



Stadt Borgholzhausen, FB 3
Masch 2
33829 Borgholzhausen

Machbarkeitsstudie zur Elimination von Mikroschadstoffen Zentralkläranlage Borgholzhausen



Untersuchte Lösungsvarianten:

Dezember 2017

- Ozon: Ozonierung (Teilstrom), Tuchfiltration im Vollstrom
- BAK: Ozonierung & GAK-Filter (BAK-Verfahren) im Vollstrom
- PAK: PAK-Adsorption in einem Kontaktbecken (Teilstrom), Tuchfiltration im Vollstrom
- PAK: PAK-Adsorption in der Belebung, Tuchfiltration im Vollstrom
- GAK: GAK-Filtration im Vollstrom

gefördert durch:

**Ministerium für Klimaschutz, Umwelt,
Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen**



Lindenstraße 33, 32825 Blomberg,
Tel.: 05236 888-414, Fax: 05236 888-476, www.hydrocompact.de

Bearbeitung der Machbarkeitsstudie durch:

Dipl.-Ing. Dominik Klein
klein@hydrocompact.de
 Tel.: 05236-888-9737

HydroCompact Ingenieure
 Lindenstraße 33,
 32825 Blomberg

Aufgestellt: Blomberg, Dezember 2017

Verlauf:

Index	Datum	Inhalt / Änderung	Freigabe	Verteiler
1.0	16.01.2018	Vorabzug	Klein	Peters
1.1	22.01.2018	Endfassung	Klein	Peters

Ausfertigung	Anzahl	Verteiler	Versand / Datum
Original	2	Stadt Borgholzhausen	26.01.2018
Kopie	7	Bezirksregierung Detmold	26.01.2018
Büroexemplar	1	HydroCompact Ingenieure	26.01.2018

1	VERANLASSUNG	5
1.1	KURZBESCHREIBUNG DES GEWÄSSERS.....	7
1.2	ALLGEMEINE KLÄRANLAGENBESCHREIBUNG.....	15
1.3	DERZEITIGE ABWASSERREINIGUNG	16
2	ABWASSEREIGENSCHAFTEN	22
2.1	STANDARD-ABWASSERPARAMETER.....	22
2.1.1	<i>Abwassermengen</i>	24
2.1.2	<i>Ablaufqualität der biologischen Stufe</i>	27
2.2	ERWEITERTES MONITORING AUF MIKROSCHADSTOFFE	30
3	AUSLEGUNGSWERTE ANLAGEN VIERTE REINIGUNGSSTUFE	34
4	STAND DER FORSCHUNG UND TECHNIK	37
4.1	EINSATZ VON OZON.....	40
4.2	EINSATZ VON PULVERAKTIVKOHLE	43
4.3	EINSATZ VON GRANULIERTER AKTIVKOHLE.....	50
4.4	VERFAHRENSKOMBINATIONEN	53
5	AUSARBEITUNG VON TECHNISCHEN ANLAGENKONZEPTEN	55
5.1	VARIANTE 1: OZONIERUNG	57
5.1.1	<i>Kurzbeschreibung Variante 1a</i>	57
5.1.1.1	<i>Kostenermittlung Variante 1a</i>	65
5.1.2	<i>Kurzbeschreibung Variante 1b</i>	69
5.1.1.2	<i>Kostenermittlung Variante 1b</i>	76
5.2	VARIANTE 2: PAK-ADSORPTION.....	81
5.2.1	<i>Variante 2a: PAK Adsorption mit Kontaktbecken und Tuchfiltration</i>	82
5.2.1.1	<i>Kostenermittlung Variante 2a</i>	87
5.2.2	<i>Variante 2b: PAK Adsorption in der Belebung mit Tuchfiltration</i>	92
5.2.2.1	<i>Kostenermittlung Variante 2b</i>	96
5.3	VARIANTE 3: GAK-FILTRATION.....	100
5.3.1	<i>Kostenermittlung Variante 3</i>	102
6	VERFAHRENSEMPFEHLUNG	108
7	ZUSAMMENFASSUNG	114

8	LITERATURVERZEICHNIS	119
9	ANLAGENVERZEICHNIS	124

1 **Veranlassung**

Trotz einer in den letzten Jahren zu verzeichnenden Verbesserung der Gewässerqualität in NRW, konnte ein ökologisch guter Zustand, entsprechend den Zielen der europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL, 2000/60/EG) und des deutschen Wasserrechts, in 90 % der Gewässer noch nicht erreicht werden. Der Eintrag von Mikroschadstoffen (z.B.: Arzneimittel, Wasch- und Reinigungsmittel, Kosmetika, synthetische Duftstoffe, Süßstoffe, Farben, Lacke, Röntgenkontrastmittel, Korrosionsschutz- und Flammschutzmittel sowie Pflanzenschutzmittel und Pestizide), führt zu nachweisbaren Belastungen der Gewässer in NRW. Dieses hat das Umweltministerium NRW durch den Bericht „Reine Ruhr“ dokumentiert. Die Monitoring-Ergebnisse der Wasserrahmenrichtlinie bestätigen die vorliegenden Erkenntnisse.

Neben der Gewässerrelevanz ist die Trinkwasserrelevanz der Stoffe ein wichtiger Aspekt in NRW. Oberflächenwasserkörper, die der Trinkwassergewinnung dienen, sind mit dem Ziel zu bewirtschaften, dass eine Verschlechterung ihrer Qualität verhindert und somit der für die Gewinnung von Trinkwasser erforderliche Umfang der Aufbereitung verringert wird (§ 7, Abs. 1 der OGewV) [KOMPETENZZENTRUM MIKROSCHADSTOFFE NRW; 2015].

Mikroverunreinigungen werden in Siedlungsgebieten verstreut und dezentral über die einzelnen Haushalte in den Abwasserpfad eingetragen. Neben Industrie und Landwirtschaft sind Kläranlagen daher bedeutende Emittenten für Mikroverunreinigungen in die Gewässer („End of Pipe“) und stellen somit auch einen geeigneten Ansatzpunkt für technische Maßnahmen zur Eintragsbegrenzung dar.

Die Zentralkläranlage Borgholzhausen leitet konventionell gereinigtes kommunales Abwasser in die Hessel ein. Die Hessel gehört zum Einzugsgebiet der Ems. Eine Besonderheit des Einzugsgebietes der Ems in OWL ist die Trinkwassergewinnung aus Uferfiltrat.

Aufgrund des für NRW flächendeckend vorliegenden Stoffflussmodells "Mikroschadstoffe aus kommunalem Abwasser" besteht, aus der Sicht der zuständigen Behörde, für das Gewässer Hessel ein grundsätzlicher Handlungsbedarf, da demnach für fast alle betrachteten Mikroschadstoffe Konzentrationen oberhalb der Orientierungswerte vorliegen.

Handlungsbedarf ist ferner wegen der insgesamt hohen Abwasserlast gegeben. Das Verhältnis der Einleitungsmenge aus der ZKA Borgholzhausen zum mittleren Niedrigwasserabfluss (MNQ)der Hessel beträgt rd. 60 %.

Zum Schutz des Wasserkörpers ist es sinnvoll die technischen Möglichkeiten und die Wirtschaftlichkeit einer Elimination von Mikroschadstoffen auf der Zentralkläranlage (ZKA) Borgholzhausen näher zu untersuchen. Ein hierfür geeignetes Instrument ist die Durchführung einer Machbarkeitsstudie, welche hiermit vorgelegt wird.

Die Maßnahme wird durch das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz NRW unter der Kennziffer "M-01/17-Bor" geführt und gefördert.

1.1 Kurzbeschreibung des Gewässers

Die Hessel ist dem Bearbeitungsgebiet "Obere Ems" im Teileinzugsgebiet der Ems NRW zugeordnet. Das Teileinzugsgebiet der Ems NRW ist in mehrere Planungseinheiten unterteilt. Planungseinheiten stellen das zentrale Planungsinstrument der Bewirtschaftungsplanung dar, mit dem insbesondere auch überregionale Fragestellungen behandelt werden können. Die zugehörige Bezeichnung der Planungseinheit lautet: PE_EMS:1600: Bever/Hessel. Der betroffenen Gewässerbereich von Sassenberg bis Borgholzhausen ist mit der Wasserkörper Identifikationsnummer DE_NRW_316_10871 gekennzeichnet. Es handelt sich um den Fließgewässertyp 14 (sandgeprägte Tieflandbäche der Ökoregionen 13 und 14: Norddeutsches Tiefland, Höhe unter 200m). Der betrachtete Wasserkörper hat eine Länge von rd. 25,52 km. Die Saprobie wurde im Rahmen des 3. Monitoringzyklus (EG-WRRL) von "gut auf "mäßig" herabgestuft. Das Gewässer befindet sich streckenweise nicht mehr in seinem ursprünglichen Zustand, sondern wurde durch den Menschen "erheblich verändert". Künstlich angelegte Fließgewässerabschnitte sind hingegen nicht vorhanden. Das Makrozoobenthos zeigt für das Bewertungsmodul "Allgemeine Degradation" ebenfalls einen "mäßigen" Zustand an. Für die Fischfauna besteht Handlungsbedarf. Der ökologische Zustand bzw. das ökologische Potential ist mit unbefriedigend dargestellt.

Die Kernprobleme des Gewässers liegen in den erheblichen hydromorphologischen Defiziten infolge des Ausbaus der Fließgewässer sowie mangelnder Durchgängigkeit, hervorgerufen durch Gewässerbegradigung und Wasserkraftnutzung. Hinzu kommen stoffliche Belastungen infolge diffuser und punktueller Einträge (Nährstoffe, vereinzelt Metalle). Stauhaltung und mangelnde Beschattung führen in Kombination mit dem großen Nährstoffangebot vereinzelt zu Sekundäreffekten wie Schwankungen im pH-Wert sowie erhöhter Wassertemperatur, die eine zusätzliche Belastung für die Gewässerorganismen darstellen.

Die ansässige kommunale Abwasserbehandlung erfüllt die technischen Anforderungen, doch reichen die bisherigen Anstrengungen zur Zielerreichung der EG-WRRL bis 2027 nicht für jeden Wasserkörper aus. Die Fortentwicklung von Standards der Kläranlagentechnik und Regenwasserbewirtschaftung (BWK M3/7), Intensivmessprogramme und ergänzende Selbstüberwachung, z. B. für Mikroschadstoffe aus Kläranlagen, konkretisieren den Handlungsbedarf.

In der betroffenen Planungseinheit PE_EMS_1600 sind Maßnahmen erforderlich und teilweise bereits vereinbart zur Regenrückhaltung und Regenklärung, Optimierung und Ausbau von Abwasserbehandlungsanlagen zur weiteren Reduzierung von stofflichen Belastungen sowie ergänzend die Erarbeitung von "Machbarkeitsstudien zur Elimination von Mikroschadstoffen aus Kläranlagen" [MKULNV NRW, 2015].

Das Gewässereinzugsgebiet der Hessel von der Quelle bis zur Einleitung aus der ZKA Borgholzhausen hat eine Größe von rd. 14,5 km².

