation und der Filtration. Wie zuvor erwähnt ist die Anordnung eines Sedimentationsbeckens nur als Zwischenstufe zur Abscheidung der grobkörnigen Fraktion der Aktivkohle anzusehen. Eine Filterstufe ist zur Abscheidung von PAK unerlässlich. Allgemein ist die Unterscheidung von Tiefen- und Flächenfilter zu erwähnen. Sie unterscheiden sich durch die Art des Partikelrückhalts. Während bei der Tiefenfiltration, wie beispielsweise Flockungsfiltern, kontinuierlich gespülten Filtern oder kompressibel synthetischen Kollektoren wie dem Fuzzy Filter die Feststoffe in den Zwischenräumen der Filtermaterialien zurückgehalten werden, dringen sie bei der Flächenfiltration wie Tuchfiltern, Membranfiltern oder dem Mikrosieben nicht in die Filterhohlräume ein (Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW).

Zur Abscheidung der gelösten Verbindungen werden beim Verfahren der Sedimentation, der Flockungsfiltration und den kompressiblen synthetischen Kollektoren Fällmittel in Form von Eisen oder Aluminium und gegebenenfalls Flockungshilfsmittel dosiert. Diese Dosiermenge kann, falls vorhanden, mit der Fällmittelmenge der Phosphorelimination abgeglichen werden.

Zur Auslegung der Filtration bei PAK wird hier auf die Ergebnisse des Pilotprojektes „Fuzzy Filtration Kläranlage Barntrup“ zurückgegriffen. Als Anforderung für den Kohlerückhalt wurde im ersten Ansatz nach den Erfahrungen von Baden-Württemberg im Ablauf der Kläranlage ein **AFS-Gehalt (einschl. PAK) von unter 1 mg/l** festgelegt. Die Bestimmung von AFS-Gehalten < 5 mg/l nach DIN 38409 Teil 2 ist normalerweise auf Grund der Bestimmungsmethodik nur bedingt geeignet. Bei erwarteten AFS-Gehalten von kleiner 2 mg/l sind demnach 10 l Probevolumen zu filtrieren. Hilfsweise wurde deshalb für AFS-Werte unter 2 mg/l die Schwarzgradbestimmung angewendet. Ein Beispiel einer Schwarzgradbestimmung mit Wiegung lässt sich in Abbildung 5-18 erkennen.

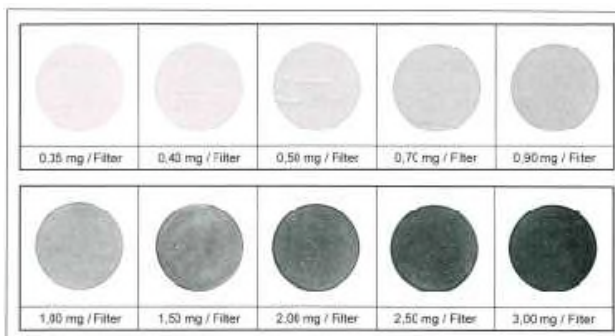


Abbildung 5-18: Schwarzgrad verschiedener PAK-Einwaagen (Metzger, 2010)

Für den kontinuierlichen Betrieb waren diese Bestimmungsmethoden jedoch nicht praktikabel, weshalb mittels Trübungsmessung in der Einheit FNU die Kontrolle des Ablaufs erfolgte. Eine Korrelation von AFS zu FNU konnte damals vom Labor jedoch nicht hergestellt werden.

Als Zielwert für die Trübung wurde 1 FNU angenommen. Der Bezug erfolgte hierbei zum DVGW Arbeitsblatt W 213-6 (Juni 2005). Nach Abbildung 5-19 steigt bei Roh- und Reinwässern über einem Wert von 0,1 FNU die Partikelkonzentration exponentiell an. Die Größe der erfassten Partikel betrug hierbei  $\geq 2 \mu\text{m}$  – zum Vergleich liegt die Partikelgröße von Pulveraktivkohle ebenfalls bei 2 bis 200  $\mu\text{m}$ .

Im Hinblick an die Anforderungen für das sensible Gewässer wurde für den **Ablauf der Kläranlage der Wert von 1 FNU** definiert, der mittels Filtration auch sicher eingehalten werden kann. Zum Vergleich liegt die Trübung von Trinkwasser im Wasserwerk bei 0,05 – 0,5, von Trinkwasser im Haushalt bei 1 bis 5 und bei unbehandeltem Abwasser von 100 bis 2.000.

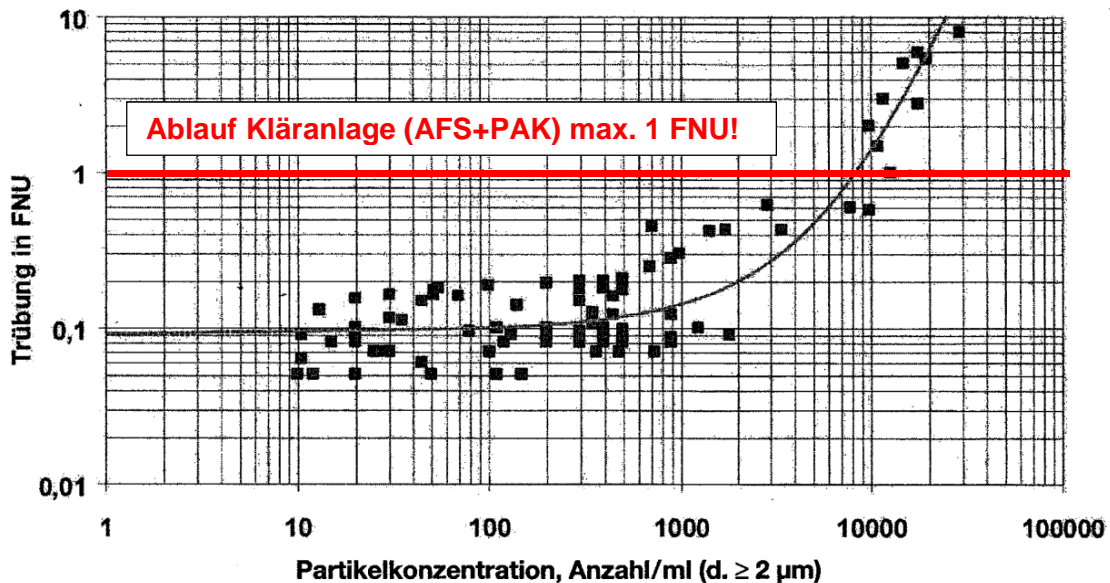


Abbildung 5-19: Vergleich von Trübungswerten mit Partikelkonzentrationen für verschiedene Roh- und Reinwässer (DVGW-Arbeitsblatt W 213-6), ergänzt durch Danjes

Neben der optischen Anforderung zur Vermeidung von getrübbtem oder schwarzem Ablaufwasser nach der Adsorptionsstufe ist auch der Einfluss der Kohle auf den CSB zu erörtern. Bei den bisherigen Untersuchungen wurde der CSB im Ablauf der Adsorptionsstufe als filtrierter Anteil  $S_{\text{CSB}}$  bestimmt.



Tatsächlich liegt der CSB durch den Anteil der Kohle wesentlich höher. Beispielsweise würde eine Dosierung von 12 mg/l PAK (1 mmol/l) bei kompletter Oxidation einen CSB von 36 mg/l bewirken. Insofern man den sonstigen AFS mit dem Wert 0 ansetzt, würde die PAK bei einem Ablauf von 1 mg/l AFS noch einen CSB von 3 mg/l bewirken (der gelöste CSB wäre hier zuzurechnen). Für das Ziel der **Abgabefreiheit des Parameters CSB** bei Unterschreitung des Schwellenwertes nach Abwasserabgabegesetz sollten deshalb AFS und Trübung unterhalb der hier vorgeschlagenen Werte liegen.

Auch im Hinblick auf den Eliminationserfolg bei den Mikroschadstoffen ist der PAK-Abtrieb aus der Adsorptionsstufe zu begrenzen. Die Erfahrungen zeigen, dass bei einer bestimmten PAK-Dosierrate die **Elimination der Summe der Indikatorsubstanzen von über 80%** erreicht werden kann. Entweichen aber aus der Adsorptionsstufe mehr als 1 mg/l AFS - und würden diese nur aus mit Mikroschadstoffen beladener PAK bestehen - so wäre die tatsächliche Eliminationsrate bei der Beispieldosierung von 12 mg/l PAK nur etwa 73%. In der Realität ist neben der PAK zwar auch AFS aus der biologischen Stufe im Ablauf enthalten, dennoch mindert der Abtrieb der beladenen PAK den Gesamtnutzen für das Gewässer deutlich.

Die Forderungen nach einem niedrigen AFS- bzw. NTU-Wert sind auch von Bedeutung für eine künftige Stufe zur **Entkeimung mittels UV-Bestrahlung**. Ein wesentlicher Faktor für die Investitions- und Betriebskosten ist die UV-Transmission des Abwassers. Bei hohen CSB-Gehalten und abfiltrierbaren Stoffen mit Pulveraktivkohle ist die üblicherweise erwartete UV-Transmission von 65% pro 1 cm im Abwasser nicht zu erzielen. Die Auslegung der Filteranlage auf die hier vorgeschlagenen Werte ist unabdingbar für eine effiziente Deaktivierung von Keimen im Abwasser.

Für die somit notwendige Filtration des Abwassers gibt es verschiedene Verfahren. Auf großen Kläranlagen (Größenklasse 5) ist die Sandfiltration eine gängige Variante. Nachteilig sind der Bedarf an großen Filterflächen, hohe Kosten sowie die Schwierigkeit der Filterreinigung. Eine weitere Option ist die Tuchfiltration. Nachteilig sind hier die Kosten der Auswechslung bei Standzeiten von 12 bis 24 Monaten, die relativ hohe Rückspülwassermenge und die geringe Filterleistung bei kleinsten Partikeln (Hosang 1998).

Als Alternative kann ein Fuzzy Filter für die Separation der PAK und für die Vorfiltration hinsichtlich der Verschlämzung von GAK verwendet werden. Der Fuzzy Filter zeichnet sich durch sehr hohe Filtergeschwindigkeiten und damit eine platzsparende Bauweise aus. Weitere Vorteile sind seine Wirtschaftlichkeit sowie seine Leistungsstärke. Aufgrund positiver Erfahrungen, guter Vergleichbarkeit zu einem umfangreichen Pilotprojekt und den genannten Vorteilen werden die Varianten unter Einbezug von Fuzzy Filtern betrachtet.

### **5.7.3 Nachbehandlung bei Ozon**

Bei Oxidationsverfahren ist nach Spurenstoffen (2015) die Bildung von Transformationsprodukten zu bewerten und nach den bisherigen Erkenntnissen eine biologische Nachreinigung des behandelten Abwassers vorzunehmen, beispielsweise in Form einer biologisch aktivierten Raumfiltration, bevor es in das Gewässer eingeleitet werden kann.

Eine gute technische Kombination ist die Nachschaltung einer GAK-Stufe, entweder kostengünstig unter Nutzung vorhandener Kammern einer Flockungsfiltration oder mit höheren Investitionen als neue Stufe mit Druckkessel-Adsorbern.

Weitere Lösungen für die Nachbehandlung können eine Nachnitrifikation mit Filtration, ein Wirbelbettreaktor, eine optionale Nachfällung mit Sandfiltration, verschiedene Biofilter oder ein Schönungsteich sein. Nachteilig bei den Filtrationsverfahren sind deren technische Komplexität und die hohen Kosten. In der Schweiz wird der Ozonung in der Regel eine Sandfiltration nachgeschaltet.

## **5.8 Kriterien zur Verfahrenswahl**

Da wie vor beschrieben, die Vorteile der PAK gegenüber der GAK überwiegen, sollen im Folgenden die Vor- und Nachteile der PAK gegenüber der Ozonung nach Rummler + Hartmann aufgezeigt werden (Tabelle 5-3).

Tabelle 5-3: Vor- und Nachteile von Ozonierung und PAK-Adsorption

Reinigungsstufe	Vorteile	Nachteile
<b>Ozonierung</b>	Meist niedrige Investitionen	Metabolitenbildung
	Meist geringe Betriebskosten	Höhere Energiekosten
	Reduzierung des Überschuss-schlamm	Kaum CSB-Reduktion
	Verringerung des Schlammvo-lumenindex	Kaum DOC-Reduktion
	Steigerung der Gasproduktion bei anaerober Schlammstabilisierung	
<b>PAK-Adsorption</b>	Keine Metabolitenbildung	Meist höhere Investitionen
	Niedrigere Energiekosten	Meist höhere Betriebskosten
	Förderliche Wirkung der Über-schusskohle hinsichtlich der Schlammbehandlung und Schlammwässerung	Zu hoher DOC führt zur Ver-minderten Adsorption von Spu-renstoffen => mehr Kohle wird benötigt
	Prinzipiell positive Wirkung auf den Heizwert des Klär-schlamm	Keine landwirtschaftliche Nut-zung des ÜSS mehr möglich
	Verringerung des Schlammvo-lumenindex	
	Zusätzliche AFS-Reduktion	
	Zusätzliche CSB-Reduktion	
	Zusätzliche DOC-Reduktion	
	Zusätzliche P <sub>ges</sub> -Reduktion	
	Einfache Betriebsweise	

Bei der Wahl des technisch, betrieblich und wirtschaftlich optimalsten Verfahrens sollten mindestens die Ozonung, Pulveraktivkohle und granuliert Aktivkohle unter Einbezug verschiedener Kriterien in Betracht gezogen werden.

Die wichtigsten Kriterien sind folgend aufgelistet (Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW, 2016):

1. Eliminationsgrade der Verfahren hinsichtlich relevanter Mikroschadstoffe
2. Vorhandene nutzbare Verfahrens- und Bautechnik, wie z.B. Filtrationsanlage oder freie Beckenkapazität
3. Platzbedarf und Flächenverfügbarkeit
4. Bromatbildungspotential des Abwassers bei Ozonung
5. Klärschlamm Entsorgungswege
6. Verbesserung der Reinigungsleistung der Kläranlage

7. Ganzheitliche energetische Betrachtung
8. Zusätzlicher Bedarf an Personal

Kostentechnisch liegen laut Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW nach der Auswertung von realisierten Anlagen in Nordrhein-Westfalen, Süddeutschland und der Schweiz sowie Kostenschätzungen von Machbarkeitsstudien die Behandlungskosten der drei Reinigungsverfahren in ähnlichen Bereichen. Grundsätzlich ist zu erwähnen, dass mit wachsenden Kläranlagengrößen die spezifischen Kosten der Mikroschadstoffelimination sinken.

## 5.9 Mögliche Verfahrenskombinationen

Verfahrenskombinationen sind in Reihe geschaltete Abläufe, die sowohl über eine adsorptive als auch über eine oxidative Stufe verfügt. Dies kann sinnvoll sein, wenn wirtschaftliche Vorgehensweisen nach dem Stand der Technik mit exorbitanten Reinigungsleistungsansprüchen an die Mikroschadstoffelimination gestellt werden. Zusätzlich kann die Verfahrenskombination laut Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW in der Lage sein, die Betriebskosten der Kläranlage senken (aktuelle Forschung auf den Kläranlagen Detmold und Paderborn). Zwar weisen Ozon-Reaktionsprodukte teilweise verschlechterte Adsorptionseigenschaften auf, jedoch können zum einen persistente, der Ozonung nicht zugängliche Stoffe im Nachhinein durch die Aktivkohle adsorbiert werden und zum anderen wird Aktivkohle als ein ideales Besiedlungsmedium angesehen, das den mikrobakteriellen Abbauprozess intensivieren und somit gezielt zum weiteren Schadstoffabbau genutzt werden kann (Maier, 1993). Als typische Verfahrenskombinationsmöglichkeiten gelten:

1. Ozon und GAK (BAK)
2. Ozon und PAK

## 5.10 Erwartete Synergieeffekte

Da Aktivkohle zur Adsorption und folgende Filter zur Separation von Mikrostoffen herangezogen werden ist es gut möglich, dass ferner zusätzliche im Wasserkreislauf ungewollte Kleinststoffe aus dem Abwasser entfernt werden. Auf diese wohlmöglichen Synergien soll im Folgenden eingegangen werden.

