



Stadt Brakel

- Der Bürgermeister -

Kreis: Höxter - Reg.-Bez.: Detmold

Elimination von Mikroschadstoffen auf der Kläranlage Brakeler Märsch

- Machbarkeitsstudie -

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



Aufgestellt im Oktober 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, www.danjes.de
Proj.-Nr.: 0309.01.01



Inhalt

Erläuterungsbericht

Anhang

- Analysen
- Raumordnungskonzept
- Verfahrenstechnische Berechnungen
- Ermittlung der Kosten

Planunterlagen

Plan	Bezeichnung	Maßstab
1	Übersichtskarte: Kläranlagen Brakel, Hembsen und Bellersen	1 : 50.000
2	Lageplan Kläranlage, Variante I GAK	1 : 500 / 2.000
3	Lageplan Kläranlage, Variante II PAK mit Filter	1 : 500 / 2.000
4	Lageplan Kläranlage, Variante III Ozon	1 : 500 / 2.000
5	Lageplan Kläranlage, Zwischenbauzustand	1 : 500 / 2.000

Erläuterungsbericht



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

Projektpartner

Vielen Dank für die hervorragende Zusammenarbeit:

Bauherr	Adresse	Mitarbeit
	Stadt Brakel Der Bürgermeister Fachbereich Zentrale Dienste, Finanzen, Wasser- u. Abwasserwerk Am Markt 4, 33034 Brakel http://www.brakel.de	Herr Münstermann, Herr Frewer, (Verwaltung), Herr Ulrich (Kläranlage)
Machbarkeitsstudie		
	Dipl.-Ing. M. Danjes GmbH Beratende Ingenieure Schubertplatz 15, 32756 Detmold Telefon +49 5231 9799-0 info@danjes.de , www.danjes.de	Herr Waermer Beratender Ingenieur (Projektleitung, Verfahrenstechnik), Herr Radeck (Studie, Kosten) Herr Finkemeyer (Konstruktion) Herr Nagel (Literatur)
Probenahme und Analytik		
	OWL Umweltanalytik GmbH Westring 93 33818 Leopoldshöhe Telefon +49 5202 92332-0 www.owlumwelt.de	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

Projektpartner	1
Inhaltsverzeichnis	2
Abkürzungsverzeichnis	4
Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	9
1 Veranlassung	10
2 Vorhandene Verhältnisse	12
2.1 Kurzbeschreibung der Kläranlage	12
2.2 Situation der Mischwasserbehandlung	17
2.3 Analyse zu den Spurenstoffen.....	17
2.4 Aussagen zum Gewässerzustand	22
2.5 Aktuelle biologisch-ökologische Gewässeruntersuchung	26
3 Abwasserparameter der Kläranlagen (IST-Zustand)	27
3.1 Vorhandene Datengrundlage	27
3.2 Abflüsse nach DWA A 198	28
3.2.1 Kläranlage Brakeler Märsch.....	28
3.2.2 Kläranlagen Bellersen und Hembsen.....	33
3.3 Frachten und Konzentrationen nach DWA A 198	41
3.3.1 Kläranlage Brakeler Märsch.....	41
3.3.2 Kläranlagen Bellersen und Hembsen.....	45
3.4 Tendenzen der Abflüsse und Frachten.....	48
4 Anforderungen und Auflagen	49
4.1 Raumordnungskonzept für die Kläranlage.....	49
4.2 Einfluss einer möglichen Trinkwasserenthärtung.....	51
4.3 Einfluss von Wartung und Substanzerhalt	52
4.4 Vorgaben für die Einleitung und das Gewässer.....	53
4.5 Überprüfung der Bemessung der Kläranlage	55
5 Grundlagen der Mikroschadstoffelimination	57
5.1 Verfahrenstechniken zur Mikroschadstoffelimination	57
5.2 Grundlagen der Aktivkohleadsorption.....	59
5.3 Anlagen zur Pulveraktivkohle-Adsorption	70
5.4 Anlagen mit granulierter Aktivkohle	72
5.5 Grundlagen der chemischen Oxidation mit Ozon	75
5.6 Anmerkung zu Oxidations- und Adsorptionsverfahren.....	79
5.7 Erforderliche Vor- und Nachbehandlung	80

5.7.1	Vorbehandlung bei Granulierter Aktivkohle	80
5.7.2	Nachbehandlung bei Pulveraktivkohle	80
5.7.3	Nachbehandlung bei Ozon	84
5.8	Kriterien zur Verfahrenswahl	85
5.9	Mögliche Verfahrenskombinationen	86
5.10	Erwartete Synergieeffekte	87
6	Dimensionierung der Mikroschadstoffelimination	89
6.1	Auslegungswassermenge	89
6.2	Verfahrenstechnische Auslegung	94
6.3	Erwartete Synergieeffekt bei Verfahren mit PAK	95
6.4	Laborversuche zum Bemessungsansatz	96
7	Variantenbetrachtung für die KA Brakeler Märsch	97
7.1	Festlegung der Varianten	97
7.2	Vorbereitende Maßnahmen	99
7.3	Variante I GAK-Adsorber	103
7.4	Variante II PAK Vollstrom	104
7.5	Variante III Chemische Oxidation mit Ozon	105
8	Kostenermittlung für die KA Brakeler Märsch	107
8.1	Kostengrundlagen	107
8.2	Investitionskosten	110
8.3	Laufende Kosten Mikroschadstoffelimination	111
8.4	Jahreskosten Mikroschadstoffelimination (KVR-Leitlinie)	113
9	Bewertungsmatrix und Verfahrensempfehlung	116
9.1	Bewertungskriterien	116
9.2	Anmerkungen zur CO2-Bilanz	117
9.3	Bewertungsmatrix	120
9.4	Verfahrensempfehlung	121
10	Zusammenfassung	122
	Literaturverzeichnis	126
	Autorenverzeichnis	129
	Anhang	130

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung	Einheit
AbwAG	Gesetz über Abgaben für das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserabgabengesetz)	
AF	Ablauf Filter	
A_{Filter}	Netto-Filterfläche	cm ²
AFS	Abfiltrierbare Stoffe	mg/l
AK	Aktivkohle	
Al	Aluminium	
BB	Belebungsbecken	
BSB ₅	Biochemische Sauerstoffbedarf über 5 Tage	mg/l
BV	durchgesetzte Bettvolumina, als m ³ Abwasser pro m ³ Adsorbens	[-]
c	Restkonzentration eines Stoffes nach Versuchsende	mg/l bzw. µg/l
c ₀	Ausgangskonzentration eines Stoffes in der Blindprobe	mg/l bzw. µg/l
C _{Ab}	Konzentration des Parameters im Ablauf	mg/l bzw. µg/l
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf	mg/l
C _{XXX}	Konzentration des Parameters XXX, in der homogenisierten Probe	mg/l
C _{Zu}	Konzentration des Parameters im Zulauf	mg/l bzw. µg/l
d _{Filter}	netto Durchmesser der Aktivkohle-Filtersäule	cm
Diatrizoat	ionisches, stark hypertones Röntgenkontrastmittel, übliche Bezeichnung ist: Amidotrizoessäure	
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 _{Filter}	Nettohöhe der Aktivkohle-Filtersäule	cm
h _{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	
k _F	Freundlichkonstante	

Abkürzung	Erläuterung	Einheit
m _{GAK}	Aktivkohle-Einwaage	g
N	Stickstoff	
NH ₄ -N	Ammonium-Stickstoff	mg/l
N _{ges}	N _{ges,anorg} : Summe anorganischer Stickstoff, aus Ammonium, Nitrit und Nitrat	mg/l
NKB	Nachklärbecken, auch N1, 2 oder NK	
NK	Nachklärbecken	
NTU	Trübung (Nephelometric Turbidity Unit), vorwiegend gebräuchlich in der USA, identisch mit FTU	
OGewV	Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (Oberflächengewässerverordnung – OGewV)	
P	Phosphor	
p	Gewicht der eingesetzten ofentrockenen Aktivkohle	g
PAK	Pulveraktivkohle	
P _{ges}	Summe P: aus Orthophosphat, Mono- und Polyphosphate sowie organisch gebundenem Phosphor	mg/l
P _{ges,gelöst}	wie vor, jedoch aus der filtrierten Probe zwecks Entfernung von PAK für photometrische Küvettentest-Auswertung	mg/l
PO ₄ -P	Orthophosphat	mg/l
q	Aufnahmevermögen (Beladung) einer Aktivkohle	mg/g bzw. µg/l
q _{max}	maximal theoretische Beladung	mg
Q _{Zu}	Abwasserzufluss	l/h
R ²	Bestimmtheitsmaß	[-]
RKM	Röntgenkontrastmittel	
RW	Regenwetter	
SAK	Spektraler Absorptionskoeffizient	
SB	Sedimentationsbecken, speziell für PAK-haltiges Abwasser	
S _{XXX}	Konzentration des Parameters XXX in der filtrierten Probe (0,45 µm Membranfilter)	mg/l
TS	Konzentration der Trockensubstanz	kg/m ³
TW	Trockenwetter	
UPM	Umdrehungen pro Minute	
ÜK	Überschusskohle aus der Adsorptionsstufe	
ÜS	Überschussschlamm aus der biologischen Reinigung	
V	Volumen	l
v _f	Filtergeschwindigkeit	m/h
V _{GAK}	Volumen der Aktivkohle	l
WRRL	„Richtlinie 2000/60/EG zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpoltik“ (Wasserrahmenrichtlinie)	
ZF	Zulauf Filter	

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Luftbild Kläranlage Brakeler Märsch (Quelle: Stadt Brakel 2017)	12
Abbildung 2-2: Lageplan Kläranlage Brakeler Märsch (Plangrundlage: Ing.-Büro Turk, 2012)	16
Abbildung 2-3: System der Mischwasserbehandlung (Entwurf 1979)	17
Abbildung 2-4: Lage der Einleitungsstelle und der unterhalb liegenden GÜS-Messstelle	22
Abbildung 2-5: Auszug aus Wasserkörpersteckbriefen der Brucht, Wasserkörper ID 4528_0	23
Abbildung 2-6: festgestellte Metalle	24
Abbildung 2-7: Wasserkörper ID 452_0 an der GÜS Messstelle 749618	24
Abbildung 2-8: Flammschutzmittel sind weiter unterhalb in der Nethe, Wasserkörper ID 452_0 an der GÜS Messstelle 749618 bei Amelunxen in Biota, d.h. konkret in Fischen fest-gestellt worden	25
Abbildung 3-1: Jahrgang des täglichen Abflusses 2016	28
Abbildung 3-2: Tägliche Abflüsse in den Jahren 2014, 2015 und 2016	29
Abbildung 3-3: Jahrgang des Abflusses an Trockenwettertagen 2014, 2015 und 2016	29
Abbildung 3-4: Polygon der niedrigsten Abflüsse in 21-Tage-Intervallen 2016	30
Abbildung 3-5: Abflüsse von berechneten Trockenwettertagen 2016	30
Abbildung 3-6: Unterschreitenshäufigkeit des Abflusses an Trockenwettertagen und an berechneten Trockenwettertagen 2014, 2015 und 2016	31
Abbildung 3-7: Maximale, mittlere und minimale stündliche Trockenwetterabflüsse 2016	31
Abbildung 3-8: Verhältnswerte $Q_{T,h,max}/Q_{T,d}$ und $Q_{T,h,min}/Q_{T,d}$ 2016	32
Abbildung 3-9: Kläranlage Bellersen - Jahrgang des täglichen Abflusses 2016	33
Abbildung 3-10: Kläranlage Bellersen - Polygon der niedrigsten Abflüsse in 21-Tage-Intervallen 2016	34
Abbildung 3-11: Kläranlage Bellersen - Abflüsse von berechneten Trockenwettertagen 2016	34
Abbildung 3-12: Kläranlage Bellersen - Unterschreitenshäufigkeit des Abflusses an berechneten Trockenwettertagen 2016	35
Abbildung 3-13: Kläranlage Bellersen - Maximale, mittlere und minimale stündliche Trockenwetterabflüsse 2016	35
Abbildung 3-14: Kläranlage Bellersen - Verhältnswerte $Q_{T,h,max}/Q_{T,d}$ und $Q_{T,h,min}/Q_{T,d}$ 2016	36

Abbildung 3-15: Kläranlage Hembsen - Jahrgang des täglichen Abflusses 2016	36
Abbildung 3-16: Kläranlage Hembsen - Polygon der niedrigsten Abflüsse in 21-Tage- Intervallen 2016	37
Abbildung 3-17: Kläranlage Hembsen - Abflüsse von berechneten Trockenwettertagen 2016	37
Abbildung 3-18: Kläranlage Hembsen - Unterschreitenshäufigkeit des Abflusses an berechneten Trockenwettertagen 2016.....	38
Abbildung 3-19: Kläranlage Hembsen - Maximale, mittlere und minimale stündliche Trockenwetterabflüsse 2016	38
Abbildung 3-20: KA Hembsen - Verhältniswerte $Q_{T,h,max}/Q_{T,d}$ und $Q_{T,h,min}/Q_{T,d}$ 2016	39
Abbildung 3-21: Temperaturganglinie im biologischen Reaktor 2014, 2015 und 2016	41
Abbildung 3-22: Jahrgang der CSB-Frachten Einzelwerte, 4-Wochenmittel 2016 ...	42
Abbildung 3-23: Unterschreitenshäufigkeit der CSB-Frachten 2014, 2015 und 2016 ..	42
Abbildung 3-24: Jahrgang des Verhältnisses C_{TKN} / C_{CSB} im Jahr 2016.....	43
Abbildung 3-25: Jahrgang des Verhältnisses C_P / C_{CSB} im Jahr 2016	43
Abbildung 3-26: Jahrgang des Schlammindex ISV 2014, 2015 und 2016	44
Abbildung 3-27: Jahrgang der CSB-Frachten für Bellersen 2017/18	45
Abbildung 3-28: Jahrgang der CSB-Frachten für Hembsen 2017/18.....	45
Abbildung 3-29: Unterschreitenshäufigkeit CSB-Frachten Bellersen 2017/18	46
Abbildung 3-30: Unterschreitenshäufigkeit CSB-Frachten Hembsen 2017/18.....	46
Abbildung 3-31: Tendenz Abflüsse und Frachten KA Brakeler Märsch, 2005 - 2016 ..	48
Abbildung 4-1: Grundkonzept Raumordnung der Kläranlage	49
Abbildung 5-1: Mikroschadstoffelimination in vorhandenen Reinigungsstufen einer Kläranlage	57
Abbildung 5-2: Verfahren zur gezielten Mikroschadstoffelimination.....	58
Abbildung 5-3: Verwendete Definitionen und Begriffe (nach Bathen 2001)	59
Abbildung 5-4: Gibbs'sche Phasengrenze (Bathen und Breitbach, 2001)	60
Abbildung 5-5: Prozessmodell zur Herstellung von Aktivkohle (Dr. Remy, Kompetenzzentrum Wasser Berlin, 2017).....	60
Abbildung 5-6: Porenstruktur von Aktivkohle (helsa, 2017)	61
Abbildung 5-7: Schematische Porenstruktur von Aktivkohle (Metzger, 2010).....	62
Abbildung 5-8: Abstandsabhängige potentielle Energie eines Adsorptivs an einem Adsorbens (Wedler, 1970)	64
Abbildung 5-9: Transportschritte der Aktivkohleadsorption (Metzger, 2010).....	66
Abbildung 5-10: Transportmechanismen bei der Aktivkohleadsorption (Hydroingenieure, 2012)	66

Abbildung 5-11: Teilschritte der Adsorption (nach Bathen 2001).....	67
Abbildung 5-12: Beladungsprofil eines Aktivkohlefilters (Hydroingenieure, 2012)	68
Abbildung 5-13: Aufnahme eines Isothermenpunktes (Metzger, 2010)	69
Abbildung 5-14: Möglichkeiten zur Einbindung der PAK-Dosierung (Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW, 2018)	71
Abbildung 5-15: Geschlossener einstufiger Aktivkohledruckfilter (Bathen, 2001)	73
Abbildung 5-16: Skizze Verfahren der Ozonung (Spurenstoffe 2015)	76
Abbildung 5-17: Schematische Darstellung Ozonerzeugungsanlage (Gujer 2007)	78
Abbildung 5-18: Schwarzgrad verschiedener PAK-Einwaagen (Metzger, 2010)	81
Abbildung 5-19: Vergleich von Trübungswerten mit Partikelkonzentrationen für verschiedene Roh- und Reinwässer (DVGW-Arbeitsblatt W 213-6), ergänzt durch Danjes	82
Abbildung 6-1: Ermittlung der behandelbaren Wassermenge für das Jahr 2014	90
Abbildung 6-2: Ermittlung der behandelbaren Wassermenge für das Jahr 2015	90
Abbildung 6-3: Ermittlung der behandelbaren Wassermenge für das Jahr 2016	91
Abbildung 6-4: Ermittlung der behandelbaren Wassermenge für das Jahr 2017	91
Abbildung 7-1: Teil- bzw. Vollstrombehandlung bei Einsatz von GAK.....	98
Abbildung 7-2: Vollstrombehandlung bei Einsatz von PAK	98
Abbildung 7-3: Teil- bzw. Vollstrombehandlung bei Einsatz von Ozon	98
Abbildung 7-4: Verfahren Variante I - Fuzzy-Filter Vollstrom vor GAK-Adsorber Teilstrom.....	103
Abbildung 7-5: Verfahren Variante II - PAK mit gemeinsamer Schlammbehandlung und nachgeschaltetem Fuzzy-Filter	104
Abbildung 7-6: Verfahren Variante III – Teilstrom Ozon, danach Fuzzy-Filter Vollstrom.....	105
Abbildung 9-1: CO ₂ -Fußabdruck, Sensitivität über DOC-Gehalt im Klarlauf (Dr. Remy, Kompetenzzentrum Wasser Berlin, 2017).....	118
Abbildung 9-2: Ökobilanz verschiedener Verfahrensoptionen (Dr. Remy, Kompetenzzentrum Wasser Berlin, 2015).....	119

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Technische Kurzbeschreibung der Kläranlage Brakeler Märsch.....	15
Tabelle 2-2: Vergleich wichtiger Parameter vorgefundener Mikroschadstoffe April 2018	19
Tabelle 2-3: Vergleich wichtiger Parameter vorgefundener Mikroschadstoffe Aug. 2018	20
Tabelle 2-4: Auffällig hohe Ablaufwerte der Kläranlage im Vergleich	21
Tabelle 3-1: Abwassermengen Ablauf Kläranlage: Entwurf und Berechnung A 198....	32
Tabelle 3-2: Abwassermengen Kläranlagen Bellersen, Hembsen: Berechnung A 198	40
Tabelle 3-3: Frachten und Konzentrationen Kläranlage Brakel: Entwurf, Berechnung.	44
Tabelle 3-4: Frachten und Konzentrationen Bellersen, Hembsen, Berechnung A 198	47
Tabelle 5-1 Porengrößen	62
Tabelle 5-2: Vor- und Nachteile von PAK.....	74
Tabelle 5-3: Vor- und Nachteile von Ozonierung und PAK-Adsorbition.....	85
Tabelle 6-1: arithmetisches 3-Jahresmittel der $Q_{T,h,max}$ der letzten 3 Jahre.....	89
Tabelle 6-2: Jahresschmutz-/abwassermenge der letzten 3 Jahre.....	92
Tabelle 6-3: Anteil der behandelbaren Wassermengen der letzten 3 Jahre	92
Tabelle 6-4: Berechnete Abwassermengen Ablauf Kläranlage nach A 198.....	93
Tabelle 6-5: Charakteristische Daten von PAK im Vergleich zum Belebtschlamm	95
Tabelle 7-1: Festlegung der Varianten für die Kläranlage Brakel	97
Tabelle 7-2: Vorbereitende Maßnahmen zur Ertüchtigung der Kläranlage	99
Tabelle 7-3: Bauwerkskonzept zu den vorbereitende Maßnahmen	100
Tabelle 8-1: Kostengrundlage für Ertüchtigung des Kläranlagenbestandes	107
Tabelle 8-2: Kostengrundlagen Variante I bis III.....	107
Tabelle 8-3: Preisrecherche für Kostenermittlung	109
Tabelle 8-4: Ermittlung der Investitionskosten: Ertüchtigung der Kläranlange	110
Tabelle 8-5: Ermittlung der Investitionskosten: Mikroschadstoffelimination und Gesamtkosten.....	110
Tabelle 8-6: Kostengrundlage für die laufenden Kosten.....	112
Tabelle 8-7: laufende Kosten (brutto einschl. 19% Ust., gerundet).....	113
Tabelle 8-8: Jahreskosten der Mikroschadstoffelimination nach KVR (brutto, gerundet)	115
Tabelle 9-1: Bewertungsmatrix der verschiedenen Varianten	120

1 Veranlassung

Die Stadt Brakel betreibt die Kläranlage „Brakeler Märsch“ mit mechanisch-biologischer Reinigung, Stickstoff- und Phosphorelimination sowie aerober Schlammstabilisierung. Die Kläranlage besitzt keine Filtration. Nach Angaben des Auftraggebers beträgt die Ausbaugröße 22.000 EW mit einer derzeitigen Auslastung von ca. 16.000 EW. Sie ist der Größenklasse 4 zuzuordnen. Das Einzugsgebiet wird historisch bedingt im Bereich der Kernstadt im Mischsystem entwässert; während die neueren Kanalnetze im Trennsystem ausgebaut worden sind.

In Zukunft ist beabsichtigt, die Kläranlage Hembesen mit einer Ausbaugröße von ca. 4.000 EW und die Kläranlage Bellersen mit einer Ausbaugröße von ca. 2.500 EW an die Kläranlage „Brakeler Märsch“ anzuschließen. Zudem besteht die Absicht der Stadt Brakel, auf dem Gelände der Kläranlage eine zentrale Trinkwasserenthärtung zu errichten. Die Einleitung des Konzentrats einschließlich Antiscalcing-Mitteln soll gegebenenfalls gemeinsam mit dem Ablauf der Kläranlage in die Brucht erfolgen.

Das Einleitungsgewässer der Kläranlage „Brakeler Märsch“ ist die Brucht. Die Brucht fließt südöstlich von Brakel in die Nethe. Die eingeleitete Jahresabwassermenge liegt nach Angaben der Stadt Brakel gegenwärtig bei ca. 1.000.000 m³.

Nach ersten Messungen durch die von der Stadt Brakel beauftragte OWL Umweltanalytik GmbH wurden im Ablauf der Nachklärung im Februar 2018 deutliche Belastungen mit Mikroschadstoffen festgestellt, die in ihrer Höhe teilweise über den Mittelwerten nach der internen Statistik der OWL Umweltanalytik GmbH liegen. Heute ist bekannt, dass Rückstände von Medikamenten, Röntgenkontrastmitteln, Kosmetika und anderen Haushaltsmitteln im kommunalen Abwasser auffindbar sind. Sie können in Kläranlagen mit herkömmlichen Technologien nicht zielgerichtet entfernt werden. Das Land Nordrhein-Westfalen fördert deshalb innovative Technologien zur Elimination dieser Mikroschadstoffe.

In Bezug auf dieses Förderprogramm hat sich die Stadt Brakel entschieden, die Möglichkeit der Nachrüstung einer Mikroschadstoff-Eliminationsstufe auf der Kläranlage „Brakeler Märsch“ in Form einer Machbarkeitsstudie zu untersuchen.

Üblicherweise wird im Rahmen solcher Studien die Elimination von Mikroschadstoffen mit adsorptiven und oxidativen Verfahren erörtert. Hierbei stehen für die Erweiterung der Kläranlage „Brakeler Märsch“ um eine solche Reinigungsstufe verschiedene Lösungen zur Verfügung. Es sind adsorptive Verfahren mit Pulveraktivkohle (PAK) und granulierter Aktivkohle (GAK), als auch oxidative Verfahren mit Ozon möglich.

Das Ziel dieser Machbarkeitsstudie ist es, die verschiedenen Konzepte hinsichtlich ihrer technischen Umsetzbarkeit, ihrer Wirtschaftlichkeit und der weiteren Vor- und Nachteile bewerten zu können.

Die Aufgabenstellung wurde mit der Bezirksregierung Detmold und der Stadt Brakel abgestimmt. Mittels Variantenbetrachtung zur Mikroschadstoff-Elimination sollen grundlegende Fragestellungen zu den Reinigungszielen, der notwendigen und wirtschaftlichen Verfahrenstechnik und den Investitions- und Betriebskosten erörtert werden. Dies soll in Form einer textlichen Erläuterung, einer überschlägigen verfahrenstechnischen Berechnung und visuell in Übersichts- und Systemzeichnungen erfolgen. Die Herstellungs- und Betriebskosten sollen in der Genauigkeit einer Kostenschätzung ermittelt werden.

Des Weiteren soll eine Vorzugslösung und deren Verfahrenstechnik unter räumlicher und verfahrenstechnischer Integration des Bestandes, wobei ausschließlich die Fläche des vorhandenen Kläranlagengeländes genutzt wird, dargestellt werden. Eventuelle künftige Erweiterungen der Kläranlage zum Beispiel durch eine anaerobe Schlammstabilisierung erfordern daher im Vorfeld einen Raumordnungsplan. Ebenso sind die kurzfristigen Aufgaben auf der Kläranlage, wie Maßnahmen der Betonsanierung an der vorhandenen Substanz wirtschaftliche und technisch bei der neuen Eliminationsstufe zu berücksichtigen.

Auf Antrag der Stadt Brakel 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 Brakel hat das Ingenieurbüro Danjes aus Detmold mit der Erarbeitung dieser Machbarkeitsstudie beauftragt. Für die Probenahme und Analytik hat die Stadt Brakel die OWL Umweltanalytik GmbH eingebunden.

2 Vorhandene Verhältnisse

2.1 Kurzbeschreibung der Kläranlage

Die Kläranlage Brakeler Märsch (Luftbild Abbildung 2-1) liegt zentral im Süden der Stadt Brakel, Kreis Höxter. Mit einer Ausbaugröße von 22.000 EWG ist sie der Größenklasse 4 zuzuordnen. Das Einleitungsgewässer ist die Brucht, welche östlich des Klärwerks verläuft und südlich von Brakel in die Nethe fließt. Diese mündet wiederum südlich von Höxter in die Weser.



Abbildung 2-1: Luftbild Kläranlage Brakeler Märsch (Quelle: Stadt Brakel 2017)

Das auf der Kläranlage Brakel ankommende Abwasser unterscheidet sich in Schmutz- und Mischwässer, welche über separate, interne Pumpwerke direkt bzw. über eine Mischwasserbehandlung den Reinigungsstufen zugeführt werden.

Der Ursprung des Mischwassers entsteht in der Altstadt der Stadt Brakel und wird über eine Betonrohrleitung DN 1000 dem Mischwasserpumpensumpf zugeführt. Das Schmutzwasser aus den Ortschaften, Frohnhausen, Auenhausen, Hampenhausen, Siddessen, Rheder, Istrup, Riesel, Hinnenburg und der Stadt Brakel wird über eine Steinzeugrohrleitung DN 500 dem Schmutzwasserpumpensumpf zugeführt.

Mit Hilfe von Einkanalradpumpen wird das Abwasser aus beiden Pumpensümpfen in einer gemeinsamen Stahlrohrleitung DN 500 zum Einlaufbauwerk Rechen gepumpt.

Die Rechenanlage der KA Brakel besteht aus einem Stufenrechen mit einem Stababstand von 8 mm. Das Rechengut gelangt zur Rechengutwaschpresse und wird anschließend in einen Container abgeworfen.

Auf der KA Brakel befindet sich ein Regenüberlaufbecken, das im Regenwetterfall eine Speicherung des erhöhten Mischwasserzuflusses ermöglicht, um eine Überlastung der Kläranlage zu verhindern. Zur Unterstützung der mechanischen Reinigung sind dem Regenüberlaufbecken zwei Rechen vorgeschaltet, die die groben Schmutzstoffe zurückhalten. Das im Regenüberlaufbecken enthaltene Mischwasser, das durch sedimentierte Schmutzstoffe angereichert ist, wird über eine geregelte Abflusssteuerung der Kläranlage zugeleitet. Das schwächer belastete Mischwasser wird nach Einstau des nutzbaren Beckenvolumens in das Gewässer Brucht abgeschlagen.

Angelieferte Fremdschlämme werden im Fäkalbunker zwischengespeichert und über eine geregelte Abflusssteuerung dem Schmutzwasserpumpensumpf zugeführt.

Die Abtrennung der absetzbaren mineralischen und der Schwimmstoffe vom zufließenden Abwasser erfolgt in zwei Schritten im Lang- Sand-Fettfang. Im ersten Schritt wird durch zugeführte Prozessluft eine walzenförmige Strömung erzeugt, die ein absetzen der mineralischen Stoffe unterstützt. Im zweiten Schritt werden Fette und Schwimmstoffe an die Wasseroberfläche befördert. Durch eine geschlitzte Tauchwand entsteht eine beruhigte Zone die als Fettfang dient. Mit Hilfe eines Räumers und einem Fettschild werden die Schwimmstoffe in eine Sammelwanne geschoben und separat entsorgt.

Die biologische Reinigungsstufe besteht aus einem Belebungsbecken mit innenliegendem und vorgeschaltetem Denitrifikationsbecken. Im Denitrifikationsbecken läuft unter anoxischen Bedingungen die Denitrifikation, also die Umwandlung von Nitrat zu elementarem Stickstoff ab. Im Belebungsbecken finden unter Belüftung die Kohlenstoffelimination und die Nitrifikation statt, also der Abbau von organischen Kohlenstoffverbindungen und die Umwandlung von Ammoniumstickstoff in Nitrat. Aus dem Belebungsbecken wird über eine Schneckenpumpe das mit Nitrat belastete Belebtschlammgemisch der vorgeschalteten Denitrifikation zugeführt.

Der notwendige Sauerstoff zur Kohlenstoffoxidation und zur Nitrifikation wird über eine feinblasige Belüftung abgedeckt. Durch Langzeitbelüftung und hohem Schlammalter wird eine aerobe Stabilisierung des Schlammes erreicht. Neben der möglichen biologischen Phosphorelimination findet eine chemische Phosphatfällung in dem Belebungsbecken statt.

Um ein Sedimentieren des Belebtschlammes im Belebungsbecken zu verhindern sind zwei Propellerrührwerke auf der Beckensohle angebracht, im Denitrifikationsbecken ein Propellerrührwerk.

Aus dem Belebungsbecken fließt das Schlammwassergemisch über zwei Dükerleitungen DN 500 dem Nachklärbecken zu. Durch Sedimentation setzt sich der Schlamm auf der Beckensohle ab und wird vom Wasser getrennt. Der sedimentierte Schlamm wird in einem Rundbecken durch am Boden laufende Räumschilde in dem mittig angeordneten Schlammtrichter geräumt und dann mit Rücklaufschneckenpumpen wieder dem Belebungsbecken zugeführt. Im Rücklaufbauwerk befinden sich zwei Rechen, die entstehende Verzapfungen dem Schlammwassergemisch entnehmen.

Ein Teil des sedimentierten und aerob stabilisierten Schlammes wird in Form von Überschussschlamm, der sich bei den Reinigungsprozessen in der Belebung durch biologischen Wachstum gebildet hat, abgepumpt und dem Schlammstilo zugeführt.

Der im Schlammstilo gespeicherte Überschussschlamm wird mit Flockungshilfsmittel und einem Dekanter entwässert. Das anfallende Zentratwasser, das hochbelastet ist, wird im Zentratbunker zwischengespeichert und mit Hilfe einer geregelten Abflusssteuerung dem Schmutzwasserpumpensumpf zugeführt. Der entwässerte Schlamm wird mit Kalk gemischt, um ihn seuchenhygienisch zu stabilisieren. In den Düngemonaten wird der stabilisierte Schlamm in der Landwirtschaft verwendet.

Das über eine gezahnte Ablaufrinne im Nachklärbecken gereinigte Abwasser fließt dem Ablaufventuri zu. Hier werden die Abwassermengen ermittelt und dem Prozessleitsystem zur Auswertung übertragen. Gleichzeitig dient dieser Messpunkt der 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 einen Absturz, der auch als Sauerstoffanreicherung dient, dem Schönungsteich zu und von dort aus in das Gewässer Brucht.