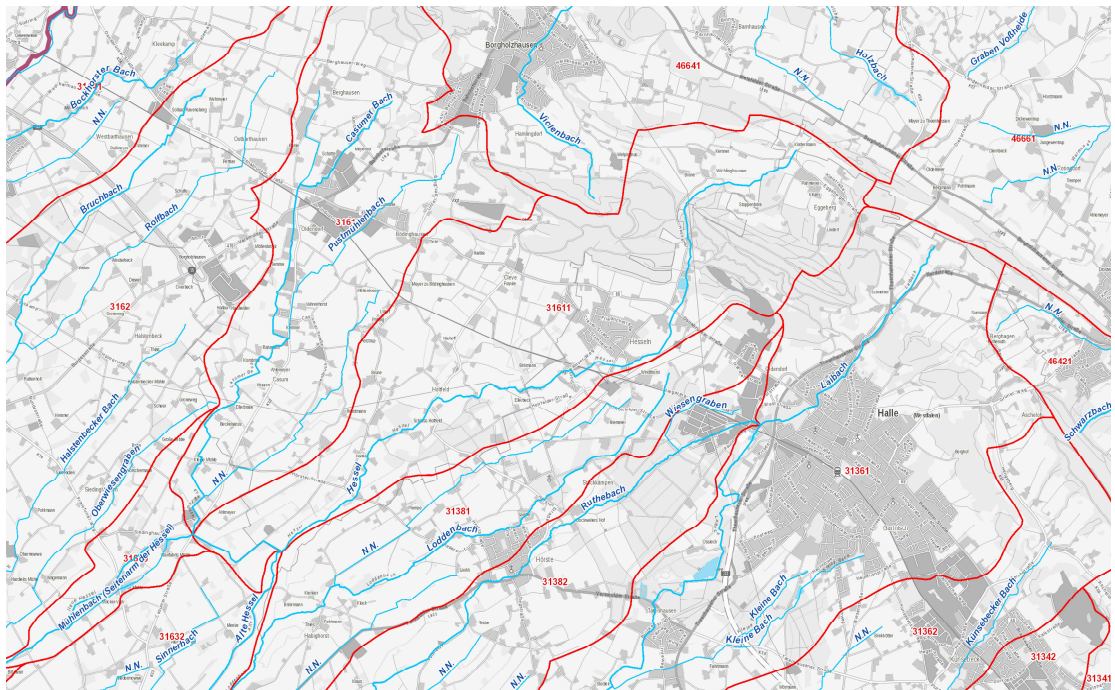


Abb. 1.1.1: Auszug aus der Gewässerstationierungskarte GSK 25, GIS Version 3c, Einleitungsstelle bei km 29,41 [ELWAS-WEB, 2013]

Unter Beachtung des Bemessungs-Mittelabflusses und mittleren Niedrigwasserabflusses im Bereich der Einleitungsstelle (MQ rd.193 l/s bzw. MNQ rd. 52 l/s) sowie der erlaubten Einleitung aus der ZKA Borgholzhausen (bis 126 l/s) wird der relativ große Einfluss der Einleitung auf die Gewässerqualität der Hessel deutlich [KLEIN, 2017].

Gewässerbelastung mit Mikroschadstoffen:

Aufgrund der hohen Abwasserbelastung der nordrhein-westfälischen Fließgewässer, ist auch die Problematik der Mikroschadstoffe für Nordrhein-Westfalen von besonderer Relevanz [GÖTZ ET AL., 2012].

Im Rahmen einer Stoffflussmodellierung für das Land NRW wurde für Arzneimittel und weitere Mikroschadstoffe aus kommunalen Kläranlagen eine flächendeckende Übersicht zur Belastungslage erstellt und der aktuelle Handlungsbedarf aufgezeigt. Mit dem Stoffflussmodell wurden sowohl die Stoffflüsse als auch die Konzentrationen im Gewässer direkt unterhalb der Einleitstellen von Kläranlagen berechnet.

Die Stoffflussmodellierung ergibt für die Hessel unterhalb der Einleitungsstelle der ZKA Borgholzhausen folgende Schadstoff-Konzentrationen [GÖTZ ET AL., 2012]:

Substanz	Modellwert	Qualitätskriterium des Modells	Bezug
Benzotriazol:	6,91 µg/L	10,00 µg/L	Ökol./ökotoxikol. Präventivwert
Carbamazepin:	0,48 µg/L	0,50 µg/L	Ökotoxikol. wirkungs- basiertes Qualitätskriterium
Clarithromycin:	0,20 µg/L	0,06 µg/L	Ökotoxikol. wirkungs- basiertes Qualitätskriterium
Diclofenac:	0,57 µg/L	0,10 µg/L	Ökotoxikol. wirkungs- basiertes Qualitätskriterium
Metoprolol:	1,12 µg/L	7,30 µg/L	Ökotoxikol. wirkungs- basiertes Qualitätskriterium
Sotalol	0,34 µg/L	0,10 µg/L	Ökol./ökotoxikol. Präventivwert
Sulfamethoxazin:	0,41 µg/L	0,15 µg/L	Ökotoxikol. wirkungs- basiertes Qualitätskriterium

Die fett gedruckten Modellwerte stellen eine Überschreitung der im Rahmen des Stoffmodells definierten Qualitätskriterien dar.

Die Bezirksregierung Detmold hat diese Überschreitungen u.a. zum Anlass genommen um zusätzliche Maßnahmen hinsichtlich einer Verdichtung der Datengrundlage im Ablauf der ZKA Borgholzhausen und im Gewässer anzuordnen.

Für das Gewässer Hessel, im Bereich der Einleitung von gereinigtem Abwasser aus der ZKA Borgholzhausen, liegen derzeit keine realen Messergebnisse aus der Gewässerüberwachung des LANUV vor. Die nächste relevante GÜS-Messstelle befindet sich an der Mündung der Hessel in die EMS in der Nähe von Warendorf-Einen. Die hier gemessenen Daten können, aufgrund der relativ großen Entfernung zur Einleitung aus der ZKA Borgholzhausen, nicht für eine Bewertung herangezogen werden.

Zur Validierung der Gewässerbelastung mit Mikroschadstoffen wurden, im Rahmen der Machbarkeitsstudie, Messungen im Gewässer durchgeführt. Hierzu hat die OWL Umweltanalytik GmbH am 31.03.2017 Stichproben ober- und unterhalb der Kläranlageneinleitung entnommen. Die Analytik wurde durch das Fremdlabor GBA – Gesellschaft für Bioanalytik, Hildesheim, vorgenommen. Es wurden insgesamt 20 Parameter aus der Stoffgruppe der Mikroschadstoffe analysiert.

Tabelle 1-1 zeigt die Parameter, die Messwerte sowie deren Bestimmungsgrenzen (BG) und die Messmethode (hier: jeweils Arzneistoffe mittels LC-MS/MS, Liquid Chromatographie-Massenspektrometrie / Massenspektrometrie und HPLC-MS/MS nach DIN 38407-35).

Parameter	Einheit	Messwert (oberhalb)	Messwert (unterhalb)	BG	Verfahren
Bezafibrat	µg/L	< 0,05	< 0,05	0,05	HM-MA-M U-2-25
Diclofenac	µg/L	< 0,05	0,440	0,05	HM-MA-M U-2-25
Naproxen	µg/L	< 0,05	0,072	0,05	HM-MA-M U-2-25
Phenazon	µg/L	< 0,05	0,050	0,05	HM-MA-M U-2-25
Carbamazepin	µg/L	< 0,05	0,150	0,05	HM-MA-M U-2-25
Atenolol	µg/L	< 0,05	< 0,05	0,05	HM-MA-M U-2-25
Bisoprolol	∞	< 0,05	< 0,05	0,05	HM-MA-M U-2-25

Metoprolol	µg/L	< 0,05	0,510	0,05	HM-MA-M U-2-25
Sotalol	µg/L	< 0,05	< 0,05	0,05	HM-MA-M U-2-25
Clarithromycin	µg/L	< 0,05	0,130	0,05	HM-MA-M U-2-25
Sulfamethoxazol	µg/L	<0,05	< 0,05	0,05	HM-MA-M U-2-25
Oxazepam	µg/L	< 0,1	< 0,1	0,1	HM-MA-M U-2-25
Amidotrizoesäure	µg/L	< 0,05	< 0,05	0,05	HM-MA-M U-2-25
lomeprol	µg/L	< 0,05	< 0,05	0,05	HM-MA-M U-2-25
lopamidol	µg/L	< 0,05	< 0,05	0,05	HM-MA-M U-2-25
lopromid	µg/L	< 0,05	< 0,05	0,05	HM-MA-M U-2-25
Diuron	µg/L	< 0,05	< 0,05	0,05	DIN 38407-35
Isoproturon	µg/L	< 0,05	< 0,05	0,05	DIN 38407-35
Terbutryn	µg/L	< 0,05	< 0,05	0,05	DIN 38407-35
Benzotriazol	µg/L	< 0,05	2,00	0,05	LC-MS/MS

Tab.: 1.1: Messwerte im Gewässer, Bestimmungsgrenzen und Analysenmethoden [OWL UMWELTANALYTIK GMBH, 2017]

Es zeigt sich, dass die Gewässerbelastung oberhalb der Einleitungsstelle, hinsichtlich der untersuchten Mikroschadstoffe, unterhalb der Bestimmungsgrenzen der eingesetzten Analyseverfahren liegt.

Unterhalb der Einleitungsstelle sind die einschlägig bekannten, in der eingangs genannten Stoffflussmodellierung untersuchten, Arznei- und Röntgenkontrastmittel sowie der Korrosionsinhibitor Benzotriazol (in Tab. 1.1 fett gekennzeichnet) deutlich nachweisbar. Die Konzentrationen der Substanzen Clarithromycin und Diclofenac (hier rot gekennzeichnet) entsprechen in etwa den, im Rahmen des Stoffmodells, ermittelten Werten. Eine Überschreitung der Qualitätsziele kann für diese zwei Parameter bestätigt werden. Durch eine am 19.05.2017 im Rahmen der Eigenüberwachung durchgeführte Analyse im Gewässer wurden die Überschreitungen bestätigt.

Hier lagen die Werte für Clarithromycin und Diclofenac sogar bei 0,28 µg/L bzw. 1,20 µg/L.

Für die Konzentrationen der anderen Indikatorsubstanzen gilt, dass diese zwar im Gewässer nachweisbar sind, aber keine Überschreitung der Qualitätsziele vorliegt. Die Konzentrationen der restlichen untersuchten Substanzen liegen unterhalb der Bestimmungsgrenzen.