Es besteht noch keine einheitliche Begriffsdefinition zu Beschreibung von Mikroplastik. Das Umweltbundesamt hat jedoch laut Ecke 2016 eine Vorschlagsdefinition veröffentlicht:

„Als MP werden anthropogene, synthetisch hergestellte Polymerstoffe bezeichnet, die in die Umwelt gelangt sind, bzw. das Potenzial haben, in die Umwelt zu gelangen. MP-Partikel liegen in einem Größenbereich von 0,1 – 100 µm und können in allen Formen und Farben sowie mit verschiedenster Oberflächenbeschaffenheit und Porosität vorliegen. Es wird weiterhin zwischen primärem und sekundärem MP differenziert: Primäres MP wird direkt als solches produziert. Sekundäres MP entsteht durch physikalische, chemische und/oder biologische Degradation und Fragmentierung. Analog zur MSRL werden Kunststoffe in der Umwelt wie folgt in drei Größenklassen charakterisiert:

Makroplastik	→ > 5 mm
Mesoplastikpartikel	→ 0,1 - 5 mm
Mikroplastik	→ 0,1 - 100 µm

Die feinen Plastikpartikel kommen zum einen als primäre Quelle beispielsweise in Form von Wasch-, Pflege- oder Reinigungsmitteln über den Indirekteinleiter am Zulauf der Kläranlage an, zum anderen aus Sektoren wie der Straßenentwässerung infolge Reifenabriebs oder der Einleitung von Waschwasser nach der Reinigung synthetischer Textilien. Dort passieren sie konventionelle Kläranlagen, ohne eliminiert zu werden und belasten nachfolgende Gewässer.

Die tatsächlichen Auswirkungen auf die Umwelt sind derzeit marginal erforscht – festzustellen ist jedoch, dass Mikroplastik global in Gewässern sowie aquatischen Lebewesen nachzuweisen ist und in diesen akkumulieren kann. Ecke (2018) beschreibt Folgen des Plastikeintrags in Gewässer und der anschließenden Nahrungsaufnahme primär von Wasserflöhen, Muscheln und Würmern. Zu den gravierendsten Folgeerscheinungen zählen wohl die aus dem MP-Verzehr resultierenden Schäden an Kiemen und am Magen-Darm-Trakt sowie Gewebeveränderungen.

Zusätzlich kann es aufgrund des MPs zu einer Scheinsättigung kommen, die Unterwasserlebewesen mit gefülltem Magen den Hungertod sterben lassen. Ferner weist Ecke auf das gute Sorptionsvermögen von Wasserschadstoffen wie beispielsweise Metallen, Additiven und persistenten organischen Schadstoffen hin. Diese reichern sich zunächst auf der Oberfläche der Plastikpartikel an und akkumulieren anschließend über die Nahrungsaufnahme in den folgenden Organismen und Lebewesen. Teilweise können sie in wirksamer Menge Immunsysteme, Nervensysteme, die Fruchtbarkeit sowie Hormonsysteme schädigen oder Impotenz und Krebs auslösen. Aus diesem Grund könnte die Elimination von MP aus dem Abwasser als eine Art doppelte Reinigungsstufe angesehen werden – eine Elimination von Wasserschadstoffen und die des MPs selbst. Ferner ist im Hinblick auf das stetige Wachstum der Produktion von polymeren Rohstoffen grundlegend dringender Handlungsbedarf zu verzeichnen. Ergebnisse fachlich durchgeführter Studien sind abzuwarten.

Ähnlich verhält es sich mit Schwermetallen. Auch für diese besteht keine einheitliche Definition. Anzutreffen sind die anorganischen Spurenstoffe in den verschiedensten Lebensbereichen. Beispielsweise in Form von Blei in Trinkwasserleitungen, Cadmium in Kosmetika und Pflanzenschutzmitteln sowie als Abfallprodukt bei der Trinkwasseraufbereitung in Gestalt von Quecksilber (Chemielexikon, o. J.). Ein Teil der Schwermetalle wird in der biologischen Reinigungsstufe von der Biomasse adsorbiert und zuzüglich des Überschussschlammes entsorgt. Der verbleibende Anteil durchströmt die Kläranlage und belastet nachfolgende Gewässer. Als größte Produzenten von Schwermetallen gelten Industriezweige der Energiewirtschaft und Hüttenindustrie. Grundlegend sind zwei „Arten“ von Schwermetallen zu unterscheiden. Zum einen lebensnotwendige Spurenelemente wie Chrom, Eisen oder Mangan, die in geringen Dosen einen für den Menschen essenziellen Baustein darstellen. Zum anderen gesundheitsschädliche bis toxische Schwermetalle, die schlichtweg nicht abbaubar sind. Diese werden über die Nahrungskette aufgenommen und akkumulieren innerhalb von Lebewesen.

In diesem Zusammenhang soll auf die Synergie sowohl der PAK als auch der GAK hingewiesen werden, die mit Mikropartikeln beladen aus dem System entfernt werden. Somit könnten sich die Eliminationsprozesse mit Aktivkohle zusätzlich als ein Lösungsweg zur Beseitigung von Mikroplastik und Schwermetallen aus dem Abwasser herausstellen. Der Aktivkohlehersteller „Carbo Tech“ weist beispielsweise auf seiner Homepage in der Produktbeschreibung darauf hin, dass die Adsorption von Quecksilber zu den Anwendungsbereichen ihrer Pulveraktivkohle gehört.

## 6 Dimensionierung der Mikroschadstoffelimination

### 6.1 Auslegungswassermenge

Nach der „Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination“, Abbildung 2-2, ist im Mischsystem eine Teilstrombehandlung zulässig. Nach Abstimmung mit der Bezirksregierung Detmold bestehen auch keine immissionsbasierten Anforderungen, so dass hier die aufgezeigten Nachweise zu führen sind. Für den erwarteten Synergieeffekt der Phosphorelimination ist die hierfür erforderliche Verfahrensstufe jedoch auf Vollstrom auszulegen.

Für die Ermittlung der Auslegungswassermenge wurden die oben aufgeführten Datensätze der Kläranlage Haaren herangezogen. Der Nachweis für die Kläranlage Haaren wird nach den Empfehlungen der oben genannten Anleitung geführt.

#### 1. Teilstrombehandlung

Überprüfung der Auslegungswassermenge durch Ermittlung der Mittelwerte der letzten drei Jahre der zu behandelnden Wassermenge, der Jahresschmutzwassermenge und der Jahresabwassermenge, entsprechend nachfolgender Vorgehensweise:

1. Ermittlung des arithmetischen 3-Jahresmittels der  $Q_{T,h,max}$  aus den letzten 3 Jahren nach ATV-DVWK-A 198 (hier wegen besonderer Datengrundlage zwei Jahre 2016 und 2017; als 2-Stundenwerte für 2016 bzw. Tagesmittel für 2017, Tabelle 6-1)

Tabelle 6-1: arithmetisches 3-Jahresmittel der  $Q_{T,h,max}$  der letzten 3 Jahre

Wert	Jahr 2016 als $Q_{T,2h,max}$	Jahr 2017 als $Q_{T,h,mitt}$	arithmetisches 3-Jahresmittel $Q_{T,h,max,3-aM}$
Maximaler stündlicher Trockenwetterabfluss $Q_{T,h,max}$	16,1 l/s	(13,0 l/s)	<b>Gewählt: 25 l/s (bzw. 90 m³/h)</b>
Vergleich mit $Q_{d,aM}$	19,9 l/s	24,5 l/s	

Zur Sicherheit wurde zum Ausgleich der wenigen Daten und zur Umrechnung der 2-Stundenwerte auf stündliche Werte (i.d.R. 3% bis 5% Aufschlag) ein gesamter Aufschlag von 50% auf den Wert des Jahres 2016 gewählt (siehe auch Auswertung der Tendenzen). Zudem muss der Teilstrom größer als der mittlere Tagesabfluss  $Q_{d,aM}$  sein.

2. Ermittlung der mit diesem  $Q_{T,h,max,3-aM}$  behandelbaren Wassermenge ebenfalls als arithmetischer Mittelwert der letzten 3 Jahre  $Q_{behandelbar,3-aM}$  (hier wegen besonderer Datengrundlage zwei Jahre 2016 und 2017; als 2-Stundenwerte berechnet für 2016, mit Darstellung als Tageswerte; als Tagesmittelwerte berechnet und dargestellt für 2017; Abbildung 6-1, Abbildung 6-2).

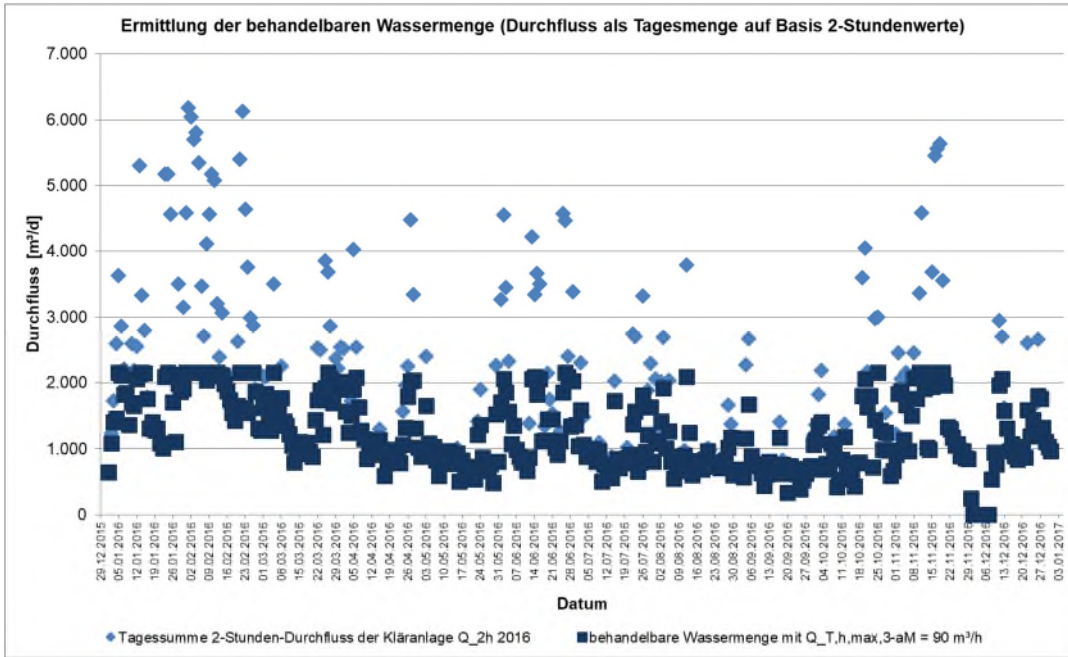


Abbildung 6-1: Ermittlung der behandelbaren Wassermenge für das Jahr 2016

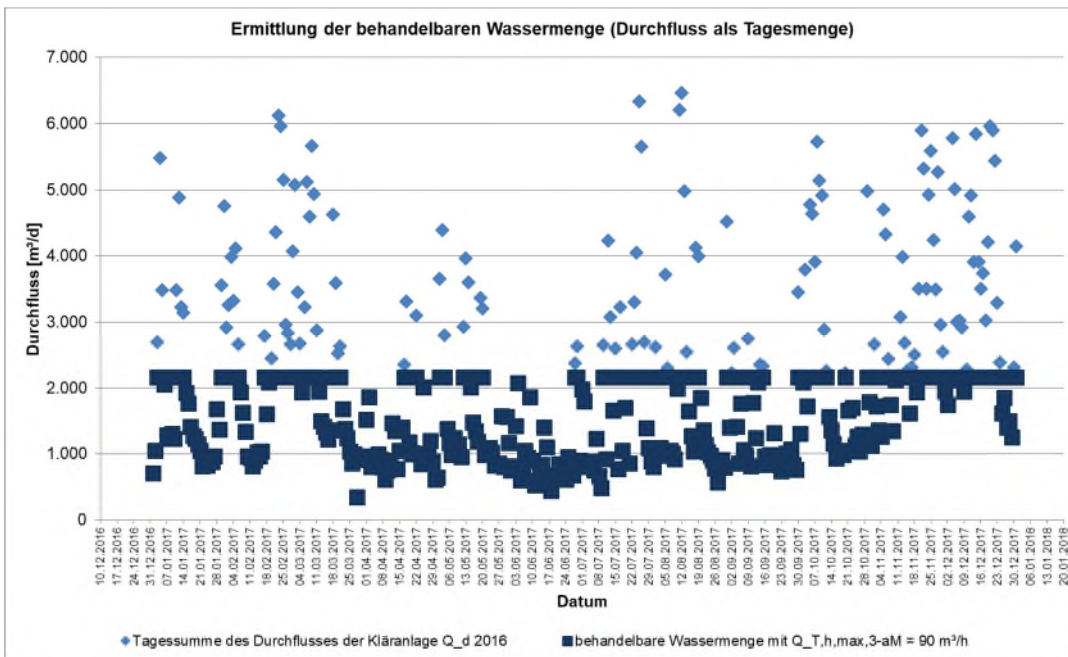


Abbildung 6-2: Ermittlung der behandelbaren Wassermenge für das Jahr 2017



3. Ermittlung der Jahresschmutzwassermenge als arithmetischer Mittelwert aus den letzten 3 Jahren ( $JSM_{3-aM}$ ) und

4. Ermittlung der Jahresabwassermenge als arithmetischer Mittelwert aus den letzten 3 Jahren ( $JAM_{3-aM}$ ), Tabelle 6-2, Daten aus Leistungsvergleich KA für 2015 und 2016 bzw. Sürder JSM für 2017

Tabelle 6-2: Jahresschmutz-/abwassermenge der letzten 3 Jahre

Jahr	Jahresschmutz- Wassermenge $JSM_{3-aM}$	Jahresabwasser- Menge $JAM_{3-aM}$	Anteil JSM / JAM
2015	327.907 m <sup>3</sup>	647.881 m <sup>3</sup>	50,6 %
2016	307.355 m <sup>3</sup>	617.250 m <sup>3</sup>	49,8 %
2017	409.980 m <sup>3</sup>	773.848 m <sup>3</sup>	53,0 %
<b>arithmetischer Mittelwert</b>	<b>348.414 m<sup>3</sup></b>	<b>679.660 m<sup>3</sup></b>	<b>51,1 %</b>

5. Nachweis des Anteils der behandelbaren Wassermenge am  $JSM_{3-aM} \geq 100\%$  und

6. des Anteils der behandelbaren Wassermenge am  $JAM_{3-aM} \geq 70\%$  (Tabelle 6-3)

Tabelle 6-3: Anteil der behandelbaren Wassermengen der letzten zwei Jahre

Jahr	$JSM_{3-aM}$	$JAM_{3-aM}$	behandel- bare Wasser- menge	Anteil behandelt an $JSM_{3-aM}$ $\geq 100\%$	Anteil behandelt an $JAM_{3-aM}$ $\geq 70\%$
	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>			
2016	307.355	617.250	451.064 m <sup>3</sup>	JA	73,1 %
2017	409.980	773.848	560.255 m <sup>3</sup>	JA	72,4 %
<b>Mittel</b>	<b>358.668</b>	<b>695.549</b>	<b>505.660 m<sup>3</sup></b>	<b>JA</b>	<b>72,7 %</b>

Nach erster Empfehlung ist die Auslegungswassermenge für Mischsysteme bei einer Teilstrombehandlung von 25 l/s bzw. 90 m<sup>3</sup>/h in erforderlicher Größe angesetzt! Das hier vorhandene Verhältnis von JSM/JAM liegt deutlich unterhalb der üblichen Verhältnisse, so dass nach Schaffung besserer Datengrundlage mit stündlichen Werten für die letzten drei Jahre gegebenenfalls die Teilstrommenge reduziert werden kann.