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 Brakeler Märsch

Nr.	Bauwerk / Anlage	Beschreibung	Daten
1	Rechen und Sandfang	Rechenanlage, belüfteter Sandf-Fettfang (einstraßig)	-
2	Belebungsbecken	Becken (einstraßig) mit teilweiser anaerober Stufe	2 x 30 m D V = 6.523 m ³
3	Nachklärbecken	Horizontal durchströmtes Rundbecken mit Schildräumer (einstraßig)	D = 38 m A = 1.125 m ²
4	RS-ÜS-PW	RS-Schnecken mit Rechen, Rezi-Schnecke für Denitrifikation	-
5	Ablaufmessung	Probeentnahme und Venturimessung	-
6	Schlamm-silo	Runder Behälter	V = 800 m ³
7	Schlammmentwässerung	Dekanter mit Kalksilo und Polymerstation	-
8	Schlamm-lagerplatz	Befestigter Platz	A = 751 m ²
9	Betriebsgebäude	Leitwarte, Aufenthalts- und Sanitär-räume	-
10	SW+MW-Pumpwerk	Zwei Pumpwerke mit eigenem Pumpensumpf und Zulauf	-
11	Fäkalschlamm	Annahmegebäude mit Fäkalbunker	-
12	Fällmitteldosieranlage	PE-Lagertank mit Dosieranlage	-
13	Gebläsestation	Gebläse redundant	-
14	Regenüberlaufbecken	Rundes Becken	D = 12 m V = 300 m ³
15	MW-Rechen	Stabrechen redundant	-
16	Bereich Trinkwasserversorgung	Halle als Betriebsgebäude	-

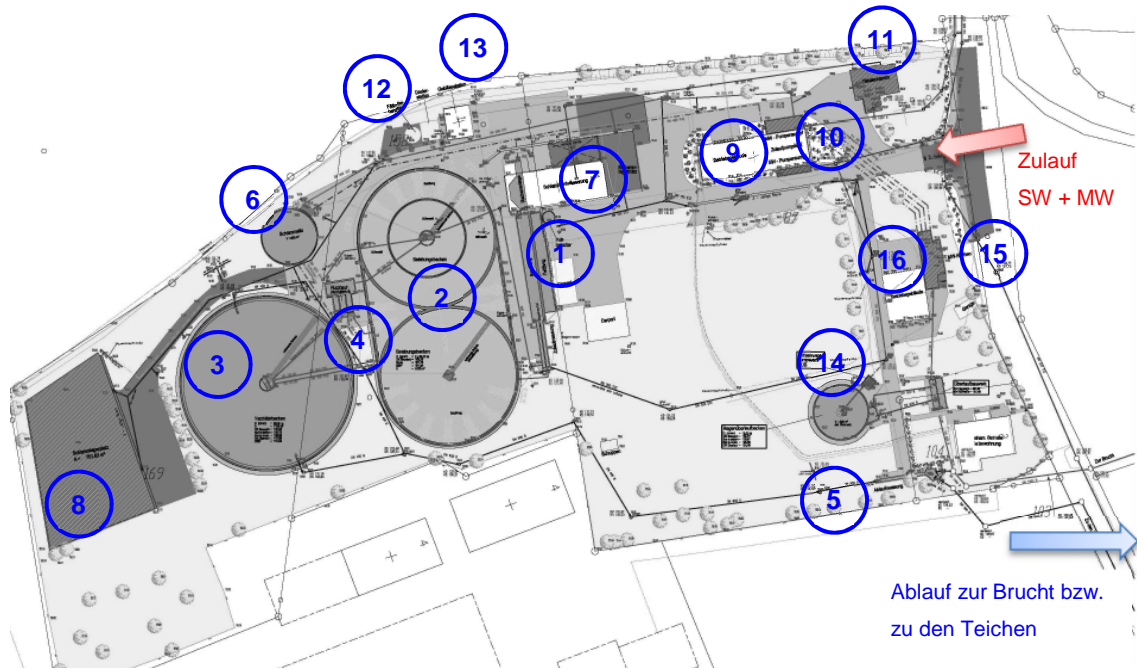


Abbildung 2-2: Lageplan Kläranlage Brakeler Märsch (Plangrundlage: Ing.-Büro Turk, 2012)

Legende:

- 1 Rechen/Sandfang
- 2 Belebungsbecken
- 3 Nachklärbecken
- 4 RS-ÜS-PW
- 5 Ablaufmessung
- 6 Schlammsilo
- 7 Schlammentwässerung
- 8 Schlammagerplatz
- 9 Betriebsgebäude
- 10 SW+MW-Pumpwerk
- 11 Fäkalschlamm
- 12 Fällmitteldosieranlage
- 13 Gebläsestation
- 14 Regenüberlaufbecken
- 15 MW-Rechen
- 16 Bereich Trinkwasserversorgung

2.2 Situation der Mischwasserbehandlung

Die Zulaufwassermenge wird durch die der Kläranlage vorgeschaltete Mischwasserbehandlung beeinflusst. Das zufließende Mischwasser wird über ein Trennbauwerk zum Mischwasserpumpwerk und weiter zum Regenüberlaufbauwerk geleitet (Abbildung 2-3).

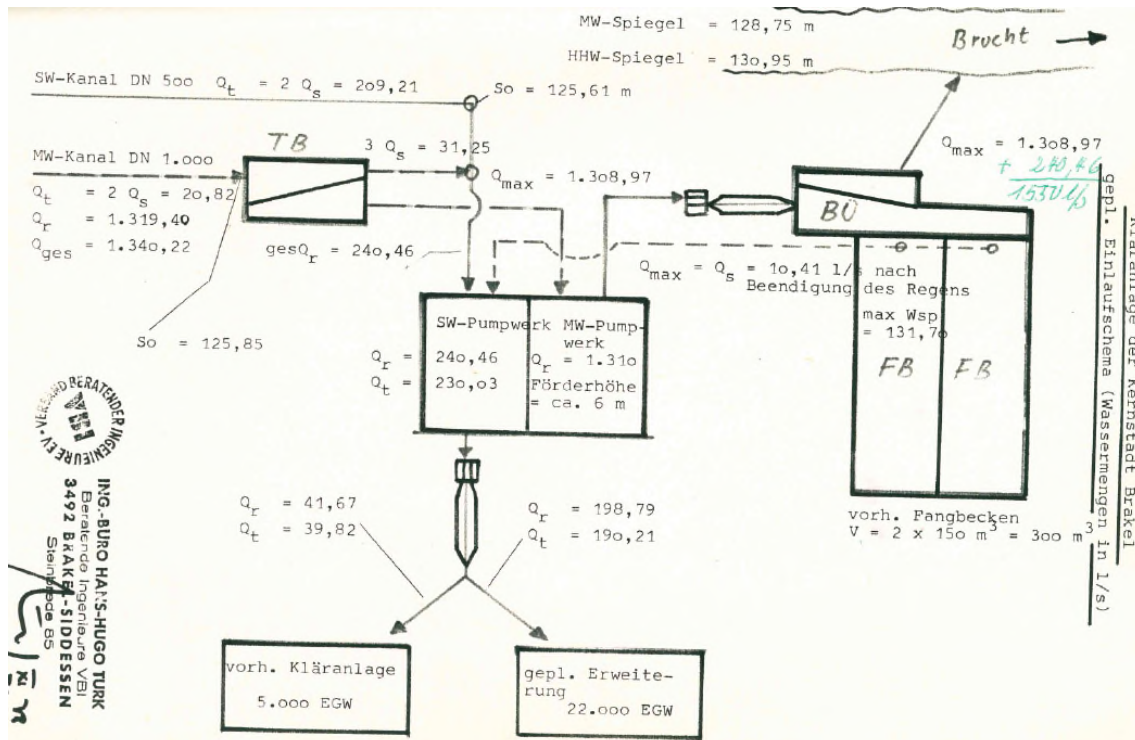


Abbildung 2-3: System der Mischwasserbehandlung (Entwurf 1979)

Die Daten der Mischwasserbehandlung sind für die weitere Auslegung der Mikroschadstoffelimination erforderlich.

2.3 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 Brakel die OWL Umweltanalytik GmbH, Leopoldshöhe, beauftragt.

Als erstes Ergebnis liegt vom Ablauf der Nachklärung eine mehrtägige Mischprobe (72 h) vom 19.02.2018 von 09.00 Uhr bis 22.02.2018 um 09:00 Uhr vor. Der Laboreingang war am 22.02.2018.

Die Tabellen der Auswertung von OWL Umweltanalytik GmbH sind im Anhang wiedergegeben. In der Tabelle im Anhang 2-1 befinden sich die Ergebnisse des Ablaufs der Kläranlage. Die Tabelle im Anhang 2-2 weist die Ergebnisse in der Einheit ng/l aus und stellt einen Bezug zu internen Statistiken der OWL Umweltanalytik GmbH zum Stand 26.03.2018 her.

Als weitere Ergebnisse liegen vom Ablauf der Nachklärung zwei mehrtägige Mischproben (72 h) vom 17.04.2018 von 10.00 Uhr bis 20.04.2018 um 10:00 Uhr (Laboreingang 20.04.2018) und vom 07.08.2018 von 08.00 Uhr bis 10.08.2018 um 08:00 Uhr (Laboreingang 10.08.2018) vor. Auch diese Tabellen der Auswertung von OWL Umweltanalytik GmbH sind im Anhang wiedergegeben (Anhang 2-3 und Anhang 2-6), wobei auch hier ein Bezug zu internen Statistiken hergestellt wurde (Anhang 2-4 und Anhang 2-7).

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.

Für die Betrachtung der Wasserqualität vor der Einleitungsstelle im Vergleich zu der Qualität nach der Einleitung durch die Kläranlage zeigt die Eintragung von Mikroschadstoffen in das Gewässer. Hierzu liegen vom Gewässer Brucht ober- und unterhalb der Kläranlageneinleitung jeweils zwei qualifizierte Stichproben vom 19.04.2018 und 08.08.2018 durch die OWL Umweltanalytik GmbH vor (Anhang 2-5 und Anhang 2-8). 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 Untersuchung vom April 2018 sind in Tabelle 2-2 dargestellt. Zusätzlich zu den Indikatorsubstanzen wurden weitere, auffällige Stoffe mit betrachtet.

Tabelle 2-2: Vergleich wichtiger Parameter vorgefundener Mikroschadstoffe April 2018

Parameter	Einheit	Gewässer oberhalb KA	Ablauf KA	Gewässer unterhalb KA
Carbamazepin	µg/l	< 0,03	0,69	< 0,03
Clarithromycin	µg/l	< 0,03	0,28	< 0,03
Diclofenac	µg/l	< 0,03	2,90	0,091
Metoprolol	µg/l	< 0,03	2,00	0,055
Sulfamethoxazol	µg/l	< 0,03	0,30	< 0,03
Benzotriazol	µg/l	0,079	4,30	0,200
4-Acetamidoantipyrin	µg/l	< 0,03	1,10	0,340
4-Aminoantipyrin	µg/l	< 0,1	2,70	< 0,1
4-Formylamino-antipyrin	µg/l	0,033	4,20	0,130
10,11-Dihydro-10,11-dihydr.	µg/l	< 0,03	1,30	0,057
Gabapentin	µg/l	< 0,03	2,70	< 0,03
Sotalol	µg/l	< 0,03	0,14	0,062
Metformin	µg/l	< 0,03	1,60	0,060
Amidotrizoesäure	µg/l	< 0,05	3,80	0,10
Iopamidol	µg/l	< 0,05	0,98	< 0,05
Valsartan	µg/l	0,033	0,95	0,140

Die Messergebnisse von Gewässer und Kläranlage aus der Untersuchung vom August 2018 sind in Tabelle 2-3 dargestellt.

Tabelle 2-3: Vergleich wichtiger Parameter vorgefundener Mikroschadstoffe Aug. 2018

Parameter	Einheit	Gewässer oberhalb KA	Ablauf KA	Gewässer unterhalb KA
Carbamazepin	µg/l	< 0,03	0,80	< 0,03
Clarithromycin	µg/l	< 0,03	0,045	< 0,03
Diclofenac	µg/l	0,015	2,20	0,023
Metoprolol	µg/l	0,058	1,70	0,094
Sulfamethoxazol	µg/l	< 0,03	0,22	< 0,03
Benzotriazol	µg/l	0,076	5,70	0,091
4-Acetamidoantipyrin	µg/l	< 0,03	0,85	0,03
4-Aminoantipyrin	µg/l	< 0,03	1,00	< 0,03
4-Formylamino-antipyrin	µg/l	0,033	1,80	0,047
10,11-Dihydro-10,11-dihydr.	µg/l	0,031	1,60	0,054
Gabapentin	µg/l	0,036	3,50	0,082
Sotalol	µg/l	< 0,03	0,099	< 0,03
Metformin	µg/l	< 0,03	0,84	0,039
Amidotrizoesäure	µg/l	0,130	3,90	0,200
Iopamidol	µg/l	0,042	0,42	0,037
Valsartan	µg/l	< 0,03	0,29	< 0,03

Bis auf die Werte für Benzotriazol und 4-Formylamino-antipyrin sowie Valsartan (im April) und Metoprolol (im August) sind die Konzentrationen im Gewässer vor der Einleitungsstelle sehr gering. Der erhöhte Wert für die letztgenannten Stoffe dürfte auf Mischwasserabschläge bzw. andere Kläranlagen im Oberlauf zurückzuführen sein.

Der Eintrag der festgestellten Mikroschadstoffe in das Gewässer ist somit eindeutig durch die Abwassereinleitung aus der Kläranlage 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 2-4 dargestellt. Über die Lokalitäten der Probenahme für die Mittelwertbildung ist dem Verfasser nichts bekannt.

Tabelle 2-4: Auffällig hohe Ablaufwerte der Kläranlage im Vergleich

Spurenstoff	Einheit	Ablauf Nachklärung			Vergleichsmittelwert 2018
		19.-22.02. 2018	17.-20.04. 2018	07.-10.08. 2018	
Clarithromycin	ng/l	1.700	280	45	300
Bisoprolol	ng/l	530	-	-	501
Carbamazepin	ng/l	560	690	800	766
Metoprolol	ng/l	2.100	2.000	1.700	1.982
Metformin	ng/l	-	1.600	840	678
Amidotrizes.	ng/l	2.100	3.800	3.900	2.488
Oxazepam	ng/l	270	-	-	159
Diclofenac	ng/l	2.000	2.900	2.200	1.956
Naproxen	ng/l	250	-	-	202
Benzotriazol	ng/l	4.900	4.300	5.700	5.471

Insgesamt liegen die Konzentrationen von fünf der sechs Leitparameter über den Vergleichs-Mittelwerten. Auch andere Spurenstoffe sind überdurchschnittlich im Ablauf der Kläranlage vertreten, wenngleich die Konzentrationen teilweise geringer sind als die der Leitparameter. Die Messwerte der Kläranlage sind als signifikant anzusehen, wie der Vergleich zu den Mittelwerten nach OWL Umweltanalytik zeigt.

2.4 Aussagen zum Gewässerzustand

Das Einleitungsgewässer der Zentralkläranlage Brakeler Märsch ist die Brucht. Die Brucht entspringt östlich von Großenbreden, einem Stadtteil der Stadt Marienmünster im Kreis Höxter. Von dort fließt die Brucht in südwestlicher Richtung nach Marienmünster-Vörden und schlängelt sich unter Beibehalt ihrer Fließrichtung nach Bellersen. Der Abfluss der Brucht gelangt über die Gewässer Nethe und Weser bis in die Nordsee. Bei der Stadt Brakel mündet die Brucht in die Nethe. Die Brucht ist etwa 21,7 km lang und hat ein Einzugsgebiet von ca. 99 km² (Wikipedia 2018).

Nach Mitteilung der Bezirksregierung Detmold (2017) stellt sich die Gewässersituation wie folgt dar:



Abbildung 2-4: Lage der Einleitungsstelle und der unterhalb liegenden GÜS-Messstelle

Bewirtschaftungsplan 2016-2021 - Steckbriefe der Planungseinheiten im Teileinzugsgebiet Weser/Weser NRW
Steckbriefe für Oberflächengewässerwasserkörper - PE_WES_1800: Nethe/Oberweser

Planungseinheit	PE_WES_1800		PE_WES_1800		PE_WES_1800		PE_WES_1800	
Wasserkörper-ID	4528_0		4528_10600		45282_0 ¹		452822_0 ¹	
Gewässername	Brucht		Brucht		Grundbach		Ender-Bach	
Wasserkörperbezeichnung	von dem Mühlenkrug in Biefersen bis zur Einmündung in die Nethe stüd. von Braket		von der Quelle bei Großenbreeden und Papenhöfen bis zum Mühlenkrug in Biefersen		von der Quelle südwestl. von Holzhausen bis zur Einmündung in den Ender-Bach		von der Quelle stüd. von Pömbßen bis zur Einmündung in den Grundbach	
LAWA-Fließgewässertyp	7		6		7		7	
Trinkwassergewinnung	nein		nein		nein		nein	
Wasserkörperausweisung	natürlich - NWB		natürlich - NWB		natürlich - NWB		natürlich - NWB	
HMWB-Falkgruppe								
Monitoringzyklus	2	3	2	3	2	3	2	3
Ökologischer Zustand	mäßig	unbefr.	unbefr.	unbefr.	unbefr.	mäßig	mäßig	mäßig
MZB Saprobie	gut	gut	gut	gut	sehr gut	sehr gut		
MZB Allgemeine Degradation	mäßig		unbefr.		gut	gut		
MZB Versauerung	nicht rel.	nicht rel.	nicht rel.	nicht rel.	nicht rel.	nicht rel.	nicht rel.	nicht rel.
MZB Gesamt	mäßig	unbefr.	unbefr.	unbefr.	gut	gut		
Fische	gut	gut	unbefr.	unbefr.			mäßig	mäßig
Makrophyten (PHYLIB)	gut	mäßig	mäßig	gut	unbefr.			
Makrophyten (NRW)		mäßig	unbefr.		unbefr.			
Phytobenthos (Diatomeen)	mäßig	mäßig	mäßig	mäßig	mäßig	mäßig		
Phytobenthos o. Diatomeen	mäßig	gut	mäßig					
Phytoplankton	nicht rel.	nicht rel.	nicht rel.	nicht rel.	nicht rel.	nicht rel.	nicht rel.	nicht rel.
Ökologisches Potenzial	nicht rel.	nicht rel.	nicht rel.	nicht rel.	nicht rel.	nicht rel.	nicht rel.	nicht rel.
MZB Allgemeine Degradation	nicht rel.	unbefr.	nicht rel.	unbefr.	nicht rel.	nicht rel.	nicht rel.	nicht rel.
MZB Gesamt	nicht rel.	nicht rel.	nicht rel.	nicht rel.	nicht rel.	nicht rel.	nicht rel.	nicht rel.
Fische	nicht rel.	nicht rel.	nicht rel.	nicht rel.	nicht rel.	nicht rel.	nicht rel.	nicht rel.
Metalle (Anl. 5 OGeWV)	gut	mäßig	gut	gut	gut	mäßig	gut	
PBSM (Anl. 5 OGeWV)		gut	gut	gut		gut		
Sonst. Stoffe (Anl. 5 OGeWV)								
ACP Gesamt (OW)	nicht einq.	nicht einq.	nicht einq.	nicht einq.	einq. gut	nicht einq.	einq. gut	
Gewässerstruktur								
Metalle n. ges. verb. (OW)	einq. gut	nicht einq.	einq. gut	einq. gut	einq. gut	nicht einq.	einq. gut	
PBSM n. ges. verb. (OW)	einq. gut	einq. gut	einq. gut	nicht einq.		nicht einq.		
Sonst. St. n. ges. verb. (OW)		einq. gut	einq. s. gut	einq. gut		einq. gut		
Chemischer Zustand ²	nicht gut	nicht gut	nicht gut	nicht gut	nicht gut	nicht gut	nicht gut	nicht gut
Ch. Zust. ohne ubiq. Stoffe	gut	gut	nicht gut	gut	gut	gut	gut	
Metalle (Anl. 7 OGeWV ³)	gut	gut	gut			gut		
PBSM (Anl. 7 OGeWV)		gut	nicht gut	gut	gut	gut		
Sonst. Stoffe (Anl. 7 OGeWV)								
Nitrat (Anl. 7 OGeWV)	gut		gut		gut		gut	

¹ siehe Kapitel 3.5 ² ohne Quecksilber in Biota ³ temporär trockenfallend

Abbildung 2-5: Auszug aus Wasserkörpersteckbriefen der Brucht, Wasserkörper ID 4528_0

Bewirtschaftungsplan 2016-2021 - Steckbriefe der Planungseinheiten im Teileinzugsgebiet Weser/Weser NRW
Steckbriefe für Oberflächengewässerwasserkörper - PE_WES_1800: Nethe/Oberweser

Planungseinheit	PE_WES_1800	PE_WES_1800	PE_WES_1800	PE_WES_1800
Wasserkörper-ID	4528_0	4528_10000	45282_0	452822_0
Gewässername	Brucht	Brucht	Grundbach	Ender-Bach
Wasserkörperbezeichnung	von dem Mühlenkrug in Belensen bis zur Einmündung in die Nethe süd. von Bracht	von der Quelle bei Großenbreeden und Papenhöfen bis zum Mühlenkrug in Belensen	von der Quelle südwestl. von Holzhausen bis zur Einmündung in den Ender-Bach	von der Quelle süd. von Pömsen bis zur Einmündung in den Grundbach
ACP Gesamt (OW)	Gesamtposphat-Phosphor	Gesamtposphat-Phosphor	Wassertemperatur	
Stoffgruppen des ökologischen Zustands / Potenzials				
Metalle (Anl. 5 OGWV)	Arsen		Arsen	
PBSM (Anl. 5 OGWV)				
Sonst. Stoffe (Anl. 5 OGWV)				
Gesetzlich nicht verbindlich				
Metalle n. ges. verb. (OW)	Beryllium; Kobalt; Kupfer; Vanadium		Barium	
PBSM n. ges. verb. (OW)		Desphenyl-chloridazon; Metazachlorsulfonsäure; Methyl-desphenylchloridazon	Desphenyl-chloridazon; Metazachlorsulfonsäure	
Sonst. St. n. ges. verb. (OW)				
Stoffgruppen des chemischen Zustands				
Metalle (Anl. 7 OGWV)				
PBSM (Anl. 7 OGWV)		Isoproturon		
Sonst. Stoffe (Anl. 7 OGWV)				

¹ ohne Quecksilber in Biota ² temporär trockenfallend

Abbildung 2-6: festgestellte Metalle

Anmerkung: oxidative Maßnahmen wie Ozonung haben keinen Einfluss auf die Entfernung von Metallen; jedoch ist eine Einlagerung im Aktivkohle-Klärschlamm anzunehmen.



Abbildung 2-7: Wasserkörper ID 452_0 an der GÜS Messstelle 749618

Bewirtschaftungsplan 2016-2021 - Steckbriefe der Planungseinheiten im Teileinzugsgebiet Weser/Weser NRW
Steckbriefe für Oberflächengewässerwasserkörper - PE_WES_1800: Nethe/Oberweser

Planungseinheit	PE WES 1800	PE WES 1800	PE WES 1800	PE WES 1800
Wasserkörper-ID	452 0	452 33356	452 42243	45216 0
Gewässername	Nethe	Nethe	Nethe	Helmerie
Wasserkörperbezeichnung	von dem Zulauf der Taufnethe in die Nethe östl. von Niesen bis zur Einmündung in die Weser östl. von Godelheim	von der Brücke in der Flörsener Str. in Willebadessen bis zum Zulauf der Taufnethe in die Nethe östl. von Niesen	von der Quelle in Neuenheerse bis zur Brücke in der Flörsener Str. in Willebadessen	von südöstl. von Laake bis zur Einmündung in die Nethe süd. von Flörsen
ACP Gesamt (OW)	Gesamtphosphat-Phosphor			Ammonium-Stickstoff, Gesamtphosphat-Phosphor
Stoffgruppen des ökologischen Zustands / Potenzials				
Metalle (Anl. 5 OGewV)				
PBSM (Anl. 5 OGewV)				
Sonst. Stoffe (Anl. 5 OGewV)				
Gesetzlich nicht verbindlich				
Metalle n. ges. verb. (OW)	Cadmium		Barium; Zink	
PBSM n. ges. verb. (OW)	Desphenyl-chloridazon; Heptachlorepoxid,dis und trans; Metazachlorsulfonsäure; Methyl- desphenylchloridazon			
Sonst. St. n. ges. verb. (OW)	10,11-Dihydro-10,11- dihydroxycarb- amazepin; 4-Acetamidoantipyrin; 4-Aminoantipyrin; 4-Formylamino- antipyrin; Amidotriazoesäure; Gabapentin; Metformin; Benzo(a)anthracen; Iopamidol			
Stoffgruppen des chemischen Zustands				
Metalle (Anl. 7 OGewV)*				
PBSM (Anl. 7 OGewV)				
Sonst. Stoffe (Anl. 7 OGewV)	2,2',4,4',5,5'-Hexa- bromdiphenylether; 2,2',4,4',5,6'-Hexa- bromdiphenylether; 2,2',4,4',5-Penta- bromdiphenylether; 2,2',4,4',6-Penta- bromdiphenylether; 2,2',4,4'-Tetra- bromdiphenylether; 2,4,4-Tri- bromdiphenylether; Summe von 6 ausqe- wählten BDE			

* ohne Quecksilber in Biota

Abbildung 2-8: Flammschutzmittel sind weiter unterhalb in der Nethe, Wasserkörper ID 452_0 an der GÜS Messstelle 749618 bei Amelunxen in Biota, d.h. konkret in Fischen fest-gestellt worden

2.5 Aktuelle biologisch-ökologische Gewässeruntersuchung

Gemäß den Auflagen des wasserrechtlichen Erlaubnisbescheides der Zentralkläranlage Brakeler Märsch wurde durch die OWL Umweltanalytik GmbH am 12.04.2018 eine biologisch-ökologische Gewässeruntersuchung nach dem PERLODES-Verfahren an zwei Kontrollabschnitten an der Brucht durchgeführt. Ein Kontrollpunkt lag oberhalb und ein Kontrollpunkt lag unterhalb der Einleitungsstelle der Kläranlage.

Hierzu liegt ein ausführlicher Bericht der OWL Umweltanalytik GmbH vom 11.06.2018 vor, der im Ergebnis auf die ökologischen Zustandsklassen der Brucht eingeht:

Zitat „Für beide betrachteten Kontrollabschnitte der Brucht wurde im Rahmen der vorliegenden Untersuchung die Zuweisung der „mäßigen ökologischen Zustandsklasse“ ermittelt. Somit lag das Ergebnis eine Stufe unterhalb des angestrebten Qualitätsziels der EU-WRRL, wobei für den unteren Abschnitt im Vergleich zum Vorbefund eine Verbesserung zu verzeichnen war.

Hinsichtlich der saprobiellen Indikation der Makrozoobenthosgemeinschaft, welche an beiden Abschnitten der „gute saprobielle Qualitätsklasse“ entsprach, war keine nennenswerte Zunahme der Belastungssituation nach Aufnahme der gereinigten Abwässer aus dem Zentralklärwerk Brakeler Märsch zu beobachten.“

3 Abwasserparameter der Kläranlagen (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 Brakel für die Jahre 2013 bis 2017 als stündliche Werte für Maximum, Minimum und als Mittel
- Abflüsse der Kläranlage Bellersen für die Jahre 2015 bis 2017 als stündliche Werte für Maximum, Minimum und als Mittel
- Abflüsse der Kläranlage Hembsen für die Jahre 2015 bis 2017 als stündliche Werte für Maximum, Minimum und als Mittel
- Betriebstagebuch der Kläranlage Brakel für die Jahre 2012 bis 2016, u.a. mit Werten für Niederschlag, Abwassertemperatur, Konzentrationen, Schlammindex
- Statistische Daten der Kläranlage Brakel für die Jahre 2002 bis 2016, u.a. mit Werten für den Trinkwasserverbrauch.

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

- Abwasserreinigung der Stadt Barkel, Kernstadt und Stadtteile Rheder, Riesel, Istrup und Hinnenburg, Erweiterung der Zentral-Kläranlage „Brakeler Märsch“ in Brakel-Kernstadt, Entwurf nach § 45 LGW NW, aufgestellt durch Planungsgemeinschaft Ing.-Büro Turk und Fa. Dr. Ing. Schreiber, vom 15.04.1979
- Abwasserreinigung der Stadt Barkel, Zentral-Kläranlage „Brakel“, Phosphatelimination und Teichanlage, Entwurf nach § 58 LGW NW, aufgestellt durch Ing.-Büro Turk, vom 15.08.1989

3.2 Abflüsse nach DWA A 198

3.2.1 Kläranlage Brakeler Märsch

Aus dem Erlaubnisbescheid nach § 8 WHG vom 19.10.2015 durch die Bezirksregierung Detmold für die „Einleitung von geklärtem Abwasser aus der Kläranlage Brakeler Märsch in die Brucht“ gehen folgende Werte hervor:

- Höchstabwasserabfluss 236 l/s bzw. 424,8 m³ / 0,5h.

Die Werte aus dem Entwurf 1979 wurden auf Basis der Auszählung von Einwohner und Gleichwerten sowie befestigten Flächen ermittelt. Nach heutigem Standard sind die Abflussmengen für eine Kläranlage nach DWA-Arbeitsblatt A 198 (April 2003) zu ermitteln.

Wichtig: Die Messung des Abflusses erfolgt am Ablauf der Kläranlage und ist somit durch die internen Pumpwerke gegenüber dem tatsächlichen Zulauf verfälscht. Die Trockenwetterabflüsse werden durch das interne Schmutzwasserpumpwerk beeinflusst, wobei die Tages- und Jahresmengen in der Summe dem Zulauf entsprechen. Die Mischwasserabflüsse werden durch das interne Mischwasserpumpwerk ausgeglichen, wobei gegebenenfalls ein Teil des Zulaufs aus dem Regenüberlaufbecken abgeschlagen wird.

Nach Auswertung der Daten ergeben sich die folgenden Bilder.