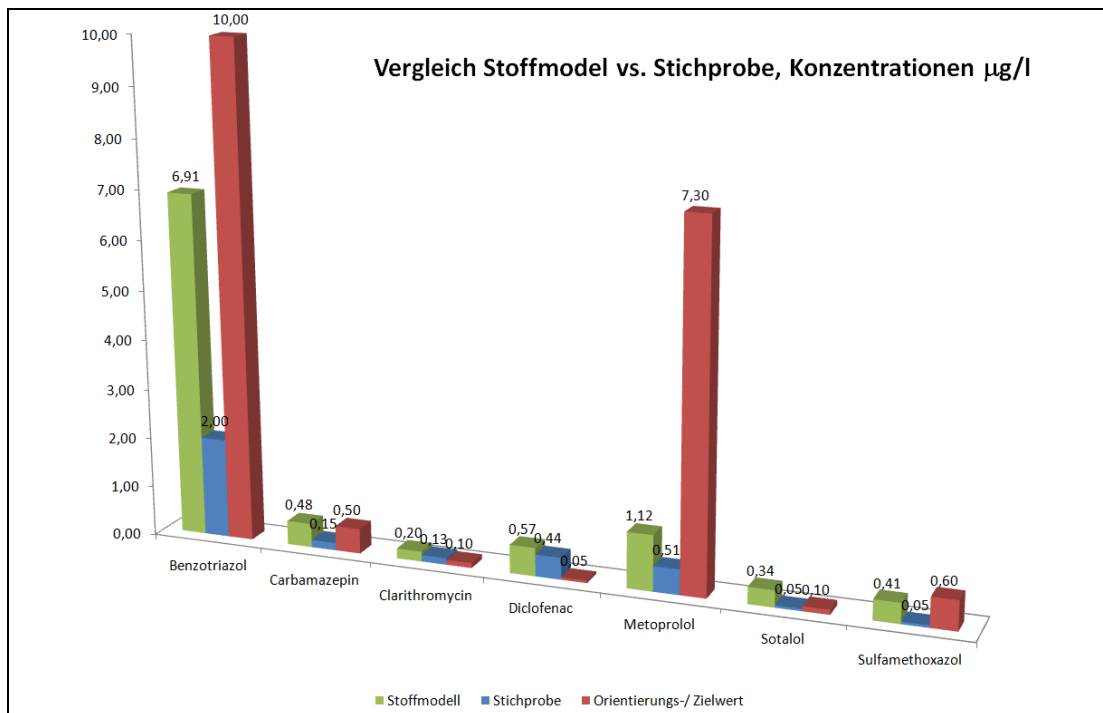


Abb. 1.1.2: Vergleich der Konzentrationen analysierter Leitsubstanzen im Gewässer unterhalb der Einleitungsstelle (Stoffmodell vs. Stichprobe).

Fazit:

Die durchgeführten Analysen sowie die Ergebnisse des Stoffmodells bestätigen einen Eintrag von Mikroschadstoffen in das Gewässer durch die Einleitung von gereinigtem Abwasser aus der Zentralkläranlage Borgholzhausen.

Die Ergebnisse des Stoffmodells zu Berechnung der Schadstoffkonzentrationen im Gewässer können durch die vorliegenden Analysen nicht im vollen Umfang bestätigt werden. Dieses war auch nicht zu erwarten, da es sich bei den, im Rahmen dieser Studie, durchgeführten Beprobungen lediglich um Momentaufnahmen (Stichproben) handelt.

Zur Ermittlung des Handlungsbedarfs können die fachlich abgeleiteten Orientierungswerte der sogenannten „D4-Liste“ aus dem Monitoring-Leitfaden des LANUV (Stand April 2014) zur Beurteilung herangezogen werden.

Ein weiterer Bewertungsmaßstab ist die Trinkwasserrelevanz. Hier finden die vorgegebenen Stoffe eine Bewertung anhand der vom Umweltbundesamt (UBA) empfohlenen GOW- Werte (Gesundheitlicher Orientierungswert).

Hieraus abgeleitet hat das Kompetenzzentrum für Mikroschadstoffe NRW eine Stoffliste herausgegeben. Aus dieser Liste können die relevanten Stoffe und Bewertungskriterien entnommen werden (siehe Tab.: 1.2).

Durch die Einleitung aus der Zentralkläranlage Borgholzhausen werden die Bewertungskriterien für einige Substanzen überschritten.

Derzeit bestehen jedoch für die Mehrheit der Spurenstoffe weder auf europäischer Ebene noch in Deutschland gesetzliche Anforderungen bzw. Grenzwerte hinsichtlich der zu erzielenden Ablaufqualität von Kläranlagen oder für eine tolerierbare Gewässerbelastung. Resultierend aus den Anforderungen der EG-Wasserrahmenrichtlinie an den Zustand europäischer Oberflächengewässer sowie der Oberflächengewässerverordnung (OGewV) könnte in Zukunft jedoch eine gezielte Mikroschadstoffelimination, seitens des Gesetzgebers, gefordert werden.

Substanzgruppe	Substanz	Bewertungskriterium c [$\mu\text{g/L}$]	Bestimmungsgrenze (BG) c [$\mu\text{g/L}$]	Analyse- methode
Arzneimittelwirkstoffe und Metabolite	Carbamazepin	0,5 ¹⁾	0,03	LC-MS/MS
	Clarithromycin	0,1 ¹⁾	0,03	LC-MS/MS
	Ciprofloxacin	0,036 ²⁾	0,01	LC-MS/MS
	Diclofenac	0,05 ¹⁾	0,015	LC-MS/MS
	Ibuprofen	0,01 ¹⁾	0,003 (derzeit messbar 0,01)	LC-MS/MS
	Metoprolol	7,3 ¹⁾	0,03	LC-MS/MS
	Sulfamethoxazol	0,6 ¹⁾	0,03	LC-MS/MS
	Valsartan	0,1 ³⁾	0,03	LC-MS/MS
	Losartan	0,1 ³⁾	0,03	LC-MS/MS
	Candesartan	0,1 ³⁾	0,03	LC-MS/MS
	Gabapentin Guanylharnstoff	0,1 ³⁾	0,03 0,03	LC-MS/MS LC-MS/MS
Östrogene	17- α -Ethinylestradiol	0,000 035 ¹⁾	0,000 035 ⁴⁾ (derzeit messbar 0,000 4)	GC-MS/MS oder LC-MS/MS
	17- β -Estradiol	0,000 4 ¹⁾	0,000 1 ⁴⁾ (derzeit messbar 0,000 4)	GC-MS/MS oder LC-MS/MS
	Estron	0,1 ³⁾	0,000 4 ¹⁾	GC-MS/MS oder LC-MS/MS
	Östrogene Aktivität / Estradiol Äquivalente	0,000 035 für EE2 ¹⁾ 0,000 4 ⁵⁾	0,000 01 $\mu\text{gEEQ/L}$ 0,000 01 $\mu\text{gEEQ/L}$	A-YES, YES oder ER CALUX
Pestizide	Terbutryn	0,065 ⁶⁾	0,02	LC-MS/MS
	Mecoprop P	0,1 ⁶⁾	0,03	LC-MS/MS
	Isoproturon	0,3 ⁶⁾	0,03	LC-MS/MS
	Flufenacet	0,04 ⁶⁾	0,01	LC-MS/MS
	Tebuconazol	1 ¹⁾	0,03	LC-MS/MS
	Propiconazol	1 ⁶⁾	0,03	LC-MS/MS
Korrosionsschutzmittel	1H-Benzotriazol	10 ³⁾	0,03	LC-MS/MS
Moschusduftstoffe	Galaxolid	7 ¹⁾	0,03	GC-MS
Per- und polyfluorierte Chemikalien	Perfluorooctansäure (PFOA)	0,1 ³⁾	0,03	LC-MS/MS
	Perfluorooctansulfonsäure (PFOS)	0,00065 ⁶⁾	0,0002 (derzeit messbar 0,01)	LC-MS/MS
	H 4-Perfluorooctansulfon- säure (H-4 PFOS)	0,1 ³⁾	0,01	LC-MS/MS
Süßstoffe	Acesulfam K	0,1 ³⁾	0,03	LC-MS/MS

¹⁾ Orientierungswert

²⁾ PNEC

³⁾ Präventiver Vorsorgewert

⁴⁾ höchst zulässige Nachweisgrenze entsprechend EU 2015/495 für Substanzen auf der watch-list. Zur Bewertung der UQN müsste die Bestimmungsgrenze 30% der Umweltqualitätsnorm betragen, was derzeit teilweise analytisch nicht möglich ist

⁵⁾ trigger-value entsprechend Kienle et al. (2015)

⁶⁾ UQN nach OGewV-2016 vom 20. Juni 2016

Tab.: 1.2: Leitsubstanzen und Bewertungskriterien, Stoffliste NRW, Stand 09.2016 [KOM-PETENZENTRUM MIKROSCHADSTOFFE NRW, 2016]

1.2 Allgemeine Kläranlagenbeschreibung

Die Zentralkläranlage Borgholzhausen "Im Recke" verfügt über eine Ausbaugröße von 21.800 EW. Die Anlage liegt im Außenbereich, südwestlich der Kernstadt Borgholzhausen in einem imaginären Dreieck zwischen den Städten Borgholzhausen, Halle und Versmold.



Abb. 1.2.1: Luftbild der ZKA Borgholzhausen, [ELWAS-WEB, 2013]

Die Zufahrt zur Kläranlage erfolgt über einen Gemeindeweg "Im Recke", der direkt an die Casumer Straße (K23) angebunden ist. Auf der gegenüberliegenden Seite der Zuwegung "Im Recke" beginnt das festgesetzte Überschwemmungsgebiet der Hessel.

Die nächsten Schutzgebiete (FFH-Gebiete, Naturschutzgebiete, geschützte Biotope nach §30 BNatSchG / § 62 LG NW) befinden sich östlich des Kläranlagengeländes in einem Abstand von rd. 400 m.

Die Kläranlage ist an diesem Standort in den Jahren 1998 bis 2000 errichtet worden. In 2016 erfolgte eine energetische Optimierung einiger Anlagenteile. In diesem Zusammenhang wurden Änderungen gegenüber der ursprünglichen Planung insbesondere in den Bereichen Beckenbelüftung und der Gebläsestation vorgenommen.

1.3 Derzeitige Abwasserreinigung

Die Abwasserreinigung erfolgt gegenwärtig mechanisch und biologisch nach dem Belebtschlammverfahren mit Nitrifikation, Denitrifikation, chemischer Phosphatelimination und simultaner aerober Schlammstabilisierung.