## 2. Vollstrombehandlung

In der Auslegungsempfehlung wird zudem empfohlen, zur Ermittlung der Auslegungswassermenge eine Betrachtung der Vollstrombehandlung durchzuführen. Die bisherige Diskussion der Auslegungswassermenge betrifft die Auslegung der angewandten Hauptverfahren zur Mikroschadstoffelimination. Zur Auslegung der Nachbehandlung, insbesondere für die PAK-Anwendungen, können andere Ansätze gelten. Wird z. B. eine PAK-Adsorptionsstufe für den Teilstrom geplant, wird als Nachbehandlungsverfahren eine Endfiltration für den Vollstrom als erforderlich erachtet. Grund dafür ist die Rezirkulation der beladenen PAK in die biologische Stufe, womit diese in den Vollstrom der Kläranlage überführt wird.

Nach der Statistik „Selbstüberwachung 2017 Haaren“ der Stadt Bad Wünnenberg wurde ein Abwasserabfluss von TW 39,70 l/s bzw. 142,92 m³/h und RW 99,3 l/s bzw. 357,48 m³/h angegeben. Auf Basis der vorliegenden Daten wurde der Mischwasserabfluss nach DWA-Arbeitsblatt A 198 neu ermittelt (siehe vor und Tabelle 6-4).

Tabelle 6-4: Berechnete Abwassermengen Ablauf Kläranlage nach A 198

Wert	Vergleich	Berechnung im Jahr		Mittelwert und Empfehlung
	Ausbaugröße	2016	2017	
Maximaler Trockenwetterabfluss (2-Stunden-Mittel bzw. Tagesmittel) $Q_{T,2h,max}$	39,70 l/s	39,2 l/s	38,1 l/s	Mittel 38,7 l/s
<b>Berechnung A 198</b> <b>Mischwasserabfluss</b> $Q_M$	<i>RW-Abfluss</i> 99,30 l/s	<b>62 l/s</b>	<b>69 l/s</b>	Mittel 65,5 l/s <b>Empfehlung</b> <b>75 l/s</b> <b>(bzw. 270 m³/h)</b>

Die hier aus wirtschaftlichen Gründen empfohlene Abwassermenge für die Vollstrombehandlung liegt über dem Maximalwert des maximalen 2-Stunden-Trockenwetterabflusses im Jahren 2016. Sie würde dazu führen, dass bei starken Niederschlägen in einem neu zu schaffenden Regenüberlaufbecken (RÜB) eine Pufferung stattfindet.

Für die Anordnung einer neuen Stufe zur Mikroschadstoffelimination bedeutet dies, ein **neues RÜB mit einem Volumen von 1.000 m³ herzurichten**, wobei auf vorhandene Bausubstanz zurückzugreifen wäre.

Die Differenz aus dem maximalen stündlichen Regenwetterabfluss (MaxMax) im Jahr 2016 mit 89,3 l/s bzw. dem Planwert aus der Ausbaugröße mit 99,3 l/s abzüglich 75 l/s könnte hier über einen Zeitraum von etwa 12 Stunden gepuffert werden. Dieses Puffer-  
volumen liegt höher als der mittlere tägliche Zufluss im Jahresmittel 2016. Die Entlee-  
rung des RÜB bei Vollfüllung innerhalb eines Tages würde eine Drosselabflussmenge  
von etwa 12 l/s erfordern.

Der hier empfohlene Wert für Vollstrombehandlung korrespondiert mit der Aufteilung des  
Mischwasserabflusses auf zwei Nachklärbecken mit NKB 1 (Bestand bei zulässiger Be-  
schickung) = 50 l/s+ NKB 2 (neu) = 25 l/s, Summe 75 l/s; Verhältnis 2/3 zu 1/3.

## 6.2 Verfahrenstechnische Auslegung

Die Anforderungen für die Entfernung von Mikroschadstoffen erfolgt nach der Ausle-  
gungsempfehlung des Kompetenzzentrums Mikroschadstoffe.NRW. Folgende Grund-  
sätze werden in der Planung angewandt (siehe auch Metzger 2010):

- Kontaktzeit der Aktivkohle (GAK, PAK) mit dem Abwasser: 15 bis 30 min
- Sedimentationsbecken PAK: Flächenbeschickung maximal  $q_A = 2 \text{ m/h}$  Aufent-  
haltszeit minimal 2 h
- Hohes Kohleschlammalter in der Adsorptionsstufe durch PAK-Kohleschlamm-  
kreislauf
- Mehrfachbeladung der PAK durch Rückführung der Überschussskohle in die bio-  
logische Stufe wünschenswert.

Ein sehr wichtiges Kriterium für den Erfolg der Elimination der Mikroschadstoffe erscheint  
dem Verfasser in dem Rückhalt der beladenen Aktivkohle zu liegen. Bei granulierter Ak-  
tivkohle ist bauartbedingt der Rückhalt in Druck- oder Schwerkraftfilter technisch gege-  
ben. Bei Pulveraktivkohle liegt die Kornverteilung erheblich niedriger als bei granulierter  
Aktivkohle, so dass ein effizienter Rückhalt technisch anspruchsvoll ist. Am Beispiel der  
Pulveraktivkohle der Firma Donau Carbon, „Carbopal AP“ G36 343 werden in Tabelle  
6-5 charakteristische physikalische Daten mit üblichen Werten eines belebten Schlam-  
mes verglichen (Kommunales Abwasser).

Tabelle 6-5: Charakteristische Daten von PAK im Vergleich zum Belebtschlamm

Charakterisierung		PAK	Belebtschlamm (Kommunales Abwasser)
Dichte	wahre Dichte (Materialdichte)	ca. 2.000 kg/m <sup>3</sup>	ca. 1.010 kg/m <sup>3</sup>
	scheinbare Dichte (Dichte einschließlich geschlossener und nicht zugänglicher Poren)	600 - 800 kg/m <sup>3</sup>	
Korn-/Partikeldurchmesser		2 - 200 µm	100 – 300 µm

Die scheinbare Dichte von Pulveraktivkohle liegt unterhalb der durchschnittlichen Dichte eines belebten Schlammes der biologischen Stufe. Für eine Sedimentation in der Nachklärung sind daher der Einsatz von Fäll- und Flockungsmitteln erforderlich, um große und schwere Flocken zu bilden.

Der größte Korndurchmesser der Pulveraktivkohle liegt etwa in der Größenordnung der Partikel des Belebtschlammes. Mit einem mittleren Korndurchmesser der Beispiel-Pulveraktivkohle „Carbopal AP“ G 36 343 von 30 µm ist davon auszugehen, dass die feinen Fraktionen nur durch eine effiziente Filtration zurückgehalten werden können. Auf diesen Rückhalt ist besonderes Augenmerk zu legen, da alle vorher durchgeführten Adsorptionsvorgänge sonst nur dazu führen, dass die Mikroschadstoffe an der beladenen Aktivkohle in das Gewässer gelangen.

### 6.3 Erwartete Synergieeffekt bei Verfahren mit PAK

Die Elimination des Phosphors erfolgt gegenwärtig neben der Einlagerung in die heterotrophe Biomasse beim Zellaufbau durch zielgerichtete, technische Maßnahmen der Fällung. Eine weitere Verbesserung der heute schon erreichten Werte wäre ohne Zusatzmaßnahmen somit nicht möglich. Im Regelwerk A 131 und nach praktischen Erfahrungen ist davon auszugehen, dass Überwachungswerte kleiner 1 mg/l in der qualifizierten Stichprobe bei einstufigen Belebungsanlagen rechnerisch nicht dimensionierbar sind. Die Kläranlagen der Größenklasse 5 mit einem Überwachungswert von 1 mg/l sind daher in der Regel mit einer Flockungsfiltration ausgestattet.

Vor der Errichtung einer Adsorptionsstufe auf Basis von Pulveraktivkohle mit der notwendigen Zugabe von Fäll- und Flockungshilfsmitteln sowie nachgeschaltetem Fuzzy-Filter zum Rückhalt der PAK wird als Nebeneffekt erwartet, dass die hierbei auch zurückgehaltenen suspendierten Stoffe (suspendierter belebter Schlamm) und damit die Restverschmutzung an organischen und Zehr-Stoffen wie CSB/BSB und Phosphor vermindert werden.

Eine Verminderung des CSB und Phosphor im Ablauf der Kläranlage wirkt sich nicht nur ökologisch positiv aus. Die Stadt Bad Driburg kann mit niedrigeren Ablaufwerten dieser Parameter einen Teil der Abwassergebühren einsparen.

## **6.4 Laborversuche zum Bemessungsansatz**

In den letzten Jahren wurden im Rahmen von Machbarkeitsstudien und Pilotierungsanlagen umfangreiche Laboruntersuchungen durchgeführt, um für den Bemessungsansatz die richtige Dosierung von Ozon, Pulveraktivkohle und die Standzeiten der granulierten Aktivkohle zu erkunden.

**Das vorhandene Untersuchungsmaterial und die Ergebnisberichte sind mittlerweile so umfangreich, dass in Abstimmung mit der Bezirksregierung Detmold auf weitere, sehr teure Laboruntersuchungen verzichtet werden soll.**

Daher werden als Bemessungswerte die Ergebnisse der vergangenen Jahre angesetzt, wie sie auch in der letzten Fassung der „Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination“ als Empfehlung formuliert worden sind.

So wurde unter anderem festgestellt, dass die meisten Mikroschadstoffe bereits bei 10 mg PAK/l vollständig adsorbiert werden. Für eine effiziente Elimination von Mikroschadstoffen ist demnach eine PAK-Dosiermenge von mindestens 10 mg/l nötig. Die großtechnische PAK-Dosierung sollte aber auf mindestens 20 mg/l ausgelegt werden, um Betriebssicherheit zu garantieren und im Bedarfsfall Reserven bereithalten zu können.

Die kontinuierlichen Kolonnenversuche mit granulierter Aktivkohle ergaben zum Beispiel einen unteren ansetzbaren Wert von 12.000 Bettvolumina (BV).

## 7 Variantenbetrachtung für die Kläranlage Haaren

### 7.1 Festlegung der Varianten

In dieser Machbarkeitsstudie war zu untersuchen, wie die verfahrenstechnische Erweiterung der Kläranlage Haaren um eine Reinigungsstufe zur Elimination von Mikroschadstoffen mit Aktivkohle oder Ozon erfolgen kann. Aus dieser Aufgabenstellung wurden die verschiedenen Varianten nach Tabelle 7-1 herausgearbeitet.

Tabelle 7-1: Festlegung der Varianten für die Kläranlage Haaren

Variante	Kurzname	Beschreibung
<b>Verfahren mit Granulierter Aktivkohle (GAK)</b>		
I	GAK	Ertüchtigung Kläranlage; GAK-Adsorber als Druckkessel im Teilstrom, vorgeschaltetem Filter im Vollstrom (hier untersucht: Fuzzy-Filter)
<b>Verfahren mit Pulveraktivkohle (PAK)</b>		
II	PAK Vollstrom	Ertüchtigung Kläranlage; Adsorptionsstufe simultan, nachgeschalteter Filter (hier untersucht: Fuzzy-Filter)
<b>Verfahren mit Ozon (O<sub>3</sub>)</b>		
III	Ozon	Ertüchtigung Kläranlage; Ozonungsstufe mit Nachbehandlung im Teilstrom, Filter zur Phosphorelimination im Vollstrom (hier untersucht: Fuzzy-Filter)

Bei allen Varianten wird eine Ertüchtigung des Bestandes als vorbereitende Maßnahme erforderlich. In Variante I GAK-Adsorber wird eine Teilstrombehandlung für die Mikroschadstoffelimination gewählt. Die Elimination der abfiltrierbaren Stoffe und des Phosphors ist hier für die gesamte Wassermenge erforderlich, wodurch der vorgeschaltete Filter im Vollstrom beschickt werden muss. Für die Variante II ist die eine Vollstrombehandlung für die Eliminations- und Filterstufen konzipiert. Die Variante III Ozon mit Nachbehandlung wird wiederum im Teilstrom gefahren. Der für die Phosphorelimination nachgeschaltete Filter wird mit dem Regenwasserteilstrom und dem mit Ozon behandelten Wasser beschickt (Vollstrom).

Für die Kläranlage Haaren wurde dann nach Abbildung 7-1, Abbildung 7-2 und Abbildung 7-3 in verschiedene Fließwege für die Aktivkohlealternativen GAK und PAK sowie die Ozonung unterschieden.

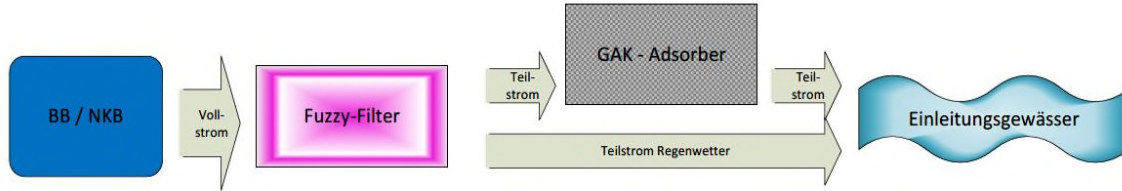


Abbildung 7-1: Voll- und Teilstrombehandlung bei Einsatz von GAK

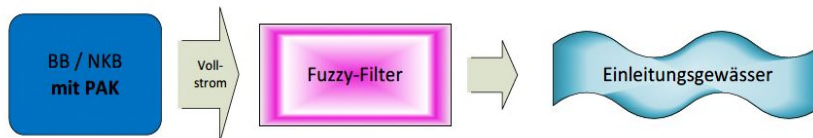


Abbildung 7-2: Vollstrombehandlung bei Einsatz von PAK

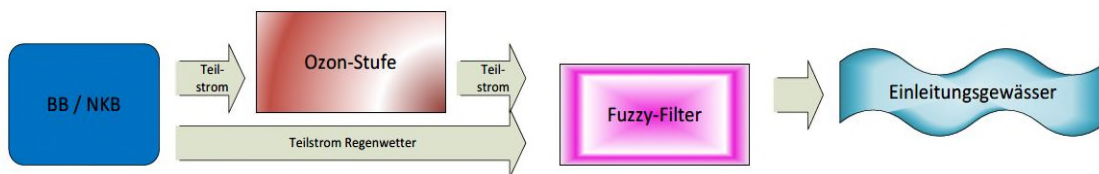


Abbildung 7-3: Teil- bzw. Vollstrombehandlung bei Einsatz von Ozon

Für die Lösung mit Pulveraktivkohle ist ein separater Kohleschlammkreislauf nach neuesten Erkenntnissen nicht mehr Gegenstand der Studie. Der Klärschlamm wird im Hinblick auf die Novellierung der Klärschlamm-Verordnung zukünftig wohl in jedem Fall verbrannt werden müssen. Eine Verbrennungsanlage nur für Klärschlamm ist nach aktuellen Presseberichten in OWL bereits in Planung. Eine generelle Vollstrombehandlung in der Adsorptions- oder Oxidationsstufe wird für die Kläranlage Haaren als nicht erforderlich erachtet. Nach der „Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination“ ist eine Teilstrombehandlung für die Mikroschadstoffelimination möglich. Bei einem Verfahren mit Pulveraktivkohle, welche in die biologische Stufe zurückgeführt wird, ist eine Teilstrombehandlung nicht möglich. Die Kohle befindet sich im gesamten System und darf nicht in das Einleitungsgewässer gelangen, da sie mit Schadstoffen beladen ist.