Bild C-1 gemäß DWA A 198: Jahresgang des täglichen Abflusses

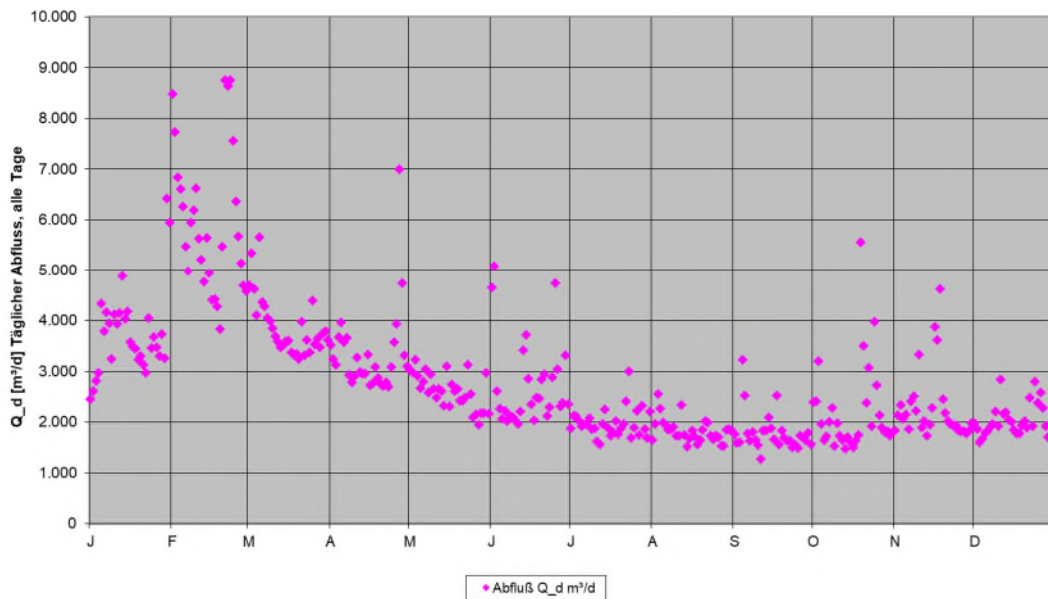


Abbildung 3-1: Jahresgang des täglichen Abflusses 2016

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

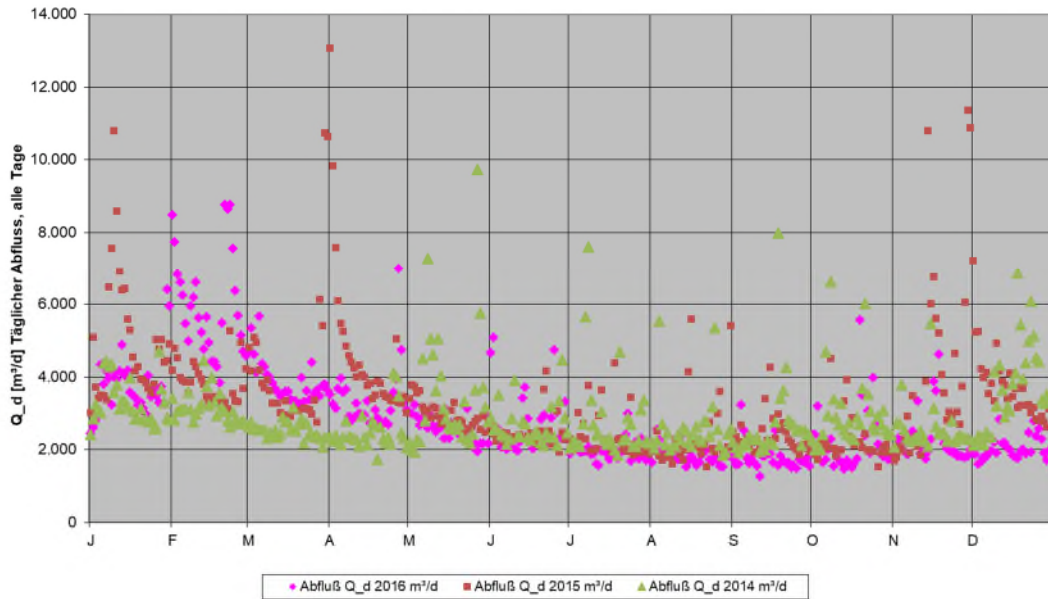


Abbildung 3-2: Tägliche Abflüsse in den Jahren 2014, 2015 und 2016

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

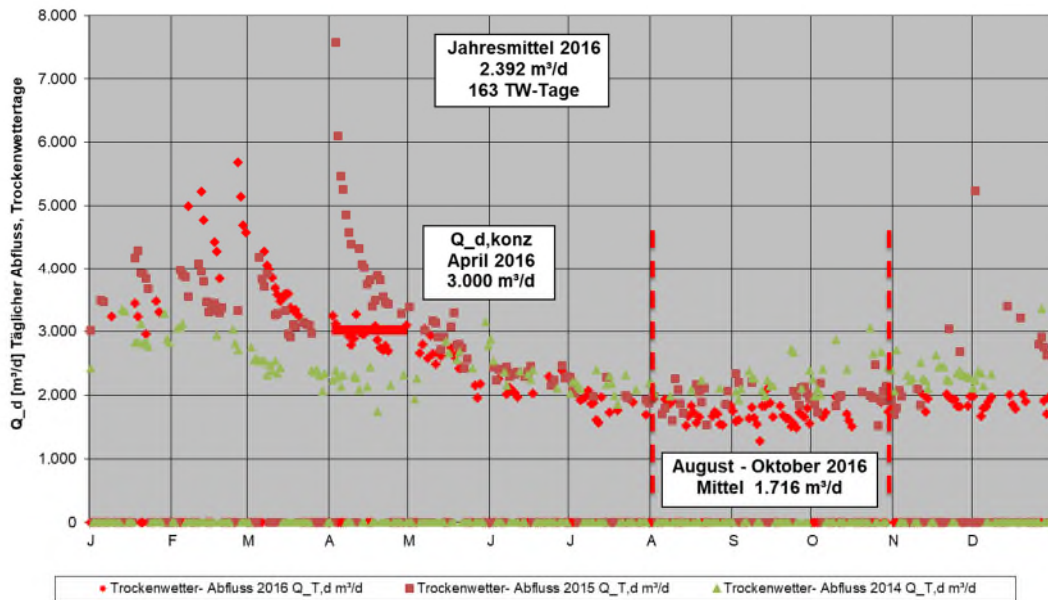


Abbildung 3-3: Jahrgang des Abflusses an Trockenwettertagen 2014, 2015 und 2016

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

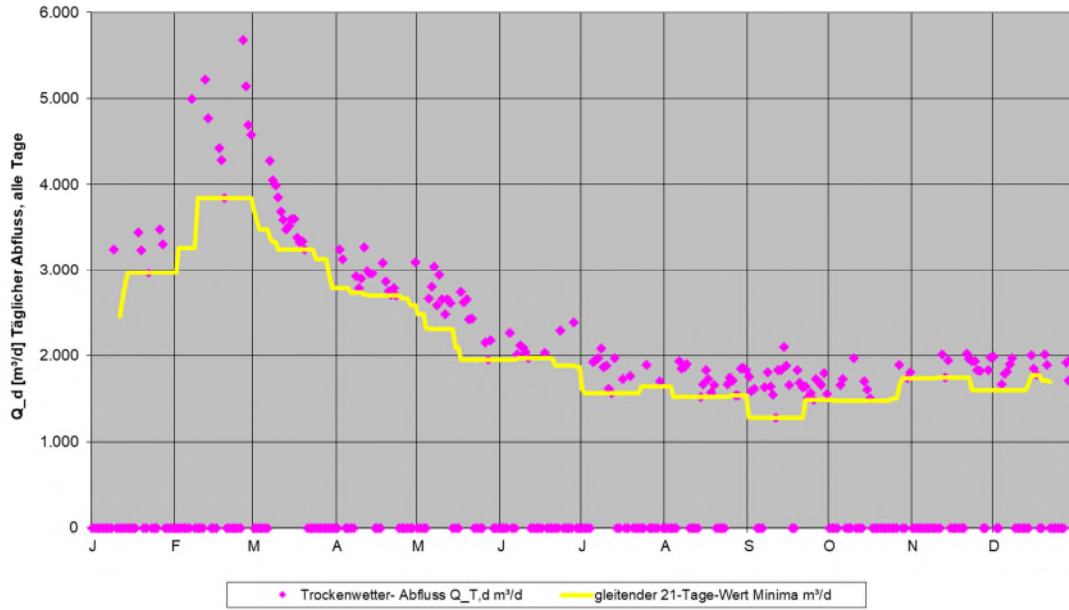


Abbildung 3-4: Polygon der niedrigsten Abflüsse in 21-Tage-Intervallen 2016

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

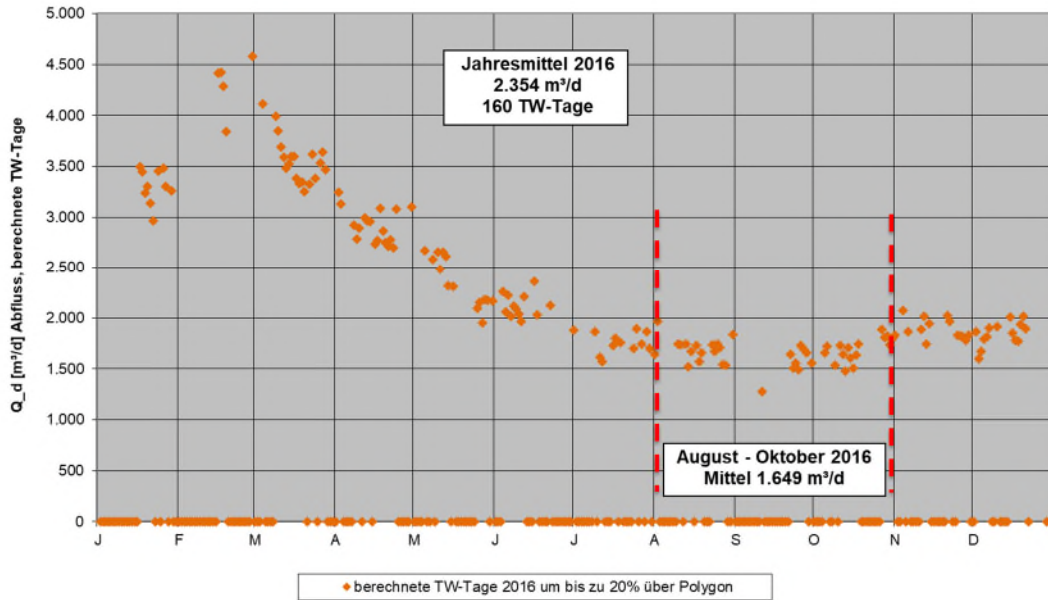


Abbildung 3-5: Abflüsse von berechneten Trockenwettertagen 2016

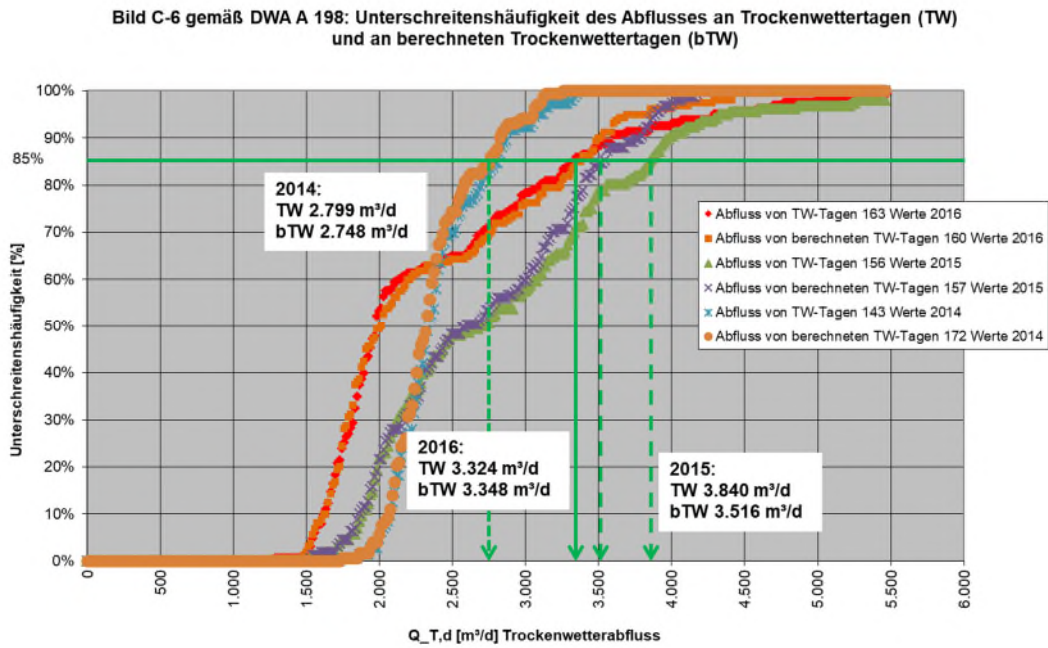


Abbildung 3-6: Unterschreitenshäufigkeit des Abflusses an Trockenwettertagen und an berechneten Trockenwettertagen 2014, 2015 und 2016

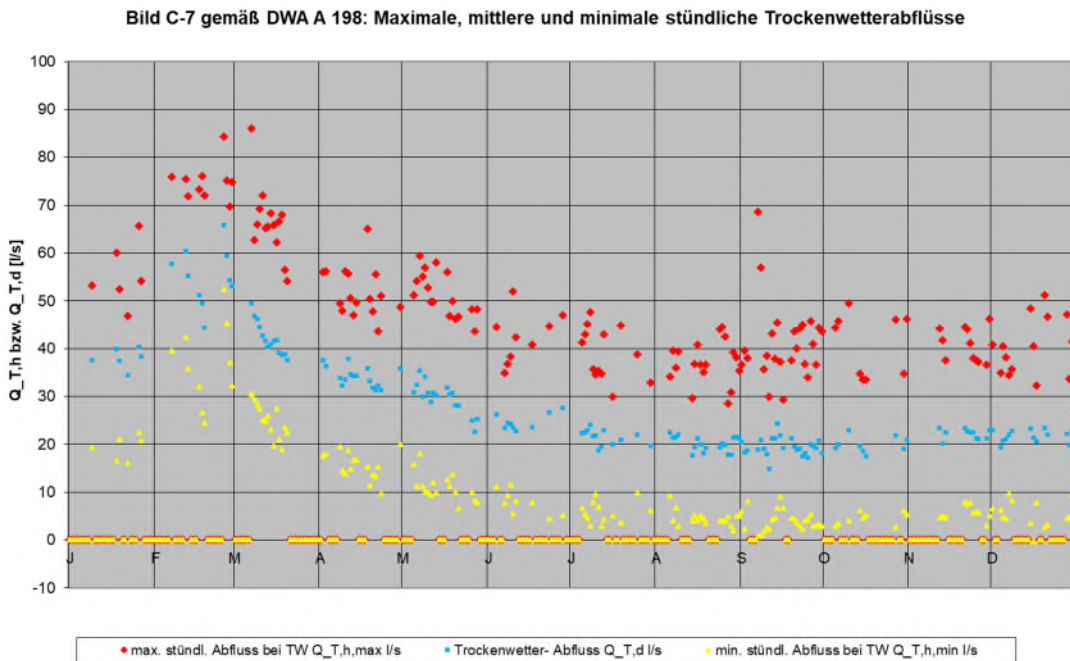


Abbildung 3-7: Maximale, mittlere und minimale stündliche Trockenwetterabflüsse 2016

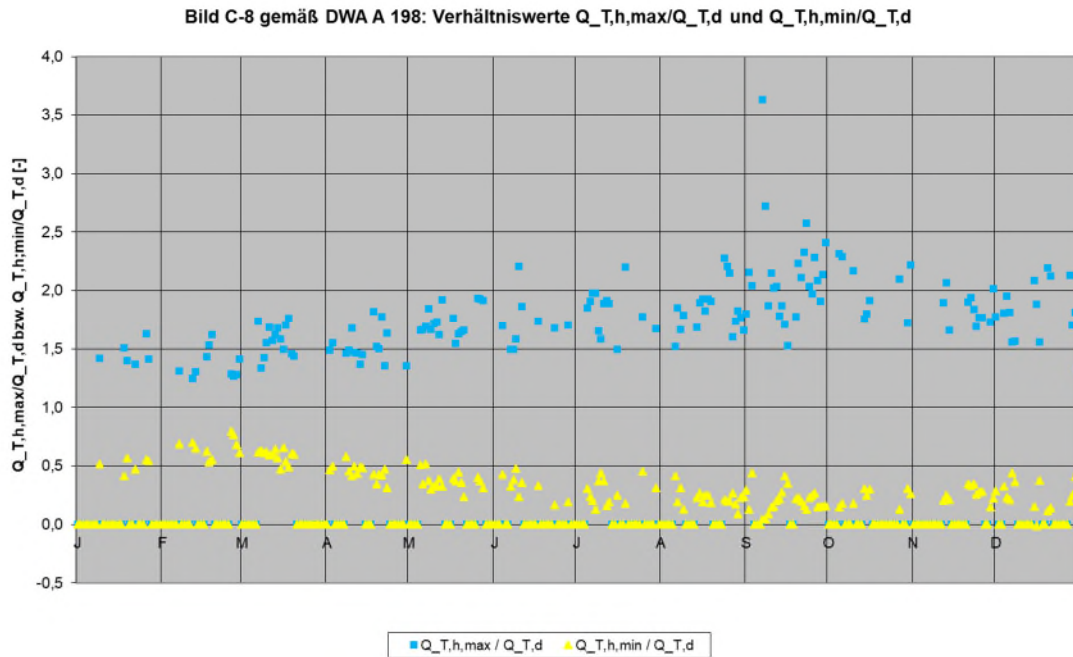


Abbildung 3-8: Verhältniszwerte $Q_{T,h,max}/Q_{T,d}$ und $Q_{T,h,min}/Q_{T,d}$ 2016

Für die Ermittlung des Mischwasserabflusses wurde der Trinkwasserverbrauch nach der Statistik der Stadt Brakel für 2014 mit 561.662 m³, für 2016 mit 582.689 m³ und für 2015 als Mittelwert aus beiden mit 572.176 m³ angesetzt. Hierbei ergaben sich einwohnerspezifische Mengen von ca. 125 bis 130 l/(Exd). Die Ergebnisse der Auswertung nach DWA A 198 sind auszugsweise in Tabelle 3-1 zusammengestellt.

Tabelle 3-1: Abwassermengen Ablauf Kläranlage: Entwurf und Berechnung A 198

Wert	Einheit	Vergleichswerte	Berechnung im Jahr		
		Entwurf 1979	2014	2015	2016
Täglicher Abfluss im Jahresmittel $Q_{d,aM}$	m ³ /d	$Q_r = 7.892,20$	2.892	3.346	2.856
Mittlerer täglicher TW-Abfluss $Q_{T,d,aM}$	m ³ /d	$Q_t = 7.517,20$	2.410	2.860	2.392
Maximaler stündlicher Trockenwetterabfluss $Q_{T,h,max}$	l/s	$Q_T = 230,03$	156,6	111,3	86,1
Maximaler stündlicher Trockenwetterabfluss der Monatsmittel $Q_{T,h,max,mM}$	l/s	-	57,3	73,0	74,9
Trockenwetterabfluss im Jahresmittel $Q_{T,aM}$	l/s	-	27,9	33,1	27,7
Mischwasserabfluss Q_M	l/s	$Q_R = 240,46$	153	160	184

Fazit: Die erlaubte Einleitungs-Höchstabwassermenge von 236 l/s ($424,8 \text{ m}^3 / 0,5\text{h}$) wird nur in seltenen Fällen erreicht (im Jahr 2014 einmal, in 2015 nie, in 2016 einmal). Im Hinblick auf die Neubemessung der Kläranlage für den Anschluss von Bellersen und Hembsen sollten daher die Werte nach DWA-A 198 angesetzt werden. Für eine kostenminimale Auslegung der neuen Stufe zur Mikroschadstoffelimination ist auch über eine Optimierung und Vergleichmäßigung des Zulaufpumpwerkes und der Mischwasserbehandlung, z.B. durch Erhöhung der Pufferkapazität nachzudenken.

3.2.2 Kläranlagen Bellersen und Hembsen

Für die künftige Überleitung der Kläranlagen Bellersen und Hembsen ist eine Einschätzung der Abwassermengen erforderlich, um die neuen Stufe zur Mikroschadstoffelimination in richtiger Größe bemessen zu können.

Folgende aktuelle Daten standen zur Verfügung:

- Abflüsse der Kläranlage Bellersen für die Jahre 2015 bis 2017 als stündliche Werte für Maximum, Minimum und als Mittel
- Abflüsse der Kläranlage Hembsen für die Jahre 2015 bis 2017 als stündliche Werte für Maximum, Minimum und als Mittel
- Niederschlagsdaten standen nicht zur Verfügung.

Nach Auswertung der Daten ergeben sich die folgenden Bilder.

Bild C-1 gemäß DWA A 198: Jahresgang des täglichen Abflusses

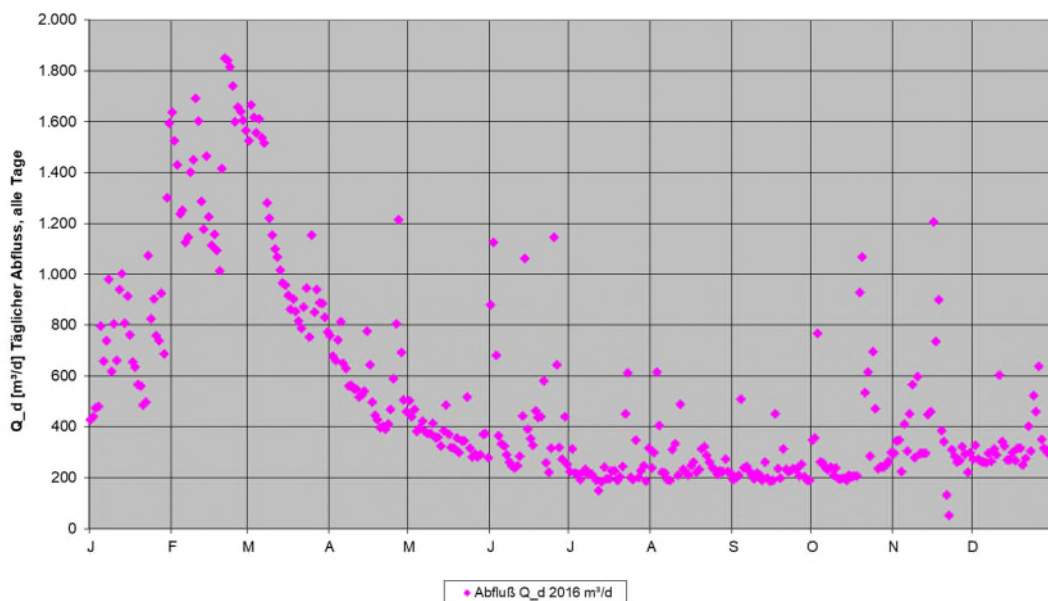


Abbildung 3-9: Kläranlage Bellersen - Jahresgang des täglichen Abflusses 2016

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

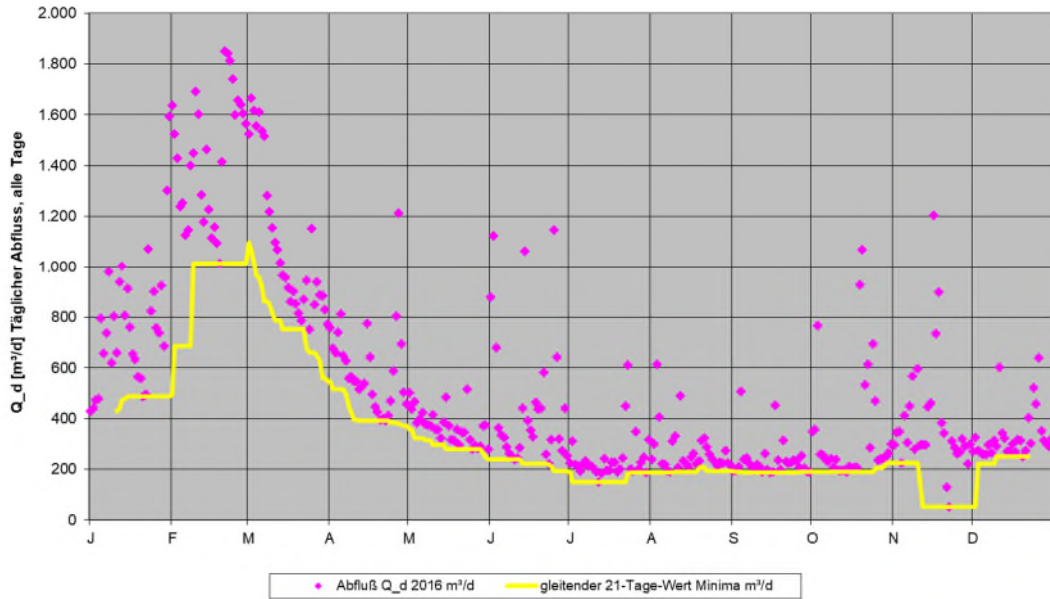


Abbildung 3-10: Kläranlage Bellersen - Polygon der niedrigsten Abflüsse in 21-Tage-Intervallen 2016

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

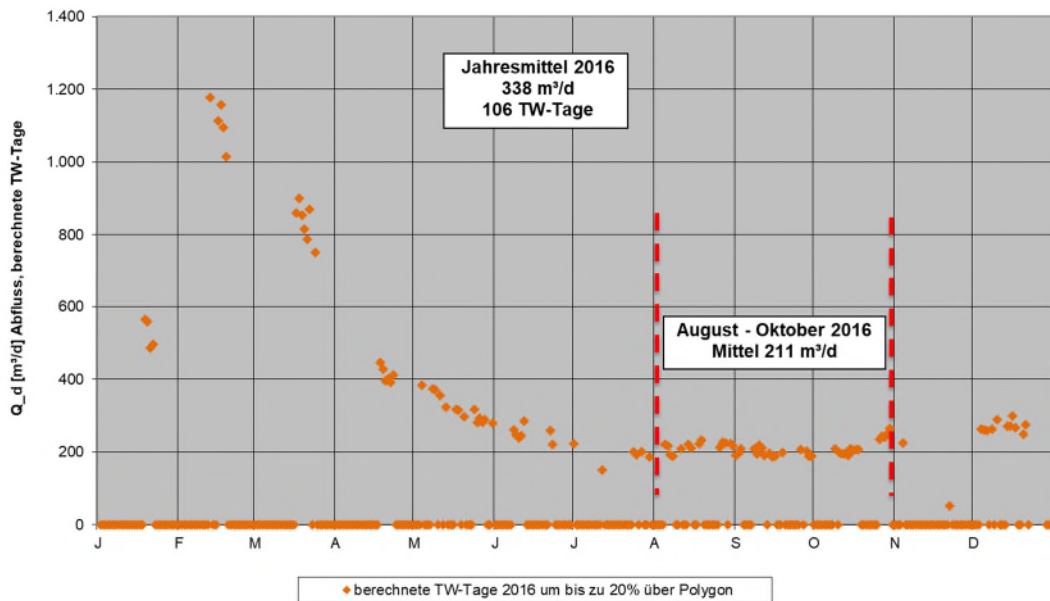


Abbildung 3-11: Kläranlage Bellersen - Abflüsse von berechneten Trockenwettertagen 2016

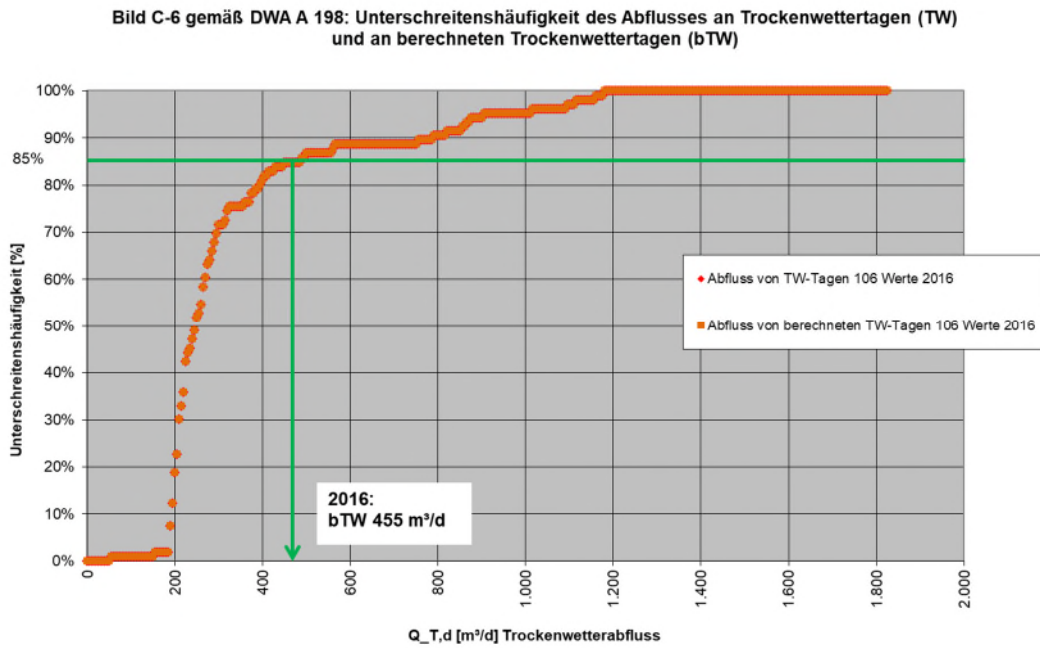


Abbildung 3-12: Kläranlage Bellersen - Unterschreitenshäufigkeit des Abflusses an berechneten Trockenwettertagen 2016

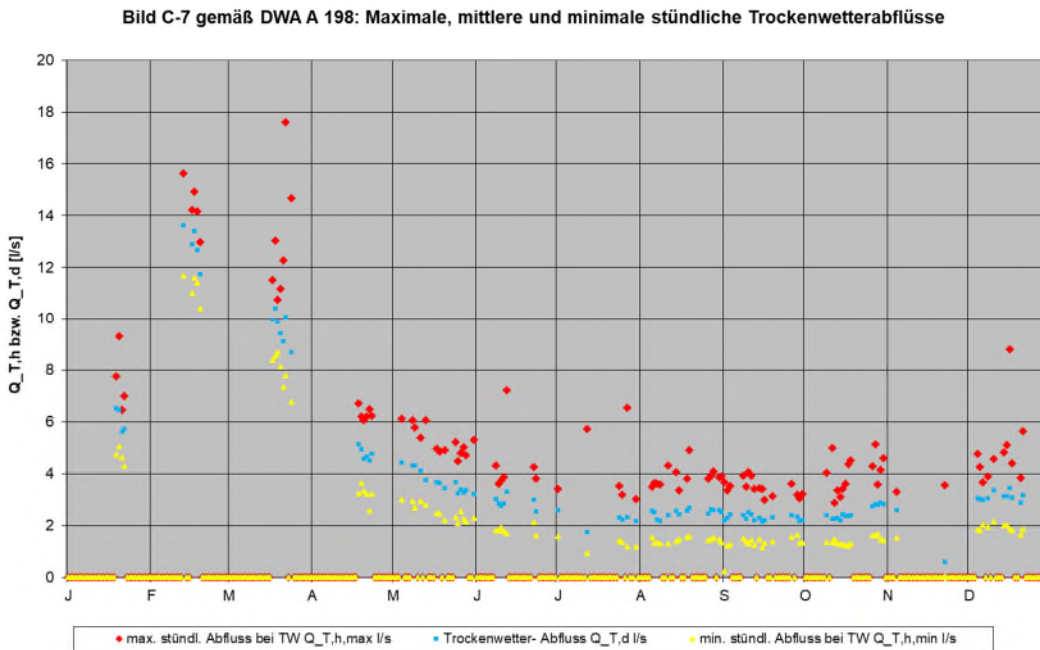


Abbildung 3-13: Kläranlage Bellersen - Maximale, mittlere und minimale stündliche Trockenwetterabflüsse 2016

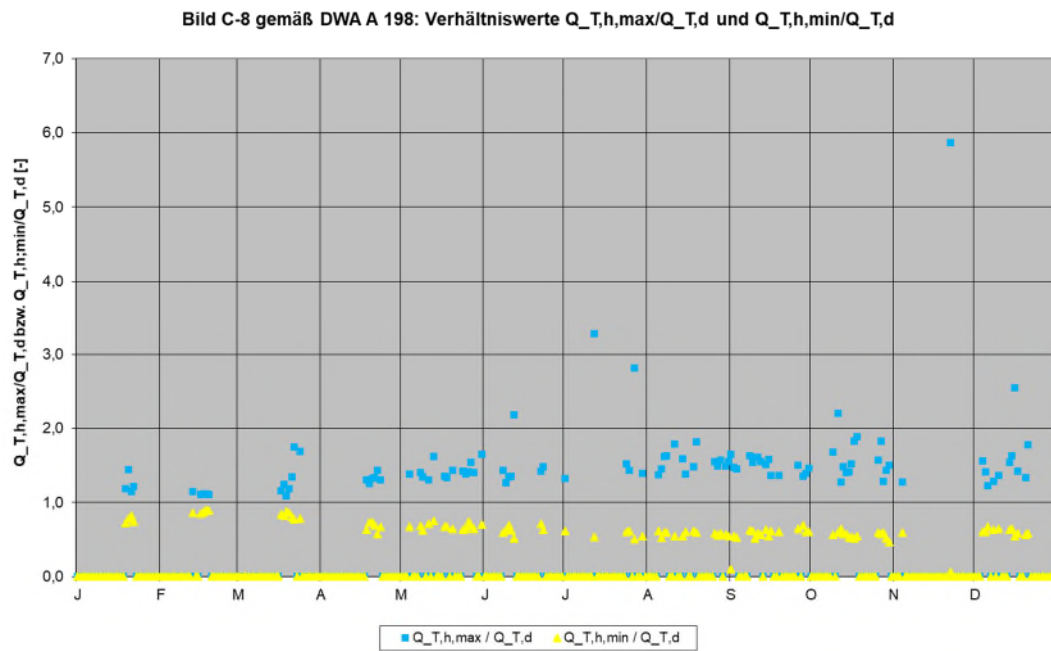


Abbildung 3-14: Kläranlage Bellersen - Verhältniszwerte $Q_{T,h,max}/Q_{T,d}$ und $Q_{T,h,min}/Q_{T,d}$ 2016