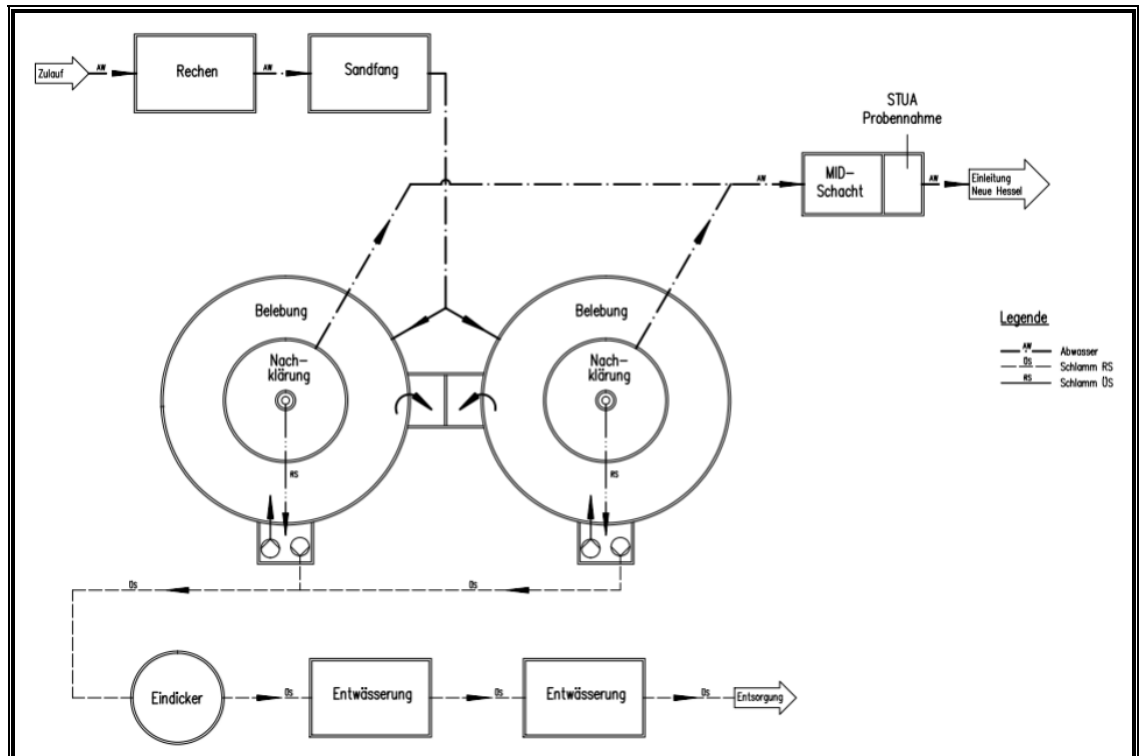


Abb. 1.3.1: Systemskizze ZKA Borgholzhausen, Quelle: Dr.- Ing. Bernd Diering GmbH, 2007

Zulauf:

Das Abwasser aus dem Entwässerungsnetz wird der Kläranlage ausschließlich über eine Druckleitung (DN 400) zugeleitet.

Mechanische Abwasserreinigung:

Die mechanische Reinigungsstufe besteht im Wesentlichen aus einem Feinrechen sowie einem belüfteten Sand-/Fettfang. Um den organischen Anteil aus dem Rechengut auszuwaschen, ist die Feinrechenanlage mit einer Schneckenwaschpresse ausgerüstet. Das gewaschene und gepresste Rechengut wird in einem Container zur Entsorgung gesammelt.

Die Abtrennung der absetzbaren mineralischen Stoffe und der Schwimmstoffe vom zufließenden Abwasser erfolgt im Sand-/Fettfang.

Die angelieferten Schlämme aus Kleinkläranlagen und abflusslosen Gruben werden

zunächst über eine Fäkalienannahmestation, bestehend aus einem Feinrechen mit Rechengutwaschpresse, behandelt, in einem Fäkalienspeicher gesammelt und gezielt dem Anlagenzulauf zugeführt. Das Rechengut wird in einem Container zur Entsorgung gesammelt. Die Entnahme aus dem Speicher erfolgt mit einer trocken aufgestellten Pumpe.

Biologische Abwasserreinigung:

Die Kläranlage verfügt über zwei parallel beschickte biologische Reinigungsstraßen. Nach der Passage der mechanischen Reinigungsstufe wird das Abwasser über einen Abwasserverteiler (Mittelbauwerk) zusammen mit den Rücklaufschlammströmen auf zwei baugleiche Kombinations-Rundbecken mit außen liegenden Belebungsgräben und innen liegenden Nachklärbecken verteilt. Die Aufteilung erfolgt über Überfallschwellen im Verhältnis 50 % auf BB1/NKB1 und 50% auf BB2/NKB2.

Innerhalb der zwei Belebungsbecken erfolgt die weitergehende Reinigung des Abwassers. Die Becken verfügen jeweils über ein Volumen von rd. 3.750 m³.

Beckenbelüftung:

Im Bereich der Beckenbelüftung wurden im Jahr 2016 umfangreiche Optimierungsmaßnahmen durchgeführt:

a) Umstellung des O₂-Regelkonzepts der Belebung

Das bisher betriebene Regelkonzept "Konstant-Druckregelung auf der Luftsammelleitung und Versorgung der zwei Belebungsbecken über eine gemeinsame Prozessluftherzeugung" wurde vollständig aufgegeben. Hierzu wurde die elektrische Schaltanlage so umgebaut, dass jeder Prozessluftherzeuger über einen eigenen Frequenzumformer angesteuert wird. Jedem Belebungsbecken sind jeweils zwei Prozessluftverdichter (ein neuer Drehkolbenverdichter und ein altes Drehkolbengebläse) zugeordnet. Jedes einzelne Aggregat ist so bemessen, dass es den Sauerstoffbedarf der gegenwärtigen Belastung für ein Becken abdeckt (redundante Ausführung). Für den Endausbau werden beide Aggregate zur Abdeckung des Sauerstoffbedarfs eines Beckens benötigt. Die Prozessluftherzeuger werden in Abhängigkeit des O₂-Messwerts im Belebungsbecken und eines vorgegebenen O₂-Sollwerts geregelt. Insgesamt wurde die komplette Steuerung und Regelung der biologischen Abwasserreinigung erneuert. Zur Sicherstellung einer weitgehenden Stickstofflimi-

nation arbeitet die Anlage nach dem Verfahren der intermittierende Nitrifikation und Denitrifikation gemäß DWA-A 268.

b) Optimierung der Belüftungseinrichtungen

Eine Optimierung erfolgte im Wesentlichen durch die Wahl einer feineren Membran-Perforierung und durch die Vergrößerung der Belüfterfläche. Hierdurch konnte eine Reduzierung des erforderlichen Prozessluftvolumenstroms erreicht werden. Die Vergrößerung der Belüfterfläche bewirkt einen erhöhten Auftrieb der einzelnen Belüftergitter. Aus diesem Grund wurde das Eigengewicht durch entsprechenden Ballast erhöht. Die Belüftergitter müssen in regelmäßigen Abständen gewartet (gereinigt oder getauscht) werden. Aufgrund des erhöhten Eigengewichts wurde eine neue Zugeinrichtung erforderlich.

c) Austausch von zwei Drehkolbengebläsen gegen Drehkolbenverdichter

Es wurden je Belebungsbecken ein neues Belüftungsaggregat (Drehkolbenverdichter) angeschafft. Die Rohrleitungsführung im Bereich der Gebläsestation wurde umgestellt. Das Steuerungskonzept wurde bereits unter Punkt a) beschrieben. Der Vorteil von Drehkolbenverdichtern gegenüber Drehkolbengebläsen liegt in der Energieeffizienz. Die neuen Aggregate verfügen über einen um 10% geringeren Energiebedarf bei gleicher Luftleistung.

Beckenumwälzung:

Der Belebtschlamm wird durch jeweils zwei Rührwerke pro Belebungsbecken in Bewegung gehalten. Beckenumwälzung und -Belüftung stehen in einem engen Zusammenhang. Für ein ordnungsgemäß funktionierendes System wurden, im Rahmen der unter Punkt b) beschriebenen Maßnahme, Lage und Anstellwinkel der vorhandenen Rühraggregate optimiert.

Nachklärbecken und -räumer:

Aus den Belebungsbecken wird das Schlammwassergemisch über jeweils eine Überfallschwelle in einen Sammelschacht geleitet. Über Dükerleitungen wird es den Nachklärbecken zugeführt, wo der belebte Schlamm durch Sedimentation vom Abwasser getrennt wird.

Rücklaufschlamm:

Für die Erhaltung des erforderlichen Trockensubstanzgehaltes (TS_{BB}) im Belebungsbecken, muss belebter Schlamm aus der Nachklärung in das Belebungsbecken zurückgeführt werden. Der sedimentierte Schlamm wird zu diesem Zweck durch Saugräumer zum Mittelbauwerk des jeweiligen Nachklärbeckens und von dort über eine Dükerleitung zum zentralen Rücklaufschlammwerk geführt. Die Rücklaufschlammförderung erfolgt getrennt für die zwei Kombibecken jeweils mit einer Tauchmotorpumpe ($Q_P = \text{rd. } 58 \text{ L/s}$). Die Pumpen werden mit variabler Frequenz (30-50 Hz, in Abhängigkeit des gemittelten Ablaufvolumenstroms) gesteuert. Es wird ein Rücklaufverhältniswert von $0,75\% Q_{Zu}$ angestrebt.

Überschussschlamm:

Ein Teil des sedimentierten Schlammes aus dem Nachklärbecken wird in Form von Überschussschlamm, der sich bei den Reinigungsprozessen in der Belebung durch biologisches Wachstum gebildet hat, abgezogen und der Schlammbehandlung zugeführt. Der Abzug des Überschussschlammes erfolgt aus dem Rücklaufschlamm mittels einer trocken aufgestellten Excenter-Schneckenpumpe.

Chemische Abwasserreinigung:

Neben der biologischen Phosphorelimination (hier lediglich durch Einbau von Phosphat durch Zellwachstum) findet eine chemische Phosphatfällung als Simultanfällung statt. Hierzu wird als Fällmittel eine Aluminiumhydroxid-Lösung verwendet.

Ablauf:

Die Teilvolumenströme des Anlagenablaufs aus den beiden Nachklärbecken werden in einem Sammelschacht (Mittelbauwerk) vereinigt und münden dann in den Ablauf-Messschacht. An dieser Stelle befindet sich neben der Durchflussmengen-einrichtung (MID) auch die Probenahmestelle (PN) der zuständigen Wasserbehörde. Hier werden die Parameter erfasst, die zur Kontrolle der Einhaltung der Überwachungswerte notwendig sind.

Schlammbehandlung:

Schlammstilo:

Zur Aufnahme und Pufferung des abgezogenen Überschussschlammes existiert ein Rundbehälter aus Stahlbeton. Das Schlammstilo verfügt über ein Nutzvolumen von 290 m³. Der Überschussschlamm wird zunächst in das Schlammstilo gefördert. Dort erfolgt eine erste Eindickung. Das Überstandwasser wird über einen Trübwasserabzug in den Kläranlagenzulauf abgezogen. Der Inhalt des Schlammstilos dient zugleich als Vorlagebehälter für die Schlammmentwässerungsanlage.

Schlammmentwässerung und Konditionierung:

Zur Konditionierung des Flüssigschlammes wird dem zu entwässernden Überschussschlamm vor der Entwässerung über eine Mischvorrichtung Flockungshilfsmittel (Polymer) zugegeben.

Die Schlammmentwässerung erfolgt über einen Dekanter. Zur weiteren Konditionierung des entwässerten Schlammes kann über einen Mischer Kalk zugegeben werden. Zur Speicherung von Kalk steht ein Kalkstilo zur Verfügung. Das Schlammwasser wird ohne besondere Behandlung dem Anlagenzulauf zugeführt.