## 7.2 Ertüchtigung des Kläranlagenbestandes

Für die Realisierung der verschiedenen Varianten sind im Vorfeld auf der Kläranlage einige Maßnahmen zu ergreifen, um die notwendigen Voraussetzungen für den Erfolg bzw. den sicheren Betrieb der neuen Stufe zur Mikroschadstoffelimination zu schaffen (Tabelle 7-2).

Tabelle 7-2: Vorbereitende Maßnahmen zur Ertüchtigung der Kläranlage

Ziel	Maßnahme	Begründung
Senkung Energiebedarf	Verlängerung Zulaufkanal in der Fiegenburg nach Norden, Neu: Eingehauster Rechen und belüfteter Langsandfang, Neu: Belebungsbecken mit feinblasiger Belüftung statt energiezehrende Kreiselbelüfter, Neu: Nachklärbecken 2	Nutzung der hydraulischen Höhe des Zulaufkanals in der Fiegenburg zur Vermeidung eines Zwischenpumpwerkes für die Mikroschadstoffelimination; Vermeidung von hohen Kosten für neuen Energiehauptanschluss vom EVU mit neuem Trafo und neuem Notstromaggregat
Optimierung Auslegungswassermenge	Herstellung eines Regenüberlaufs- bzw. Pufferbeckens unter Nutzung vorhandener Bausubstanz	Senkung der Kosten für neue Stufe zur Mikroschadstoffelimination; Schaffung sicherer Betriebsführung, da Extremwassermengen durch das Pufferbecken vergleichmäßigt werden; Eliminationserfolg höher durch gleichmäßige Belastung der neuen Stufe
Vermeidung Störstoffe	Neu: Eingehauster Rechen und belüfteter Langsandfang wie vor	Wirkung der Mikroschadstoffelimination wird sichergestellt, wenn störende Partikel aus der neuen Stufe durch optimierte mechanische Stufe ferngehalten werden
Vermeidung Sauerstoffzehrung	Neu: Belebungsbecken wie vor – Sicherung der vollständigen Nitrifikation	Bei Mikroschadstoffelimination mit Ozon führt eine unvollständige Nitrifikation durch das verbleibende Nitrit zu unnötiger Zehrung des Ozon und damit zur Minderung der Eliminationserfolges
Vermeidung AFS	Neu: Nachklärbecken 2 wie vor	Bei Mikroschadstoffelimination mit GAK und Ozon führen abfiltrierbare Stoffe aus überlasteter Nachklärung zu Betriebsstörung durch Verschlämung bzw. Minderung des Eliminationserfolges.



Die hier aufgezeigten, vorbereitenden Maßnahmen sind teilweise von mehrfacher positiver Wirkung auf den angestrebten Erfolg der Mikroschadstoffelimination. Die hierbei geschaffene Redundanz der biologischen Stufe sichert einen dauerhaften Betrieb der Mikroschadstoffelimination. Die neuen Bauwerke sind im Bauablauf zuerst zu realisieren, damit wegen der beengten Verhältnisse überhaupt erst einmal Platz für die Bauwerke zur Mikroschadstoffelimination geschaffen wird (Tabelle 7-3). Unter Nutzung der dann frei gewordenen Alt-Substanz (z.B. Belebungsbecken) können neue Ozon-Becken, Filter- oder Adsorberhallen errichtet werden.

Tabelle 7-3: Bauwerkskonzept zu den vorbereitende Maßnahmen

<b>Bauwerk</b>	<b>Konstruktion / technische Ausrüstung</b>
Trennbauwerk und Zulaufkanal	Zulauf zur neuen mechanischen Stufe bis 73 l/s, Abschlag darüber hinausgehender Mischwassermengen mit neuem Zulaufkanal in das umgebaute Regenbecken
Eingehauster Rechen	Leistung bis 75 l/s; Notumgehung zum Regenbecken, Feinrechen 3 mm als Siebrechen, Rechengutwäsche und –presse, Containerstandplatz mit Einhausung gegen Frost
belüfteter Langsandfang mit Fettfang	Leistung bis 75 l/s; Notumgehung zum Regenbecken, Sandräumer, Sandwäsche, Fettfangschacht zur mobilen Abfuhr, Containerstandplatz mit Einhausung gegen Frost
Belebungsbecken mit feinblasiger Belüftung	Volumen nach A 131 bemessen: 2.250 m <sup>3</sup> Tiefe 5 m, Breite 16 m, Länge 30 m, Umlaufgraben, zur Redundanz 2 Kammern; Feinblasige, gestaffelte Belüftung – mit variablen Beckenzonen zur vollständigen Nitrifikation bei tiefen Temperaturen (Vermeidung Nitritproblem!), Rührwerke für intermittierende Denitrifikation, Simultanfällung Phosphor
Nachklärbecken 2	Leistung bis 25 l/s (= 1/3 vom Vollstrom) Durchmesser 12 m, Mindesttiefen nach A 131, zur Redundanz (1/3) als zweites, zusätzliches Becken; Räumerrücke, RS-ÜS-Pumpwerk
Umbau Regenbecken	Volumen 1.000 m <sup>3</sup> durch Umnutzung altes Belebungsbecken, Entleerungspumpwerk zum Rechen, Klärüberlauf (nur als Notabschlag!) zu den Schönungsteichen

In den dieser Machbarkeitsstufe beigefügten Zeichnungen sind die Maßnahmen zur Er-  
tüchtigung der Kläranlage im Bereich der Straße Fiegenburg, d.h. westlich des Kläran-  
lagenbestandes angeordnet. Dies hat einfachere hydraulische und betriebliche Vor-  
teile, vor allem eine deutliche Energieeinsparung durch Vermeidung von Zwischen-  
pumpwerken.

Alternativ können die Maßnahmen aber auch auf der östlichen Seite, d.h. östlich des  
Einleitungsgewässers umgesetzt werden, wobei hier die Querung des Gewässers be-  
sonders zu beachten wäre. Ein Zulaufpumpwerk südlich des Betriebs- und Maschinen-  
gebäudes oder ein Zwischenpumpwerk nach den hierbei verbleibendem Rechen-Sand-  
fangbauwerken wäre dann erforderlich. Wegen der deutlichen Nachteile der hohen  
Energiekosten wurde diese Lösung in Abstimmung mit der Verwaltung nicht weiter un-  
tersucht.

### 7.3 Variante I GAK-Adsorber

In der Variante I erfolgt die Adsorption der Mikroschadstoffe an granulierten Aktivkohle in  
Festbett-Adsorbern. Neben den Mikroschadstoffen führen gelöste und partikuläre Stoffe  
im Ablaufwasser der Nachklärung zu einer zusätzlichen Beladung der granulierten Ak-  
tivkohle, die nach Erschöpfung ihrer Adsorptionskapazität ausgetauscht und erneuert  
bzw. regeneriert werden muss. Das Verfahrensschema wird in Abbildung 7-4 aufgezeigt.

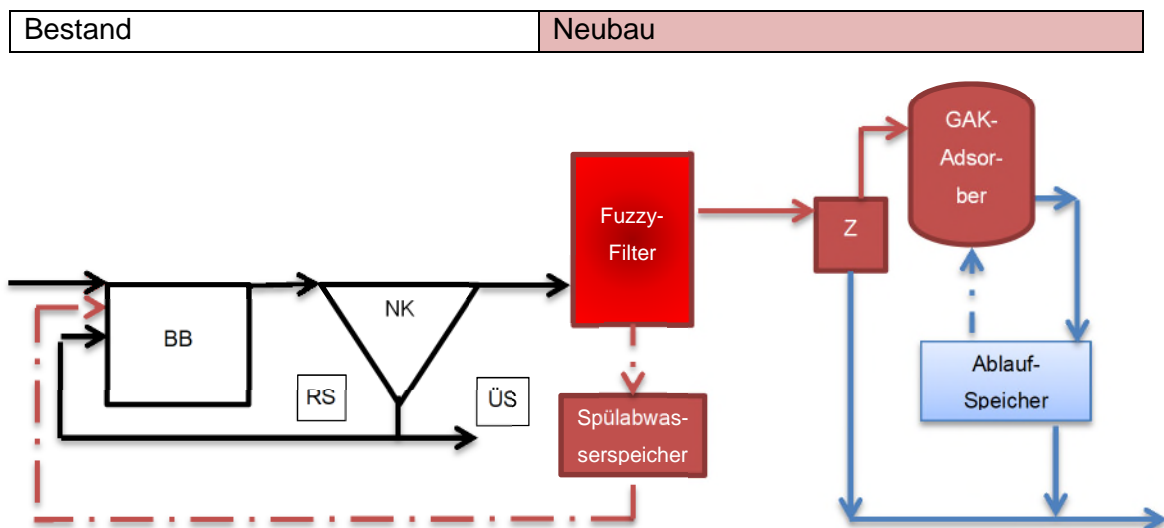


Abbildung 7-4: Verfahren Variante I - Fuzzy-Filter vor GAK-Adsorber

In dieser Variante wird das Abwasser aus der Nachklärung im Vollstrom über den Fuzzy-Filter und dann im Teilstrom über die GAK-Adsorber geführt. Die Filterstufe senkt die abfiltrierbaren Stoffe, den CSB und den Phosphor auch im Regenwetterfall. Während eines Filter-Spülvorgangs entnehmen die Fuzzy-Filter weithin das zufließende Abwasser aus der Nachklärung auf, jedoch auf etwa ein Viertel bis ein Drittel der Modulkapazität begrenzt. Es ist somit ein redundantes Reserve- bzw. Rückspülmodul vorzusehen. Wegen des hohen Spülabwasserförderstromes wurde ein Spülabwasserzweischenspeicher vorgeschlagen, von dem eine geringere Fördermenge gepuffert in die Biologie zurückgeführt wird. Ein Zwischenspeicher (Z) für das Filtrat aus dem Fuzzy-Filter dient als Pumpenvorlage für die GAK-Adsorber. Der Ablaufspeicher dient zur Vergleichmäßigung des Kläranlagenablaufes und als Spülvorlage für die GAK-Adsorber.

Das Adsorbensvolumen wurde für eine Kontaktzeit von 30 min bei Bemessungszufluss ausgelegt. Es wurden 2 Reihen mit je zwei Druckkesseln konzipiert. Die Lösung bietet bei verhältnismäßigem Aufwand eine hohe Wirkung und Sicherheit. Gegenüber einer Parallelschaltung von einzelnen Druckkesseln kann so ein GAK-Filter bis zum Durchbruch beladen werden. Die ausführlichen verfahrenstechnischen Berechnungen befinden sich im Anhang 7-1.

## 7.4 Variante II PAK Vollstrom

Die Variante II beinhaltet die Adsorption der Mikroschadstoffe an Pulveraktivkohle. Diese wird in ein Kontaktbecken (K) dosiert, welches gleichzeitig als Pumpenvorlage für die Fuzzy Filter dient. Aus Frostschutzgründen wird eine Halle für die Filtration erforderlich. Das Verfahrensfliessbild ist in Abbildung 7-5 dargestellt.

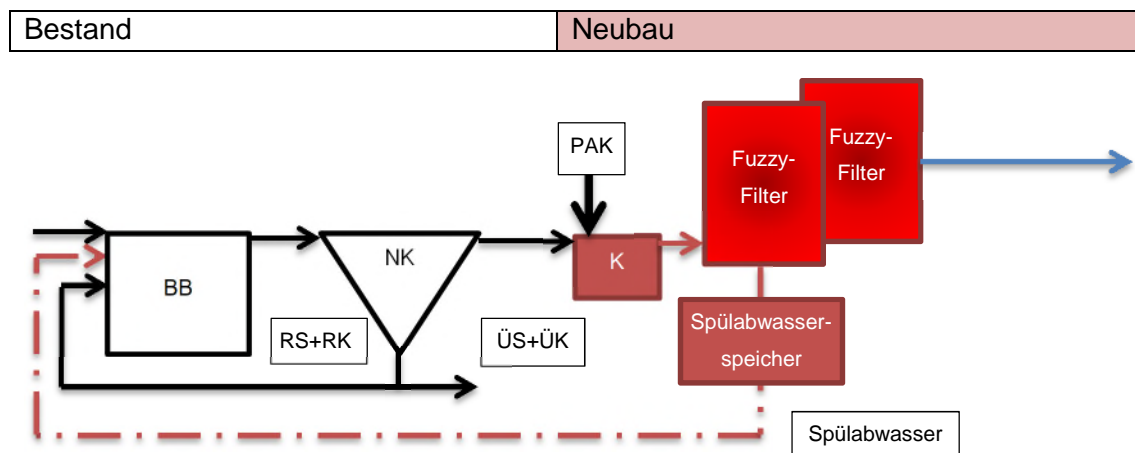


Abbildung 7-5: Verfahren Variante II - PAK mit nachgeschaltetem Fuzzy-Filter

In Variante II wird Pulveraktivkohle durch die gesamte Kläranlage rezirkuliert. Somit muss den Nachklärbecken ein Filter nachgeschaltet werden. Eine Regenwetter-Teilstromumleitung ist bei dieser Variante daher nicht möglich. In Untersuchungsergebnissen der Literatur (u.a. Metzger 2010) wird der deutliche Vorteil einer Mehrfachbeladung der Pulveraktivkohle durch Rückführung der Rücklaufkohle in die biologische Stufe beschrieben. Daher wird das Spülabwasser in das Belebungsbecken gegeben. Bei dieser Lösung sollen der Überschussschlamm gemeinsam mit der Überschussskohle behandelt werden. Die Nachklärbecken dienen für die Aktivkohle als Sedimentationsbecken. Die verfahrenstechnischen Berechnungen befinden sich im Anhang 7-2.

## 7.5 Variante III Chemische Oxidation mit Ozon

Die Variante III unterscheidet sich grundlegend von den vorherigen Varianten. Sie nutzt die chemische Oxidation zur Eliminierung der Mikroschadstoffe. Über die Ozonungsstufe wird ein Teilstrom des Abwassers geleitet. Das Reaktionsbecken ist gasdicht abzudecken. Das Verfahrensschema ist in Abbildung 7-6 dargestellt. Die Bemessung der Anlage sowie der Ozonbedarf befinden sich im Anhang 7-3.

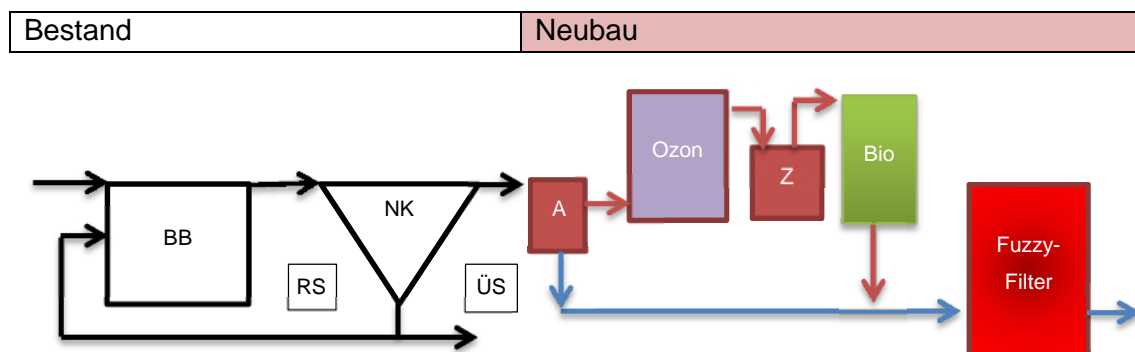


Abbildung 7-6: Verfahren Variante III – Teilstrom Ozon mit biologischer Reinigung, danach Fuzzy-Filter im Vollstrom

Die Ozonung wird verfahrenstechnisch der biologischen Stufe nachgeschaltet. Für die Aufteilung der Abwasserströme ist ein Schachtbauwerk (A) erforderlich. Der Regenwetterteilstrom wird direkt zu der Filterstufe geleitet.