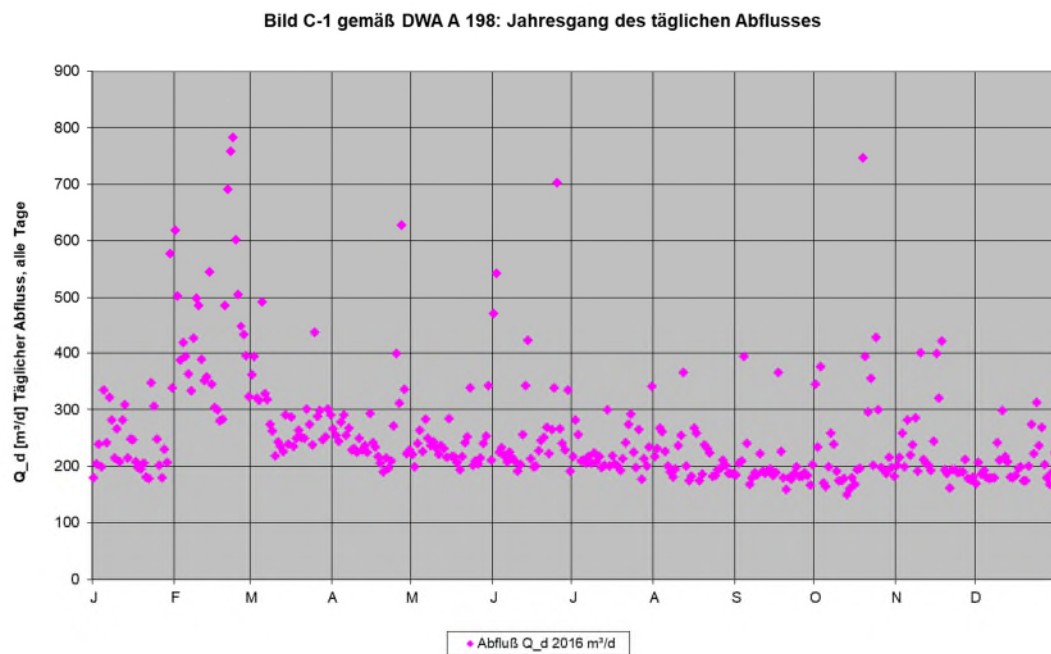


Abbildung 3-15: Kläranlage Hembesen - Jahresgang des täglichen Abflusses 2016

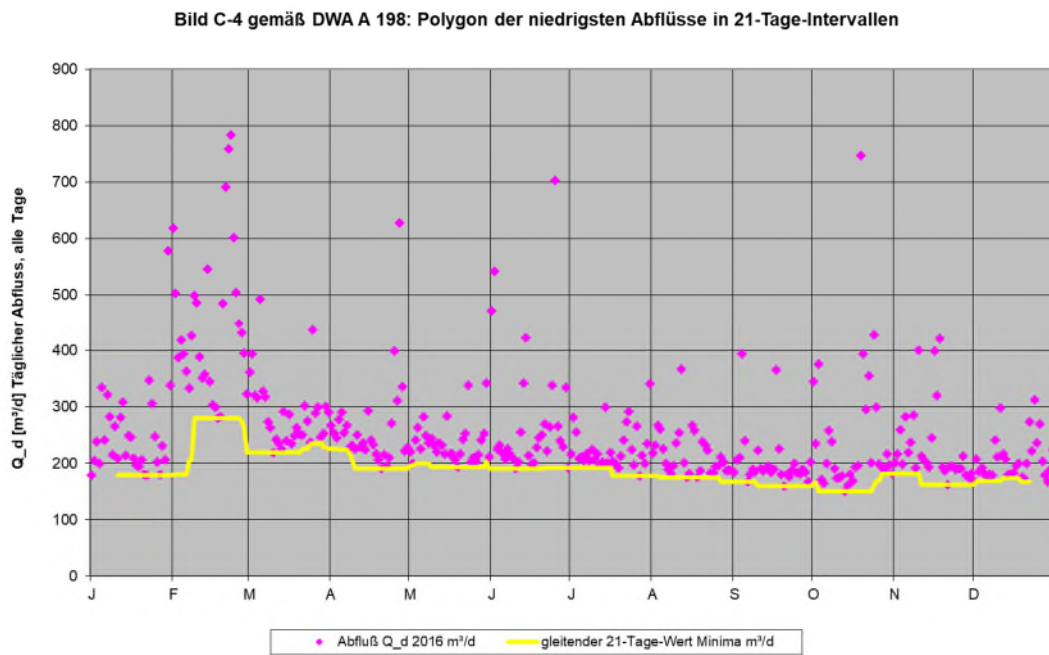


Abbildung 3-16: Kläranlage Hembsen - Polygon der niedrigsten Abflüsse in 21-Tage-Intervallen 2016

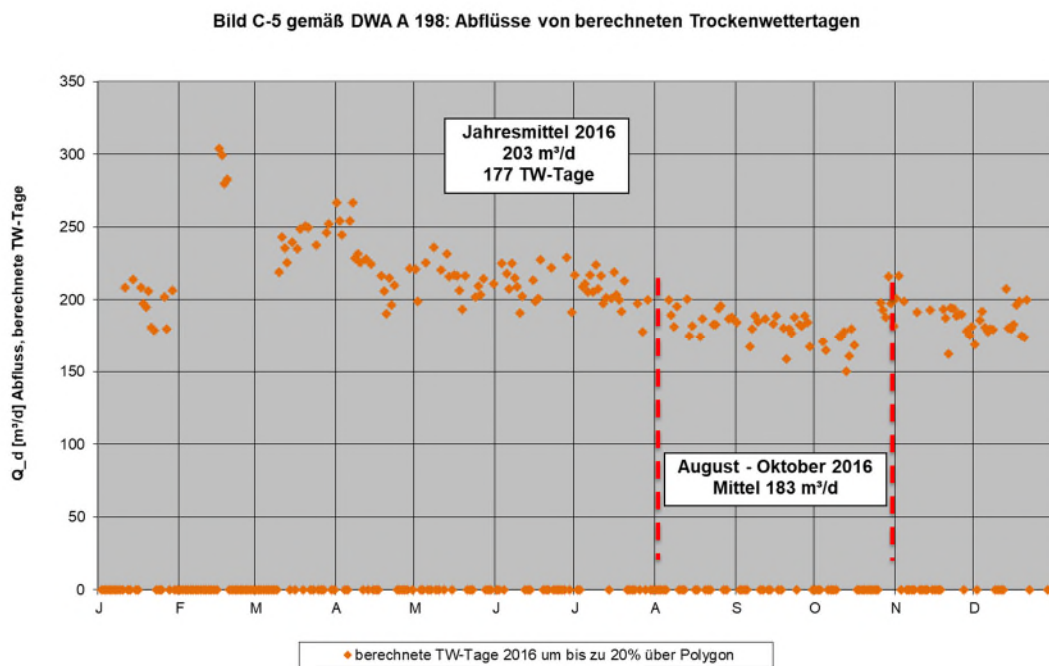


Abbildung 3-17: Kläranlage Hembsen - Abflüsse von berechneten Trockenwettertagen 2016

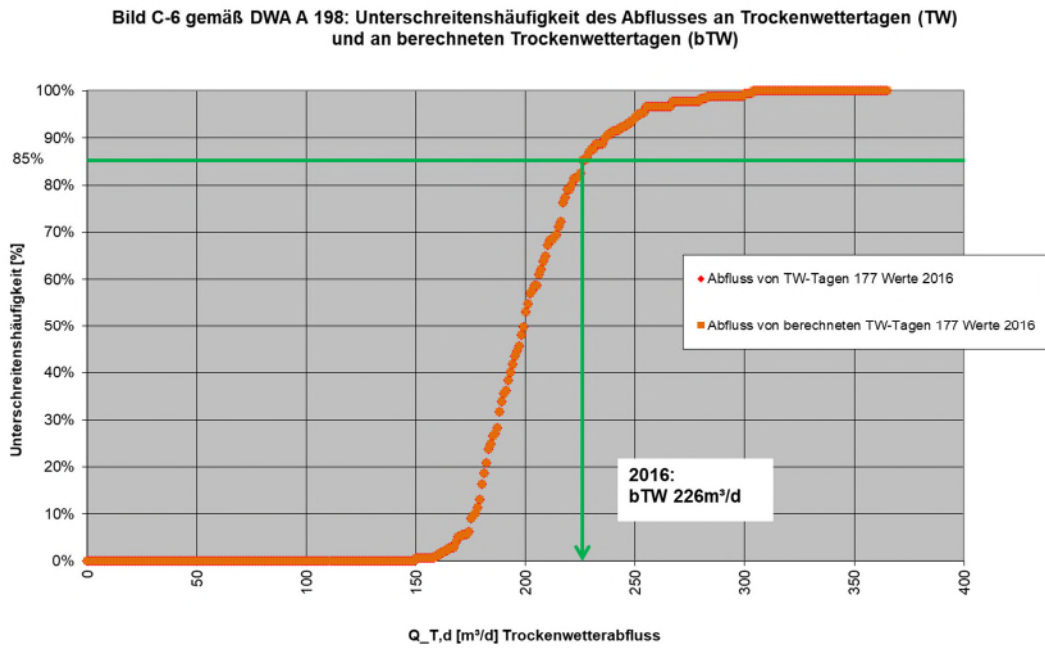


Abbildung 3-18: Kläranlage Hemsben - Unterschreitenshäufigkeit des Abflusses an berechneten Trockenwettertagen 2016

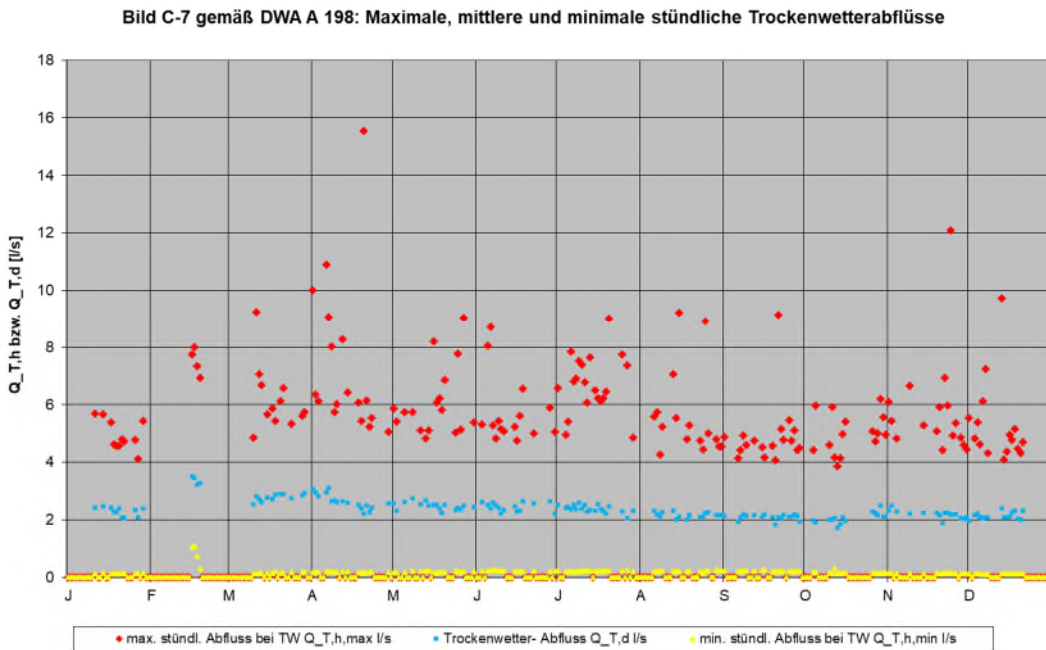


Abbildung 3-19: Kläranlage Hemsben - Maximale, mittlere und minimale stündliche Trockenwetterabflüsse 2016

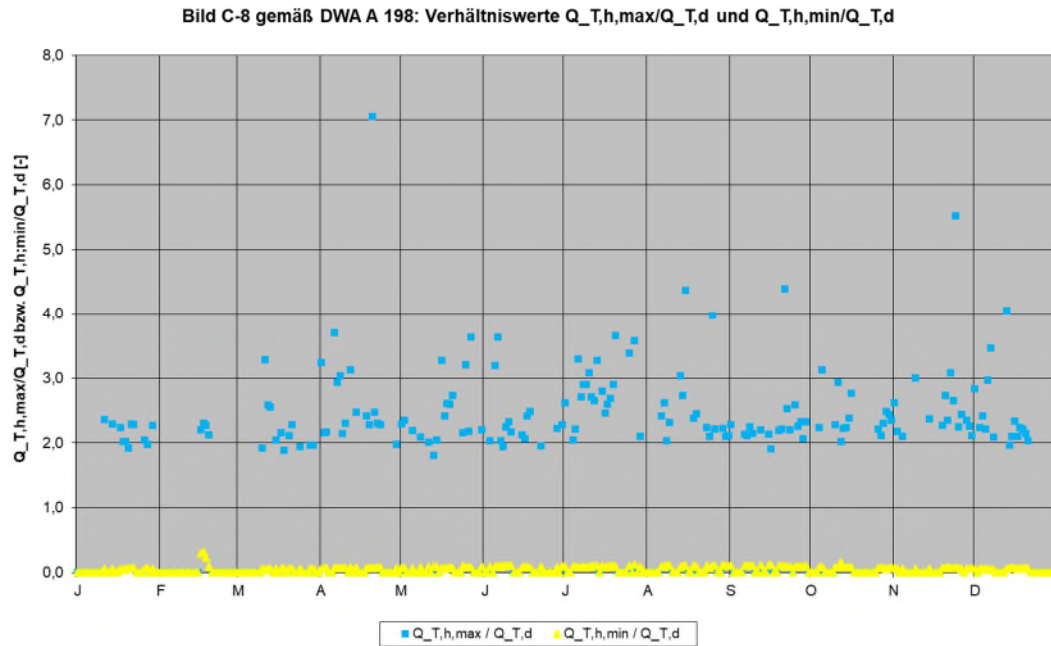


Abbildung 3-20: KA Hembsen - Verhältnswerte $Q_{T,h,max}/Q_{T,d}$ und $Q_{T,h,min}/Q_{T,d}$ 2016

Für die Ermittlung des Mischwasserabflusses wurde der Trinkwasserverbrauch nach der Statistik der Stadt Brakel für das Jahr 2016 für Bellersen mit 54.812 m^3 und für Hembsen mit 65.234 m^3 angesetzt. Hierbei ergaben sich einwohnerspezifische Mengen von ca. 105 bis $106 \text{ l}/(\text{Exd})$.

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

Tabelle 3-2: Abwassermengen Kläranlagen Bellersen, Hembsen: Berechnung A 198

Wert	Einheit	Berechnung A 198 - Jahr 2016		
		Bellersen	Hembsen	Summe
Einwohnerzahl Stand 2017!	E	Bökendorf 752, Gellersen 667 = 1.419	Erkeln 554, Bel- ler 205, Hemb- sen 941 = 1.700	3.119
Täglicher Abfluss im Jahresmittel $Q_{d,aM}$	m ³ /d	541	257	798
Mittlerer täglicher TW-Abfluss $Q_{T,d,aM}$	m ³ /d	338	203	541
Maximaler stündlicher Trockenwetterabfluss $Q_{T,h,max}$	l/s	17,6	15,5	33,1
Maximaler stündlicher Trockenwetterabfluss der Monatsmittel $Q_{T,h,max,mM}$	l/s	14,4	7,5	21,9
Trockenwetterabfluss im Jahresmittel $Q_{T,aM}$	l/s	3,9	2,4	6,3
Mischwasserabfluss Q_M	l/s	27	20	47

Fazit: Die Kläranlage Bellersen zeigt eine deutliche ausgeprägte Zulaufganglinie. Bei der Kläranlage Hembsen sind die Abwassermengen relativ konstant über das Jahr verteilt. Bei der Umwandlung der beiden Kläranlagen in Pumpwerke zur Zentralkläranlage Brakel sollte unbedingt eine Pufferung der Mischwasserspitzen erfolgen. Damit lässt sich nicht nur die Dimension der Druckleitung und der Pumpen optimieren, sondern die Weiterbehandlung in der Kläranlage einschließlich Mikroschadstoffelimination können effizient bemessen werden.

3.3 Frachten und Konzentrationen nach DWA A 198

3.3.1 Kläranlage Brakeler Märsch

Aus dem Erlaubnisbescheid nach § 8 WHG vom 19.10.2015 durch die Bezirksregierung Detmold für die „Einleitung von geklärtem Abwasser aus der Kläranlage Brakeler Märsch in die Brucht“ gehen folgende Werte hervor:

- Schmutzwasser im Umfang bis zu 22.000 EW
- Anschlusswert: 13.700 EW, davon 1.450 EGW (Stand 2015).

Nach dem damaligen Entwurf 1979 wurden auf Basis der Auszählung von Einwohner und Gleichwerten zuzüglich 10% Reserven eine BSB-Fracht von 22.000 EW x 0,06 kg/(EWxd) BSB = 1.320 kg/d (CSB = 2.640 kg/d) ermittelt.

Wichtig: 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.

Nach Auswertung der Daten ergeben sich die folgenden Bilder.

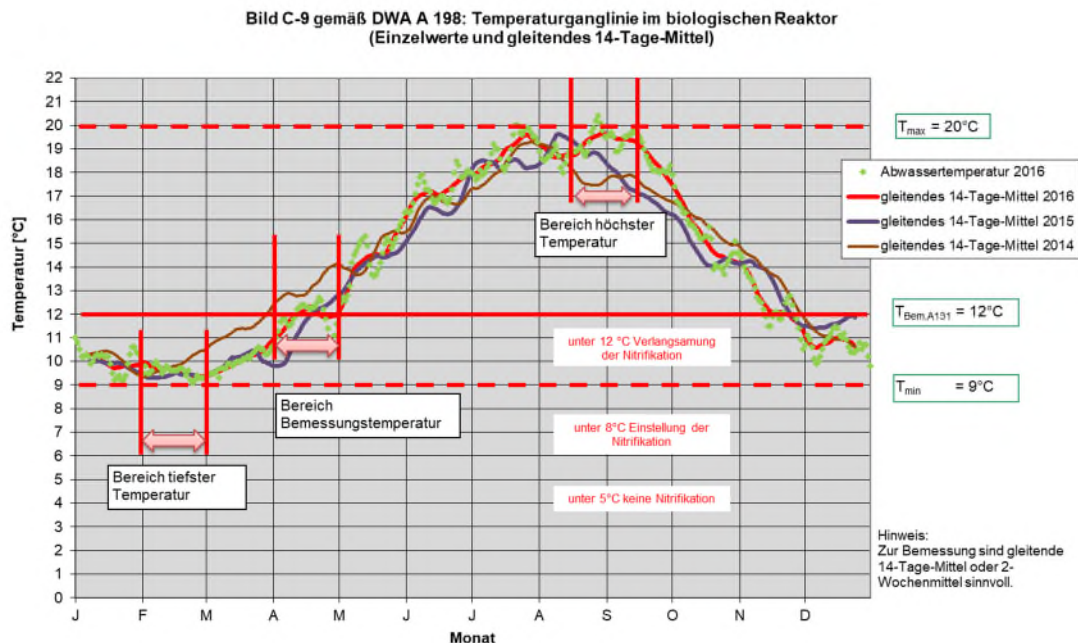


Abbildung 3-21: Temperaturganglinie im biologischen Reaktor 2014, 2015 und 2016

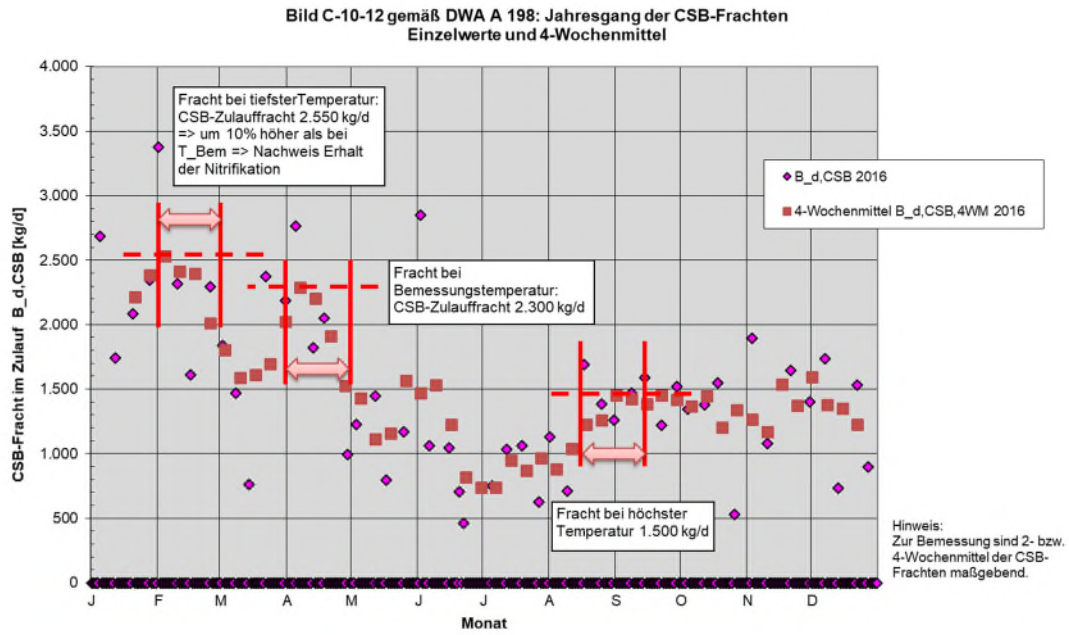


Abbildung 3-22: Jahrgang der CSB-Frachten Einzelwerte, 4-Wochenmittel 2016

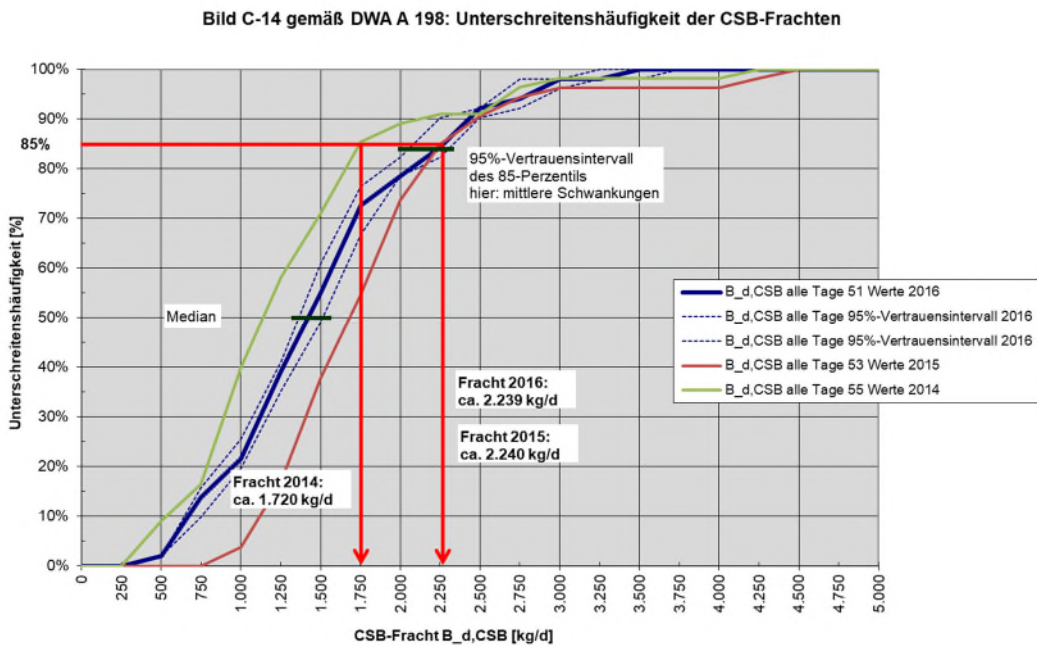


Abbildung 3-23: Unterschreithäufigkeit der CSB-Frachten 2014, 2015 und 2016

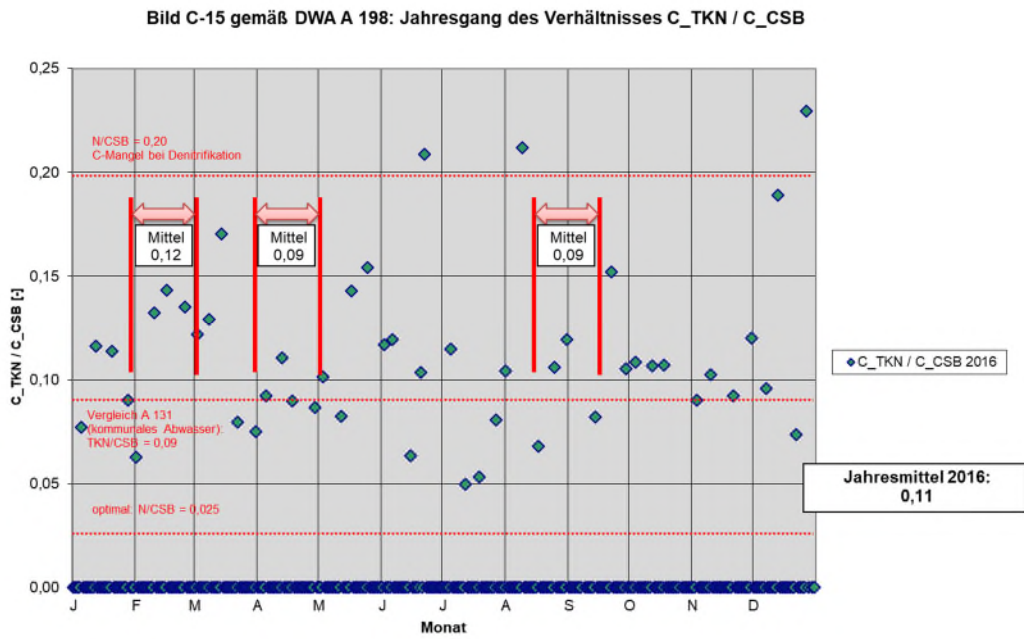


Abbildung 3-24: Jahrgang des Verhältnisses C_{TKN} / C_{CSB} im Jahr 2016

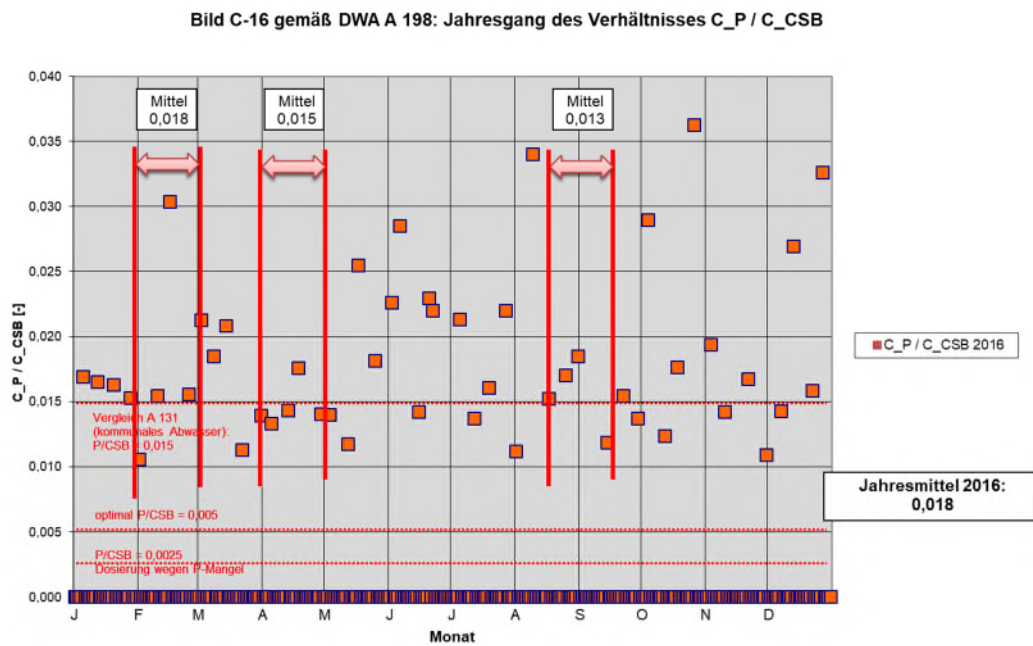


Abbildung 3-25: Jahrgang des Verhältnisses C_P / C_{CSB} im Jahr 2016

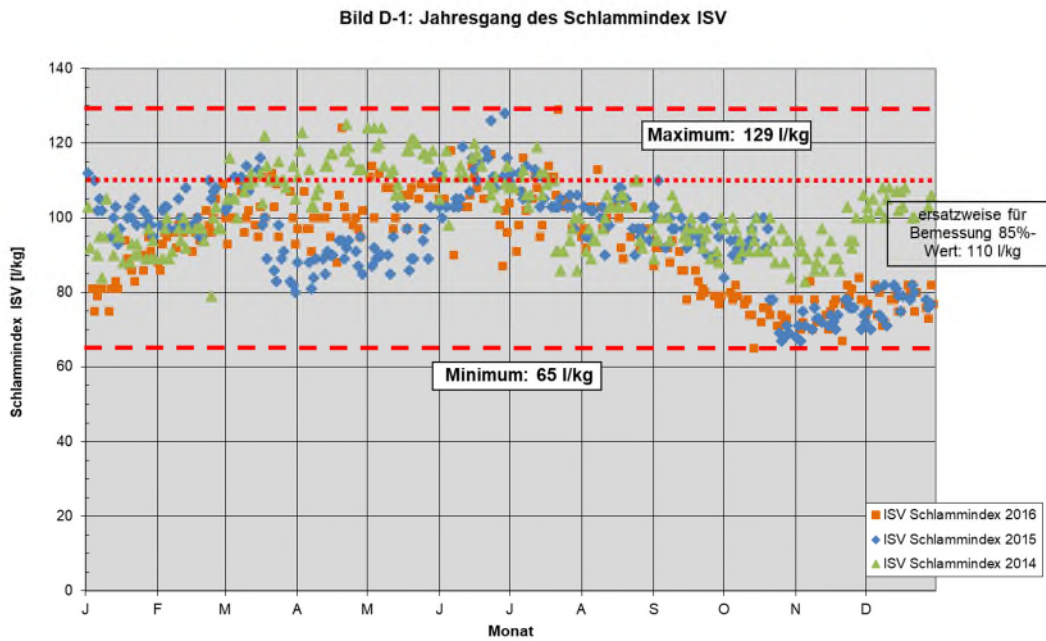


Abbildung 3-26: Jahrgang des Schlammindeix ISV 2014, 2015 und 2016

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

Tabelle 3-3: Frachten und Konzentrationen Kläranlage Brakel: Entwurf, Berechnung

Wert	Einheit	Vergleichswerte	Berechnung A 198 im Jahr			maßg. Fracht für Hochrechn.
			Entwurf 1979	2014	2015	
Fracht bei Bemessungstemperatur $B_{d,4wM,max}$	kg/d CSB	-	1.734	2.396	2.300	-
Fracht als 85%-Wert	kg/d CSB	2.640	1.720	2.240	2.239	2.240
Einwohnerwerte bei 120 g/(EWxd) CSB (85%-Werte)	EW	22.000	14.332	18.667	18.658	18.700
Phosphor-Fracht	kg/d P	108	24	31	26	-
Schlammindex ISV	ml/g	120	114	107	106	-

3.3.2 Kläranlagen Bellersen und Hembsen

Für die Kläranlagen Bellersen und Hembsen liegen die Daten zu Niederschlag, Abwassermenge und CSB-Konzentration für das Jahre 2017 vollständig und für das Jahr 2018 bis zum 24.09. vor. Nach Auswertung der Daten ergeben sich die folgenden Bilder.