Schlammstagerfläche:

Der entwässerte und ggf. konditionierte Schlamm wird über ein Förderband auf die Schlammstagerfläche gefördert. Dort wird er mit Hilfe eines Ladegeräts (Radlader) zur Lagerung eingebaut. Die Schlammstagerfläche besteht im Wesentlichen aus einer nicht überdachten befestigten Fläche mit Entwässerungseinrichtungen. Das Oberflächenwasser wird in den Anlagenzulauf geleitet.

Zusammenfassung wesentlicher Bauwerke und maschineller Einrichtungen:

- Rechenanlage mit Rechengutpresse (Stufenrechen 6 mm),
- Fakalienspeicher ($V = 55 \text{ m}^3$),
- Belüfteter Langsandfang mit Fettfang (LSF= 15,00 m),
- Sandwäscher,
- Abwasserverteiler, innerhalb des Bauwerks "Mittelbauwerk",
- 2 Stück Kombibecken mit innenliegender Nachklärung (intermittierende Denitrifikation mit $V_{\text{BB1}} = V_{\text{BB2}} = 3.750 \text{ m}^3$, jeweils 2 stationäre Rührwerke und 150 Stück Rohrbelüfter (Ott System, Magnum 2000 Silikon), Nachklärbecken jeweils $D = 18,20 \text{ m}$, $h_{\text{ges}} = 4,41 \text{ m}$, $A = 253 \text{ m}^2$, $Q_{\text{zul.}} = 90 \text{ L/s}$,
- Dosieranlage zur chemischen P-Elimination (Fällmittel: Aluminiumhydroxid-Lösung),
- oberirdisch aufgestellter Fällmitteltank ($V = 25,0 \text{ m}^3$),
- Ablaufmengenmessung mit MID,
- Schlammumpwerk, $Q_{\text{RS,ges}} = 110 \text{ L/s}$, innerhalb des Bauwerks "Mittelbauwerk",
- Schlammstilo (Vorlage für Schlammmentwässerung), $V_{\text{Nutz}} = 290 \text{ m}^3$,
- Maschinelle Klärschlammmentwässerungsanlage (Dekanter) einschl. Kalkkonditionierung, maximale Durchsatzleistung $15 \text{ m}^3/\text{h}$, 250 kgTS/h , Austrag rd. 20% TS,
- Betriebsgebäude mit Gebläsestation, je Becken 1 Stk. Drehkolbengebläse: $Q_{\text{L}} = 18,5 \text{ m}^3/\text{min}$, $\Delta P = 590 \text{ mbar}$, $P_{\text{Mot}} = 30 \text{ kW}$ und 1 Stk. Drehkolbenverdichter: $Q_{\text{L}} = 16,7 \text{ m}^3/\text{min}$, $\Delta P = 550 \text{ mbar}$, $P_{\text{Mot}} = 22 \text{ kW}$,
- Netzersatzanlage 220/264 kW / kVA.

2 Abwassereigenschaften

2.1 Standard-Abwasserparameter

Um eine fundierte Verfahrensauswahl und Auslegung der Anlagen zur Mikroschadstoffelimination zu ermöglichen wurde eine Grundlagenermittlung auf der Basis der letzten 3 Betriebsjahre durchgeführt.

Einzugsgebiet:

Das Einzugsgebiet der ZKA Borgholzhausen setzt sich aus folgenden Entwässerungsgebieten zusammen: Borgholzhausen-Stadt, Baugebiet Enkefeld, Barnhausen, Casum, interkommunales Gewerbegebiet (IBV Borgholzhausen-Versmold), Holtfeld, Kleekamp und. Westbarnhausen.

Das interkommunale Gewerbegebiet umfasst eine Gewerbefläche von insgesamt 24,19 ha. Das Gebiet ist zur Zeit komplett erschlossen. 11,35 ha werden bereits genutzt.

Die Größe des Gesamt-Einzugsgebietes ($A_{E,K}$) beträgt 191,91 ha. Davon werden 116,28 ha im Trennsystem und 75,63 ha im Mischsystem entwässert. Bezogen auf die Gesamteinzugsgebietsfläche beträgt die Verteilung rd. 60% auf Trenn- und 40% auf Mischsystem. Das Abwasser aus dem Entwässerungsnetz wird der Kläranlage jeweils über Abwasserpumpwerke zugeführt. Die verschiedenen Pumpwerke fördern alle in eine Sammeldruckleitung, welche bis zur Zentralkläranlage "Im Recke" geführt wird.

Gegenwärtig sind im Einzugsgebiet der ZKA Borgholzhausen 6.994 (rd. 7.000) Einwohner (E) mit Hauptwohnsitz und Nebenwohnsitz gemeldet.

Die Auswertung der Zulauffrachten auf der Grundlage der Eigenüberwachungsdaten der Kläranlage ergibt eine Zulaufbelastung in Höhe von rd. 13.000 EW.

Im Einzugsgebiet der Zentralkläranlage Borgholzhausen sind eine Reihe von Betrieben mit wesentlicher Schmutzwasserproduktion angesiedelt. Die Bandbreite der Betriebe erstreckt sich über die Bereiche Schlachtung und Fleischverarbeitung, Gastronomie, Metallindustrie, Kunststoffindustrie, Kraftverkehr Logistik und diverse Kleinbetriebe.

Von den ansässigen Gewerbe- und Industriebetrieben sind insbesondere zu nennen:

- Glocken-Beune GmbH & Co. KG: **2.000 EGW**
Innerhalb des Betriebs werden Kochschinken-Spezialitäten, Rohschinken, Bauchspeck und Rohwurst bis zu Rinderrauchfleisch hergestellt. Der Betrieb hat einen Jahrestrinkwasserbedarf von rd. 17.000 m³/a.
- Specht Fleischwaren Vertriebsgesellschaft GmbH & Co KG: **2.500 EGW**
Zum Sortiment der Fa. Specht gehören neben Schweinefleisch und Geflügelprodukten (Aufschnitt und Sülze) auch Frischkäseprodukte. Der Betrieb hat einen Jahrestrinkwasserbedarf von rd. 22.000 m³/a.
- Mehrere kleinere Schlachtbetriebe mit insgesamt: **rd.100 EGW**
Der Jahrestrinkwasserbedarf liegt in der Summe bei rd. 2.400 m³/a.
- Großküche der DRK Haus Ravensberg GmbH: **rd. 400 EGW**
Der Jahrestrinkwasserbedarf liegt bei rd. 6.100 m³/a.
- Diverse Gastronomiebetriebe (Gaststätten, Cafés und Catering) mit insgesamt: **rd. 200 EGW**
Der Jahrestrinkwasserbedarf liegt in der Summe bei rd. 4.800 m³/a.

Insgesamt werden für Gewerbe und Industriebetriebe im Einzugsgebiete der ZKA Borgholzhausen **5.800 EGW** angesetzt.

Die Kläranlage ist für eine Belastung in Höhe von 21.800 EW ausgelegt. Somit wird festgestellt, dass die gegenwärtige Belastung mit 13.000 EW deutlich unterhalb der Auslegungsgröße liegt. Durch den Ausbau des interkommunalen Gewerbegebiets "IBV Borgholzhausen-Versmold" ist eine kurzfristige Ansiedlung von abwasserintensiven Betrieben nicht auszuschließen.

2.1.1 Abwassermengen

Zunächst wurden die täglichen Abflüsse der letzten 3 Betriebsjahre betrachtet. In der Abbildung 2.1.1 sind die täglichen Abflüsse an allen Tagen sowie die nach der NRW-Methode und nach der gleitenden 21-Tage-Minimum-Methode ermittelten Trockenwetterabflüsse dargestellt.

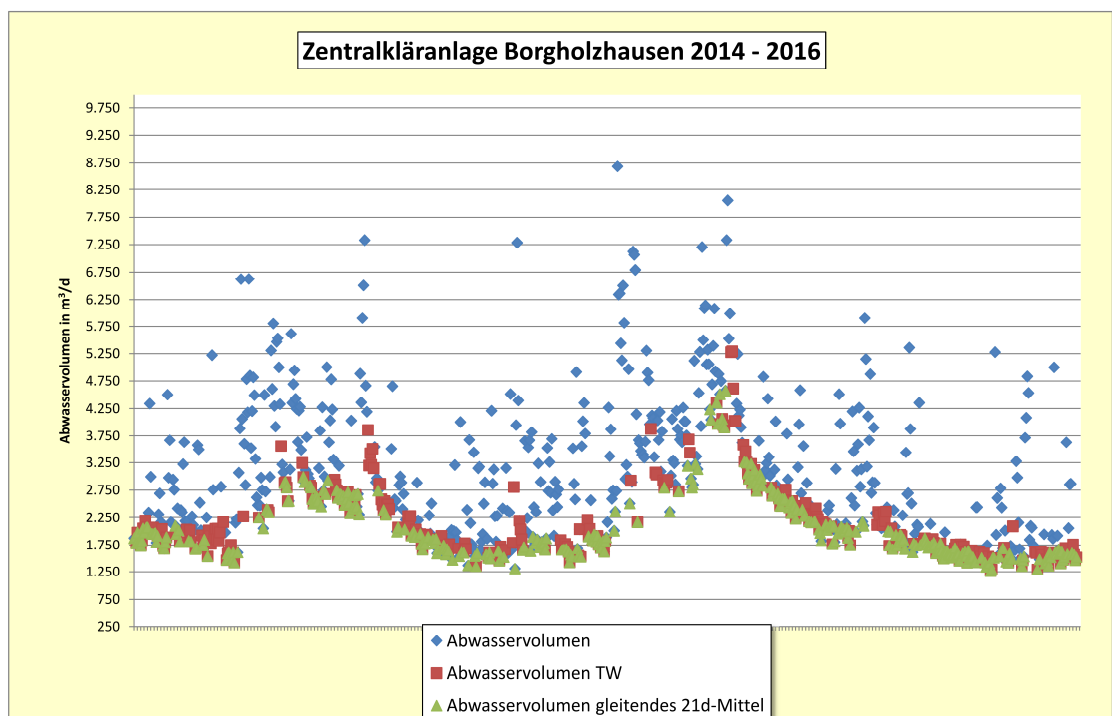


Abb. 2.1.1: Jahrgang des täglichen Abflusses ZKA Borgholzhausen 2014 - 2016

Es zeigen sich jeweils ausgeprägte Jahrgänge. Besonders hohe Abflüsse werden in den Wintermonaten erreicht.

Für eine wirksame Reduktion von Spurenstoffen (80% im Jahresmittel) ist mindestens eine weitergehende Behandlung von 90% der jährlichen Abwassermenge erforderlich. Dieses wird im Fall der ZKA Borgholzhausen erfüllt, wenn im Tagesdurchschnitt rd. 3.000 m³ Abwasser behandelt werden können.

In Tabelle 2.1.1. sind die Kennzahlen der Abflüsse der Betriebsjahre 2002 bis 2016 dargestellt.