Der Ozonung folgt eine biologische Nachbehandlung in Form eines MBBR (Moving Bed Biofilm Reactors). Hier werden Chips als Aufwuchsfläche für einen Biofilm genutzt. Diese werden im Becken in Schwebelage gehalten und durchmischt. Eine biologische Nachbehandlung ist bei der Ozonung zwingend erforderlich, damit die Transformationsprodukte möglichst abgebaut werden können um nicht frei in die Natur zu emittieren. Die Aufenthaltszeit des Wassers ist mit mindestens 15 min anzusetzen, da sich dann bereits eine konstante Abbaurate einstellt, wie durch Hesse, S (2001) beschrieben. Der Abbauprozess in einem Biofilmreaktor ist temperaturabhängig. Für die Kläranlage Haaren wurden 30 min gewählt um sich die volle Funktionsweisen sowohl bei Temperaturschwankungen, als auch die Option, größere Wassermengen zu behandeln, offen zu halten. In dem 6 m tiefen Becken befinden sich Biochips, die als Aufwuchsfläche für Bakterien genutzt werden. Diese werden durchmischt. Durch die sehr hohe Oberfläche der Biochips kann das Becken mit 54 m<sup>3</sup> relativ klein gehalten werden.

Auf die biologische Nachbehandlung folgt eine Filterstufe, hier beispielhaft mit einem Fuzzy - Filter zur Elimination von Phosphor.

Die Kontaktzeit bei der Ozonung ist nach Auslegungsrichtlinie im oberen Bereich mit 30 min gewählt.

Für die Herstellung von Ozon werden pro kg erzeugtem Ozon 10 kg Sauerstoff benötigt. Bei einer Dosierung von 7 mg O<sub>3</sub> pro Liter Abwasser (auf vergleichbaren Anlagen werden durchschnittlich 5 -10 mg/l O<sub>3</sub> verwendet) ist somit eine Sauerstoffmenge von 110 kg pro Tag erforderlich. Auf eine genaue Bestimmung der Dosierung mittels Ozonzehrungsversuche wurde - wie oben beschrieben - verzichtet. Nach den Kontaktbecken ist zusätzlich ein Restozonvernichter notwendig. Das Kontaktbecken muss abgedeckt sein. Für einen effektiven Betrieb ist die Wassertiefe im Kontaktbecken auf 6 m auszulegen.

## 8 Kostenermittlung Kläranlage Haaren

### 8.1 Kostengrundlagen

#### 8.1.1 Varianten zur Mikroschadstoffelimination

Für die Ertüchtigung des Bestandes und die drei betrachteten Varianten werden im Folgenden die wesentlichen Daten zusammengestellt, die die Grundlage für die Kostenermittlung bilden (Tabelle 8-1 und Tabelle 8-2). Die Bemessungen erfolgten gemäß Beschreibungen in vorherigen Kapiteln und nach Literaturempfehlung.

Tabelle 8-1: Kostengrundlagen Ertüchtigung der Kläranlage zur Mikroschadstoffelimination

Bauwerk / Anlage	Variante I bis III
	Ertüchtigung Kläranlage
<b>Ingenieurbauwerke</b>	
Baufeldräumung	Psch
Verteiler-/Schacht-Bauwerk	Stb-Bauwerk
BB, NKB, SF,RÜB...	Stb-Bauwerk
Containerhalle	Psch
Bodenentsorgung	-
Rohrleitungen DN 100 bis 600	erdverlegt
Dekanterhalle	ertüchtigen
Kabelleerrohranlage	erdverlegt
Straßen und Wege	2.000 m <sup>2</sup>
Schlosserarbeiten	Podeste, Geländer,...
Sonstiges	Baustelleneinrichtung,...
<b>Technische Ausrüstung</b>	
Schieber Verteiler-Bauwerk	Psch
Dekanter, Rechen, Sandfang	Psch
MID+Schieber	Psch
Pumpen	Stck.
RÜB, BB, NKB	Psch
<b>EMSR-Technik</b>	
Mess-/ Automatisierungstechnik, Erweiterung PLS, Allg. Elektroinstallation, Erdung, Blitzschutz, Potentialausgleich, Inbetriebnahme und Dokumentation	Psch
<b>Baunebenkosten</b>	
Objektplanung, Fachplanung Technische Ausrüstung, EMSR, Tragwerk, öBÜ, Gutachten (Baugrund, Brandschutz,...)	Ermittlung nach HOAI bzw. ortsübliche Vergütungen: Summe 25%

Tabelle 8-2: Kostengrundlagen Variante I bis III

Bauwerk / Anlage	Variante I	Variante II	Variante III
	GAK-Adsorber	PAK	Ozon
<b>Ingenieurbauwerke</b>			
Baufeldräumung	Psch	Psch	Psch
Verteiler-/Schacht-Bauwerk	Stb-Bauwerk	Stb-Bauwerk	Stb-Bauwerk
Gründung Filterhalle	Beckensohle /Stb-Wanne	Beckensohle /Stb-Wanne	Beckensohle /Stb-Wanne
Zwischenspeicher	integriert	-	-
Spülabwasser-Speicher	76 m <sup>3</sup> integriert	34 m <sup>3</sup> integriert	34 m <sup>3</sup> integriert
RK+ÜK-Speicher	-	integriert	-
Ablaufspeicher	34 m <sup>3</sup> integriert	34 m <sup>3</sup> integriert	34 m <sup>3</sup> integriert
Filterhalle ab OKG	2.000 m <sup>3</sup>	1.800 m <sup>3</sup>	1.800 m <sup>3</sup>
EMSR-Raum	75 m <sup>3</sup>	75 m <sup>3</sup>	150 m <sup>3</sup> (Ozon- generator etc.)
Puffer-/Pumpen-Vorlage Fuzzy-Filter	84 m <sup>3</sup> Stb-Schacht	84m <sup>3</sup> Stb-Schacht	84 m <sup>3</sup> Stb-Schacht
Stromleitung Ozonung	-	-	erdverlegt
Rohrleitungen DN 100 - 600	erdverlegt	erdverlegt	erdverlegt
Dosierleitungen	in Halle	erdverlegt	erdverlegt
Kabelleerrohranlage	erdverlegt	erdverlegt	erdverlegt
Straßen und Wege	100 m <sup>2</sup>	100 m <sup>2</sup>	100 m <sup>2</sup>
Schlosserarbeiten	Podeste, Gelän- der,...	Podeste, Gelän- der,...	Podeste, Gelän- der,...
Sonstiges	Baustelleneinrich- tung,...	Baustellenein- richtung,...	Baustellenein- richtung,...
<b>Technische Ausrüstung</b>			
Schieber Verteiler-Bauwerk	Psch	Psch	Psch
MID+Schieber	Psch	Psch	Psch
Rührwerke KB+Vorlage	2 Stck	2 Stck	2 Stck
Fuzzy-Filter-Anlage (Pum- pen, Gebläse,...)	2 Stck.	2 Stck.	2 Stck.
GAK-Adsorber	2 x 2 Stck. D = 3,2 m H <sub>FB</sub> = 3,00m	-	-
Pumpen GAK	2 Stck.	-	-
Spülabwasser-Pumpen	2 Stck.	2 Stck.	-
Pumpen RK+ÜK	-	2 Stck.	-
Hebepumpen	-	-	3 Stck.
Sauerstofftank			20 m <sup>3</sup>

Bauwerk / Anlage	Variante I	Variante II	Variante III
	GAK-Adsorber	PAK	Ozon
Ozon-Anlage (2x Generator je 3 kg/h, Restozonvernichter, Kühlwassersystem, Aggregate, Überwachung und Messungen, Anbindungen, Dokumentation etc.)	-	-	1 Stck.
FM-Puffertank	1 m <sup>3</sup>	1 m <sup>3</sup>	1 m <sup>3</sup>
PAK-Silo	-	75 m <sup>3</sup>	-
PAK-Austrag	-	1 Stck.	-
PAK-Gravimeter	-	1 Stck.	-
FM-Dosieranlage	1 Stck.	1 Stck.	1 Stck.
FHM-Dosieranlage	1 Stck.	1 Stck.	1 Stck.
Flockulator	2 Stck.	2 Stck.	2 Stck.
Fuzzy-Filter Rohrinstallation, Schieber,...	Rohrgalerie	Rohrgalerie	Rohrgalerie -
Adsorber Rohrinstallation, Schieber,...	Rohrgalerie	-	-
Portalkran Filterhalle	2 Stck.	1 Stck.	1 Stck.-
Inbetriebnahme Dokumentation usw.	Anfahr- und Probetrieb	Anfahr- und Probetrieb	Anfahr- und Probetrieb
<b>EMSR-Technik</b>			
Mess-/ Automatisierungstechnik, Erweiterung PLS, Allg. Elektroinstallation, Erdung, Blitzschutz, Potentialausgleich, Frostschutz Filterhalle, Inbetriebnahme und Dokumentation	Psch	Psch	Psch
<b>Erstbefüllung</b>	GAK 28 t	PAK 10 t	O <sub>2</sub> 6 t
<b>Baunebenkosten</b>			
Objektplanung, Fachplanung Technische Ausrüstung, EMSR, Tragwerk, öBÜ, Gutachten (Baugrund, Brandschutz,...)	Ermittlung nach HOAI bzw. ortsübliche Vergütung: Summe 25%	Ermittlung nach HOAI bzw. ortsübliche Vergütung: Summe 25%	Ermittlung nach HOAI bzw. ortsübliche Vergütung: Summe 25%

Im Rahmen der Kostenermittlung wurden aktuelle Submissions- und Richtpreise direkt bei den Herstellern bzw. Lieferanten recherchiert. Einige Hersteller sind in Tabelle 8-3 angeführt.



Tabelle 8-3: Preisrecherche für Kostenermittlung

Objekt/Anlage	Hersteller/Lieferanten	Status
Fuzzy-Filter	Bosman Watermanagement GmbH	Submission
Pumpen	KSB, Hidrostal	Submission
PAK-Silo und Dosieranlage	Schaub Umwelttechnik	Submission
Rührwerk	Xylem, GVA	Submission
Portalkran	DEMAG	Submission
FM-Pumpen	Jesco	Submission
Ozonanlage	Xylem WEDECO	Richtpreise
Sauerstoff, Sauerstofftank	Messer Group	Richtpreise

## 8.2 Herstellungskosten

Die Ermittlung der Investitionskosten erfolgt in Form einer Kostenschätzung mit Gliederung in Ingenieurbauwerke, Technische Ausrüstung (TA mit Maschinen- und Verfahrenstechnik), EMSR-Technik usw. auf Basis überschlägiger Massen für Bauwerke und technische Anlagen. Die Kosten wurden in Excel-Listen in ausführlicher Form erarbeitet (siehe Anhang 8-1 bis 8-4). Die Baunebenkosten (BNK) wurden mit 25 % der Nettosumme angenommen. In Tabelle 8-4 sind die Summen für die vorbereitenden Maßnahmen zur Ertüchtigung des Bestandes der Kläranlage zusammengestellt.

Tabelle 8-4: Ermittlung der Investitionskosten (gerundet)

Varianten / Kostengruppe	Ertüchtigung Kläranlage
Ingenieurbauwerke	1.714.625 €
TA Maschinen	320.000 €
TA Verfahren	175.000 €
EMSR-Technik	105.000 €
<b>Zwischensumme</b>	<b>2.314.625 €</b>
BNK 25%	578.656 €
<b>Summe</b>	<b>2.893.281 €</b>
gesetzl. Ust. 19%	549.723 €
<b>Gesamt Brutto</b>	<b>3.443.005 €</b>

In Tabelle 8-5 werden nur die Summen der Varianten für die Mikroschadstoffelimination zusammengestellt.

Tabelle 8-5: Ermittlung der Investitionskosten (gerundet)

Varianten / Kostengruppe	Kosten Mikroschadstoffelimination		
	Var. I GAK	Var. II PAK	Var. III Ozon *)
Ingenieurbauwerke	665.775 €	609.675 €	915.970 €
TA Maschinen	680.000 €	555.000 €	1.045.000 €
TA Verfahren	928.000 €	845.500 €	985.500 €
EMSR-Technik	420.000 €	440.000 €	450.000 €
Erstbefüllung	32.844 €	15.000 €	900 €
<b>Zwischensumme</b>	<b>2.726.619 €</b>	<b>2.465.175 €</b>	<b>3.397.370 €</b>
BNK 25%	681.655 €	616.294 €	849.343 €
<b>Summe</b>	<b>3.408.274 €</b>	<b>3.081.469 €</b>	<b>4.246.713 €</b>
gesetzl. Ust. 19%	647.572 €	585.479 €	806.875 €
<b>Gesamt Brutto</b>	<b>4.055.846 €</b>	<b>3.666.948 €</b>	<b>5.053.588 €</b>

zuzügl.

Ertüchtigung Kläranlage	3.443.005 €	3.443.005 €	3.443.005 €
<b>Gesamtkosten</b>	<b>7.498.851 €</b>	<b>7.109.953 €</b>	<b>8.496.593 €</b>

**Eventuelle Fördermittel nach ResA II sind unberücksichtigt (z.B. bis zu 70% für Mikroschadstoffelimination und 30% für Austausch des Belüftungssystems).**

*\*) Bei den Kosten für die Ozonanlage könnten noch weitere Investitionen auf den Betreiber der Kläranlage hinzukommen, da die Ozonanlage einen hohen Energiebedarf hat und das Notstromaggregat entsprechend sicherstellen muss, dass diese zusammen mit den übrigen Verbrauchern im Notfall genügend Strom liefern kann. Die Energieversorgung der Ozonanlage muss zu jedem Zeitpunkt sichergestellt werden können. Es müsste ein neues Energiekonzept erarbeitet und gegebenenfalls ein größeres Aggregat angeschafft werden.*

**Die Kosten wurden bei gegenwärtigem Kenntnisstand auf der Grundlage von marktüblichen Preisen geschätzt und sind als Größenordnung bzw. grobe Orientierung zu verstehen. Im Zuge der vertiefenden Planungen wird diese Kostenermittlung weiter präzisiert.**

**Alle Kosten sind vorbehaltlich Bodengutachten (Grundwasser, Sondergründung), Tragwerksplanung und Kampfmittelfreiheit!**

### 8.3 Laufende Kosten Mikroschadstoffelimination

Die Ermittlung der laufenden Kosten (für Betrieb, Wartung, Unterhaltung,...) erfolgt nur für die zusätzlich notwendigen Leistungen durch die Adsorptions- bzw. die Ozonstufe. Weiterhin dient diese Ermittlung nur der Zusammenstellung der Jahreskosten für die dynamische Kostenvergleichsrechnung und erfolgt nicht im betriebswirtschaftlichen Sinne nach Kostenträgerrechnung, z.B. für die Ermittlung von Abwassergebühren zur Beurteilung der unmittelbaren monetären Auswirkungen für die Gebührenzahler. Sie ist dient also ausschließlich einer realwirtschaftlichen Ermittlung der Jahreskosten nach der Leitlinie zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinie 2012, siehe auch folgendes Kapitel).