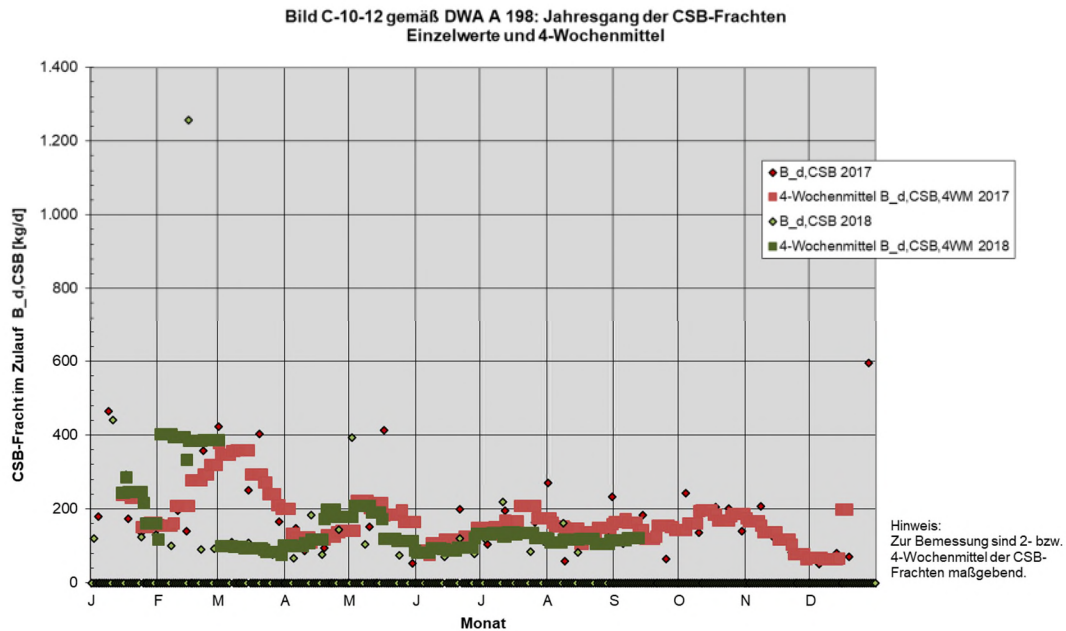


Abbildung 3-27: Jahresgang der CSB-Frachten für Bellersen 2017/18

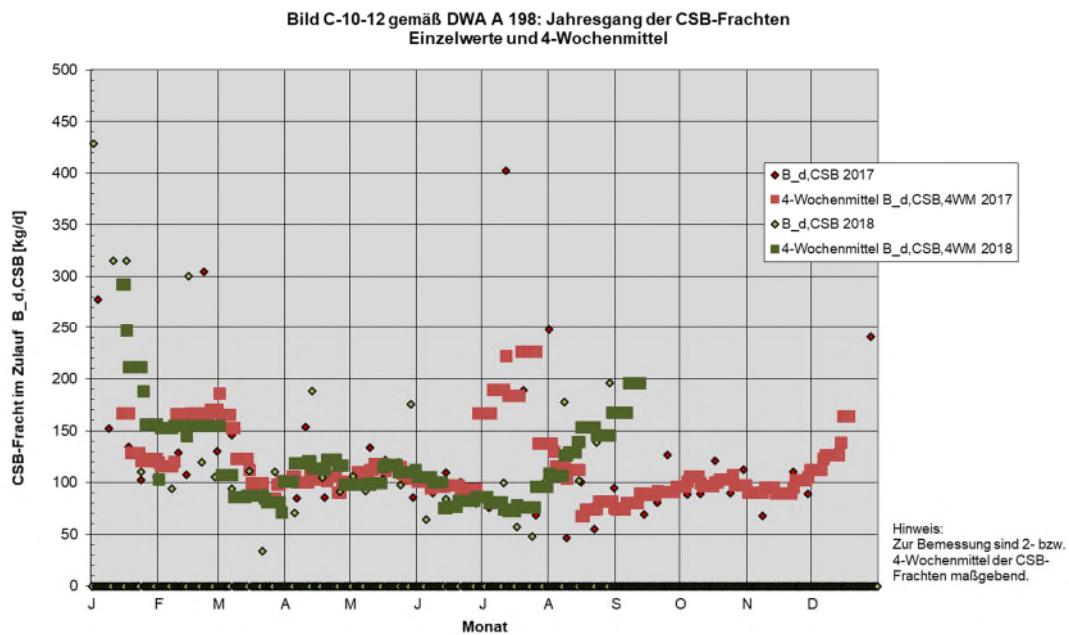


Abbildung 3-28: Jahresgang der CSB-Frachten für Hembsen 2017/18

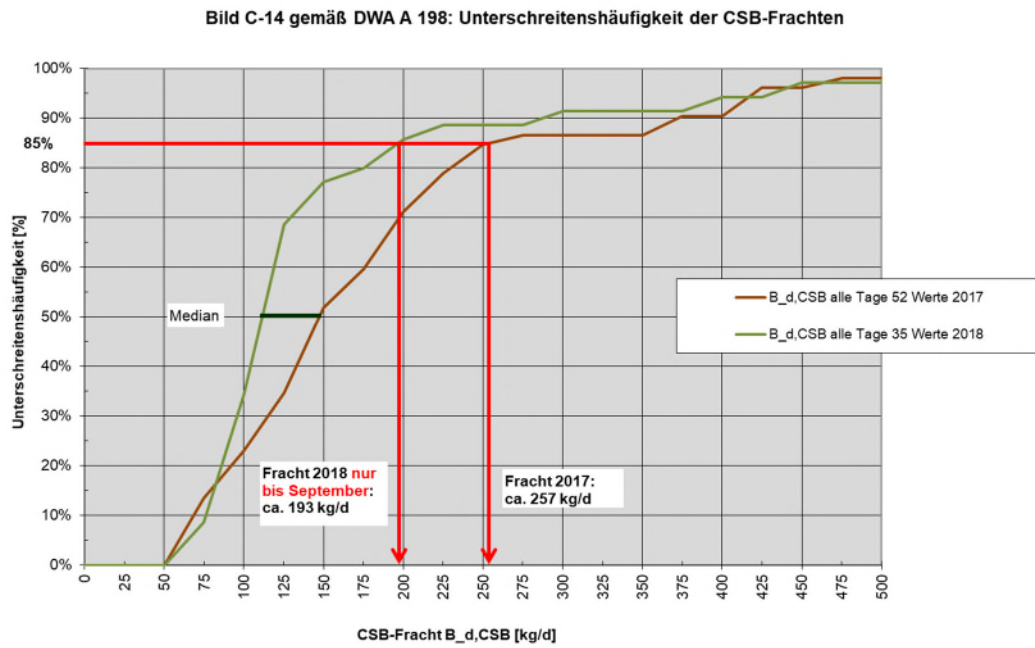


Abbildung 3-29: Unterschreitenshäufigkeit CSB-Frachten Bellersen 2017/18

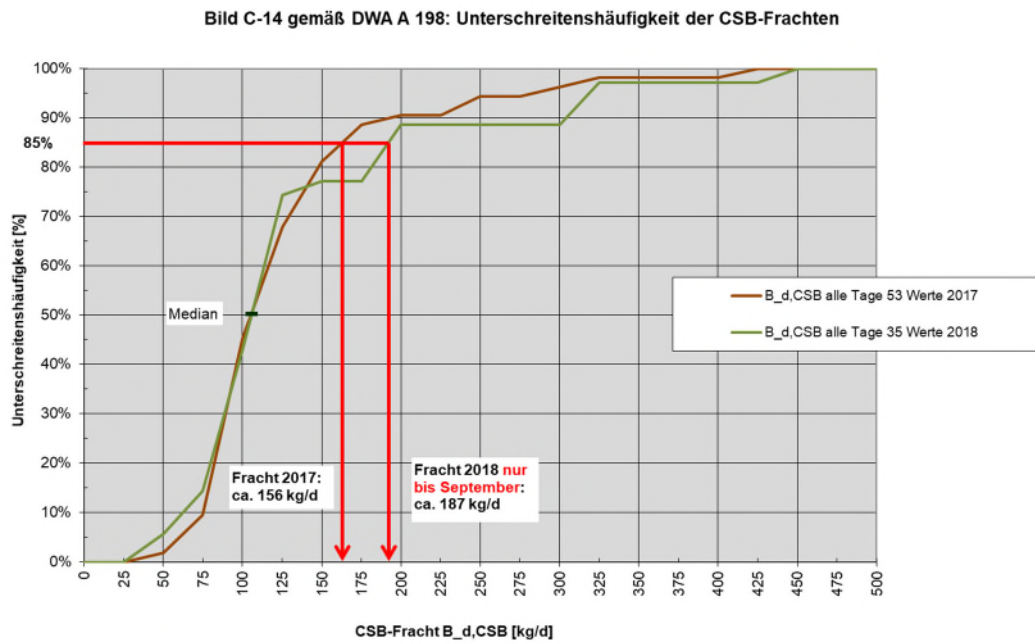


Abbildung 3-30: Unterschreitenshäufigkeit CSB-Frachten Hemsben 2017/18

Die Ergebnisse der Auswertung nach DWA-Arbeitsblatt A 198 sind auszugsweise in Tabelle 3-4 zusammengestellt. Für die überschlägige Bemessung wurde keine Temperaturganglinie ausgewertet, so dass Frachten bei Bemessungstemperatur nicht bestimmt wurden.

Tabelle 3-4: Frachten und Konzentrationen Bellersen, Hembsen, Berechnung A 198

Wert	Einheit	Berechnung A 198 im Jahr 2017/18				maßg. Fracht-Summe für Hochrechn.
		Bellersen		Hembsen		
		2017	bis Sept. 2018	2017	bis Sept. 2018	
Fracht als 85%-Wert	kg/d CSB	257	193	156	187	444
Einwohnerwerte bei 120 g/(EWxd) CSB (85%-Werte)	EW	2.142	1.611	1.297	1.562	3.700

Für die Hochrechnung im Falle einer Aufgabe der beiden Standorte mit Überleitung nach Brakel wurden für die Kläranlage Brakel eine aktuelle maßgebende CSB-Fracht von 2.240 kg/d sowie für Bellersen und Hembsen eine aktuelle maßgebende CSB-Fracht-Summe von 444 kg/d aus den 85%-Werten ermittelt.

Demzufolge liegt die aktuelle **maßgebende Belastung** aus Brakel, Bellersen und Hembsen mit **2.684 kg/d CSB** etwa in der Größe des Entwurfs 1979 mit einer CSB-Fracht von 2.640 kg/d. Bei Umrechnung auf Einwohnerwerte würde die Gesamtbelastung zur Zentralkläranlage in der Höhe von rund 18.700 EW + 3.700 EW bei gesamt 22.400 EW liegen (Entwurf 1979 = 22.000 EW).

Fazit: Nach erster Sichtung der Daten ist ein **Zusammenschluss der drei Kläranlagen** zu einer Zentralkläranlage **möglich**. Hierbei wird nach den aktuellen Zahlen die damals prognostizierte Ausbaugröße erreicht. Etwaige **Reserven** für Einwohner- oder Gewerbezuwächse stehen aber **nicht mehr zur Verfügung**.

Für eine detailliertere Betrachtung sind verdichtete Probenahmen zu den maßgebenden Temperatur- bzw. Frachtbereichen erforderlich. Eventuell lassen sich damit noch Reserven erkennen, sofern vorhanden.

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 Brakel für die Kläranlage Brakeler Märsch ausgewertet.

Hierzu liegen die Werte für die Jahresabwassermenge, die Jahresschmutzwassermenge und die mittlere CSB-Fracht als 50%-Wert für die Jahre 2005 bis 2016 vor (Abbildung 3-31).

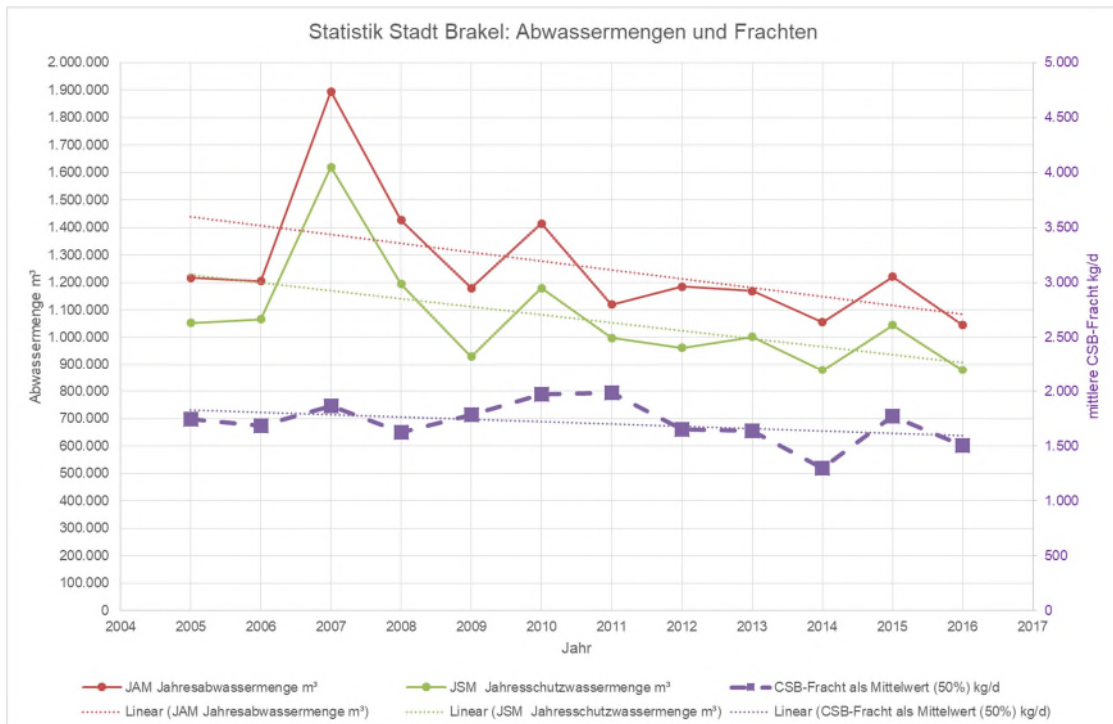


Abbildung 3-31: Tendenz Abflüsse und Frachten KA Brakeler Märsch, 2005 - 2016

Fazit: Die Abwassermengen haben eine leicht abnehmende Tendenz, sowohl bei Trockenwetter- als auch beim ganzjährigen Abfluss. Ähnlich verhält es sich bei der mittleren CSB-Fracht. Für die Festlegung der Auslegungswassermenge der neuen Stufe zur Mikro Schadstoffelimination auf Basis der letzten drei Jahre sind daher keine zusätzlichen Aufschläge erforderlich. Lediglich der künftige Anschluss von Bellersen und Hembsen wird bei den Teil- und Vollstrommengen berücksichtigt.

4 Anforderungen und Auflagen

4.1 Raumordnungskonzept für die Kläranlage

Unter dem Begriff der Raumordnung wird normalerweise die planmäßige Ordnung, Entwicklung und Sicherung von größeren Gebieten zur Gewährleistung der bestmöglichen Nutzung verstanden. Für eine Kläranlage sei dies im Sinne einer bestmöglichen, zukunftssicheren Aufteilung der verfügbaren Flächen unter Beachtung einer eventuellen Entscheidung für die Stilllegung und Überleitung der Abwässer aus den Kläranlagen Belsen und Hembsen gemeint. Zudem befinden sich auf dem Grundstück der Kläranlage auch die Anlagen der zentralen Wasserversorgung, die eventuell um eine Trinkwasserenthärtung erweitert werden. Da letztgenannten Entscheidungen noch unsicher sind, wäre eine Raumordnung am sinnvollsten, die alle Richtungen offen lässt.

Für die Aufteilung der Flächen wird im ersten Schritt nach den grundlegenden Aufgabenbereichen und Verfahrensstufen

- Kläranlage: Abwasserreinigung, Mischwasserbehandlung, Schlammbehandlung mit NEU Mikroschadstoffelimination und ZUKUNFT ggfs. Schlammverwertung
- Trinkwasserversorgung (ggfs. mit Trinkwasserenthärtung)

unterschieden (Abbildung 4-1).

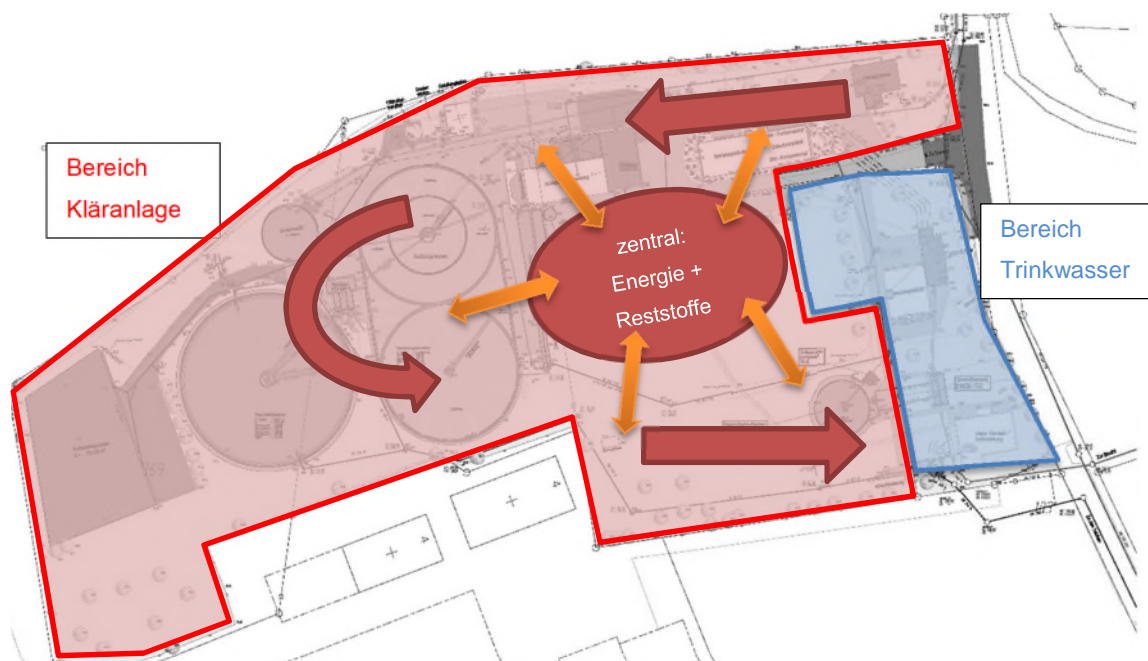


Abbildung 4-1: Grundkonzept Raumordnung der Kläranlage

Für eine wirtschaftliche Realisierung sollten die künftigen Bauwerke immer dort angeordnet werden, wo Hauptfließwege von Abwasser und Schlamm verlaufen. Dies bedeutet speziell für die Anordnung:

- Bereich Zulauf und Betrieb
 - Vorhandener Bereich an der Zufahrt zur Kläranlage
- Bereich Abwasserreinigung
 - Ertüchtigung des Belebungsbeckens mit Herstellung von Redundanz für eine effiziente biologische Reinigung als Voraussetzung für die nachgeschaltete Mikroschadstoffelimination (z.B. Vermeidung von Nitrit im Falle von Ozonung)
 - Erweiterung der Nachklärung um zweites Becken zur Herstellung von Redundanz; für minimale hydraulische Verluste muss Anbindung im westlichen Bereich erfolgen; feststofffreies Abwasser als Voraussetzung z.B. für den Einsatz von Granulierter Aktivkohle oder bei Ozon
- Bereich Mikroschadstoff-Elimination
 - dem Fließweg des gereinigten Abwassers folgend in Richtung Ablauf / Schönungsteiche im Süden der Kläranlage
- Bereich Schlammbehandlung
 - Bestand der Schlammmentwässerung verbleibt im Zentrum der Kläranlage
 - Umbau des Schlamm lagerplatzes zu einer Schlammcontainerhalle
 - Künftig ggfs. Maßnahmen zur Schlammverwertung - gehören wegen ungünstiger Schlammfließigenschaften in das Zentrum mit kurzen Wegen zum Bestand (Energiezentrale, Entwässerung, ...);
Im Hinblick auf eine mittelfristige erforderliche Verbrennung des Klärschlammes ist jedoch zu beachten, dass eine Behandlung im Faulturm organische Substanz abbaut und den Brennwert des Klärschlammes reduziert. Dadurch wird der Aufwand für die Verbrennung höher.
- Bereich Mischwasserbehandlung
 - Grundlegende Verlagerung aus dem Bereich Trinkwasser heraus näher an die Zulaufpumpwerke
 - Herstellung eines neuen Mischwasser-Pufferspeicher zum optimalen Mengenausgleich näher am Bereich Zulauf; Verminderung der hydraulischen Auslegungsgröße der Stufe zur Mikroschadstoff-Elimination und damit zur Kostensenkung
 - Kurze Wege und tiefere Beckenlage zur deutlichen Energieeinsparung bei den Mischwasserpumpen; als Ausgleich für den unvermeidlich steigenden Gesamt-Energiebedarf durch die Mikroschadstoff-Elimination

- Kurzer Weg zum Mischwasser-Notüberlauf nach Süden Richtung Kläranlagen-Ablauf
- Ggfs. Überbauung des neuen Mischwasser-Pufferspeicher; dient gleichzeitig zur Sicherung gegen Auftrieb bei hohem Grundwasserstand!
- Bereich Trinkwasserversorgung
 - Schaffung von Baufreiheit durch Herausnahme veralteter und abgängiger MW-Anlagenteile
 - Klare Trennung der Aufgabenbereiche zur Kläranlage

Das vorläufige Raumordnungskonzept der Kläranlage „Brakeler Märsch“ wurde in einen Lageplan übertragen.

4.2 Einfluss einer möglichen Trinkwasserenthärtung

Gegenwärtig bestehen bei der Stadt Brakel – Wasserwerk - Überlegungen für die Nachrüstung einer zentralen Trinkwasserenthärtung. Damit verbunden ist der Einsatz eines Anti-Scaling-Mittels auf Basis von Phosphor (z.B. Phosphonsäure). Nach letztem Kenntnisstand soll das Abwasser aus der zentralen Trinkwasserenthärtung direkt in die Brucht und nicht über die Kläranlage in das Gewässer eingeleitet werden. Eine abschließende Entscheidung ist dem Verfasser noch nicht bekannt. Sofern dennoch das phosphorhaltige Abwasser in die Kläranlage gegeben werden soll, wäre der Einsatz von biologisch abbaubaren Anti-Scaling-Mittel für den Reinigungsprozess der Kläranlage von Vorteil.

Die erwartete Phosphorfracht aus der Enthärtung liegt bei $1,5 \text{ mg/l} \times 200.000 \text{ m}^3/\text{a} = 300 \text{ kg/a P}$. Die Phosphorfracht im Zulauf der Kläranlage liegt zurzeit bei $9,7 \text{ mg/l} \times 1.045.200 \text{ m}^3/\text{a} = 10.139 \text{ kg/a P}$. Bei überschlägiger Mischrechnung würde sich die **P-Zulaufkonzentration damit auf ca. 8,4 mg/l verdünnen.**

Die erwartete Stickstofffracht aus der Enthärtung soll bei $150 \text{ mg/l} \times 200.000 \text{ m}^3/\text{a} = 30.000 \text{ kg/a Nitrat (NO}_3\text{)}$ liegen. Bei einer Molmasse von Stickstoff mit 14 g/mol und dreimal Sauerstoff mit 16 g/mol ergibt sich die Molmasse von Nitrat zu 62 g/mol . Entsprechend würde die reine Stickstofffracht bei $6.775 \text{ kg/a Nitrat-Stickstoff (NO}_3\text{-N)}$ liegen. Die Stickstofffracht im Zulauf der Kläranlage liegt zurzeit bei $64 \text{ mg/l} \times 1.045.200 \text{ m}^3/\text{a} = 66.893 \text{ kg/a N}$. Bei überschlägiger Mischrechnung würde sich die **N-Zulaufkonzentration damit auf ca. 60 mg/l verdünnen.**

Bei der Auslegung der hydraulischen Komponenten ist bei gleichmäßiger Einleitung aus der Enthärtung in die Kläranlage eine Menge von $200.000 \text{ m}^3/\text{a} / 365 \text{ d/a} / 24 \text{ h/d} = 22,8 \text{ m}^3/\text{h}$ bzw. $6,3 \text{ l/s}$ anzunehmen. Bei einem mittleren Mischwasserabfluss von 160 l/s hätte die **Enthärtung damit einen Anteil von 3,8%. Dieser ist vernachlässigbar klein.** Jedoch ist bei bestimmten Betriebskosten (z.B. Strom für Pumpen, Strom für Rührwerke bei Denitrifikation,...) ein Zuschlag von etwa 20% zu berücksichtigen.

Nach Mitteilung der Stadt Brakel wäre der Vordruck aus der Enthärtung ausreichend groß, um eine Druckrohrleitung nach dem Sandfang anzubinden. So könnte ohne weitere Pumpen vor dem Belebungsbecken zwecks Reduzierung der Nitratfracht eingeleitet werden. Jedoch sind für das Belebungsbecken die beschriebenen verfahrenstechnischen Änderungen zur Erhöhung der Denitrifikationskapazität erforderlich.

Bei der Mikroschadstoffelimination würde man aufgrund der Phosphorproblematik das Abwasser im Vollstrom über die Filter schicken; unabhängig vom Eliminationsverfahren (GAK, PAK, Ozon). Die zusätzliche Wassermenge könnte auch hier unproblematisch mit behandelt werden.

Mit dem zusätzlichen Enthärtung-Abwasser wird jedoch das Kohlenstoff-Stickstoff-Verhältnis im Zulauf negativ beeinflusst, was sich wiederum auf den Schlamm und die Funktionalität der Kläranlage auswirkt. Falls erforderlich, müsste gegebenenfalls Kohlenstoff extern zudosiert werden. Sofern detaillierte Analysen aus dem Test mit der Enthärtungsanlage vorliegen, können bei Bedarf ausführliche Nachrechnungen durchgeführt werden.

In Bezug auf die Kosten für die Mikroschadstoffelimination würde sich das Mitbehandeln des Anti-Scaling-Mittel-haltigen Abwassers - wenn überhaupt - nur marginal auswirken. Lediglich der Energieverbrauch wird sich durch das Pumpen der erhöhten Wassermenge geringfügig erhöhen.

4.3 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 Belegung als auch die Nachklärung sind nicht redundant ausgelegt.
- Ein Substanzerhalt, z.B. eine Betonsanierung an dem Belebungsbecken, sind damit nicht möglich.

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.

4.4 Vorgaben für die Einleitung und das Gewässer

Nach Mitteilung der Bezirksregierung Detmold ist zu erwarten, dass aus Vorsorge für das Einleitungsgewässer und nach den Anforderungen der Oberflächengewässerverordnung (OGewV) bestimmte Parameter der Überwachungswerte verschärft werden. Hierzu hat die Bezirksregierung eine Berechnung mit den bisherigen Betriebsmittel- und Spitzenwerten durchgeführt.

Nach vorläufigen – bisher noch nicht in die Einleitungserlaubnis übernommenen – Hochrechnungen ist davon auszugehen, dass die Überwachungswerte für die Parameter NH₄-N und P verschärft werden:

- NH₄-N auf 2 mg/l (derzeit 3 mg/l)
- P_{ges} auf 1,2 mg/l (derzeit 2 mg/l)

Neben diesen Überwachungswerten sind nach Mitteilung der Bezirksregierung noch Betriebsmittelwerte einzuhalten (Jahresdurchschnittswerte). Diese betragen zukünftig für NH₄-N = 0,5 mg/l und für P_{ges} = 0,6 mg/l. Aktuell betragen die errechneten Betriebsmittelwerte für NH₄-N = 0,7 mg/l und für P_{ges} = 1,18 mg/l.

Insofern ist in dieser Machbarkeitsstudie zu erörtern, ob und wie die künftig herabgesetzten Werte im Zuge der Herstellung einer Reinigungsstufe zur Mikroschadstoffelimination als Synergieeffekt mit erreicht werden können.

Zum Parameter **Stickstoff** ist anzumerken, dass die bisher bekannten und großtechnisch realisierbaren Verfahren zur Mikroschadstoffelimination keine technisch zielgerichtete Verminderung des Stoffes bewirken.

Jedoch setzt zum Beispiel das oxidative Reinigungsverfahren mit Ozon eine weitgehend vollständige Nitrifikation (Ammonium – Nitrit – Nitrat) voraus, da das Zwischenprodukt „Nitrit“ in der folgenden Mikroschadstoffstufe den zum Aufbrechen der Stoffe benötigten Sauerstoff aufzehrt. Weiterhin ist eine stabile biologische Behandlung eine wichtige Voraussetzung für alle Verfahren zur Mikroschadstoffelimination, um zum Beispiel Betriebsprobleme durch abtreibende Schlämme zu verhindern.

Auch unter Beachtung, dass in der Kläranlage Brakeler Märsch künftig die Abwässer aus Bellersen und Hembsen mit gereinigt werden sollen, ist die Ertüchtigung der biologischen Stufe dringende Voraussetzung. Hierbei sollte das Belebungsbecken in jedem Fall als Zweikammer-Bauwerk redundant umgebaut werden. Dabei lässt sich gleichzeitig die feinblasige Belüftung in variable Zonen aufteilen, um in Abhängigkeit der Abwassertemperatur die Volumenanteile Nitrifikation-Denitrifikation anzupassen. Dies verbessert bei tiefen Temperaturen die weitgehende Nitrifikation zur Minimierung von $\text{NH}_4\text{-N}$ und bei hohen Temperaturen eine optimale Denitrifikation zur nachhaltigen Minderung des Wertes N_{ges} . Für die Denitrifikation ist durch zusätzliche Anordnung von Rührwerken die verfahrenstechnische Voraussetzung zu schaffen.

Zum Parameter **Phosphor** ist anzumerken, dass von den bisher bekannten und großtechnisch realisierten Verfahren zur Mikroschadstoffelimination nur die Lösung mit einer Filterstufe (Fuzzy, Tuch-, Sandfilter) eine technisch zielgerichtete Verminderung des Stoffes bewirkt. Als Beispiel sei das Pilotprojekt „Mikroschadstoffelimination durch Pulveraktivkohle und abschließende Abtrennung mit Fuzzy Filter in Barntrop“ des Landes NRW und der Bezirksregierung Detmold genannt. Im aktuellen Leistungsnachweis vom Monat Mai/Juni 2018 in Barntrop konnten Betriebsmittelwerte für P_{ges} von unterhalb 0,5 mg/l bis nahe der Abgabefreiheitsgrenze von 0,01 mg/l erreicht werden. Wegen der Zugabe von Pulveraktivkohle muss hierbei das Abwasser im Vollstrom behandelt werden. Auch wenn andere Verfahren zur Mikroschadstoffelimination (GAK oder Ozon) im Teilstrom betrachtet werden, wird die zur P-Elimination erforderliche Filterstufe im Vollstrom vorgesehen.

Die Umsetzung der vorgeschlagenen Lösungen lässt erwarten, dass die künftig verminderten Überwachungswerte eingehalten werden können.

4.5 Überprüfung der Bemessung der Kläranlage

Nach dem DWA Arbeitsblatt A 131 erfolgt eine Nachrechnung der Kläranlage Brakel 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 der Raumordnungsplan der Kläranlage präzisiert und die Voraussetzung für die optimale und effiziente Integration der neuen Reinigungsstufe zur Elimination von Mikroschadstoffen geschaffen.

1. Bemessung der Nachklärung

In einer Nebenrechnung wurde auf Basis der bekannten geometrischen Daten das Nachklärbecken nach den Empfehlungen des DWA A 131 Punkt 6.9 nachgerechnet.

Folgende Bemessungsgrundlagen wurden angesetzt:

- Mischwasserzufluss $Q_M = \text{Brakel } 184 \text{ l/s (2016)} + \text{Bellersen-Hembsen } 47 \text{ l/s (2016)} = \text{Summe künftig } 231 \text{ l/s}$
- $RV = 0,75$, horizontal, $h_e = 2,58$, $D = 38 \text{ m}$, Mittelbauwerk 3 m , $ISV = 110 \text{ ml/g}$, $t_e = 2 \text{ h}$, Schildräumer $0,7$, $h_{ges} = 2,38 \text{ m}$, Raumgeschwindigkeit = 108 m/h (Entwurf 1979 = 3 cm/s), Räumschildhöhe $0,40 \text{ m}$, Räumerarme $1,25$

Fazit: 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. **Im Ergebnis kann das vorhandene Nachklärbecken einen Volumenstrom von 192 l/s leisten.** Dieser Wert liegt unterhalb der Erlaubnis mit 236 l/s bzw. dem Entwurf 1979 mit 240 l/s .

Empfehlung: Als Voraussetzung für die Nachrüstung einer Stufe zur Mikroschadstoffelimination ist deshalb ein zweites Nachklärbecken herzustellen. **Ziel- Q_M einschließlich Reserven = 210 l/s für Vollstrombehandlung bei Mikroschadstoffelimination**; Aufteilung NKB 1 (vorh.) $2/3$ mit 140 l/s und **NKB 2 (neu) $1/3$ mit 70 l/s . Baugröße $D = 20 \text{ m}$, Tiefe $> 3 \text{ m}$ nach A 131 - jedoch $V \geq 1.500 \text{ m}^3$ für Zwischenzustand, nur ein Räumerarm.**

2. Bemessung der Belebung

In einer Nebenrechnung wurde auf Basis des vorhandenen Volumens das Belebungsbecken nachgerechnet. Folgende Bemessungsgrundlagen wurden angesetzt:

- Daten aus Berechnung der Nachklärung, sowie
- $Q_{d,konz} = \text{Brakel } 3.000 \text{ m}^3/\text{d}$, für Hochrechnung Brakel + Bellersen + Hembsen = $3.000 + 650 \text{ m}^3/\text{d} = 3.650 \text{ m}^3/\text{d}$
- $B_{d,4wm,max} = \text{bei Bemessungstemperatur für Brakel } 2.300 \text{ kg/d CSB}$, für Hochrechnung Brakel + Bellersen + Hembsen = 2.684 kg/d CSB als 85%-Wert
- $C_{TKN} / C_{CSB} = 0,11$, $C_P / C_{CSB} = 0,018$
- Volumen Belebung = 6.523 m^3 (Entwurf 1979)
- Lastfall Bemessungstemperatur 12°C (die anderen Lastfälle sind im Zuge der künftigen Planung nachzuweisen)

In **erster Nachrechnung** wurde die aktuell maßgebende Belastung bei Bemessungstemperatur für **Brakel** angesetzt. Mit den ermittelten Bemessungsgrundlagen ergab sich ein bei einem TS_{BB} von $3,44 \text{ kg/m}^3$ (aus Nachrechnung der Nachklärung mit $RV = 0,75$) ein Schlammalter von ca. 20 Tagen. Für Anlagen mit aerober Schlammstabilisierung und gezielter Denitrifikation wird jedoch ein Schlammalter von 25 Tagen erwartet, um weitgehende Stabilisierung und Vermeidung betrieblicher Probleme sicherzustellen. Tatsächlich lag wegen des zeitweise niedrigen Schlammindex der TS_{BB} in den Jahren 2014 bis 2016 im Mittel bei $3,80 \text{ kg/m}^3$ bzw. im 85%-Wert bei $4,17 \text{ kg/m}^3$. Hieraus ergab sich ein sehr gutes **Schlammalter von 22 bis 25 Tagen**.