Abbildung 2.1.2 zeigt die Unterschreitungshäufigkeit der täglichen Abflüsse der ZKA Borgholzhausen.

		Kläranlage: Borgholzhausen Q-4. Stufe 3.000 m ³		Alle Jahre 01.01.02 31.12.16		Letzten 5 Jahre 01.01.12 31.12.16		Letzten 3 Jahre 01.01.14 31.12.16	
		Q-behandelt	Q nicht behandelt	13.491.894 m ³	86 %	4.233.794 m ³	89 %	2.576.200 m ³	88 %
		2.151.110 m ³	14 %	501.714 m ³	11 %	349.863 m ³	12 %		
JAM	QTW	TW-Tage	JSM	Q-behandelt	%JAM	Q nicht behandelt	%JSM	100 %JSM beh. ?	80%JAM beh. ?
2002	1.208.854	379.360	140	989.046	988.033	81,7	220.821	100	⊕
2003	965.871	403.527	184	800.475	839.748	86,9	126.123	105	⊕
2004	1.122.272	369.419	143	945.506	950.215	84,7	172.057	100	⊕
2005	1.090.976	312.688	132	864.630	947.450	86,8	143.526	110	⊕
2006	1.134.711	370.292	146	925.730	975.627	86,0	159.084	105	⊕
2007	1.317.960	415.455	137	1.106.869	1.025.423	77,8	292.537	93	⊕
2008	1.106.004	388.188	151	940.906	920.742	83,2	185.262	98	⊕
2009	949.520	300.619	142	772.718	850.683	89,6	98.837	110	⊕
2010	1.083.624	388.149	152	932.068	938.473	86,6	145.152	101	⊕
2011	927.703	358.960	174	752.991	821.706	88,6	105.997	109	⊕
2012	919.025	292.452	147	728.146	831.241	90,4	87.784	114	⊕
2013	890.421	400.211	192	760.817	826.353	92,8	64.068	109	⊕
2014	904.054	282.068	141	730.176	838.720	92,8	65.334	115	⊕
2015	1.044.328	290.401	129	821.676	895.353	85,7	148.975	109	⊕
2016	977.681	347.082	161	789.019	842.127	86,1	135.554	107	⊕
5 Jahre	1.612.213 m ³	770 TW- Tage	Mittel 5 Jahre	846.759 m ³					
gewichtetes Mittel 5 Jahre		764.231 m ³							

Tab.: 2.1.1 Kennzahlen der Abflüsse ZKA Borgholzhausen 2002 bis 2016

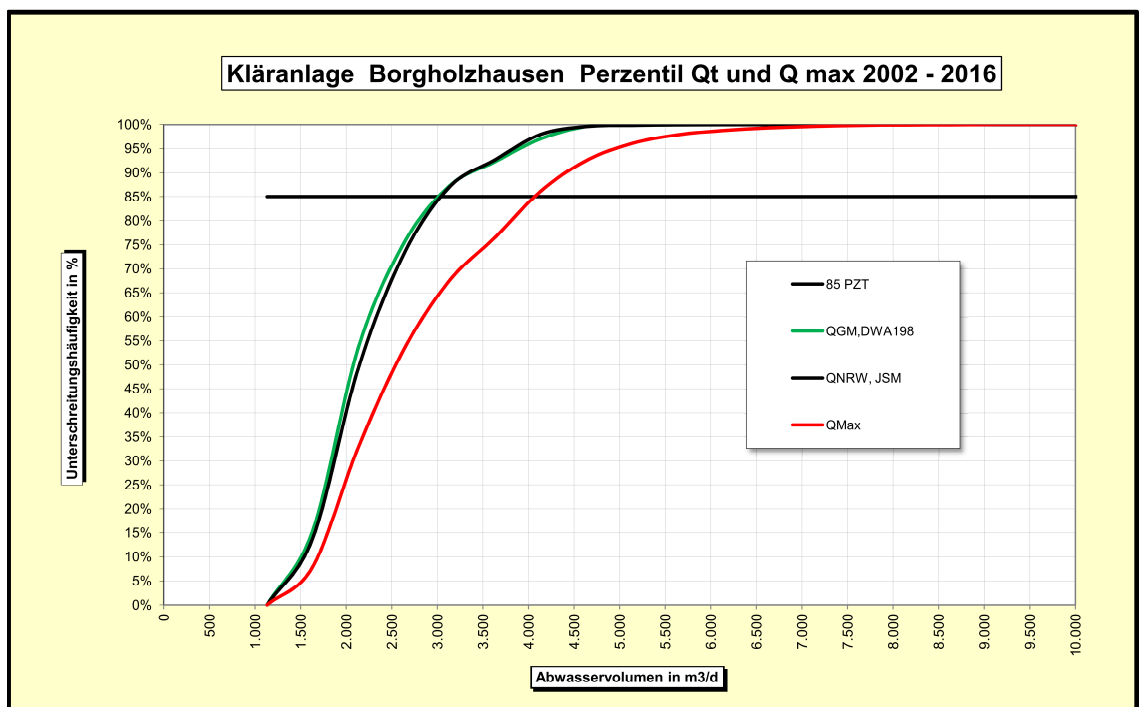


Abb. 2.1.2: Summenhäufigkeit der täglichen Abflüsse ZKA Borgholzhausen, 2002 bis 2016

Desweiteren wurden die stündlichen Trockenwetterabflüsse der ZKA Borgholzhausen untersucht. Es zeigt sich, dass die stündlichen Trockenwetterabflüsse ebenfalls einem ausgeprägten Jahressgang folgen.

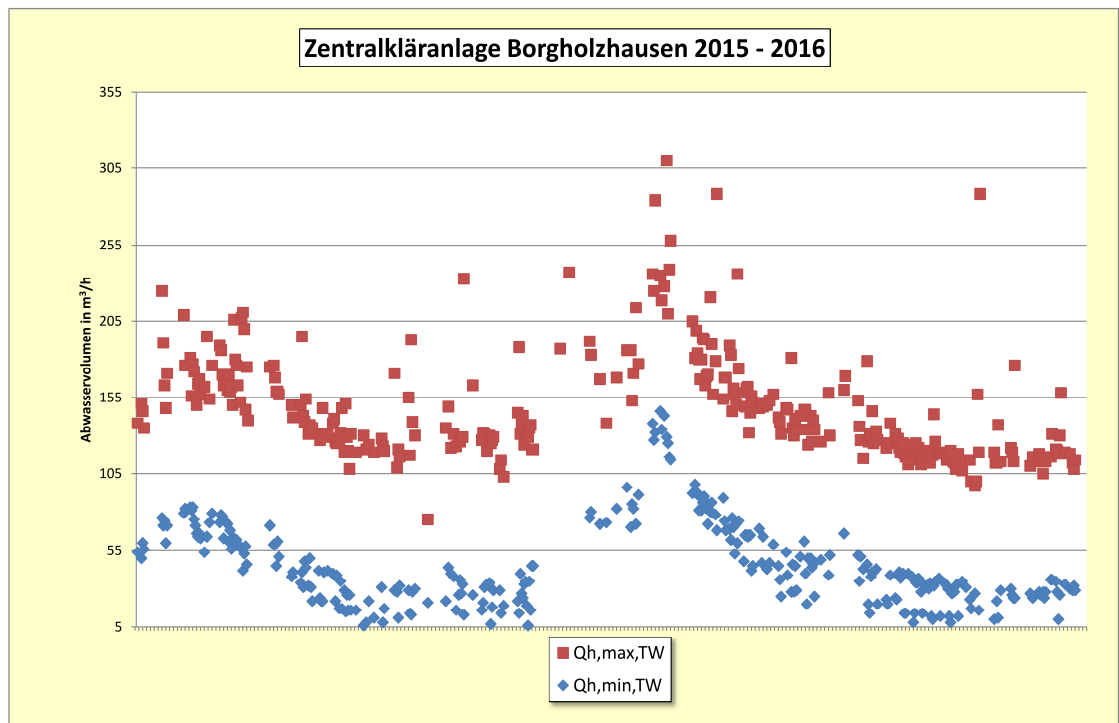


Abb. 2.1.3: Jahrgang der stündlichen Spitzen- und Minimalabflüsse bei TW, 2015 bis 2016

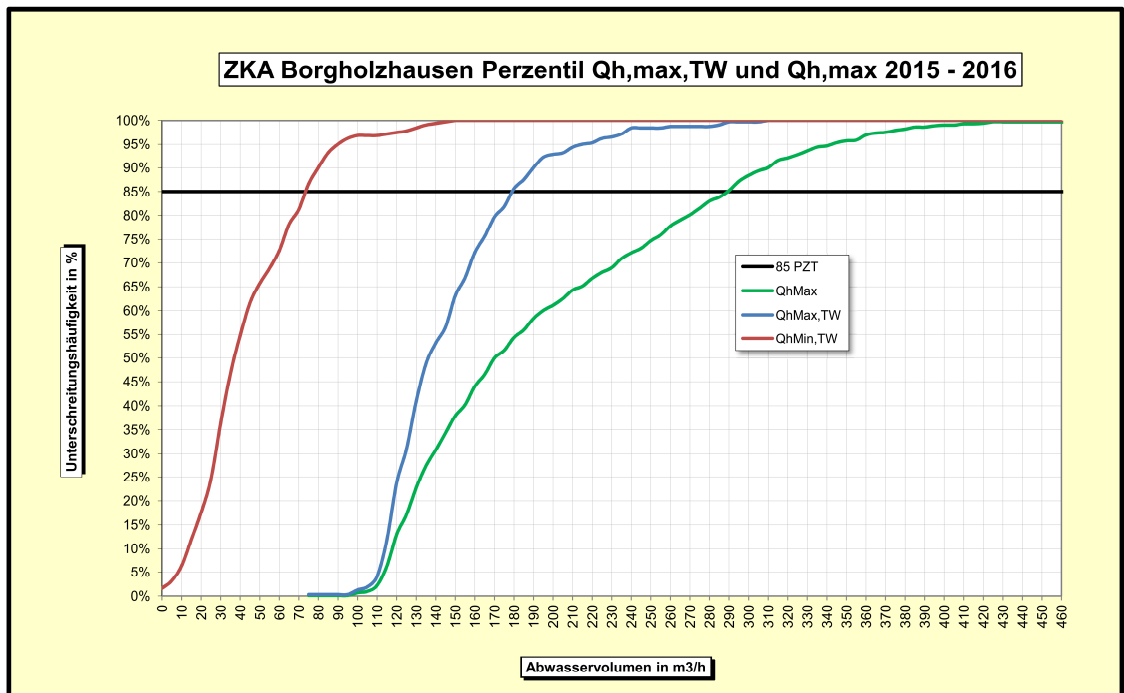


Abb. 2.1.4: Summenhäufigkeit der stündlichen Abflüsse ZKA Borgholzhausen, 2015 bis 2016

Anhand der ausgewerteten Betriebsdaten ergeben sich folgende IST-Werte (Stand 31.12.2016):

$$Q_{T,daM} = 2.100 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$Q_{h,max,TW} = 290 \text{ m}^3/\text{h} \quad (\text{rd. } 80 \text{ L/s})$$

$$Q_m = 425 \text{ m}^3/\text{h} \quad (118 \text{ L/s})$$

Die ermittelten Abflusswerte entsprechen in etwa den Planungsansätzen der Entwurfsplanung.