Für den Verbrauch an Aktivkohle wurde nach den Laborversuchen ähnlicher Projekte, Werten aus der Literatur und der Testphase des Pilotprojektes zur Elimination von Mikroschadstoffen in Barntrup für die PAK eine mittlere Dosiermenge von 10 mg/l angesetzt. Für die GAK wurde eine maximale Beladung von 1.000 mg CSB/g GAK bzw. nach Literaturwerten 12.000 BV angenommen. Für die Dosierung von Ozon wird nach Herstellererfahrungen und Vergleich mit Literaturangaben eine Dosis von 7 mg/l O<sub>3</sub> angesetzt. Dieser Wert liegt im Bereich der Auslegungsempfehlung NRW, in der eine Ozondosis von 0,7 bis 0,9 mg O<sub>3</sub>/mg DOC empfohlen wird.

In Tabelle 8-6 werden die Grundlagen für die Ermittlung der laufenden Kosten erörtert.

Tabelle 8-6: Kostengrundlage für die laufenden Kosten

Nr.	Kostenstelle	Bemerkung
1.	Personalkosten	Zusätzliche Arbeiten: Annahme Aktivkohle/Sauerstoff, FM, FHM; sofern erforderlich allgemeine Wartung und Kontrolle (größere Wartung der Maschinenteknik erfolgt durch Fremdpersonal). <b>Es wird eine halbe Stelle angesetzt.</b>
2.	Energiekosten	Die Ermittlung des Energiebedarfes erfolgte tabellarisch für alle Varianten. Es wird ein durchschnittlicher Strompreis von <b>0,21 €/kWh einschl. 19% Ust.</b> angesetzt.
3.	Instandhaltung/ Ersatzteile/ Sonstiges	Es wird unter Berücksichtigung langjähriger Erfahrungen für die Bauwerke, Maschinen- und EMSR-Technik ein <b>Prozentsatz von 0,3%</b> angesetzt.

Nr.	Kostenstelle	Bemerkung
4.	Stoffkosten	<p>Die Verbrauchsmengen werden aus der verfahrenstechnischen Berechnung übernommen.                      Kostenannahme:  <b>GAK 1.200 €/t zuzgl. Ust.</b>  <b>PAK 1.500 €/t zuzgl. Ust.</b>  <b>Flockungshilfsmittel 1.300 €/t zuzgl. Ust.</b>  <b>O<sub>2</sub> 130 €/t zuzgl. Ust., Miete Anlage (Speicher incl. Verdampfer): 4.600 €/a zuzgl. Ust.</b></p> <p>Bei Fällmittel (Alu-Basis) wird unterstellt, dass die Mehrmenge für die Flockenbildung vor dem Fuzzy-Filter in gleicher Größe durch die Verminderung der Fällmitteldosierung in die Biologie ausgeglichen wird.</p>
5.	Reststoffe	<p>Die Mehrmengen des Schlammes werden mit dem Erfahrungswert 10 g/(EW x d) angenommen. Preis für PAK-Schlamm Entsorgung: <b>Annahme 75 €/t brutto</b></p>
6.	Abwasserabgabe	<p>Es wird davon ausgegangen, dass durch Synergieeffekte bei der Mikroschadstoffelimination der CSB und Phosphor vermindert werden.                      Beim <b>CSB wird vorläufig von Abgabefreiheit</b> ausgegangen. Beim <b>Phosphor wird eine Verminderung bei der Vollstromvariante um 0,6 mg/l</b> erwartet.</p>

Die ausführliche Berechnung für den Energiebedarf ist im Anhang 8-5 und für die laufenden Kosten in Anhang 8-6 enthalten. Für die Vergleichbarkeit wurden dort auch die spezifischen laufenden Kosten bezogen auf die Jahresabwassermenge angegeben.

Die Summe der laufenden Kosten für die Varianten I bis III sind in Tabelle 8-7 dargestellt.

Tabelle 8-7: Laufende Kosten der Mikroschadstoffelimination (brutto einschl. 19% Ust., gerundet)

Varianten	Var. I GAK	Var. II PAK	Var. III Ozon
Summe laufende Kosten	82.087 €	76.404 €	126.064 €

## 8.4 Jahreskosten Mikroschadstoffelimination (KVR-Leitlinie)

Als modernes Instrument zur Untersuchung von Kosten und Nutzen einer Maßnahme werden die „Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinie)“ in der 8. überarbeiteten Auflage vom Juli 2012 angewendet.

Nach Intention des Gremiums zur Fortschreibung der Leitlinien soll dieses als Hilfsmittel zur Vorbereitung von Investitionsentscheidungen über die wasserwirtschaftliche Infrastruktur dienen. Statt wenig kreativer Reproduktion von Standardlösungen und buchstabengetreuer Umsetzung fachtechnischer Regelwerke soll eine Berücksichtigung der jeweiligen fallspezifischen Gegebenheiten erfolgen. Die sich daraus ergebenden Handlungsspielräume sind auszuschöpfen, um zu einer individuell optimierten Lösung zu gelangen. Als Basisverfahren steht hierfür die dynamische Kostenvergleichsrechnung zur Verfügung. Die Bewertungsverfahren sind mithin in erster Linie Instrumente der wasserwirtschaftlichen Fachplanungen. Sie bilden daneben die Grundlage für begleitende und abschließende Erfolgskontrollen. Ihre Anwendungsbereiche liegen in sämtlichen Planungsphasen; sie sind integraler Bestandteil des gesamten Planungsprozesses. In dessen Fortschritt verlagert sich dabei ihr Einsatz von der Auswahl der vorteilhaftesten Systemkonzeptionen zu den Fragen der Kostenoptimierung der verschiedenen Anlagenteile und der Betriebsabläufe (KVR-Leitlinie 2012).

Die sachgerechte Anwendung der Kostenvergleichsrechnung unterliegt jedoch im Wesentlichen folgenden einschränkenden Bedingungen:

- normative Zielvorgabe, d. h., eine bestimmte vorgegebene Leistung ist zwingend zu erbringen
- **Nutzengleichheit der Alternativen** mit der Ausnahme: die kostengünstigste Alternative weist zudem die größten Nutzenüberschüsse gegenüber den anderen Alternativen aus
- Äquivalenz monetär nicht bewertbarer Kostenwirkungen. In Geldeinheiten nicht bewertbare negative Konsequenzen (z. B. intangible Sozialkosten) lassen sich in dieser Art von Vergleichsrechnung rechentechnisch nicht berücksichtigen.

Die Nutzengleichheit der Alternativen erfordert dann ebenso die gleiche wasserwirtschaftliche Reinigungsleistung bei allen Varianten. Dies schließt die Frage nach dem Verbleib der Schadstoffe im gereinigten Abwasser – Stichwort Transformationsprodukte bei der Ozonung – mit ein.

Die Ozonung bietet an sich keine Nutzengleichheit mit einer Aktivkohlevariante. Die Mikro-schadstoffe werden hier transformiert, jedoch nicht aus dem Wasser entfernt. Im Ergebnis könnte hierfür keine Wirtschaftlichkeitsuntersuchung nach KVR-Leitlinie durchgeführt werden, da die Zielleistung und die Alternativen nicht nutzengleich wären. Aufgrund der Konzeption einer biologischen Nachbehandlungsstufe konnte die Variante bei den Berechnungen zum Vergleich mit betrachtet werden.

Die Jahreskosten wurden nur für die neue Adsorptions- bzw. Ozonung- und Filtrationsstufe sowie den hierfür erforderlichen laufenden Kosten ermittelt. Bei den Einzelkosten wurde die **durchschnittliche Nutzungsdauer nach den Leitlinien** zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinie), Anlage 1 für wasserbauliche Anlagen, angesetzt. Als Zinssatz wurde nach KVR-Leitlinie ein **langfristiger Zinssatz von real 3% p.a. als Standardwert** zu Grunde gelegt. Dieser darf nicht mit betriebswirtschaftlicher Verzinsung des Eigenkapitals von üblicherweise 5 bis 6% verwechselt werden.

Bei der Preisermittlung der laufenden Kosten wird in zwei Fälle unterschieden. Zum einen wurden die Jahreskosten mit einem dem Standardzinssatz von 3% kalkuliert. Betrachtet man die Preisentwicklung im Energiesektor und die politischen Entscheidungen bezüglich der Energiewende kann von einer erhöhten Kostensteigerung diesbezüglich ausgegangen werden. In den KVR-Leitlinien ist die Überprüfung der Empfindlichkeit hinsichtlich künftiger Energiepreissteigerungen empfohlen. Der Preis für Sauerstoff setzt sich zu 25% aus fixen Kosten und 75% aus Energie-, Lohn- und Kraftstoffkosten zusammen. Für den Sauerstoff und den Energiebedarf der vierten Reinigungsstufe wurde eine Berechnung mit einer Kostensteigerungsrate von 2% für diese preisveränderlichen Betriebskosten durchgeführt - diese kann unter Umständen auch höher sein.

Die Summe der Jahreskosten sind in Tabelle 8-8 dargestellt. Die ausführliche Berechnung der Jahreskosten ist im Anhang 8-7 enthalten.

Tabelle 8-8: Jahreskosten der Mikroschadstoffelimination nach KVR (brutto, gerundet)

Varianten	Var. I GAK	Var. II PAK	Var. III Ozon
Investitionskosten incl. BNK, 19% Ust	285.101 €	266.201 €	334.205 €
Betriebskosten ohne Preissteigerung	82.087 €	76.404 €	126.064 €
<b>Jahreskosten nach KVR</b>	<b>367.188 €</b>	<b>342.605 €</b>	<b>460.269 €</b>
	107%	100%	134%

Investitionskosten incl. BNK, 19% Ust	285.101 €	266.201 €	334.205 €
<i>Betriebskosten mit Preissteigerung</i>	99.720 €	92.971 €	172.526 €
<b>Jahreskosten nach KVR mit Preissteigerung Energie</b>	<b>384.820 €</b>	<b>359.172 €</b>	<b>506.731 €</b>
	107%	100%	141%

**Eventuelle Fördermittel nach ResA II sind unberücksichtigt (z.B. bis zu 70% für Mikroschadstoffelimination und 30% für Austausch des Belüftungssystems).**

Da es sich in diesem Bearbeitungsstadium der Kostenermittlung um Schätzungen handelt, sind gewisse Ungenauigkeiten hinzunehmen. Dennoch ist erkennbar, dass Variante II gegenüber den anderen Varianten nach den KVR-Jahreskosten vorteilhaft erscheint. Bei der Berücksichtigung einer Preissteigerung im Energiesektor wird dies noch deutlicher. Die Variante III hat ein relativ hohes Kostensteigerungspotential, da die Ozonbereitstellung einen sehr hohen Energiebedarf hat. Die Berechnung der Jahreskosten nach KVR mit Energiepreissteigerung ergibt eine geringere Wirtschaftlichkeit für die Ozonung gegenüber der PAK-Lösung mit Vollstrombehandlung.

## 9 Bewertungsmatrix und Verfahrensempfehlung

### 9.1 Bewertungskriterien

Die Vor- und Nachteile der verschiedenen Varianten zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Haaren werden in einer Bewertungsmatrix gegenübergestellt und bewertet. Neben den monetären Aspekten werden auch weitere Kriterien betrachtet, die eine Bewertung der verschiedenen Verfahren ermöglichen.

Die Bewertungskriterien wurden aus Erfahrungen von ähnlichen Projekten und in enger Zusammenarbeit mit Kläranlagenbetreibern abgestimmt. Ebenso wurde eine Gewichtung der einzelnen Kriterien bestimmt, die besonders für das Personal auf der Kläranlage von Interesse sind. Bei den einzelnen Kriterien können Punkte auf einer Skala von 1 Punkt (mangelhaft) bis 5 Punkte (sehr gut) erreicht werden. Diese werden mit den Faktoren 0,2 (unwichtig) bis 1 (sehr wichtig) gewichtet.

Das Kriterium der Betriebssicherheit wird sehr hoch gewichtet (Faktor 1,0). Eine zuverlässige, sichere neue Reinigungsstufe ist den Betreibern besonders wichtig. Das gegenwärtig genutzte Grundstück der Kläranlage Haaren ist sehr beengt, wodurch die Bauwerke sehr schwer erreichbar sind und die internen Zufahrtswege kaum Rangiermöglichkeit für Liefer- und Entsorgungs-LKW bieten. Jedoch sind an der Ost- bzw. Westseite der Kläranlage nach Angaben des Auftraggebers genügend Reserve-Flächen im kommunalen Eigentum vorhanden, so dass der Flächenverbrauch bei der Bewertung sehr gering ins Gewicht (Faktor 0,2) fällt.

Die Investitionskosten werden weitaus weniger hoch gewichtet (Faktor 0,4) als die Betriebs- und Jahreskosten (Faktor 1,0), da Investitionen in die Mikroschadstoffelimination vom Land NRW mit bis zu 70% (Stand 2018) gefördert werden, aber der laufende Betrieb später durch die Stadt Bad Wünnenberg zu tragen ist.

Mit dem Bau einer Eliminierungsstufe für Mikroschadstoffe sind Schadstoffe zu entfernen und nicht umzuwandeln. Die unerwünschten Transformationsprodukte, die nur bei der Ozonstufe entstehen, können durch das Nachschalten einer biologischen Stufe gemindert werden. Den Transformationsprodukten wird somit nur eine geringe Wichtung zugesprochen (Faktor 0,2).



In der heutigen Zeit ist die Nachhaltigkeit von immer größer werdendem Interesse. Die entstehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen bei den erörterten Varianten werden daher im folgenden Kapitel näher erläutert. Die Nachhaltigkeit wird für die Entscheidungsfindung einer mittleren Wichtigkeit zugeordnet (Faktor 0,6).

Die Effektivität der Schadstoffeliminierung muss bei allen 4. Reinigungsstufen gegeben sein und ist somit hoch zu gewichten (Faktor 0,8).

In den Ausführungen zur Analyse der Spurenstoffe wurde deutlich, dass der Eintrag der festgestellten Mikroschadstoffe in das Gewässer durch die Abwassereinleitung aus der Kläranlage mit verursacht wird. Bei einer Teilstrombehandlung wird eben nur ein Teil der Jahresabwassermenge hinsichtlich Mikroschadstoffelimination behandelt, bei einer Vollstrombehandlung demgegenüber die Gesamtmenge. Um die Wasserkörper des Grabens B und der Altenau wieder zu verbessern, wird der behandelten Abwassermenge eine sehr hohe Bedeutung beigemessen (Faktor 1,0).

Als Nebeneffekt einer Vollstrombehandlung sei erwähnt, dass durch den Entfall einer Regelstrategie für den Teilstrom eine einfachere und somit stabilere Betriebsweise möglich wird.

## 9.2 Anmerkungen zur CO<sub>2</sub>-Bilanz

Im Zusammenhang mit der Umweltbelastung werden vermehrt Berechnungen ange stellt, die klimatischen Auswirkungen von Produkten im zeitlichen Ablauf in Form von Lebensstadien darzustellen. Diese Anstrengungen werden mit dem Begriff CO<sub>2</sub>-Fußabdruck beschrieben. Normalerweise wird dieser in Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalent angegeben, um andere Treibhausgase mit einzubeziehen.

Laut „Desotec“, einem Aufbereitungsunternehmen aus Belgien, ist die Produktionsemis sion von Aktivkohle abhängig von der Ursprungsregion, dem eingesetzten Rohstoff, dem Energiemix und der zu erzielenden Qualität. Hinterlässt die Aktivkohle bei der Produktion noch einen verhältnismäßig hohen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von 7,05 bis 12,92 t CO<sub>2</sub>-Äquivalent je Tonne, besitzt sie nach der Wiederaufbereitung des Recyclings nur noch einen Fuß abdruck von 1,03 t CO<sub>2</sub>-Äquivalent je Tonne recyceltes Produkt. Dies ist ein zusätzlicher Fundus, der bei der Wahl einer GAK-Anlage in Betracht gezogen werden sollte.

Das verhältnismäßige Treibhauspotential verschiedener Verfahrensoptionen in Abhängigkeit des DOC-Gehalts sind in der folgenden Abbildung 9-1 ersichtlich.