In **zweiter Hochrechnung** wurde als maßgebende Fracht der 85%-Wert aus Brakel zuzüglich Bellersen und Hembsen angesetzt. Mit dem vorhandenen Volumen ließe sich demnach bei einem TS_{BB} von $3,80 \text{ kg/m}^3$ ein **Schlammalter von 18 Tagen** bzw. bei einem TS_{BB} von $4,17 \text{ kg/m}^3$ ein Schlammalter von **20 Tagen** erreichen.

In beiden Lastfällen beträgt der Denitrifikationsanteil am Belebungsvolumen 40 bis 50%.

Fazit: Vorläufig ist davon auszugehen, dass bei Zusammenführung von Brakel mit Bellersen und Hembsen **kein zusätzliches Belebungsvolumen** erforderlich sein wird. Der Rückgang des Schlammalters wird bei künftiger Klärschlammverbrennung vermutlich unproblematisch. Jedoch sind hinsichtlich des erforderlich hohen Denitrifikationsanteils die verfahrenstechnische Voraussetzung sicherzustellen (variable Belüftungszonen, Umlaufbecken,...).

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).

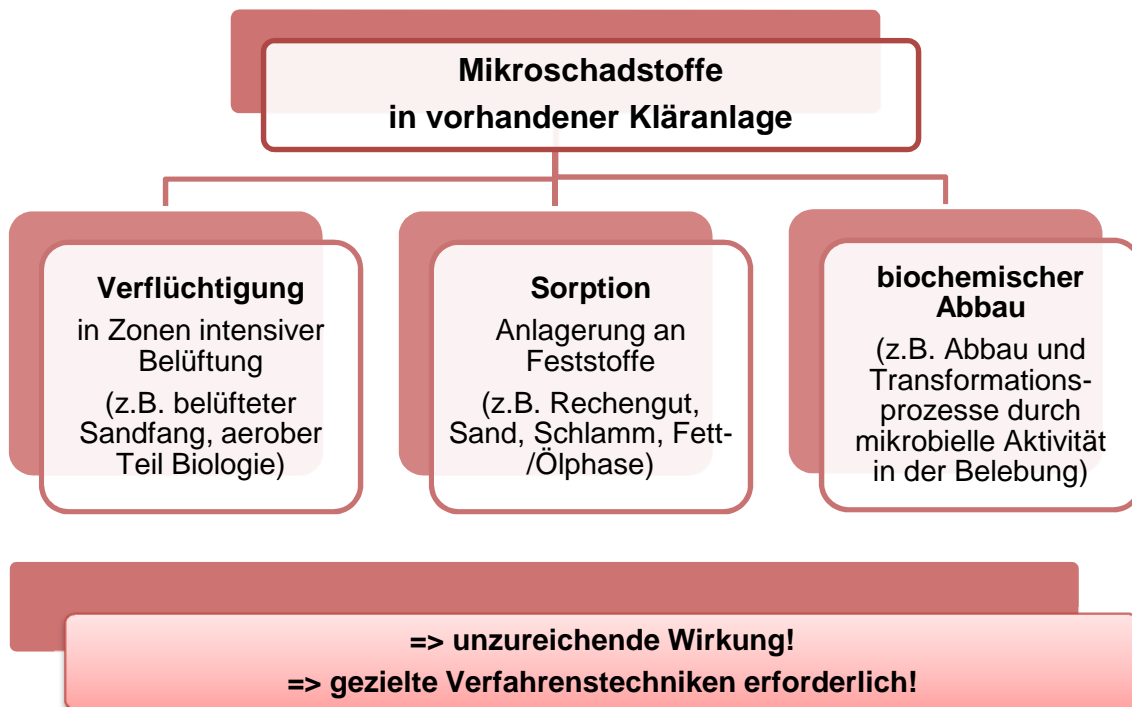


Abbildung 5-1: Mikroschadstoffelimination in vorhandenen Reinigungsstufen einer Kläranlage

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.

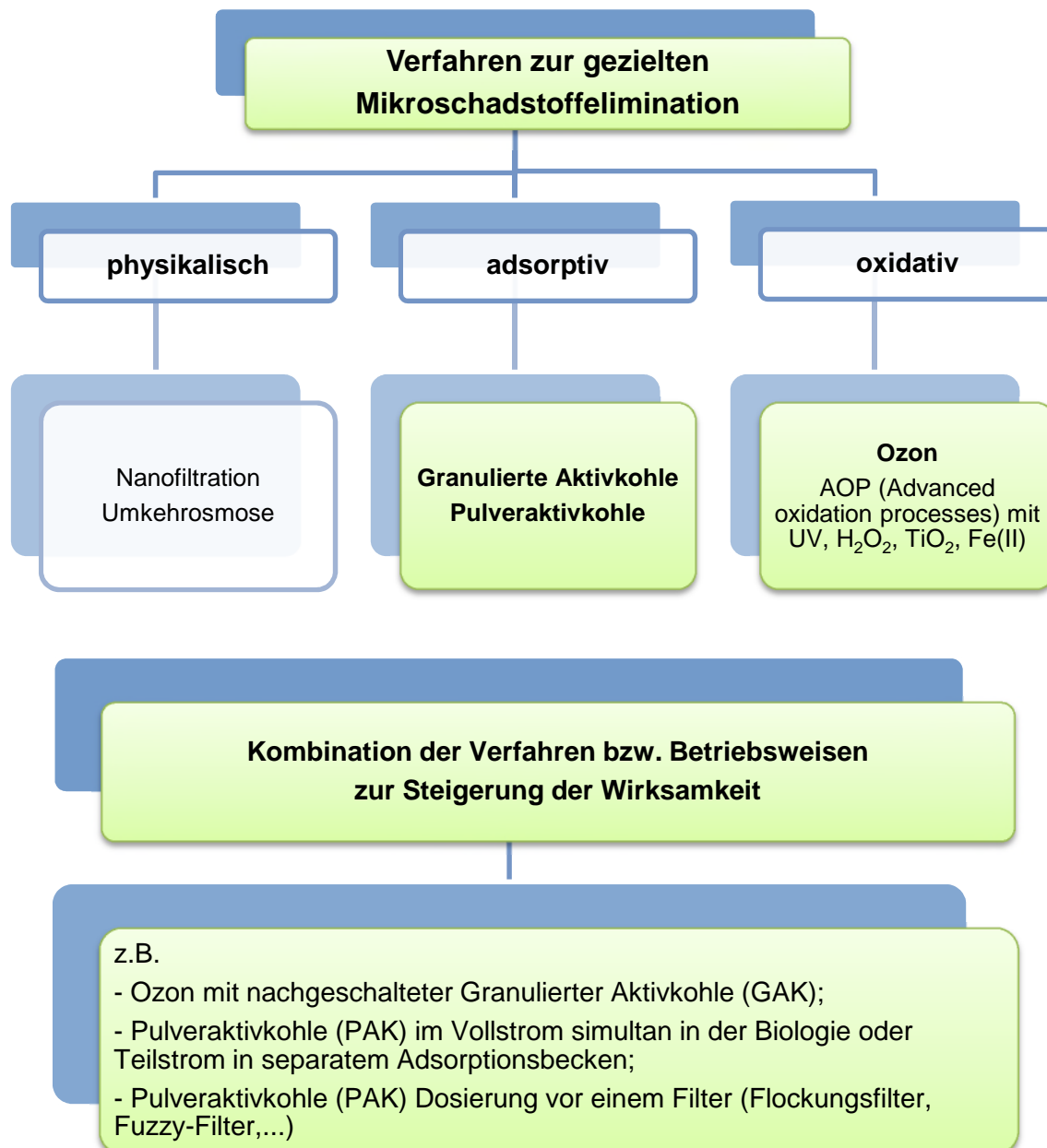


Abbildung 5-2: Verfahren zur gezielten Mikroschadstoffelimination

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.

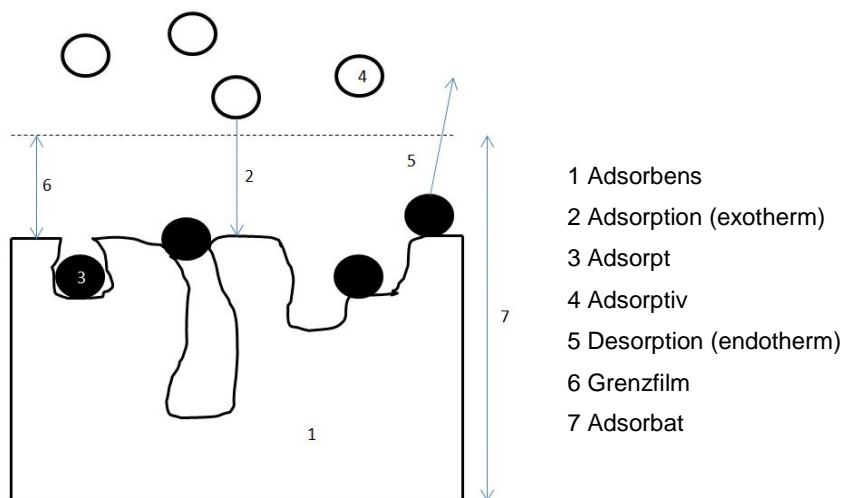


Abbildung 5-3: Verwendete Definitionen und Begriffe (nach Bathen 2001)

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.

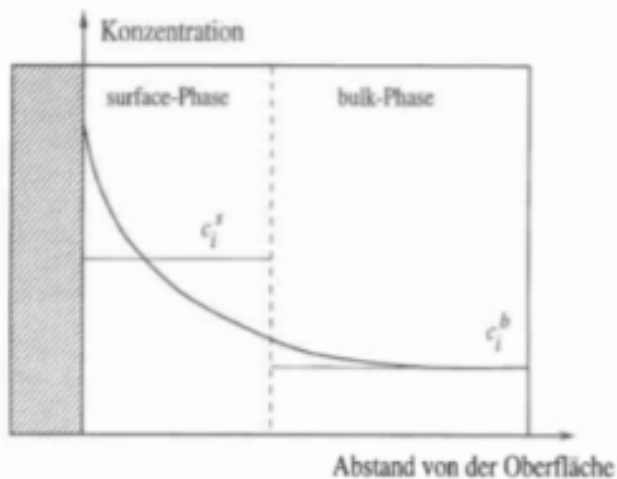


Abbildung 5-4: Gibbs'sche Phasengrenze (Bathen und Breitbach, 2001)

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.

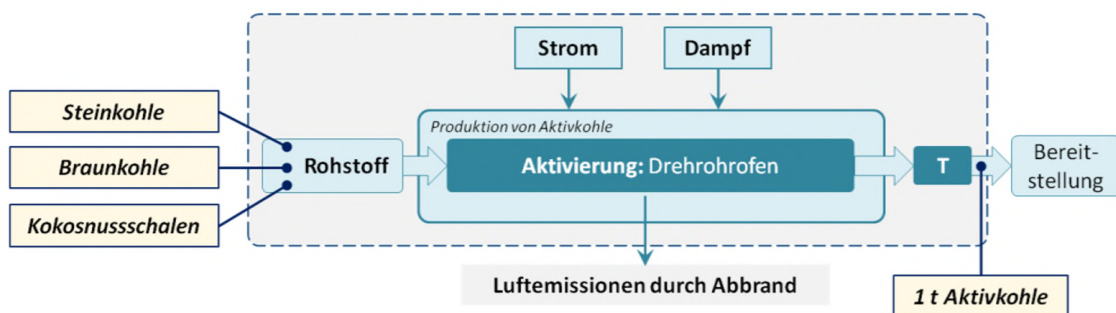


Abbildung 5-5: Prozessmodell zur Herstellung von Aktivkohle (Dr. Remy, Kompetenzzentrum Wasser Berlin, 2017)

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 m²/g aus. In der nachstehenden Abbildung 5-6 ist die Oberflächenstruktur von Aktivkohle ersichtlich.

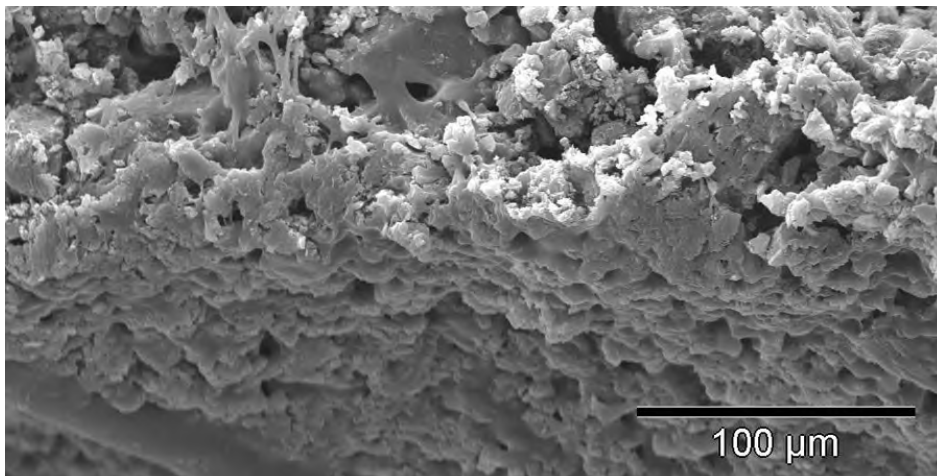


Abbildung 5-6: Porenstruktur von Aktivkohle (helsa, 2017)

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.

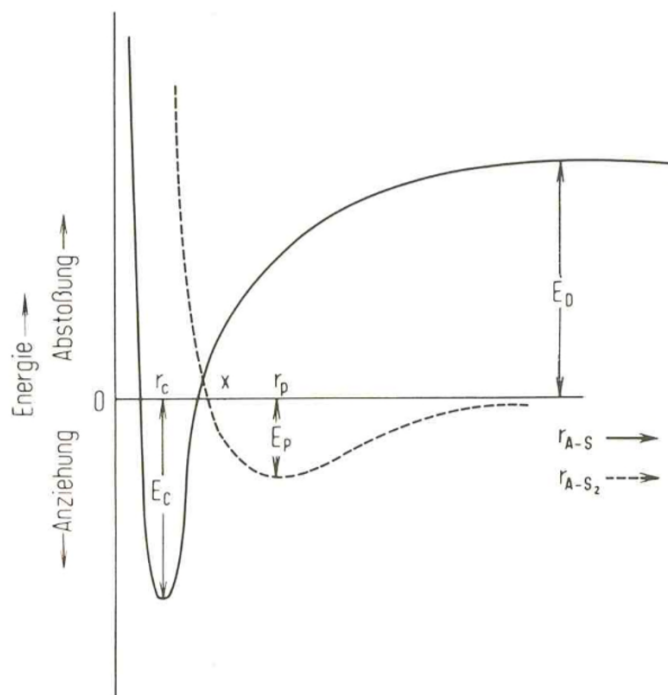


Abbildung 5-8: Abstandsabhängige potentielle Energie eines Adsorptivs an einem Adsorbens (Wedler, 1970)

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. Karusselladsorber
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).

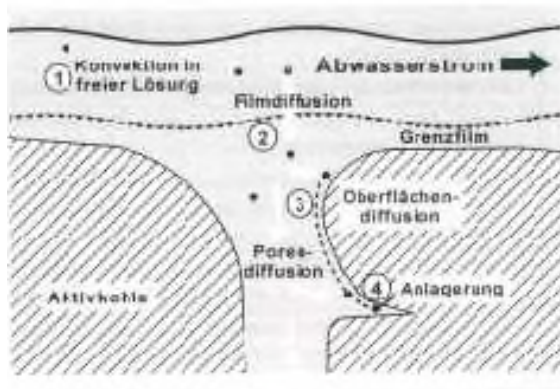


Abbildung 5-9: Transportschritte der Aktivkohleadsorption (Metzger, 2010)

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.

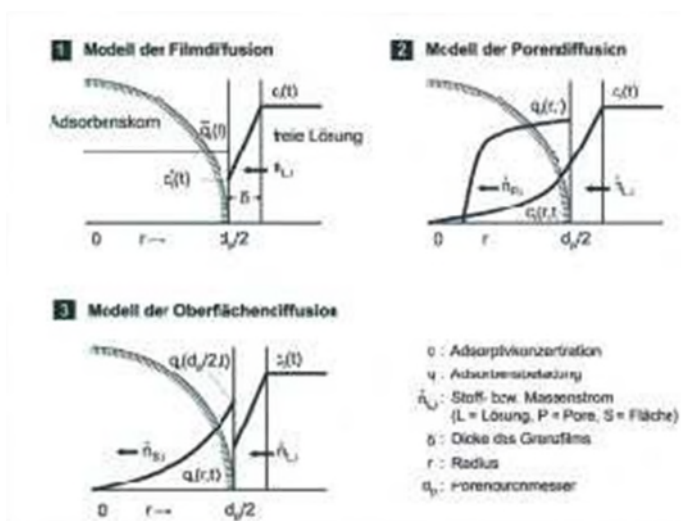


Abbildung 5-10: Transportmechanismen bei der Aktivkohleadsorption (Hydroingenieure, 2012)

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:

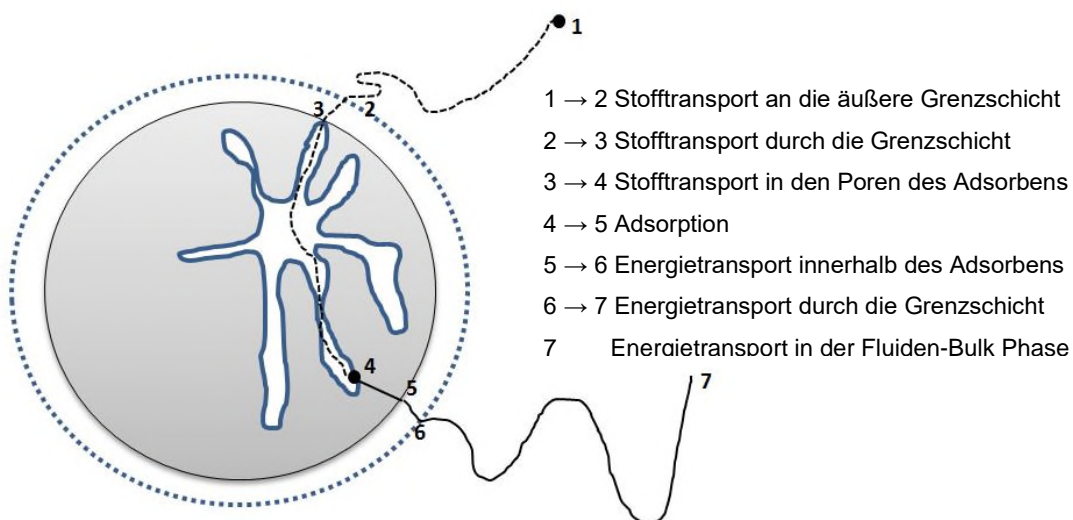


Abbildung 5-11: Teilschritte der Adsorption (nach Bathen 2001)

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.

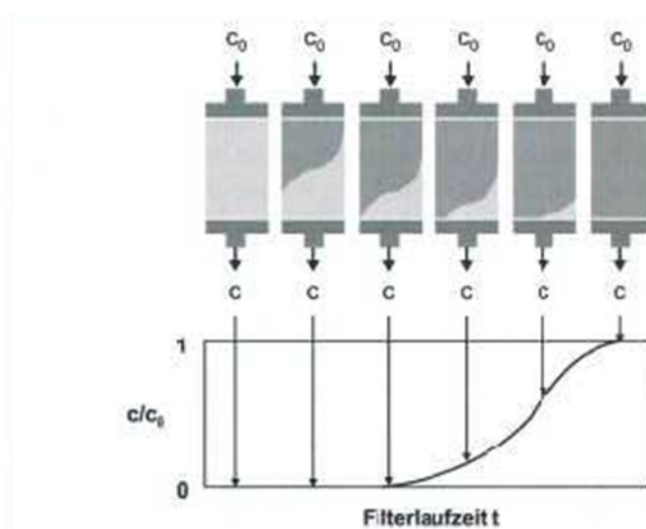


Abbildung 5-12: Beladungsprofil eines Aktivkohlefilters (Hydroingenieure, 2012)

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).

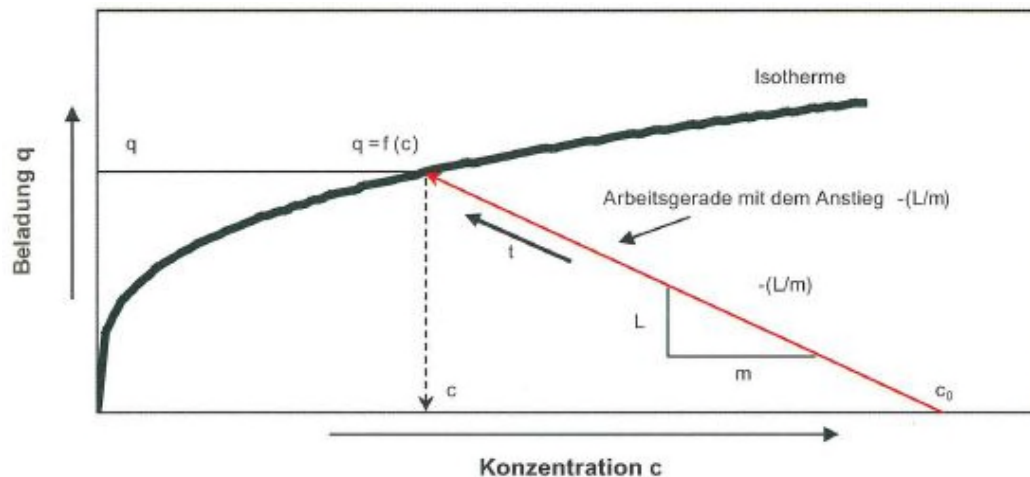


Abbildung 5-13: Aufnahme eines Isothermenpunktes (Metzger, 2010)

Für die Darstellung des Verlaufs einer Isotherme sind mehrere Messpunkte erforderlich. Die Ermittlung eines Isothermenpunktes ist in **Abbildung 5-13** **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** 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.

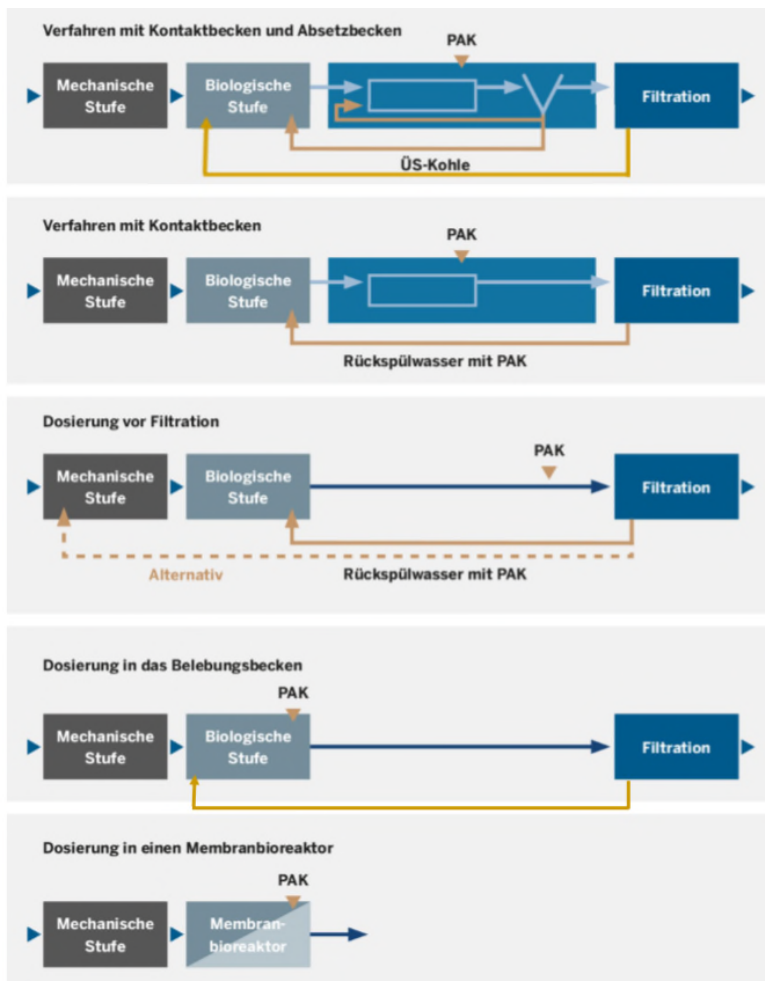


Abbildung 5-14: Möglichkeiten zur Einbindung der PAK-Dosierung (Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW, 2018)

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 dem damit einhergehenden guten Stoffaustausch zu kurzen benötigten Mindestkontaktzeiten, in der Regel werden 15 – 30 Minuten als ausreichend angesehen (Bathen, 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 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 (MULNV NRW, 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 passierte, 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.

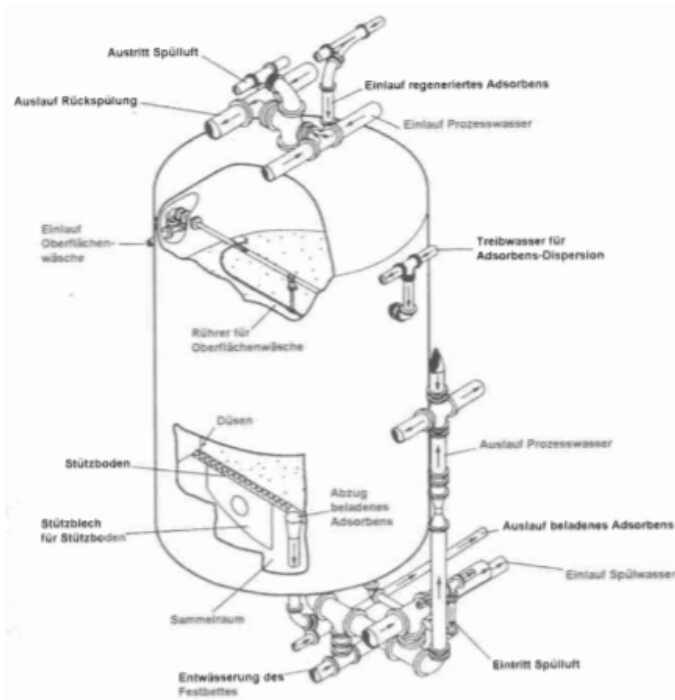


Abbildung 5-15: Geschlossener einstufiger Aktivkohledruckfilter (Bathen, 2001)

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)

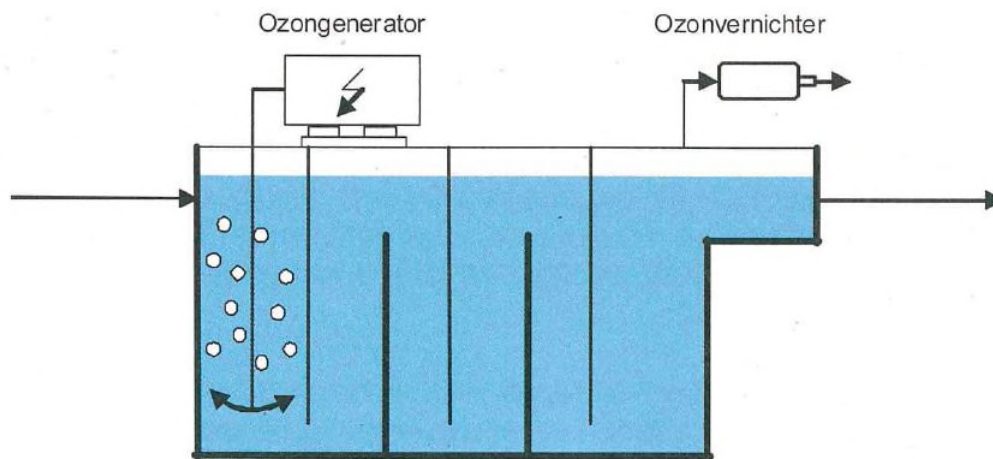


Abbildung 5-16: Skizze Verfahren der Ozonung (Spurenstoffe 2015)

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 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

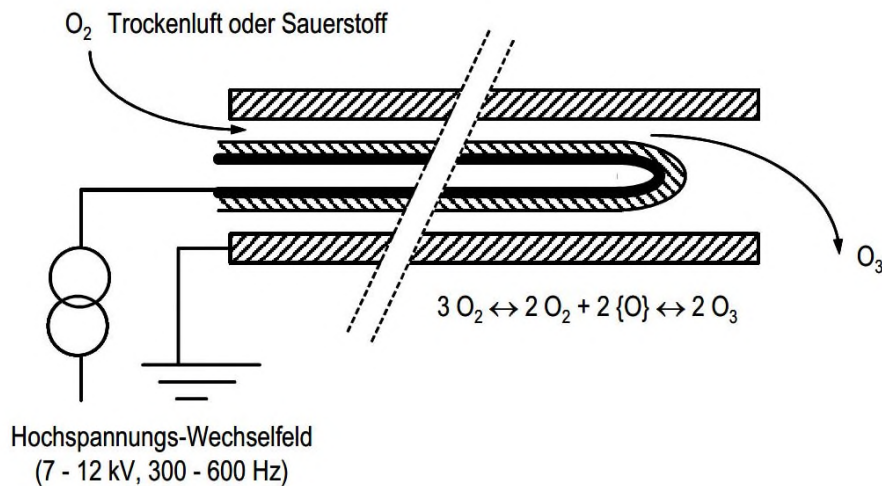


Abbildung 5-17: Schematische Darstellung Ozonerzeugungsanlage (Gujer 2007)

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.

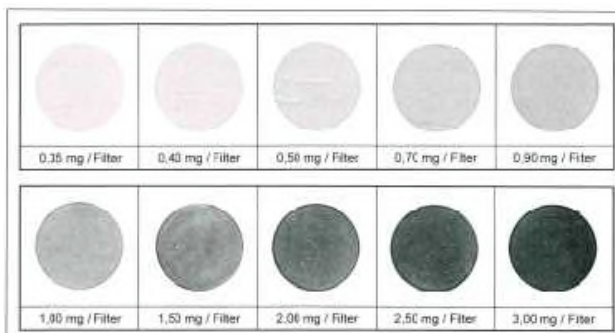


Abbildung 5-18: Schwarzgrad verschiedener PAK-Einwaagen (Metzger, 2010)

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 μm .

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.