2.1.2 Ablaufqualität der biologischen Stufe

Im Hinblick auf eine effiziente Mikroschadstoffelimination, bei freier Verfahrensauswahl, erfüllt eine gut funktionierende Kläranlage mit niedrigen DOC- (*dissolved organic carbon*, gelöster organisch gebundener Kohlenstoff) bzw. CSB-Frachten (chemischer Sauerstoffbedarf) im Ablauf die besten Voraussetzungen. Hohe Feststoffgehalte können, insbesondere für Aktivkohleverfahren, problematisch sein.

Zur Prüfung der Umsetzbarkeit einer Ozonierung ist im Vorfeld die Bromidkonzentration des Abwassers zu ermitteln, da aus Bromid (Br) durch Ozon kanzerogenes Bromat gebildet werden kann. Zudem muss die Nitritkonzentration überprüft werden, da die Oxidation des Nitrits zu Nitrat die Ozonzehrung erhöhen und somit auch die Wirtschaftlichkeit der Ozonierung negativ beeinflussen kann [KOMPETENZ-ZENTRUM MIKROSCHADSTOFFE NRW, 2015].

Im Rahmen der Eigenüberwachung werden im Ablauf der ZKA Borgholzhausen die hier relevanten Parameter CSB und Nitrit als qualitative Stichprobe bestimmt. Der Feststoffgehalt wird über eine Trübungsmessung erfasst.

Da insbesondere die oxidativen Verfahren zur Mikroschadstoffelimination frachtgesteuert in Abhängigkeit des DOC / TOC erfolgen, wird dem Betreiber empfohlen entsprechende Analysen vorzunehmen.

CSB, NO₂-N und P_{ges}:

Eine statistische Auswertung der Messwerte aus der Eigenüberwachung ergab hinsichtlich der Parameter CSB und NO₂-N folgende Ablaufwerte:

Konzentrationen Ablauf NKB (2014 bis 2016):

	Mittelwert	MIN	MAX
CSB:	16,70 mg/L	13,00 mg/L	21,70 mg/L
NO ₂ -N:	0,057 mg/L	0,002 mg/L	0,138 mg/L
P _{ges} :	0,17 mg/L	0,26 mg/L	0,40 mg/L

Die sehr niedrigen CSB- und Nitritkonzentrationen im Ablauf der Nachklärung lassen hohe Standzeiten der Aktivkohle bzw. geringe Zehrungen bei den oxidativen Verfahren erwarten. Die P_{ges}-Konzentrationen im Ablauf liegen auch ohne Nachfällung und Flockungsfiltration bereits in einem sehr niedrigen Bereich.

Der DOC im Ablauf der Nachklärung wurde im Rahmen der Eigenüberwachung beobachtet zu 5,0 mg/L.

Feststoffgehalt (AFS):

Die Feststoffkonzentrationen im Ablauf der Nachklärung liegen im Mittel mit 5,0 mg/L deutlich unter 15 mgTS/L. Im Winter werden unter dem Einfluss hoher Zulaufwassermengen, hohem Salzgehalt und niedrigen Temperaturen maximale Konzentrationen bis 8,0 mg/l erreicht. Somit ist eine feststoffarme Beschickung der nachfolgenden Reinigungsstufen zur Mikroschadstoffelimination gewährleistet.

Bromid:

Die Bromidkonzentration im Abwasser wurde maximal bestimmt zu 80 µg/L. Die Bromatbildung kann die Anwendung der Ozonung von kommunalem Abwasser limitieren, da Bromat als potenziell kanzerogen eingestuft ist und als derzeit einziges bekanntes Transformationsprodukt einer gesetzlichen Regulierung unterliegt. Gemäß TrinkwV (2001) gilt für Trinkwasser ein Bromatgrenzwert von 10 µg/L. Das

Oekotoxzentrum der Schweiz hat für Bromat ein chronisches Qualitätskriterium für die aquatische Umwelt von 50 µg/L abgeleitet.

Die Bromatbildung hängt von verschiedenen Faktoren ab. Dazu gehören u.a. die Bromid-Ausgangskonzentration, die Ozon- und Hydroxylradikal-Exposition bzw. die organische Hintergrundbelastung und der pH-Wert. Besonders bei Wässern mit Bromidkonzentrationen über 100 µg/L wird die Anwendung von Ozon in der Trinkwasseraufbereitung als kritisch erachtet, und es müssen verfahrenstechnische Maßnahmen zur Bromatkontrolle ergriffen werden. Eine pauschalisierte Übertragung dieses Wertes auf die Abwasserbehandlung ist aber aufgrund einer veränderten Zusammensetzung der Hintergrundmatrix und abweichender Reaktionsbedingungen nicht ohne weiteres möglich [KOMPETENZZENTRUM MIKROSCHADSTOFFE NRW, 2016].

Aktuelle Forschungen zeigen, dass die Bromatbildung erst ab einer spezifischen Ozondosis im Bereich von 0,4–0,6 mg O₃/mg DOC deutlich ansteigt. Es wird angenommen, dass bei spezifischen Dosen < 0,4 mg O₃/mg DOC das Ozon primär mit schnell reagierenden Substanzen oder funktionellen Gruppen des organischen Materials reagiert. Erst danach wird Bromid durch Ozon oxidiert. Oberhalb der genannten Schwelle steigt die Bromatausbeute nahezu linear mit der spezifischen Ozondosis an. Wie stark der Anstieg der Bromatausbeute ist, hängt von der Matrix des Abwassers ab. Erfahrungswerte haben gezeigt, dass der geforderte Abbau der Spurenstoffe von 80% mit einer spezifischen Ozondosis von ≤ 0,6 mg O₃/mg DOC erreicht werden kann [SOLTERMANN ET AL., 2016]. In diesem Fall ist mit einer erhöhten Bromatbildung nicht zu rechnen. Dennoch kann die Bildung von Bromat bei der Ozonung des Abwassers der Zentralkläranlage Borgholzhausen nicht vollständig ausgeschlossen werden. Eine Anwendung der Ozonung ist unter Einhaltung der o.g. Ozondosis und unter Beachtung verfahrenstechnischer Maßnahmen zur Bromatkontrolle möglich.

SAK254:

Der spezifische Absorptionskoeffizient bei 254 nm (SAK254) ist eine geeignete Größe zur Steuerung und Überwachung der Spurenstoffentfernung und sowohl für die Ozonung als auch für die Adsorption an Aktivkohle aussagekräftig. Der Parameter SAK 254nm wurde bestimmt zu 14 m⁻¹.

2.2 Erweitertes Monitoring auf Mikroschadstoffe

Zur weiteren Bewertung der Abwasserbelastung und zur Datenverdichtung erfolgte, in Abstimmung mit der Bezirksregierung Detmold, ein Monitoring im Ablauf der Zentralkläranlage Borgholzhausen. Hierzu wurden insgesamt drei 72-Stunden-Mischproben bei Trockenwetter im Ablauf der Nachklärung genommen und analysiert. Die Probenahme erfolgte jeweils durch die Fa. OWL Umweltanalytik GmbH.

Messung 1:	28.03.2017 bis 31.03.2017	$Q_{\text{Bezug}} = 6.873 \text{ m}^3$
Messung 2:	30.05.2017 bis 01.06.2017	$Q_{\text{Bezug}} = 7.612 \text{ m}^3$
Messung 3:	01.08.2017 bis 04.08.2017	$Q_{\text{Bezug}} = 5.724 \text{ m}^3$

Neben den Parametern aus der Stoffgruppe der Arzneimittel wurden auch Röntgenkontrastmittel, zwei Parameter aus der Gruppe der Pestizide sowie das Korrosionsschutzmittel Benzotriazol analysiert. Weiter wurden die Parameter Bromid und SAK 254nm zusätzlich analysiert. Auf eine Analyse von Hormonen, Duftstoffen und Süßstoffen wurde verzichtet. Eine vollständige Liste der untersuchten Substanzen ist der Anlage zu entnehmen.

Des Weiteren wurde, aufgrund der Auflagen des 2. Änderungsbescheids vom 28.10.2016 zum Erlaubnisbescheid vom 21.02.2007, eine zusätzliche Untersuchung im Ablauf der Nachklärung durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messung finden in dieser Studie ebenfalls Berücksichtigung.

Messung 4:	16.05.2017 bis 19.05.2017	$Q_{\text{Bezug}} = 5.943 \text{ m}^3$
------------	---------------------------	--

Die Analyse der Messung 4 beschränkte sich, aufgrund der Vorgaben des 2. Änderungsbescheids, auf die Parameter Benzotriazol, Carbamazepin, Clarithromycin, Diclofenac, Metoprolol, Sulfamethoxazol und Acesulfam.

In der nachfolgenden Tabelle 2.2.1 sind die Ergebnisse der Leitparameter aus allen durchgeführten Messungen zusammengefasst dargestellt. Die Ergebnisse der kompletten Analysen sind der Anlage zu entnehmen.

Um eine aussagekräftige Einschätzung der Analysewerte zu erhalten werden die Einzelwerte jeweils mit einem Referenzwert sowie dem Bewertungskriterium des Kompetenzzentrums für Mikroschadstoffe NRW (Stoffliste NRW, siehe Tab.: 1.2) verglichen. Hieraus kann der spezifische Handlungsbedarf für Stoffgruppen/ Einzelstoffe abgeschätzt werden. Die Referenzwerte stammen aus der Datenbasis der Fa. OWL Umweltanalytik GmbH, Leopoldshöhe. Es handelt sich hierbei um Mittelwerte aus bis zu 250 Analysen von Kläranlagenabläufen ohne 4. Reinigungsstufe zur Elimination von Mikroschadstoffen.

Stoffgruppe / Einzelstoff	Einheit	Konzentration				Referenz	Bewertung
		Messung 1	Messung 2	Messung 3	Messung 4		
Arzneimittel							
Carbamazepin	µg/L	0,550	0,630	1,100	0,750	0,831	0,500
Clarithromycin	µg/L	0,480	0,098	0,110	0,220	0,279	0,100
Diclofenac	µg/L	1,500	1,300	1,000	3,000	1,837	0,050
Metoprolol	µg/L	1,800	1,400	1,100	1,200	2,081	7,300
Sulfamethoxazol	µg/L	0,150	0,056	0,100	0,058	0,435	0,600
Sotalol	µg/L	0,120	0,120	0,150	-	0,238	0,100
Röntgenkontrastmittel							
Amidotrizoesäure	µg/L	<0,05	<0,05	0,140	-	2,740	0,100
Imeprol	µg/L	<0,05	<0,05	<0,05	-	3,166	0,100
Iopamidol	µg/L	<0,05	0,130	0,094	-	1,349	0,100
Iopromid	µg/L	<0,05	0,150	<0,05	-	0,564	0,100
Korrosionsschutzmittel							
Benzotriazol	µg/L	9,200	6,400	6,200	6,400	4,956	10,000
Sonstige Stoffe							
Acesulfam	µg/L	-	-	-	2,000	-	0,100
Bromid	µg/L	0,080	0,060	<0,05	-	-	-
Terbutryn	µg/L	<0,05	<0,05	<0,05	0,064	-	0,100

Tab.: 2.2.1 Zusammenfassung und Bewertung der Messergebnisse

Die gelb hinterlegten Messwerte kennzeichnen eine Überschreitung des Referenzwertes. Bei den orange hinterlegten Messwerten wurde der Referenzwert deutlich überschritten. Bei leichten und wesentlichen Überschreitung des Bewertungskriteriums gemäß der Stoffliste NRW wird dieses gelb bzw. rot gekennzeichnet. Sofern keine Überschreitung vorliegt erfolgt eine grüne Kennzeichnung.