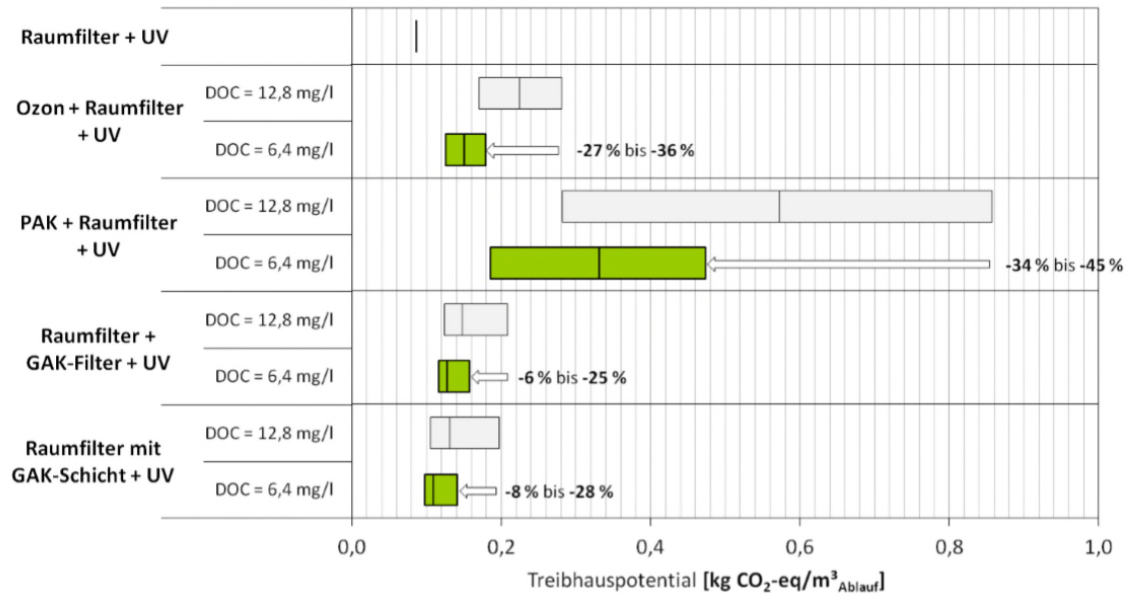


Abbildung 9-1: CO<sub>2</sub>-Fußabdruck, Sensitivität über DOC-Gehalt im Klarlauf (Dr. Remy, Kompetenzzentrum Wasser Berlin, 2017)

Das Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur und Verbraucherschutz des Landes NRW (MULNV NRW, o. J.) stellt in ihrem Handbuch „Energie in Abwasseranlagen“ den Ansatz der CO<sub>2</sub>-Bilanzierung dar, der sich nicht nur vereinzelt auf den Gasausstoß bezieht, sondern zusätzlich die Treibhausgasaufnahme des Systems betrachtet. Dieser Ansatz bezieht sich im Hinblick auf Kläranlagen verstärkt auf die exorbitanten Treibhausgaspotentiale von Methan und Distickstoffoxid, die bei der anaeroben Schlammstabilisierung und in der Belebungsstufe entstehen.

Allgemein zu unterscheiden sind zwei Emissionsarten. Während unter indirekter Emissionen der Treibhausgasausstoß zur Herstellung von benötigten Rohstoffen und der dazu benötigten aufgewandten Energie verstanden wird, bezeichnet die direkte Emission den tatsächlichen Ausstoß der Nutzung innerhalb eines Bilanzierungszeitraums.

In der folgenden Abbildung 9-2 sind beispielhaft die Ökobilanzen ersichtlich, wobei den verschiedenen Verfahrensoptionen der kumulierende Energieaufwand zugeordnet wird.



## Aufwand der 4. Reinigungsstufe

### Kumulierter Energieaufwand, fossil + nuklear

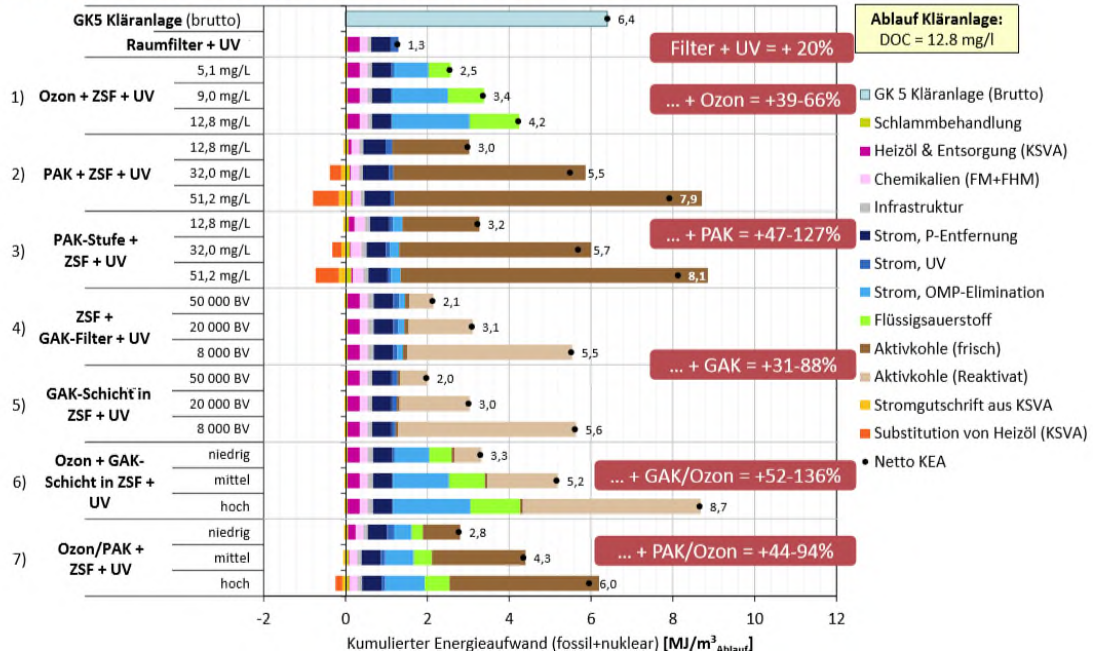


Abbildung 9-2: Ökobilanz verschiedener Verfahrensoptionen (Dr. Remy, Kompetenzzentrum Wasser Berlin, 2015)

Der obenstehenden Darstellung ist jedoch anzumerken, dass die Ozonung an sich schwer mit den beiden Adsorptionsverfahren zu vergleichen ist, da die Ozonung lediglich Schadstoffe in Transformationsprodukte umwandelt, deren Umweltauswirkungen derzeit unbekannt sind. Bei der adsorptiven Behandlung hingegen werden die Schadstoffe mitsamt der Aktivkohle aus dem System entfernt.

### 9.3 Bewertungsmatrix

Auf Basis der erörterten Kriterien wurde eine Bewertungsmatrix entwickelt (Tabelle 9-1).

Tabelle 9-1: Bewertungsmatrix der verschiedenen Varianten

Kriterium \ Variante	Faktor	I GAK		II PAK		III Ozon	
		P	gew.	P	gew.	P	gew.
Betriebssicherheit	<b>1,0</b>	4	4	5	5	4	4
Flächenverbrauch	<b>0,2</b>	4	0,8	4	0,8	4	0,8
Investitionskosten	<b>0,4</b>	3	1,2	4	1,6	2	0,8
Betriebs-/Jahreskosten	<b>1,0</b>	3	3	4	4	2	2
Transformationsprodukte	<b>0,2</b>	5	1	5	1	4	0,8
Nachhaltigkeit	<b>0,6</b>	4	2,4	3	1,8	3	1,8
Effektivität	<b>0,8</b>	5	4	5	4	4	3,2
Teil-/Vollstrom	<b>1,0</b>	4	4	5	5	4	4
<b>Summe</b>			<b>20,4</b>		<b>23,2</b>		<b>17,4</b>
			<b>Rang 2</b>		<b>Rang 1</b>		<b>Rang 3</b>

(P = Punkte, gew. = gewichtete Punkte)

Die verschiedenen Varianten erreichen zwischen 17,4 und 23,2 Punkten. Die wenigsten Punkte werden von der Variante III mit einer Ozonung erreicht. Dies lässt sich hauptsächlich auf die unerwünschten Transformationsprodukte und die relativ hohen Betriebskosten, sowie die Nachhaltigkeit zurückführen. Die Variante I mit GAK ist im Verhältnis unwirtschaftlich und erreicht 20,4 Punkte. Die Variante II ist mit 23,2 Punkten von den Lösungen zur Mikroschadstoffelimination die empfehlenswerteste. Der Vorteil für die Variante PAK Simultan mit Vollstrombehandlung lässt sich auf die niedrigen Betriebs- und Jahreskosten und den nachhaltigen Schutz der Gewässerkörper durch die Vollstrombehandlung zurückführen.

## 9.4 Verfahrensempfehlung

Für die Herstellung einer Reinigungsstufe zur Elimination von Mikroschadstoffen wurden für die konkreten Bedingungen der Kläranlage Haaren verschiedene Varianten konzipiert. Die Kostenvergleichsrechnung enthält sowohl die laufenden Kosten als auch die Investitionskosten und bietet die Grundlage für den Vergleich der Varianten bezüglich monetärer Faktoren.

Die Gesamtbewertung einschließlich der nicht monetären Faktoren in Form einer Matrix führt zu einer Empfehlung für den Betreiber:

- Die Variante I (GAK Teilstrom, Filter Vollstrom) ist mit 20,4 Punkten bei den tatsächlichen Mikroschadstoffeliminationsvarianten durchaus erwägenswert, jedoch auf Grund der Teilstrombehandlung und der Investitionskosten nicht zu empfehlen.
- Die Variante II (PAK, Vollstrombehandlung) erhält die höchste Punktzahl von 23,2 und ist bei den laufenden Kosten günstig. Die höheren Investitionen beeinflussen zwar die Jahreskosten nach KVR-Leitlinie, sind aber insgesamt auch unter Einbeziehung von Fördermitteln als moderat zu bewerten. Eine Vollstrombehandlung des Abwassers ist auch im Hinblick auf den Schutz des Gewässers aus Sicht des Verfassers empfehlenswert.
- Die Variante III (Ozon Teilstrom, Filter Vollstrom) ist bei den Investitionskosten die teuerste Variante. Unter Berücksichtigung der Preissteigerungen im Energiesektor sind die heutigen Strompreise mit Vorsicht zu betrachten. Bei der Bewertung der Faktoren in der Matrix ist die Variante III am geringsten bewertet (Punktzahl 17,4). Die Variante ist hinsichtlich Kostenvergleichsrechnung, der erwarteten Betriebskostenentwicklung sowie wegen des Erfordernisses der biologischen Nachbehandlung möglicher Transformationsprodukte nicht zu empfehlen.

**Die Variante II (PAK mit Filter in Vollstrombehandlung)  
wird vom Verfasser als Lösung für eine effektive, zukunftsorientierte und nachhaltige Reinigungsstufe für die Mikroschadstoffelimination  
auf der Kläranlage Haaren empfohlen.**

## 10 Zusammenfassung

Die Stadt Bad Wünnenberg betreibt je eine Kläranlage in dem Ortsteil Bad Wünnenberg und in dem Ortsteil Haaren. Die hier zu untersuchende Kläranlage „Haaren“ verfügt über eine Ausbaugröße von 7.700 EW. Die zweite Kläranlage Bad Wünnenberg mit einer Ausbaugröße 9.300 EW wurde hier nur zu Vergleichszwecken erwähnt. Für das Erarbeiten einer Machbarkeitsstudie zu den Möglichkeiten der Mikroschadstoffelimination auf der Kläranlage Haaren wurde von der Stadt Bad Wünnenberg das Ingenieurbüro Danjes aus Detmold beauftragt. Der Verfasser selbst arbeitet langjährig an der vom Land NRW und dem Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe herausgegebenen „Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination“ mit. Die aktuellsten wissenschaftlich-technischen Erkenntnisse der mittlerweile 3. Auflage – die noch unveröffentlicht ist – konnten somit in die vorliegende Studie einfließen.

Die OWL Umweltanalytik führte die Beprobung des Gewässers durch und testete dieses auf Mikroschadstoffe vor und nach der Einleitungsstelle der Kläranlage Haaren. Die Analyse der Proben ergab, dass **der Eintrag der Mikroschadstoffe in das Gewässer „Graben B Altenau“ durch die Abwassereinleitung aus der Kläranlage deutlich mit verursacht** wird. Es besteht also Handlungsbedarf bezüglich einer Reinigungsstufe für Mikroschadstoffe.

Als erste Aufgabe in Vorbereitung der Bemessung der Mikroschadstoffelimination muss eine Auswertung Abflüsse und Frachten der bestehenden Kläranlage erfolgen, um eventuellen Handlungsbedarf im Bestand zu erkennen.

Die Auswertung der Abflüsse nach DWA A 198 ergab für die Kläranlage Haaren, dass der **Mischwasserabfluss mit 62 bis 69 l/s anzusetzen** ist (gegenwärtig 99,30 l/s). Die Frachtberechnung ergab für 2017 eine CSB-Fracht als 85%-Wert in Höhe von 507 kg/d und damit eine **Auslastung von 4.225 Einwohnerwerten** (Ausbaugröße 924 kg/d und 7.700 EW). Die langzeitliche Betrachtung der **Abflüsse ergab** sowohl beim Trockenwetter als auch ganzjährig einschließlich Regenwetter eine **steigende Tendenz**. Anders hingegen verhält es sich bei der mittleren **CSB-Fracht, die eine deutlich abnehmende Tendenz** aufzeigt. Für die Festlegung der Auslegungswassermenge der neuen Stufe zur Mikroschadstoffelimination wurde deshalb die steigende Tendenz der Abwassermengen berücksichtigt.

Die Überprüfung der Bemessung der Kläranlage im Bestand hat ergeben, dass das **vorhandene Nachklärbecken nach heutigen Bemessungsregeln zu flach** ist und höchstens einen Volumenstrom von 53,9 l/s leisten kann (Erlaubnis 99,30 l/s). Auch im Hinblick auf eine stabile Betriebsführung und die steigenden Abflussmengen **ist ein zweites Nachklärbecken mit einer Ziel-Mischwassermenge von 25 l/s herzustellen**, so dass beide Nachklärbecken mindestens einen Gesamt-Mischwasserstrom von N1-abgemindert 50 l/s zuzüglich N2-Neu 25 l/s = 75 l/s leisten können. Die vereinzelt auftretenden Abwasserspitzen über den neu festzulegenden Mischwasserabfluss sind unter Nutzung vorhandener Bausubstanz in Form eines Regenüberlaufbeckens zu puffern, um die künftige Stufe zur Mikroschadstoffelimination in wirtschaftlichen Grenzen zu halten. Diese **Pufferung erlaubt zudem eine Kanalnetzsteuerung** bzw. -bewirtschaftung, um die über Mischwasserauslässe in das Gewässer eingeleiteten Schadstoffe zurückzuhalten, zur Kläranlage weiterzuleiten und dort zu behandeln.

Die Nachrechnung der Belebung ergab, dass das vorhandene Volumen von 2.310 m<sup>3</sup> zum heutigen Zeitpunkt und wegen der abnehmenden Fracht-Tendenz für eine Stabilisierungsanlage mit Nitrifikation als auch mit intermittierender Denitrifikation ausreichend ist. Für den künftigen stabilen Betrieb des Belebungsbeckens sollte jedoch eine Aufteilung in zwei Kammern erfolgen. Vorbehaltlich verdichteter Probenahmen und deren Auswertung stehen ca. **20 bis 25% Fracht-Reserven** zur Verfügung - jedoch **maximal 5.250 EW** und nicht die ursprüngliche Auslegungsgröße von 7.700 EW.