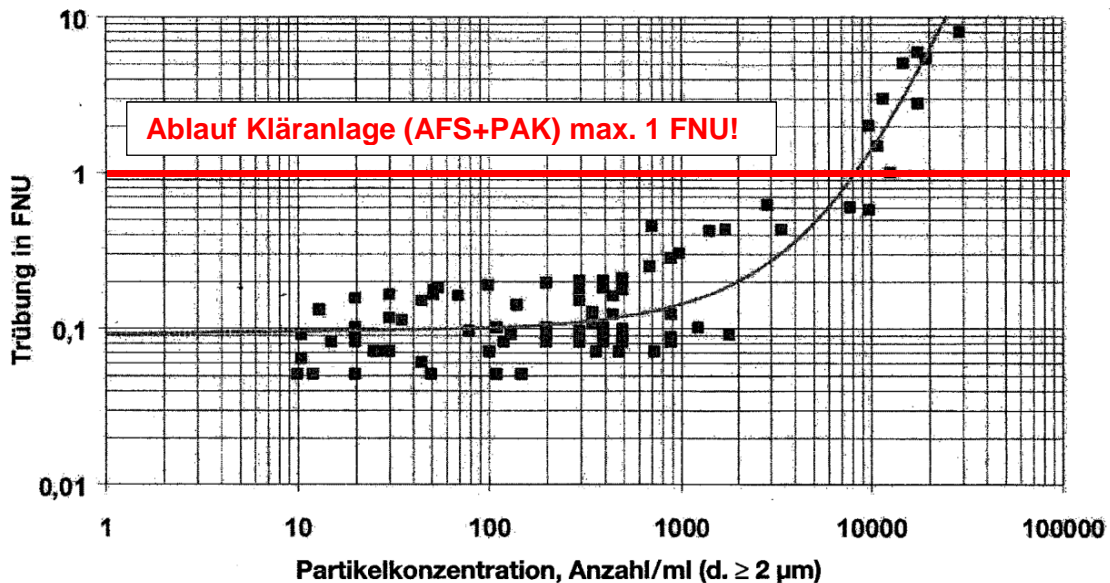


Abbildung 5-19: Vergleich von Trübungswerten mit Partikelkonzentrationen für verschiedene Roh- und Reinwässer (DVGW-Arbeitsblatt W 213-6), ergänzt durch Danjes

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_{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
Ozonierung	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	
PAK-Adsorption	Keine Metabolitenbildung	Meist höhere Investitionen
	Niedrigere Energiekosten	Meist höhere Betriebskosten
	Förderliche Wirkung der Über-schusskohle hinsichtlich der Schlammbehandlung und Schlammentwässerung	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 _{ges} -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. Klärschlammabfuhrwege
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 mikrobiellen Abbauprozess intensivieren und somit gezielt zum weiteren Schadstoffabbau genutzt werden kann (Maier, 1993). Als typische Verfahrenskombinationsmöglichkeiten gelten 1) Ozon und GAK (BAK) sowie 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 Brakeler Märsch sowie der Kläranlagen Bellersen und Hembsen herangezogen. Da die beiden Kläranlagen Bellersen und Hembsen künftig als Pumpwerke funktionieren, können die vorliegenden Ganglinien nicht für die Nachweise herangezogen werden. Es wird deshalb ausschließlich der Nachweis für die Kläranlage Brakeler Märsch geführt und die Auslegungswassermenge prozentual mit einem Aufschlag von 30% für die beiden Kläranlagen erhöht.

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 (Tabelle 6-1)

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

Wert	Jahr 2014	Jahr 2015	Jahr 2016	arithmetisches 3-Jahresmittel $Q_{T,h,max,3-aM}$
Maximaler stündlicher Trockenwetterabfluss $Q_{T,h,max}$	48,9 l/s	54,6 l/s	47,3 l/s	50 l/s (bzw. 180 m³/h)
Aufschlag für künftigen Anschluss von Bellersen und Hembsen in der Höhe von 30%				65 l/s (bzw. 234 m³/h)

2. Ermittlung der mit diesem $Q_{T,h,max,3-aM}$ behandelbaren Wassermenge ebenfalls als arithmetischer Mittelwert der letzten 3 Jahre $Q_{\text{behandelbar},3-aM}$ (Abbildung 6-1, Abbildung 6-2 und Abbildung 6-3)

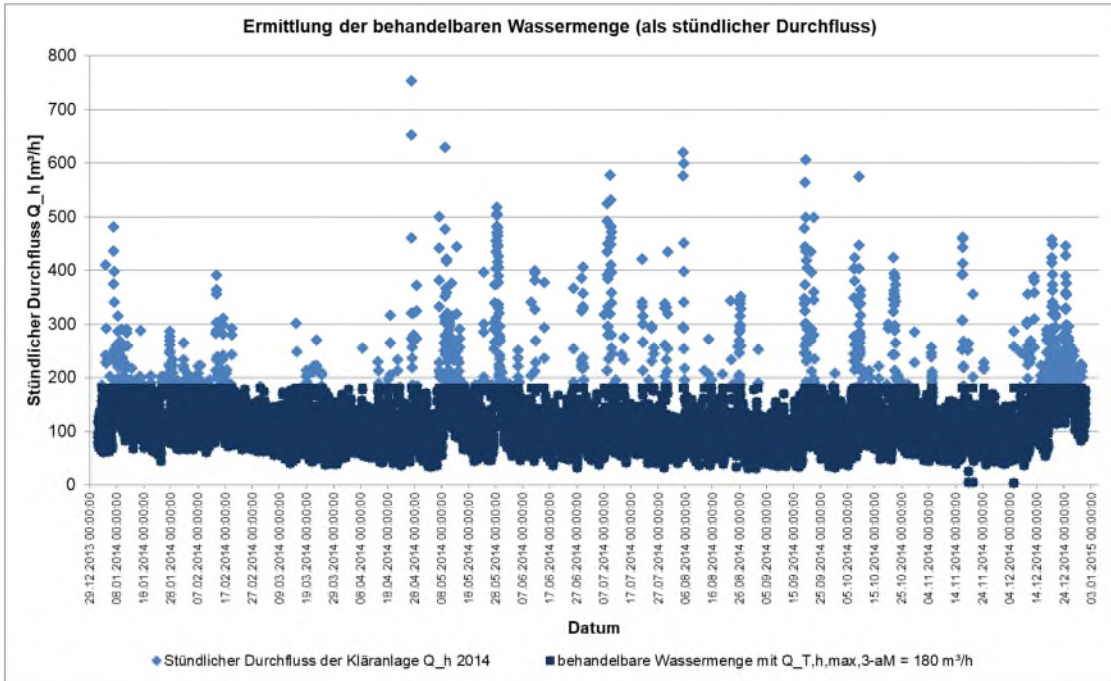


Abbildung 6-1: Ermittlung der behandelbaren Wassermenge für das Jahr 2014

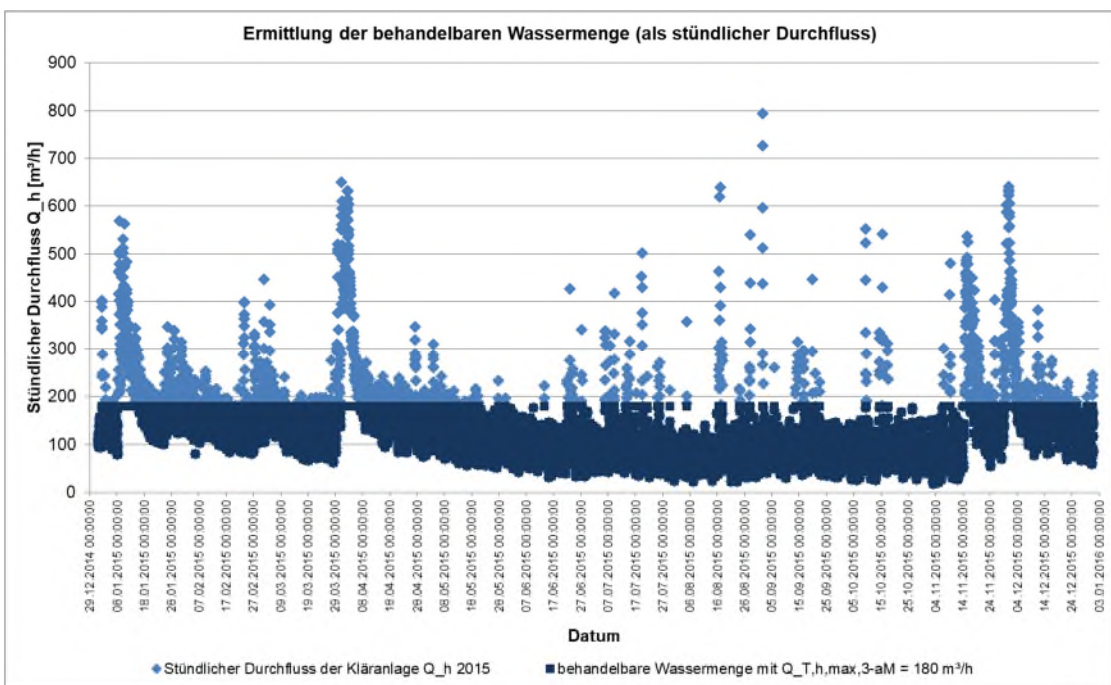


Abbildung 6-2: Ermittlung der behandelbaren Wassermenge für das Jahr 2015

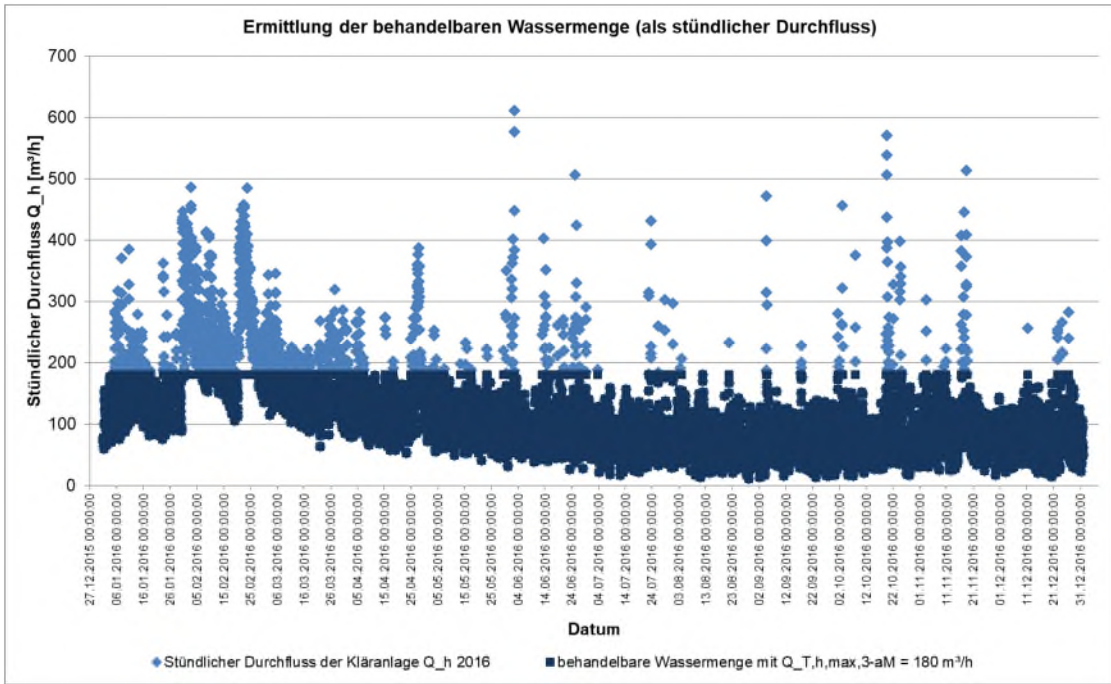


Abbildung 6-3: Ermittlung der behandelbaren Wassermenge für das Jahr 2016

Zusätzlich zu den nach DWA 198 ausgewerteten Jahren 2014 bis 2016 wird das Jahr 2017 als Vergleich und der Erkennung von Tendenzen hinzugezogen (Abbildung 6-4).

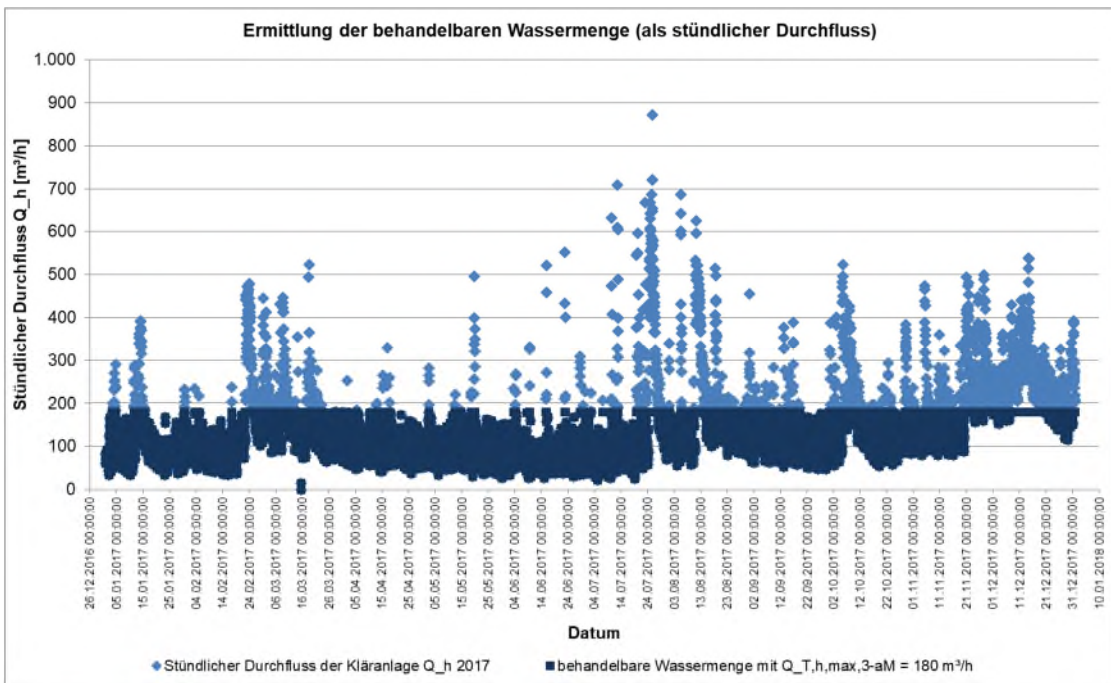


Abbildung 6-4: Ermittlung der behandelbaren Wassermenge für das Jahr 2017

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, *hier zusätzlich mit dem Jahr 2017*

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

Jahr	Jahresschmutz- Wassermenge JSM_{3-aM}	Jahresabwasser- Menge JAM_{3-aM}	Anteil JSM / JAM
2014	879.571 m ³	1.055.515 m ³	83,3%
2015	1.043.996 m ³	1.221.210 m ³	85,5%
2016	879.236 m ³	1.045.200 m ³	84,1%
2017	960.925 m ³	1.286.083 m ³	74,7%
arithmetischer Mittelwert	940.932 m³	1.152.002 m³	81,7%

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), *hier zusätzlich mit dem Jahr 2017*

Tabelle 6-3: Anteil der behandelbaren Wassermengen der letzten 3 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 ³	m ³	mit $Q_{T,h,max,3-aM} = 50 \text{ l/s} / 180 \text{ m}^3/\text{h}$		
2014	879.571	1.055.515	982.698 m ³	JA	93%
2015	1.043.996	1.221.210	1.075.196 m ³	JA	88%
2016	879.236	1.045.200	952.117 m ³	JA	91%
2017	960.925	1.286.083	1.094.653 m ³	JA	85,1%
Mittel	940.932	1.152.002	1.003.337 m³	JA	87,1%

Nach der Empfehlung ist die Auslegungswassermenge für Mischsysteme bei einer Teilstrombehandlung von 50 l/s bzw. 180 m³/h in erforderlicher Größe angesetzt!

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.

Im Erlaubnisbescheid nach § 8 WHG vom 19.10.2015 für die „Einleitung von geklärtem Abwasser aus der Kläranlage Brakeler Märsch in die Brucht“ wurde als Höchstabwasserabfluss 236 l/s bzw. 424,8 m³ / 0,5h festgelegt. 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
	Entwurf 1979	2014	2015	2016	
Maximaler stündlicher Trockenwetterabfluss $Q_{T,h,max}$	$Q_T = 230,03 \text{ l/s}$	156,6	111,3	86,1	Mittel 118 l/s
Berechnung A 198 Mischwasserabfluss Q_M	$Q_R = 240,46 \text{ l/s}$	153	160	184	Mittel 166 l/s Empfehlung 160 l/s (bzw. 576 m³/h)
Aufschlag für künftigen Anschluss von Bellersen und Hembsen in der Höhe von 30%					210 l/s (bzw. 760 m³/h)

Die hier aus wirtschaftlichen Gründen empfohlene Abwassermenge für die Vollstrombehandlung liegt über dem Maximal- und Mittelwert des maximalen stündlichen Trockenwetterabflusses in den Jahren 2014 bis 2016. Sie würde dazu führen, dass bei starken Niederschlägen in dem Regenüberlaufbecken eine Pufferung stattfindet.

Nach dem neuen Raumordnungskonzept wurde hierfür ein neues, größeres RÜB mit einem Volumen von 3.000 m³ empfohlen. Die Differenz aus dem maximalen stündlichen Regenwetterabfluss (MaxMax) in den Jahren 2014 bis 2016 mit 288 l/s abzüglich 160 l/s könnte hier über einen Zeitraum von 6,5 Stunden gepuffert werden. Dieses Puffervolumen liegt höher als der mittlere tägliche Zufluss im Jahresmittel dieses Zeitraumes. Die Entleerung des RÜB bei Vollfüllung innerhalb eines Tages würde eine Drosselabflussmenge von 34,7 l/s (nach Mitteilung der Kläranlage zurzeit: 15 l/s) erfordern.

Der hier empfohlene Wert für Vollstrombehandlung korrespondiert mit dem künftigen Mischwasserabfluss für zwei Nachklärbecken in Höhe von 210 l/s (NKB 1 = 140 l/s+ NKB 2 = 70 l/s).

In der Summe der neu zu schaffenden Volumen aus RÜB-neu und NKB 2-neu ergeben sich ca. 4.500 m³ als Volumen für den Zwischenbauzustand der Belebung. Damit kann über einen kürzeren Zeitraum das vorhandene Belebungsbecken für die künftige optimale Mikroschadstoffelimination hergerichtet werden (siehe ausführliche Beschreibung im Punkt 7.2 Vorbereitende Maßnahmen).

6.2 Verfahrenstechnische Auslegung

Die Anforderungen für die Entfernung von Mikroschadstoffen erfolgt nach der Auslegungsempfehlung des Kompetenzzentrums Mikroschadstoffe.NRW. Folgende Grundsätze 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 $q_A = 2$ m/h Aufenthaltszeit minimal 2 h
- Hohes Kohleschlammalter in der Adsorptionsstufe durch PAK-Kohleschlammkreislauf
- Mehrfachbeladung der PAK durch Rückführung der Überschussskohle in die biologische 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 Aktivkohle ist bauartbedingt der Rückhalt in Druck- oder Schwerkraftfilter technisch gegeben. 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 Schlammes 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 ³	ca. 1.010 kg/m ³
	scheinbare Dichte (Dichte einschließlich geschlossener und nicht zugänglicher Poren)	600 - 800 kg/m ³	
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 Brakel 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 KA Brakeler Märsch

7.1 Festlegung der Varianten

In dieser Machbarkeitsstudie war zu untersuchen, wie die verfahrenstechnische Erweiterung der Kläranlage Brakeler Märsch 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 Brakel

Variante	Kurzname	Beschreibung
V	Vorbereitung	Vorbereitende Maßnahmen zur Ertüchtigung der Kläranlage im Hinblick auf Sicherstellung und Optimierung der Mikroschadstoff-Elimination
Verfahren mit Granulierter Aktivkohle (GAK)		
I	GAK	GAK-Adsorber als Druckkessel im Teilstrom, vorgeschalteter Filter (hier untersucht: Fuzzy-Filter), Vollstrom
Verfahren mit Pulveraktivkohle (PAK)		
II	PAK Vollstrom	Adsorptionsstufe simultan, nachgeschalteter Filter (hier untersucht: Fuzzy-Filter)
Verfahren mit Ozon (O₃)		
III	Ozon	Ozonungsstufe mit Nachbehandlung im Teilstrom Filter zur Nachbehandlung Phosphorelimination (hier untersucht: Fuzzy-Filter), Vollstrom

Für die Kläranlage Brakel wird in allen Lösungen eine Ertüchtigung des Bestandes als vorbereitende Maßnahme erforderlich (Variante 0). 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). Hierzu 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.

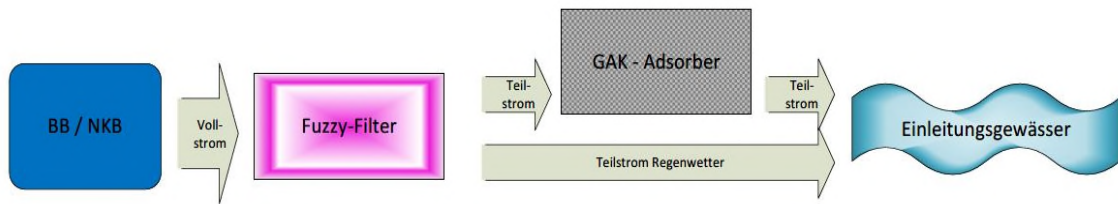


Abbildung 7-1: Teil- bzw. Vollstrombehandlung bei Einsatz von GAK

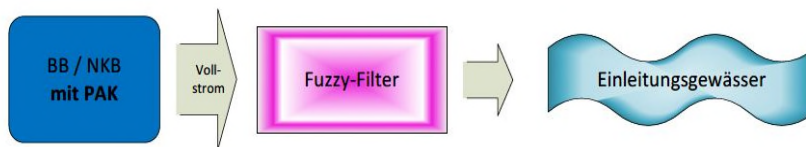


Abbildung 7-2: Vollstrombehandlung bei Einsatz von PAK

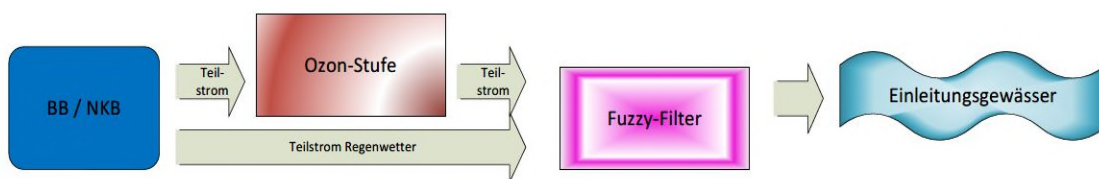


Abbildung 7-3: Teil- bzw. Vollstrombehandlung bei Einsatz von Ozon

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 Brakeler Märsch 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 Vorbereitende Maßnahmen

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	Umbau Rohrleitungen RW-Pumpwerk, kurze Leitung zu einem neuen RÜB+Pufferbecken	Vermeidung von hohen Kosten für neuen Energiehauptanschluss vom EVU mit neuem Trafo und neuem Notstromaggregat
Optimierung Auslegungswassermenge	Herstellung eines neuen Regenüberlaufs- bzw. Pufferbeckens	Senkung der Kosten für neue Stufe zur Mikroschadstoffelimination; Schaffung sicherer Betriebsführung, da Extremwassermengen durch das Pufferbecken gleichmäßig werden; Eliminationserfolg höher durch gleichmäßige Belastung der neuen Stufe
Vermeidung Sauerstoffzehrung	Ertüchtigung Belebungsbecken Sicherstellung 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	Bei Mikroschadstoffelimination mit GAK und Ozon führen abfiltrierbare Stoffe aus überlasteter Nachklärung zu Betriebsstörung durch Verschlämmung 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 RÜB+Pufferbecken bzw. Nachklärbecken 2 sind im Bauablauf zuerst zu realisieren, damit überhaupt eine Ertüchtigung des Belebungsbeckens erfolgen kann (Tabelle 7-3). Im Anschluss können neue Ozon-Becken, Filter- oder Adsorberhallen errichtet werden.

Tabelle 7-3: Bauwerkskonzept zu den vorbereitende Maßnahmen

Bauwerk	Konstruktion / technische Ausrüstung
Umbau Rohrleitungen RW-Pumpwerk	Neue Rohrleitung in kurzer Länge vom RW-Pumpwerk zum neuen RÜB+Pufferspeicher
RÜB+Pufferspeicher	Neubau mit ca. 3.000 m ³ Volumen; Aufteilung in mehrere Kammern mit Spüleinrichtungen; Entleerung im Freigefälle mit kurzer Leitung zum SW-Pumpwerk; Notentlastung mit neuer Leitung zum Anschluss Bestand hinter Ablauf-Bauwerk; Schutz der mechanischen Stufe vor Überlastung nach Anschluss von Bellersen und Hembsen
Nachklärbecken 2	Leistung bis 70 l/s (= 1/3 vom Vollstrom) Durchmesser 20 m, Mindesttiefen nach A 131, Volumen mindestens 1.500 m ³ wegen Bauwischenzustand; zur Redundanz als zweites, zusätzliches Becken; Räumerbrücke; Schutz der Nachklärung 1 vor Überlastung und Schlammabtrieb nach Anschluss von Bellersen und Hembsen
RS-ÜS-Pumpwerk 2	Förderung Rücklauf- und Überschussschlamm
Verteilerschächte	Verteilung am Ablauf Sandfang und Ablauf Belebungsbecken
Belebungsbecken	Ertüchtigung Bestand; zur Redundanz 2 Kammern; Feinblasige, gestaffelte Belüftung – mit variablen Beckenzonen zur vollständigen Nitrifikation bei tiefen Temperaturen (Vermeidung Nitritproblem!), Rührwerke für intermittierende Denitrifikation, Simultanfällung Phosphor; Untersuchung und Ersatz oder Sanierung der fast 40 Jahre alten Rohrleitungen vom Sandfang zur Biologie; Sicherung Nitrifikation und Denitrifikation nach Anschluss von Bellersen und Hembsen – neuer Überwachungswert für NH ₄ -N
Abbruch alte MW-Behandlung	Außerbetriebnahme und Freimachen für Wasserwerk (zentrale Enthärtung)

In den dieser Machbarkeitsstufe beigefügten Zeichnungen sind die Maßnahmen zur Ertüchtigung der Kläranlage dargestellt.

Für die Ertüchtigung des Bestandes wie vor beschrieben ist ein Zwischenbauzustand erforderlich. Die notwendigen Arbeitsschritte sind im Folgenden beschrieben und in den Kosten zur Ertüchtigung (Variante 0) erfasst.

1. Herstellung eines RÜB+Pufferbeckens mit Volumen ca. 3.000 m³; ohne technische Ausrüstung
2. Herstellung eines Nachklärbeckens 2 nach A 131, jedoch Volumen ca. 1.500 m³; ohne technische Ausrüstung; in der Summe beider Becken ca. 4.500 m³ - wobei andere Volumenaufteilung auch möglich ist
3. Herstellung von verbindenden Leitungen und Schachtbauwerken
4. Ausrüstung RÜB mit Leihbelüftung und neuen Rührwerken, provisorische Prozessführung
5. Ausrüstung NKB 2 mit Leihbelüftung und neuen Rührwerken, provisorische Prozessführung
6. NUR in warmer Jahreszeit:
Abwasserführung aus dem Sandfang zum RÜB als Belebung 1a und dann zum NKB 2 als Belebung 1b; von Belebung 1b zum vorhandenen Nachklärbecken 1; weiter zum Ablauf; ÜS- und RS-Schlamm ggfs. in temporärer Leitungsverlegung;
nach erfolgreichem Test der Ersatzbiologie 1a und 1b wird altes Belebungsbecken außer Betrieb genommen, entleert, gereinigt und zum Zweikammerbecken mit neuer Zuleitung ertüchtigt; Ausrüstung mit variablen Belüfterfeldern
7. NACH Ertüchtigung der vorhandenen Belebung – Wiederinbetriebnahme und Betriebstest der Prozessführung; schrittweiser Umbau der neuen Rührwerke aus Ersatz-Biologie 1a und 1b in ertüchtigte Belebungsbecken-Kammern; Außerbetriebnahme der Ersatz-Biologie 1a und 1b
8. Entleerung und Reinigung der Ersatz-Biologie 1a; Nachrüstung technische Installation für RÜB-Beckenreinigung usw.
9. Entleerung und Reinigung der Ersatz-Biologie 1b; Nachrüstung technische Installation für Nachklärung, wie Räumern, Ablaufrinne, usw.
10. Außerbetriebnahme und Abbruch alte Mischwasserbehandlung, Freimachen

Nach dem Zwischenbauzustand kann die Herstellung des Endzustandes zur Mikro Schadstoffelimination und auch künftig die Anbindung von Bellersen und Hembesen erfolgen.

Anmerkungen:

Das vorhandene Belebungsbecken besitzt nur in einem Teil eine innenliegende Denitrifikationskammer und ist nicht redundant. Die Ertüchtigung in zwei getrennte Kammern erfordert die komplette Außerbetriebnahme. Damit die beiden Belebungsammern entsprechend beschickt werden können, ist ein neues Verteilerbauwerk am Ablauf Sandfang erforderlich.

Da der Umbau der Kläranlage unter laufendem Betrieb erfolgen muss, ist eine provisorische Belegung zur Verfügung zu stellen. Das vorhandene Regenbecken ist mit seinen 300 m³ deutlich zu klein. Es ist eine Ersatz-Biologie bereitzustellen, die nach A 131 bemessen ist und nach erster Berechnung ein Mindest-Volumen von 4.500 m³ erfordert. Dies könnte auf das RÜB+Pufferbecken und das NKB 2 aufgeteilt werden.

Aus Gründen der Redundanz ist ein zweites Nachklärbecken zu bauen, da auch das Abwasser aus Bellersen und Hembesen zukünftig mit in Brakel zu behandeln ist. Das aktuell vorhandene Nachklärbecken ist jetzt schon unterdimensioniert. Zusätzlich sind ein Verteilerbauwerk und ein weiteres Rücklauf- und Überschussschlammumpwerk 2 herzurichten. Diese Bauwerke sollten für den Zwischenbauzustand mit genutzt werden.

Die jetzige Mischwasserbehandlung ist künftig nicht mehr nutzbar. Der Mischwasser-Rechen mit Leitungen und das RÜB 300 m³ sind zurückzubauen. Auf der Grünfläche neben der Einfahrt ist als Ersatz ein Parkplatz für Einsatzfahrzeuge und Mitarbeiter- sowie Besucher-PKW anzuordnen. Damit die Zuwegung auf dem Betriebsgelände gewährleistet ist, wird eine neue Umfahrt um das Nachklärbecken 2, die Mikroschadstoffstufe, entlang der Grundstücksgrenze, dem Ablaufbauwerk und zurück zur Einfahrt geplant.

An dieser Stelle sei ausdrücklich erwähnt, dass die hier vorgeschlagene Lösung mit dem Zwischenbauzustand eine einmalige Chance für die Stadt Brakel darstellt, das vorhandene Belebungsbecken mit Grundleitungen zu ertüchtigen bzw. zu sanieren. Auf Grund des Alters von fast 40 Jahren steht zu befürchten, dass die Biologie durch einen Havariefall vollständig ausfällt.

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 Aktivkohle, die nach Erschöpfung ihrer Adsorptionskapazität ausgetauscht und erneuert bzw. regeneriert werden muss. Das Verfahrensschema wird in Abbildung 7-4 aufgezeigt.

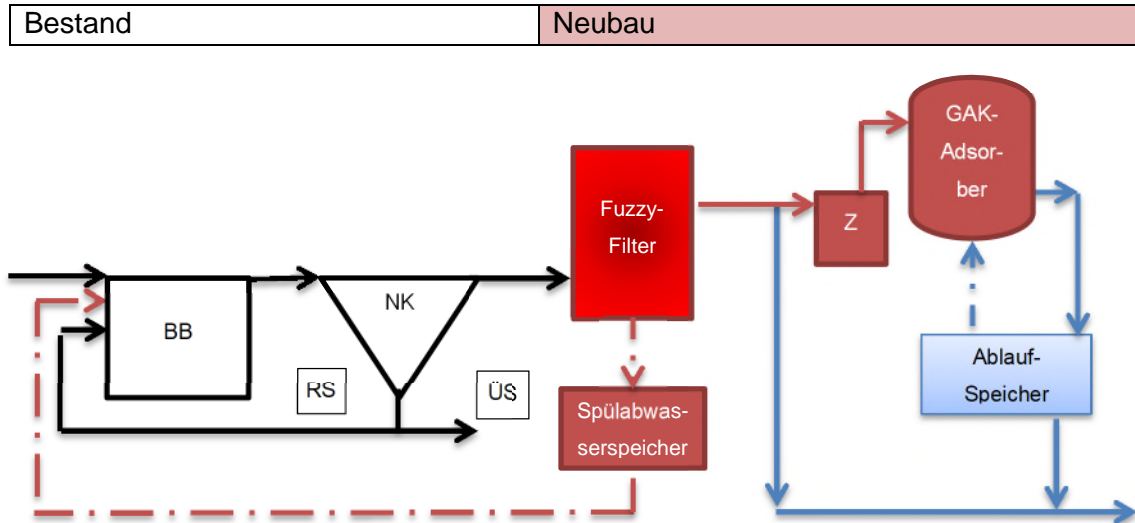


Abbildung 7-4: Verfahren Variante I - Fuzzy-Filter Vollstrom vor GAK-Adsorber Teilstrom

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 3 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.

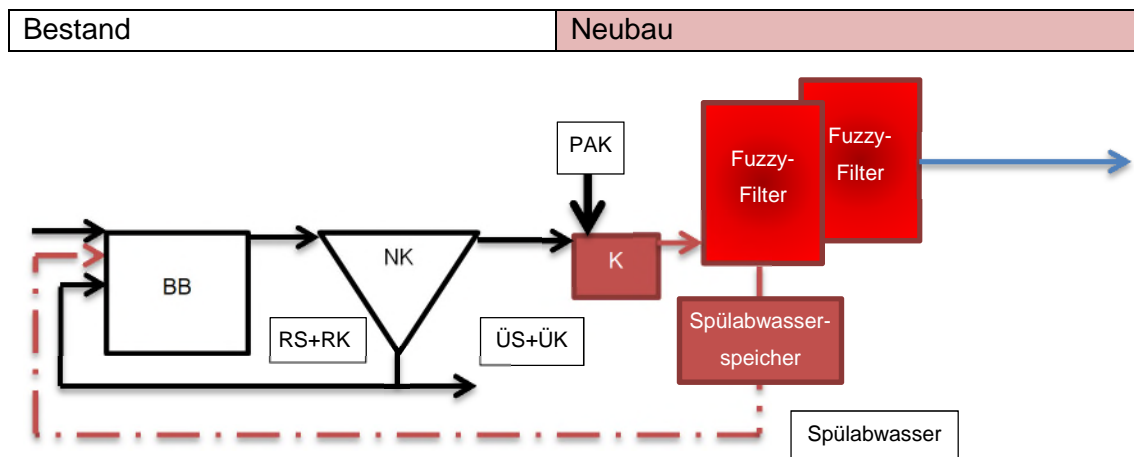


Abbildung 7-5: Verfahren Variante II - PAK mit gemeinsamer Schlammbehandlung und nachgeschaltetem Fuzzy-Filter

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.

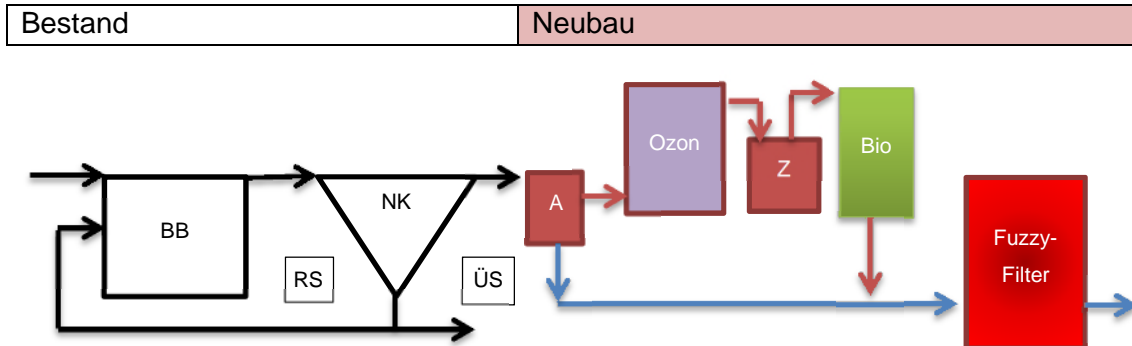


Abbildung 7-6: Verfahren Variante III – Teilstrom Ozon, danach Fuzzy-Filter Vollstrom

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 Brakeler Märsch wurden 30 min gewählt, um sich die vollen 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 108 m³ 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 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 O₃ pro Liter Abwasser (auf vergleichbaren Anlagen werden durchschnittlich 5 -10 mgO₃/l verwendet) ist somit eine Sauerstoffmenge von 190 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 für die KA Brakeler Märsch

8.1 Kostengrundlagen

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

Tabelle 8-1: Kostengrundlage für Ertüchtigung des Kläranlagenbestandes

Bauwerk/ Anlage	Variante 0
	Ertüchtigung Bestand
RÜB + Pufferbecken mit Reinigungstechnik	3.000 m ³
Nachklärbecken mit Räumer	1.500 m ³
RS-ÜS Pumpwerk mit Pumpen	psch
Parkplatz, Straßen und Wege	2.000 m ²
Verteilerbauwerk BB	Stb-Bauwerk
Verteilerbauwerk NK	Stb-Bauwerk
Rohrleitungen	Erdverlegt
Rührwerke, Leihbelüftung	psch

Tabelle 8-2: Kostengrundlagen Variante I bis III

Bauwerk/ Anlage	Variante I	Variante II	Variante III
	GAK	PAK	Ozon
Baufeldräumung	Psch	Psch	Psch
Verteiler-/Schacht-Bauwerk	Stb-Bauwerk	Stb-Bauwerk	Stb-Bauwerk
Gründung Filterhalle	Stb-Wanne	Stb-Wanne	Stb-Wanne
Zwischenspeicher	integriert	integriert	integriert
Spülabwasserspeicher	integriert	integriert	integriert
Ablaufspeicher	integriert	integriert	integriert
Filterhalle ab OKG	3.600 m ³	2.000 m ³	2.000 m ³
EMSR-Raum	75 m ³	75 m ³	75 m ³ Filter + 75 m ³ für Ozongenerator etc.)
Puffer-/Pumpen-vorlage Fuzzy-Filter	integriert	integriert	integriert
Stromleitung Ozon	-	-	erdverlegt
Biofilmreaktor	-	-	108 m ³

Bauwerk/ Anlage	Variante I	Variante II	Variante III
	GAK	PAK	Ozon
Rohrleitungen DN 100 bis 600	erdverlegt	erdverlegt	erdverlegt
Dosierleitungen	in Halle	in Halle	in Halle
Kabelleerrohranlage	erdverlegt	erdverlegt	erdverlegt
Straßen und Wege	Psch	Psch	Psch
Schlosserarbeiten	Podeste, Geländer,...	Podeste, Geländer,...	Podeste, Geländer,...
Sonstiges	Baustelleneinrichtung,...	Baustelleneinrichtung,...	Baustelleneinrichtung,...
Schieber Verteiler-Bauwerk	Psch	Psch	Psch
MID+Schieber	Psch	Psch	Psch
Rührwerke KB+Vorlage	3 Stck	3 Stck	3 Stck
Fuzzy-Filter-Anlage (Pumpen, Gebläse,...)	4 Stck.	4 Stck.	4 Stck.
GAK-Adsorber	3 x 2 Stck. D = 3,2 m H _{FB} = 3,00m	-	-
Pumpen GAK	2 Stck.	-	-
Spülabwasser- Pumpen	2 Stck.	2 Stck.	2 Stck.
Hebepumpen	-	-	2 Stck.
Sauerstofftank			20 m ³
Ozon-Anlage (2x Generator je 1,5 kg/h, Restozonvernichter, Kühlswassersystem, Aggregate, Überwachung und Messungen, Anbindungen, Dokumentation etc.)	-	-	1 Stck.
FM-Puffertank	1 m ³	1 m ³	1 m ³
PAK-Silo		75 m ³	
PAK-Austrag		1 Stck.	-
PAK-Gravimeter	-	1 Stck.	-
FM-Dosieranlage	-	1 Stck.	-
FHM-Dosieranlage	-	1 Stck.	-
Flockulator	-	4 Stck.	-
Fuzzy-Filter Rohrinstallation, Schieber,...	Rohrgalerie	Rohrgalerie	Rohrgalerie-
Adsorber Rohrinstallation, Schieber,...	Rohrgalerie	-	-
Portalkran Filterhalle	2 Stck.	1 Stck.	1 Stck.

Bauwerk/ Anlage	Variante I	Variante II	Variante III
	GAK	PAK	Ozon
Inbetriebnahme Dokumentation usw.	Anfahr- und Probebetrieb	Anfahr- und Probebetrieb	Anfahr- und Probebetrieb
Mess-/ Automatisierungstechnik, Erweiterung PLS, Allg. Elektroinstallation, Erdung, Blitzschutz, Potentialausgleich, Frostschutz Filterhalle, Inbetriebnahme, Dokumentation	Psch	Psch	Psch
Erstbefüllung	GAK 42 t	PAK 17,5 t	O ₂ 6 t
Objektplanung, Fachplanung Technische Ausrüstung, EMSR, Tragwerk, öBÜ, Gutachten (Baugrund, Brandschutz,...)	Ermittlung nach HOAI bzw. ortsübliche Vergütungen: Summe 25%	Ermittlung nach HOAI bzw. ortsübliche Vergütungen: Summe 25%	Ermittlung nach HOAI bzw. ortsübliche Vergütungen: 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	Sülzle Kopf	Submission
Rührwerk	KSB	Submission
Portalkran	DEMAG	Submission
FHM-Dosieranlage	Sülzle Klein	Submission
FM-Pumpen	Jesco	Submission
Ozonanlage	Xylem WEDECO	Richtpreise
Sauerstoff, Sauerstofftank	Messer Group	Richtpreise

8.2 Investitionskosten

Die Ermittlung der Investitionskosten (Anschaffung- und Herstellungskosten) 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 8-0, 8-1 bis 8-3). Die Baunebenkosten (BNK) wurden mit 25% der Nettosumme angenommen. In Tabelle 8-4 und Tabelle 8-5 werden die Summen der betrachteten Varianten zusammengestellt.

Tabelle 8-4: Ermittlung der Investitionskosten: Ertüchtigung der Kläranlage

Varianten / Kostengruppe	Ertüchtigung
Ingenieurbauwerke	2.032.250 €
TA Maschinen	304.000 €
EMSR-Technik	105.000 €
Zwischensumme	2.441.250 €
BNK 25%	610.313 €
Summe	3.051.563 €
Ust. 19 %	579.797 €
Gesamt Brutto	3.631.359 €

Tabelle 8-5: Ermittlung der Investitionskosten: Mikroschadstoffelimination und Gesamtkosten

Varianten / Kostengruppe	Kosten Mikroschadstoffelimination		
	Var. I GAK	Var. II PAK	Var. III Ozon *)
Ingenieurbauwerke	1.311.475 €	964.975 €	1.355.640 €
TA Maschinen	1.250.000 €	990.000 €	1.440.000 €
TA Verfahren	1.243.000 €	1.135.500 €	1.275.500 €
EMSR-Technik	545.000 €	565.000 €	570.000 €
Erstbefüllung	59.976 €	30.000 €	900 €
Zwischensumme	4.409.451 €	3.685.475 €	4.642.040 €
BNK 25%	1.102.363 €	921.369 €	1.160.510 €
Summe	5.511.814 €	4.606.844 €	5.802.550 €
Ust. 19 %	1.047.245 €	875.300 €	1.102.485 €
Gesamt Brutto	6.559.058 €	5.482.144 €	6.905.035 €

zuzügl.

Ertüchtigung Kläranlage	3.631.359 €	3.631.359 €	3.631.359 €
Gesamtkosten	10.190.417 €	9.113.503 €	10.536.394 €

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 Ozonstufen. 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 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 Barntrop, für die PAK eine mittlere Dosiermenge von 10 mg/l angesetzt. Für die GAK ist eine maximale Beladung von 1.000 mg CSB/g GAK bzw. nach Literaturwerten 12.000 BV angesetzt worden. Für die Dosierung von Ozon wird nach Herstellererfahrungen und Vergleich mit Literaturangaben eine Dosis von 7 mg/l O₃ angesetzt. Dieser Wert liegt im Bereich der Auslegungsempfehlung NRW, in der eine Ozondosis von 0,7 bis 0,9 mg O₃/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). Es wird eine volle Stelle angesetzt.
2.	Energiekosten	Die Ermittlung des Energiebedarfes erfolgte tabellarisch für alle Varianten. Es wird ein durchschnittlicher Strompreis von 0,21 €/kWh einschl. 19% Ust. nach Auswertung der Rechnung Mai 2017 angesetzt.
3.	Instandhaltung/ Ersatzteile/ Sonstiges	Es wird unter Berücksichtigung langjähriger Erfahrungen für die Bauwerke, Maschinen- und EMSR-Technik ein Prozentsatz von 0,3% angesetzt.
4.	Stoffkosten	Die Verbrauchsmengen werden aus der verfahrenstechnischen Berechnung übernommen. Kostenannahme: GAK 1.200 €/t zuzgl. Ust. PAK 1.500 €/t zuzgl. Ust. Flockungshilfsmittel 1.300 €/t zuzgl. Ust. O₂ 130 €/t zuzgl. Ust., Miete Anlage (Speicher incl. Verdampfer): 4.600 €/a zuzgl. Ust. 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.
5.	Reststoffe	Die Mehrmengen des Schlammes werden mit dem Erfahrungswert 10 g/(EW x d) angenommen. Preis für PAK-Schlamm Entsorgung: Annahme 100 €/t brutto
6.	Abwasserabgabe	Es wird davon ausgegangen, dass durch Synergieeffekte bei der Mikroschadstoffelimination der CSB und Phosphor vermindert werden. Beim CSB wird vorläufig von Abgabefreiheit ausgegangen. Beim Phosphor wird eine Verminderung um 0,8 mg/l erwartet.

Die ausführliche Berechnung für den Energiebedarf ist im Anhang 8-4 und für die laufenden Kosten in Anhang 8-5 enthalten. Für die Vergleichbarkeit wurden dort auch die spezifischen Betriebskosten bezogen auf die Jahresabwassermenge angegeben.

Anmerkungen zu Punkt 5.) Reststoffe - Schlamm Entsorgung:

Wie im folgenden Kapitel ausführlich erläutert, muss bei einer Kostenvergleichsrechnung eine Nutzengleichheit angesetzt werden. Bei der Schlamm Entsorgung wird hier der Fall der thermischen Verwertung für alle Varianten betrachtet. Hierbei ist der Vorsorgegedanke ausschlaggebend, weil eine zukünftige Verwertung in der Landwirtschaft als unsicher einzuschätzen ist.

Bei einer betriebswirtschaftlichen Betrachtung kann bei den Varianten ohne Pulveraktivkohle vorerst noch weiterhin von einer landwirtschaftlichen Verwertung ausgegangen werden. Hiermit bestehen dann betriebliche Kostenvorteile, die sich mindernd auf die zu erhebenden Abwassergebühren auswirken.

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

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

Varianten	Var. I GAK	Var. II PAK	Var. III Ozon
Summe laufende Kosten	115.821 €	95.611 €	150.857 €

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 8-6 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	422.686 €	375.581 €	445.278 €
Betriebskosten ohne Preissteigerung	97.821 €	72.391 €	132.857 €
Jahreskosten nach KVR	520.507 €	447.972 €	578.135 €
	116%	100%	129%

Investitionskosten incl. BNK, 19% Ust	422.686 €	375.581 €	445.278 €
<i>Betriebskosten mit Preissteigerung</i>	117.149 €	89.669 €	184.464 €
Jahreskosten nach KVR mit Preissteigerung Energie	539.835 €	465.250 €	629.741 €
	116%	100%	135%

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 Brakeler Märsch 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 den Betreibern besonders wichtig. Da es auf dem Grundstück der Kläranlage Brakeler Märsch noch ausreichend ungenutzte Flächen gibt, fällt der Flächenverbrauch bei der Bewertung kaum ins Gewicht (Faktor 0,4). Auch die Investitionskosten werden weitaus weniger hoch gewichtet (Faktor 0,4) als die Betriebs- und Jahreskosten (Faktor 1,0), da Investitionen vom Land NRW mit bis zu 70% (Stand 2018) gefördert werden, aber der laufende Betrieb später durch die Stadt Brakel zu tragen ist.

Mit dem Bau einer Eliminierungsstufe für Mikroschadstoffe sind Schadstoffe zu entfernen und nicht umwandeln. Die Vermeidung unerwünschter Transformationsprodukte, die nur bei der Ozonstufe entstehen, ist demnach ein Kriterium mittlerer Bedeutung (Faktor 0,6).

In der heutigen Zeit ist die Nachhaltigkeit von immer größer werdendem Interesse. Die entstehenden CO₂-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).

Entsprechend dem Kapitel „Analyse zu den Spurenstoffen“ wurde deutlich, dass die Abwassereinleitung aus der Kläranlage gegenwärtig mitbestimmend für den mäßigen Zustand des Wasserkörpers ist. Bei einer Teilstrombehandlung wird eben nur ein Teil der Jahresabwassermenge hinsichtlich Mikroschadstoffelimination behandelt, bei einer Vollstrombehandlung demgegenüber die Gesamtmenge. Um die Wasserkörper der Brucht wieder in einen guten ökologischen Zustand zu bringen, 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 CO₂-Bilanz

Im Zusammenhang mit der Umweltbelastung werden vermehrt Berechnungen angestellt, die klimatischen Auswirkungen von Produkten im zeitlichen Ablauf in Form von Lebensstadien anzustellen. Diese Anstrengungen werden mit dem Begriff CO₂-Fußabdruck beschrieben. Normalerweise wird dieser in Tonnen CO₂-Äquivalent angegeben, um andere Treibhausgase mit einzubeziehen.

Laut „Desotec“, einem Aufbereitungsunternehmen aus Belgien, ist die Produktionsemission 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 CO₂-Fußabdruck von 7,05 bis 12,92 t CO₂-Äquivalent je Tonne, besitzt sie nach der Wiederaufbereitung des Recyclings nur noch einen Fußabdruck von 1,03 t CO₂-Äquivalent je Tonne recyceltes Produkt. Dies ist ein zusätzlicher Fundus, der bei der Wahl einer GAK-Anlage in Betracht gezogen werden sollte.

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

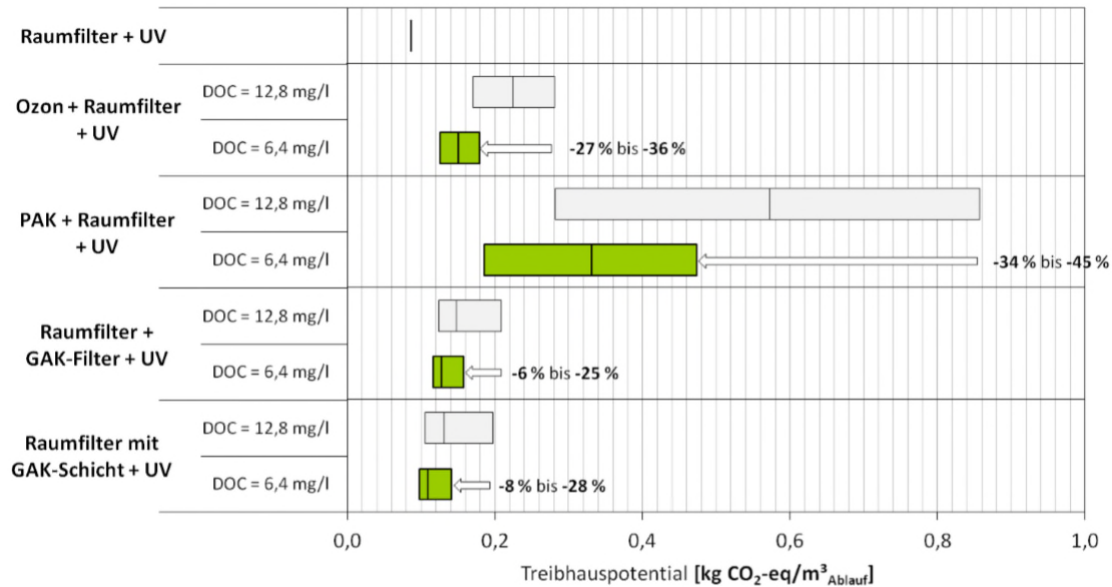


Abbildung 9-1: CO₂-Fußabdruck, Sensitivität über DOC-Gehalt im Klarlauf (Dr. Remy, Kompetenzzentrum Wasser Berlin, 2017)

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 CO₂-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

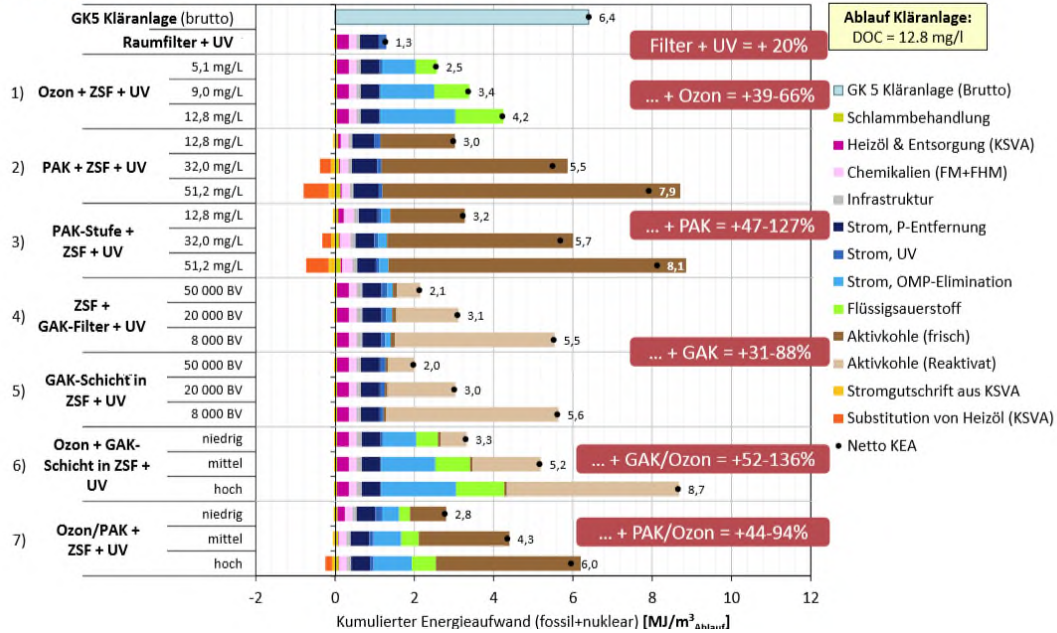


Abbildung 9-2: Ökobilanz verschiedener Verfahrensoptionen (Dr. Remy, Kompetenzzentrum Wasser Berlin, 2015)

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	1,0	4	4	5	5	4	4
Flächenverbrauch	0,4	3	1,2	5	2	3	1,2
Investitionskosten	0,4	3	1,2	4	1,6	2	0,8
Betriebs- und Jahreskosten	1,0	3	3	5	5	4	4
Transformationsprodukte	0,6	5	3	5	3	4	2,4
Nachhaltigkeit	0,6	4	2,4	4	2,4	3	1,8
Effektivität	0,8	5	4	5	4	5	4
Teil-/Vollstrom	1,0	4	4	5	5	4	4
Summe			22,8		28,0		22,2
			Rang 2		Rang 1		Rang 3

(P = Punkte, gew. = gewichtete Punkte)

Die verschiedenen Varianten erreichen zwischen 22,2 und 28,0 Punkten. Die wenigsten Punkte werden von der Variante III mit einer Ozonung erreicht. Dies lässt sich hauptsächlich auf die unerwünschten Transformationsprodukte sowie die Nachhaltigkeit zurückführen. Vorsorglich wurde eine biologische Nachbehandlung geplant, mit der sich die Transformationsprodukte abbauen lassen können. Die Variante I mit GAK ist im Verhältnis unwirtschaftlich und erreicht lediglich 22,8 Punkte. Die Variante II sticht mit 28 Punkten deutlich hervor.

Der Vorteil für die Variante PAK mit Vollstrombehandlung lässt sich auf die die niedrigen Betriebs- und Jahreskosten, 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 Brakeler Märsch 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 einem abschließenden Urteil und einer Empfehlung für den Betreiber:

- Die Variante I (GAK Teilstrom, Filter Vollstrom) ist in der Anschaffung relativ teuer und mit 22,8 Punkten in der Bewertungsmatrix nicht zu empfehlen.
- Die Variante II (PAK mit Filter in Vollstrombehandlung) erhält die höchste Punktzahl 28,0 und ist bei den laufenden Kosten günstig. Die niedrigen Investitionen sprechen genauso für die Empfehlung dieser Variante wie die Jahreskosten nach KVR-Leitlinie. Eine Vollstrombehandlung des Abwassers ist 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 22,2). 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 Brakeler Märsch empfohlen.**

10 Zusammenfassung

Die Stadt Brakel betreibt die Kläranlage Brakeler Märsch mit einer Ausbaugröße von 22.000 EW (Entwurf 1979). Für das Erarbeiten einer Machbarkeitsstudie zu den Möglichkeiten der Mikroschadstoffelimination auf dieser Kläranlage wurde von der Stadt Brakel 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 Brakeler Märsch. Die Analyse der Proben ergab, dass **der Eintrag der Mikroschadstoffe in das Gewässer Brucht eindeutig durch die Abwassereinleitung aus der Kläranlage 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. Neben den Daten der Kläranlage Brakeler Märsch wurden auch die Abflüsse und Frachten aus den Kläranlagen Bellersen und Hembsen ausgewertet, da künftig diese beiden Anlage aufgegeben und zur Zentralkläranlage Brakel übergeleitet werden sollen.

Die Auswertung der Abflüsse für Brakel ergab, dass der **Mischwasserabfluss mit 160 l/s anzusetzen** ist (gegenwärtig 240 l/s). Für Bellersen und Hembsen wären künftig ein Mischwasserabfluss in der Summe von 47 l/s anzusetzen. Die Frachtberechnung für Brakel ergab für 2016 eine CSB-Fracht als 85%-Wert in Höhe von rund 2.240 kg/d und damit eine Auslastung von rund 18.700 Einwohnerwerten. Als Summe für Bellersen und Hembsen ergibt sich nach Auswertung der Jahre 2017 und 2018 (nur bis September) eine CSB-Fracht (85%) von rund 444 kg/d und damit eine Ausbaugröße von rund 3.700 EW. Die **künftige Gesamtbelastung läge damit bei 22.400 EW** (Entwurf 1979: 22.000 EW). Die langzeitliche Betrachtung der Abflüsse und Frachten ergab für Brakel jeweils abnehmende Tendenzen, so dass die Neu-Auslegung ohne zusätzliche Sicherheiten erfolgen kann.

In Form eines **Raumordnungskonzeptes** wurden die Funktionsbereiche der Kläranlage neu zugewiesen, damit die Anordnung einer Stufe zur Mikroschadstoffelimination die künftige Entwicklung der vorhandenen Reinigungsstufen nicht blockiert.

Aus Sicht des Gewässers ergeben sich nach Mitteilung der Bezirksregierung Detmold weitere Anforderungen an die Abwasserreinigung hinsichtlich der Parameter Ammonium-Stickstoff und Phosphor. Hier war zu überprüfen, ob diese Aufgaben durch Nutzung von Synergieeffekten gemeinsam mit der Mikroschadstoffelimination zu lösen sind.

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 192 l/s leisten kann (Erlaubnis 236 l/s). Auch im Hinblick auf den Anschluss von Bellersen und Hemsben **ist ein zweites Nachklärbecken mit einer Ziel-Mischwassermenge von 70 l/s herzustellen**, so dass beide Nachklärbecken einen Gesamt-Mischwasserstrom von N1-abgemindert 140 l/s zuzüglich N2-Neu 70 l/s = 210 l/s leisten können.

Die Nachrechnung der Belebung mit einer **Gesamtfracht von 2.684 kg/d CSB** (Entwurf 1979: 2.640 kg/d) ergab, dass das vorhandene Volumen von 6.523 m³ zum heutigen Zeitpunkt und auch nach Anschluss von Bellersen und Hemsben für die Reinigungsfunktion ausreichend sein kann. Das Schlammalter geht auf etwa 18 bis 20 Tage zurück, womit schlechtere Entwässerungseigenschaften und eine nicht ausreichende Stabilisierung verbunden sind. Bei künftiger Klärschlammverbrennung sollte dies jedoch unproblematisch sein. Vorbehaltlich einer verdichteten Probenahme und der Nachrechnung der temperaturabhängigen Lastfälle bestehen damit **kaum noch Reserven** für etwaige Einwohnerzuwächse oder den Anschluss abwasserintensiven Gewerbes. Für den künftigen **stabilen Betrieb des Belebungsbeckens mit neuen dichten Zulaufleitungen muss jedoch eine Aufteilung in zwei Kammern** erfolgen. Hierbei können gleichzeitig variable Belüfterfelder geschaffen werden, mit denen speziell bei tiefen Temperaturen eine weitgehende Nitrifikation zur Minderung von NH₄-N zur Einhaltung der künftig verminderten Werte erfolgt.

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 50 l/s** (mit Bellersen und Hembsen 65 l/s) ermittelt. Im **Vollstrom sind 160 l/s** (mit Bellersen und Hembsen 210 l/s) zu behandeln. Diese Werte führen zu einer wirtschaftlichen Auslegung der Mikroschadstoffelimination, wobei die gemessenen Spitzenwerte im Regenwetterfall die Anordnung eines **neuen RÜB- und Pufferbeckens mit einem Volumen von ca. 3.000 m³** erfordern.

Hinsichtlich der Verfahrenstechnik der Mikroschadstoffelimination wurden im Rahmen der Studie drei Varianten konzipiert. Diese 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 wurde zuerst die **Ertüchtigung des Bestandes** auch mit Hinblick auf den Anschluss von Bellersen und Hembsen untersucht. Die Herstellung eines neuen RÜB- und Pufferbeckens und des Nachklärbeckens 2 mit einem Gesamt-Volumen von ca. 4.500 m³ ermöglicht in einem Zwischenbauzustand die einmalige Chance, hier zeitweise eine Ersatz-Biologie für die Ertüchtigung des vorhandenen Belebungsbeckens betreiben. Die Kosten dieses Maßnahmeteils belaufen sich auf **ca. 3,6 Mio. Euro brutto**.

Die **Investitionen** der drei Varianten zur **Mikroschadstoffelimination** für den Einzugsbereich Brakel liegen zwischen **5,4 bis 6,9 Mio. Euro** einschließlich Baunebenkosten und 19% Umsatzsteuer. Sofern Bellersen und Hembsen sofort mit an die Kläranlage und damit an die Mikroschadstoffelimination angeschlossen werden sollen, sind für die hydraulische Erhöhung ca. 5% höhere Kosten anzunehmen.

In der **Gesamtheit** der vorbereitenden Maßnahmen im Bestand und der Mikroschadstoffelimination ist variantenabhängig mit **Investitionskosten in Höhe von 9,1 bis 10,6 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 auch künftig verminderte Überwachungswerte bei Einleitung in die Brucht eingehalten werden können.

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

Detmold, am 29.10.2018

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 CO₂-Ausstoß. <https://www.desotec.com/de>, Dezember 2017
- Dr. Remi** Remi, C., Ökobilanz verschiedener Verfahrensoptionen zur Spurenstoffelimination 2015 und Energieaufwand und CO₂-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 4-1, 7-1 bis 7-3, 8-0 bis 8-6 Zeichnungen
Noll, R.	Anhänge 2-1 bis 2-8

Anhang

Anhang 2-1 Untersuchungsbefund Ablauf Nachklärung (72 h Mischprobe), OWL Umweltanalytik GmbH vom 26.03.2018

Anhang 2-2 Messergebnisse und Statistische Auswertung Ablauf Nachklärung, OWL Umweltanalytik GmbH vom 26.03.2018

Anhang 2-3 Untersuchungsbefund Ablauf Nachklärung (72 h Mischprobe), OWL Umweltanalytik GmbH vom 30.05.2018

Anhang 2-4 Messergebnisse und Statistische Auswertung Ablauf Nachklärung, OWL Umweltanalytik GmbH vom 30.05.2018

Anhang 2-5 Untersuchungsbefund Gewässer Brucht ober-/unterhalb Kläranlageneinleitung, OWL Umweltanalytik GmbH vom 30.05.2018

Anhang 2-6 Untersuchungsbefund Ablauf Nachklärung (72 h Mischprobe), OWL Umweltanalytik GmbH vom 03.09.2018

Anhang 2-7 Messergebnisse und Statistische Auswertung Ablauf Nachklärung, OWL Umweltanalytik GmbH vom 03.09.2018

Anhang 2-8 Untersuchungsbefund Gewässer Brucht ober-/unterhalb Kläranlageneinleitung, OWL Umweltanalytik GmbH vom 03.09.2018

Anhang 4-1 Raumordnungskonzept

Anhang 7-1 Verfahrenstechnische Berechnung: Variante I GAK-Adsorber

Anhang 7-2 Verfahrenstechnische Berechnung: Variante II PAK

Anhang 7-3 Verfahrenstechnische Berechnung: Variante III Ozon

Anhang 8-0 Investitionskosten Ertüchtigung

Anhang 8-1 Investitionskosten Variante I GAK-Adsorber

Anhang 8-2 Investitionskosten Variante II PAK Vollstrom

Anhang 8-3 Investitionskosten Variante III Ozon

Anhang 8-4 Ermittlung des Energiebedarfs

Anhang 8-5 Betriebskosten

Anhang 8-6 Jahreskosten nach KVR-Leitlinie