Nach der Untersuchung der Standard-Abwasserparameter erfolgte die Bestimmung der Auslegungswassermengen für die Mikroschadstoffelimination. Gemäß der Anleitung des Landes NRW ist im Mischsystem eine Teilstrombehandlung zulässig, wobei unter den Gesichtspunkten der Synergieeffekte auch eine Vollstrombehandlung zu bewerten ist.

Für Teilstrom wurde eine **Auslegungswassermenge von 25 l/s** ermittelt. Hierbei sind Sicherheiten wegen der geringen Datengrundlage und der steigenden Tendenz des Abwasservolumens enthalten. Im **Vollstrom sind 75 l/s** zu behandeln, wobei die gemessenen Spitzenwerte im Regenwetterfall die Anordnung eines Regenüberlaufbeckens **mit einem Volumen von 1.000 m<sup>3</sup>** unter Nutzung vorhandener Bausubstanz erfordern.

Hinsichtlich der Mikroschadstoffelimination wurden im Rahmen der Studie drei Varianten diskutiert. Als Voraussetzung für alle drei Lösungen wurde jeweils eine **Ertüchtigung des Bestandes als vorbereitende Maßnahme** konzipiert. Diese sind für den Erfolg, d.h. den sicheren Betrieb der neuen Stufe zur Mikroschadstoffelimination erforderlich und schaffen wegen der beengten Verhältnisse erst einmal Platz für die Bauwerke der Mikroschadstoffelimination.

Gleichzeitig haben die vorbereitenden Maßnahmen eine **deutliche Energieeinsparung zum Ziel**, die den zusätzlichen Bedarf der neuen Stufe kompensieren soll. Zur Ertüchtigung wurden eine neue mechanische Stufe, ein neues, tiefes Belebungsbecken und das zweite Nachklärbecken angedacht. In dem vorhandenen Belebungsbecken erfolgt dann der Einbau der Mikroschadstoffelimination bzw. ein Teilumbau zum RÜB.

Die Hauptlösungen zur neuen Stufe wenden als Verfahren 1.) die granulierten Aktivkohle im Teilstrom mit vorgeschaltetem Filter im Vollstrom, 2.) die Pulveraktivkohle im Belebungsbecken im Vollstrom oder 3.) die Ozonung mit biologischer Nachbehandlung im Teilstrom und nachgeschaltetem Filter im Vollstrom an. Diese Varianten wurden hinsichtlich ihrer technischen Machbarkeit und der geschätzten Kosten untersucht. Des Weiteren erfolgte eine Variantenbewertung mit Hilfe von nicht monetären Faktoren.

Bei den Investitionen wurden belaufen sich die Kosten für die Ertüchtigung der Kläranlage auf ca. 3,4 Mio. Euro. Die **Investitionen** der drei Varianten nur für die Mikroschadstoffelimination liegen zwischen rund **3,6 bis 5,1 Mio. Euro** einschließlich Baunebenkosten und 19% Umsatzsteuer.

In der **Gesamtheit** der vorbereitenden Maßnahmen im Bestand und der Mikroschadstoffelimination ist variantenabhängig mit **Investitionskosten in Höhe von 7,1 bis 8,5 Mio. Euro** einschließlich Baunebenkosten und 19% Umsatzsteuer zu rechnen. Die vorgenannten Zahlen sind um die **Zuwendungen nach Förderprogramm ResA II** zu vermindern, die vom Land NRW zurzeit für die Mikroschadstoffelimination in Höhe bis zu 70% und für den Austausch des Belüftungssystems in Höhe bis zu 30% gewährt werden.



Unter Abwägung aller Faktoren wurde die **Variante II Pulveraktivkohle mit Filter in Vollstrombehandlung** als sinnvollste und nachhaltigste Lösung zum Schutz der Gewässer empfohlen. Die Umsetzung der vorgeschlagenen Lösungen einschließlich der vorbereitenden Maßnahmen zur Ertüchtigung des Bestandes der Kläranlage lässt erwarten, dass künftig eine Verminderung des Eintrags von Mikroschadstoffen und als Synergieeffekt auch der überwachungspflichtigen Parameter in den Gräben B Altenau bzw. in das Grundwasser im Karstgebiet erfolgt.

Im Ergebnis der Studie zur Mikroschadstoffelimination für die Kläranlage Haaren wurde von der Verwaltung der Stadt Bad Wünnenberg angesprochen, ob gegebenenfalls auch die zweite Kläranlage Wünnenberg in das Konzept mit einzubeziehen sei. Dies könnte im Hinblick auf die Zukunftssicherheit für die Stadt Bad Wünnenberg vorteilhaft sein. Aus Sicht des Verfassers bringt hierbei die **Zusammenfassung beider Kläranlagen zu einer Zentralkläranlage** die höchste Betriebssicherheit und Effizienz auch für eine Mikroschadstoff-Eliminationsstufe. Sofern die Lösung einer zentralen Behandlungsanlage von der Bezirksregierung Detmold und dem Land NRW mit getragen wird, empfiehlt der Verfasser auch hier eine Machbarkeitsstudie, für die gegebenenfalls Zuwendungen nach ResA II in Höhe bis zu 80% möglich werden.

Der Verfasser bedankt sich bei der Stadtverwaltung Bad Wünnenberg und bei den Mitarbeitern der Kläranlage für das entgegengebrachte Vertrauen und die wertvolle Unterstützung.

Detmold, am 07.11.2018

Dipl.-Ing. M. Danjes GmbH, Detmold

Dipl.-Ing. Frank Waermer

## Literaturverzeichnis

- A 106** DWA (Hrsg.): DWA-Regelwerk: Arbeitsblatt A 106 – Entwurf und Bauplanung von Abwasserbehandlungsanlagen. Hennef: DWA, Oktober 1995
- A 131** DWA (Hrsg.): DWA-Regelwerk: Arbeitsblatt A 131 - Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen. Hennef: DWA, Juni 2016
- A 198** DWA (Hrsg.): DWA-Regelwerk (früher ATV-DVWK): Arbeitsblatt A 198 – Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen. Hennef: DWA, April 2003
- Anleitung Mikroschadstoffelimination 2018** ARGE Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW (Hrsg.): Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination, 3. Auflage - unveröffentlicht. Köln, April 2018
- Bathen 2001** Bathen, D Breitbach, M: Adsorptionstechnik. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg: 2001
- Bischof 1998** Bischof, W., Hosang, W.: Abwassertechnik. 11. Auflage Teubner-Verlag, Stuttgart: 1998
- Chemielexikon** Desorption, <http://www.chemie.de/lexikon/Desorption.html>, o. J.
- Carbo Tech** Your Adsorption Company, <http://www.carbotech.de/aktivkohle/#pulveraktivkohlen>, o. J.
- Desotec** Desotec Activated Carbon, Reaktivierte Aktivkohle sorgt für geringeren CO<sub>2</sub>-Ausstoß. <https://www.desotec.com/de>, Dezember 2017
- Dr. Remi** Remi, C., Ökobilanz verschiedener Verfahrensoptionen zur Spurenstoffelimination 2015 und Energieaufwand und CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von Aktivkohleadsorption und Ozonung zur Spurenstoffentfernung in Berlin 2017, Kompetenzzentrum Wasser Berlin
- DVGW W 213-6** DVGW-Merkblatt W 213-6: Filtrationsverfahren zur Partikelentfernung; Teil 6: Überwachung mittels Trübungs- und Partikelmessung. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. Bonn: Gas und Wasser, Juni 2005
- DVGW W 239** DVGW W 239 (A): Entfernung organischer Stoffe bei der Trinkwasseraufbereitung durch Adsorption an Aktivkohle. Technische Regel – Arbeitsblatt, DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. – Technisch-wissenschaftlicher Verein, Bonn, 2011
- Ecke** Ecke D., Mikroplastik in Abwasseranlagen. Detmold 2018

- MULNV NRW** Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Energie in Abwasseranlagen Handbuch NRW, 2. Vollständig überarbeitete Fassung, Düsseldorf o. J.
- Firk 2013** Firk, W., Dr.-Ing.: Verfahren zur Elimination von Spurenstoffen auf kommunalen Kläranlagen. 14. Kölner Kanal- und Kläranlagenkolloquium 2013. In: Aachener Schriften zur Stadtentwässerung, Band 17
- Gujer 2007** Gujer, W.: Siedlungswasserwirtschaft. 3. Auflage Springer-Verlag Berlin, Heidelberg: 2007
- Helsa** helsa – Innovationen aus Tradition, <https://www.helsa.com/>, Gefrees o. J.
- Henning 1991** Henning KH, Degel J: Aktivkohlen – Herstellung und Produkteigenschaften. Vortrag Seminar „Aktivkohle in Technik und Umweltschutz“ Wuppertal: April 1991
- Hydroingenieure** Hydro-Ingenieure Planungsgesellschaft für Siedlungswasserwirtschaft mbH, Machbarkeitsstudie zur Spurenstoffelimination Harsewinkel. Düsseldorf, 2012
- Maier** Maier D., Gilbert E., Wasserozonung in der Praxis. R. Oldenburg Verlag München Wien, 1993
- Hesse, S 2001** Hesse, S: Anwendung von Biofilm – Reaktoren für die Charakterisierung der biologischen Eliminierbarkeit von Abwasserinhaltsstoffen.: R. Dissertation, Universität Fridericiana Karlsruhe
- Metzger 2010** Metzger, S.: Einsatz von Pulveraktivkohle zur weitergehenden Reinigung von kommunalem Abwasser. München: Oldenbourg Industrie, 2010
- Metzger 2010a** Metzger, S., Dr.-Ing.: Aktivkohle in der Abwasserreinigung – vom Versuch zum technischen Maßstab. Symposium in Mannheim. In: Korrespondenz Abwasser, Abfall 2010 (57) Nr. 12. S. 1193-1196
- Mikroschadstoffentfernung 2015** ARGE Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW (Hrsg.): Mikroschadstoffentfernung machbar? Wesentliche Inhalte einer Machbarkeitsstudie für Anlagen zur Mikroschadstoffelimination. Köln, 20.10.2015
- Nahrstedt et al. 2013** Nahrstedt, A.; Alt, K.; Mauer, C.; Schlösser, F; Schröder, K.-H.; Schweinforth, R.; Sürder, T.: Mikroschadstoffelimination mittels granulierter Aktivkohle im Ablauf der Kläranlage Gütersloh-Putzhagen. Zwischenbericht, IWW Mülheim an der Ruhr, Förderkennziffer Bez.-Reg. Detmold M-03/12 Gt, 2013
- Nahrstedt et al. 2015** Nahrstedt, A.; Alt, K.; Schlösser, F.; Austermann, H.; Roderfeld, H.; Sürder, T.: Großtechnische Versuche zur Elimination von Spurenstoffen auf der Kläranlage Harsewinkel – Einsatz granulierter Aktivkohle. IWW Mülheim an der Ruhr, Förderkennziffer Bez.-Reg. Detmold 01/13-HA, 2015

- Nicolet-Misslbeck 2014** Nicolet-Misslbeck, L.: Mehrfachbeladung von Pulveraktivkohle in der weitergehenden Abwasserreinigung, Grundlagen und Praxisempfehlungen. Zeitschrift Korrespondenz Abwasser Abfall, Heft 3/14. Hennef: GFA, März 2014
- Pinnekamp et al. 2014** Pinnekamp, J.; Bornemann, C.; Yüse, S.; Jagemann, P.; Lyko, S.; Benstöm, F.; Montag, D.; Platz, C.; Wett, M.; Biebersdorf, N.; Kaub, J.M.; Kolisch, G.; Osthoff, T.; Taudien, Y.; Rolfs, T.; Stepkes, H.: Elimination von Arzneimitteln und organischen Spurenstoffen: Entwicklung von Konzepten und innovativen, kostengünstigen Reinigungsverfahren, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben Projekt Nr. 5: Ertüchtigung kommunaler Kläranlagen, insbesondere kommunaler Flockungsfiltrationsanlagen durch den Einsatz von Aktivkohle (MIKROFlock) gerichtet an das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, (AZ IV+7+042 600 001E), 2014
- Rummler + Hartmann** Ingenieurbüro Rummler + Hartmann GmbH, Möglichkeiten der Elimination prioritärer Stoffe in der Kläranlage Stadtlohn. Havixback, 2014
- Spurenstoffe 2015** DWA (Hrsg.): DWA-Themen: Möglichkeiten der Elimination von anthropogenen Spurenstoffen. Hennef: DWA, April 2015
- Stromach 1986** Stromach S. M., Rudd T., Lester J.N. : Anaerobic Digestion Processes in Industrial Wastewater Treatment. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg: 1986
- Tchobanoglous et al. 2003** Tchobanoglous, G.; Burton, F. L.; Stensel, H. D.: Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. 4th ed. Metcalf & Eddy Inc., New York, NY: McGraw-Hill, 2003, p. 823, 2003
- TEXTE UBA 85 / 2014** Umweltbundesamt (Hrsg.): TEXTE 85/2014 Maßnahmen zur Verminderung des Eintrags von Mikroschadstoffen in die Gewässer. Dessau-Roßlau, Januar 2015
- Waermer et al. 2015** Waermer, F.; Austermann-Haun, U.; Brandt, B.-J.; Althaus, P.; Finkemeyer, A.; Meier, J.F.; Gantner, K.: Elimination von Mikroschadstoffen durch Pulveraktivkohle und anschließender Abtrennung der Feststoffe unter Einsatz des Fuzzy-Filters auf der Kläranlage Barntrup, Testphase 2014 „Betriebliche Aspekte“, Machbarkeitsstudie, gefördert durch das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Bezirksregierung Detmold, Dezernat 54.8; 2015
- Wedler** Wedler, G., Die Einführung in die Physisorption und Chemisorption. Verlag Chemie, 1970
- Wikipedia 2015** Mischsystem. URL <http://de.wikipedia.org/wiki/Mikroplastik> – Datum: 23.10.2015

## Autorenverzeichnis

Autor	Bearbeitete(s) Kapitel einschl. Anhänge
Waermer, F. Radeck, T. Finkemeyer, A. Nagel, M.	1. bis 10. Anhänge 7-1 bis 7-3, 8-1 bis 8-7 Zeichnungen
Noll, R.	Anhänge 2-1 bis 2-4

## Anhang

Anhang 2-1 Untersuchungsbefund Ablauf Nachklärung (72 h Mischprobe), OWL Umweltanalytik GmbH vom 01.08.2016

Anhang 2-2 Untersuchungsbefund Ablauf Nachklärung (72 h Mischprobe), OWL Umweltanalytik GmbH vom 13.08.2018

Anhang 2-3 Messergebnisse und Statistische Auswertung, Ablauf Nachklärung, OWL Umweltanalytik GmbH vom 13.08.2018

Anhang 2-4 Untersuchungsbefund Gewässers oberhalb/unterhalb Ablauf Kläranlage (qualifizierte Stichprobe), OWL Umweltanalytik GmbH vom 13.08.2018

Anhang 7-1 Verfahrenstechnische Berechnung: Variante I GAK

Anhang 7-2 Verfahrenstechnische Berechnung: Variante PAK

Anhang 7-3 Verfahrenstechnische Berechnung: Variante III Ozon

Anhang 8-1 Investitionskosten Ertüchtigung Kläranlage

Anhang 8-2 Investitionskosten Variante I GAK-Adsorber

Anhang 8-3 Investitionskosten Variante II PAK

Anhang 8-4 Investitionskosten Variante III Ozon

Anhang 8-5 Ermittlung des Energiebedarfs

Anhang 8-6 Laufende Kosten

Anhang 8-7 Jahreskosten nach KVR-Leitlinie