Eine optische Darstellung der Belastungssituation liefern die folgenden Abbildungen. In Abbildung 2.2.1 sind die Konzentrationen der Leitparameter der einzelnen Messungen sowie die Extrem- und Mittelwerte aus den durchgeführten 4 Messungen dargestellt. Abbildung 2.2.2 zeigt einen Vergleich der Mittelwerte für die ZKA Borgholzhausen zu den Ergebnissen ausgewählter Kläranlagen in OWL.

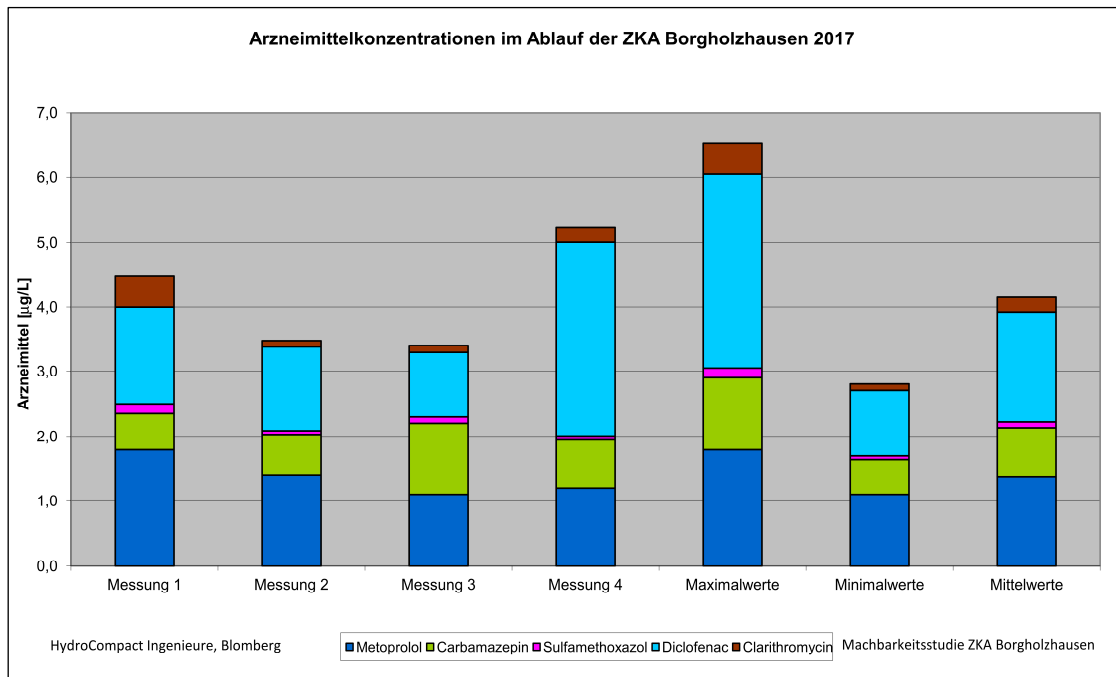


Abb. 2.2.1: Analyisierte Arzneimittelkonzentrationen im Ablauf der ZKA Borgholzhausen

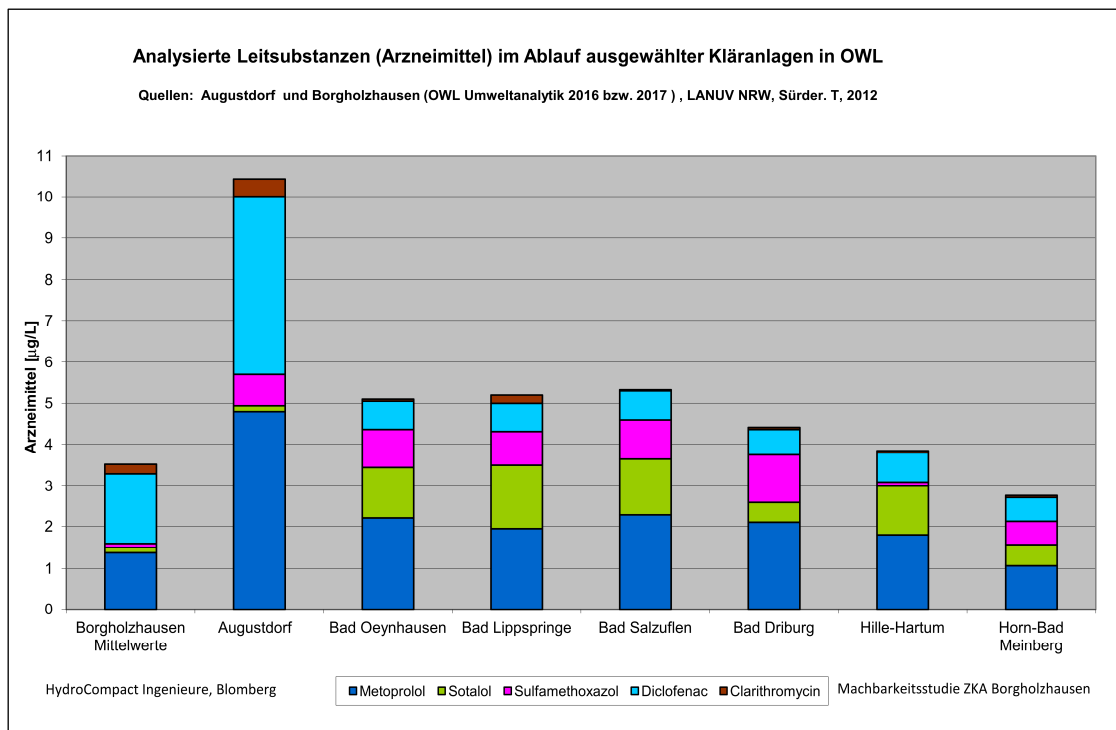


Abb. 2.2.2: Analyisierte Arzneimittelkonzentrationen im Ablauf ausgewählter Kläranlagen in OWL

Es zeigt sich, dass die analysierten mittleren Arzneimittelkonzentrationen im Ablauf der ZKA Borgholzhausen in der Summe (mit Ausnahme der Kläranlage Augustdorf, wo deutlich höhere Werte vorliegen) durchaus mit den anderen betrachteten Kläranlagen vergleichbar sind.

Die Maximalwerte der Parameter Diclofenac und Clarithromycin mit $3,0 \mu\text{g/L}$ bzw. $0,48 \mu\text{g/l}$ liegen im Vergleich zu den Messwerten der anderen betrachteten Anlagen relativ hoch.

Auffällig hoch sind auch die Messwerte des Korrosionsschutzmittels Benzotriazol. Hier wird der Orientierungswert (präventiver Vorsorgewert) in Höhe von $10 \mu\text{g/L}$ nur knapp unterschritten.

Röntgenkontrastmittel spielen im Ablauf der ZKA Borgholzhausen eine untergeordnete Rolle. Die Messwerte liegen im Bereich des Orientierungswertes in Höhe von $0,1 \mu\text{g/L}$. Daher wird auf eine intensivere Betrachtung und Darstellung der Messergebnisse verzichtet.

3 Auslegungswerte Anlagen vierte Reinigungsstufe

Mittels einer sogenannten 4. Reinigungsstufe soll eine Elimination von 80 % der Indikatorsubstanzen zwischen dem Ablauf der biologischen Stufe und dem Ablauf der 4. Reinigungsstufe (im Jahresmittel) erreicht werden. Die Eliminationsrate bezieht sich dabei auf die Summe über alle Indikatorsubstanzen.

Im Hinblick auf eine wirtschaftliche Auslegung der Verfahrensstufe zur Spurenstoffelimination ist die Betrachtung einer Teilstrombehandlung sinnvoll. Der Teilstrom wird so gewählt, dass ein Großteil der jährlichen Abflusssituationen darüber abgedeckt wird. Zudem muss sichergestellt sein, dass eine ausreichende Spurenstoffelimination in der Gesamtanlage (bestehende Anlage + 4. Reinigungsstufe) erfolgt (siehe auch Punkt 2.1.1). Letzteres kann, für eine Behandlung von 90 % der Gesamtabwassermenge in der 4. Reinigungsstufe, am Beispiel des Arzneimittels Diclofenac nachgewiesen werden (BIEBERSDORF ET AL., 2015).

Bemessungswassermenge $Q_{Bem.}$:

Unter Berücksichtigung der innerhalb der vorausgegangenen Kapitel beschriebenen Untersuchungen wird die Elimination von Mikroschadstoffen auf der ZKA Borgholzhausen mindestens in einer Teilstrombehandlung auf der Basis einer möglichen Abwasserbehandlung von 3.000 m³/d erforderlich. Bei diesem Ansatz können die Jahresschmutzwassermenge (JSM = 764.231 m³/a) und bis zu 89% der Jahresabwassermenge (JAM= 947.102 m³/a) behandelt werden. Bei den aufgeführten Abflusswerten handelt es sich um den gewichteten Mittelwert bzw. den Mittelwert aus den letzten 5 Betriebsjahren.

Eine Auswertung der Ganglinien des täglichen Abflusses ergibt, dass bei Ansatz von 144 m³/h ca. 90 % der bei Trockenwetter anfallenden täglichen Abwassermenge behandelt werden können. Bei diesem Ansatz ist zudem eine Behandlung von maximal 3.400 m³ Abwasser pro Tag (dieses entspricht 93% der JAM) möglich. Die Anlagen der 4. Reinigungsstufe (z.B.: Ozongenerator, Ozonreaktor, PAK-Kontaktbecken, etc.) werden für die Varianten der Teilstrombehandlung ausgelegt auf:

$$Q_{Bem, Teilstrom} = 144 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (40 L/s)}$$

Einige Lösungsvarianten erfordern eine Behandlung im Vollstrom. Für diese und für die, zur Einhaltung des P_{ges} - Überwachungswerts, in jedem Fall erforderliche Flokkungsfiltration, wird der maximale RW-Abfluss als Bemessungswassermenge angesetzt.

$$Q_{Bem,Vollstrom} = 454 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (126 L/s)}$$

Hydraulik:

Die Hydraulik der im Teilstrom durchflossenen Bauwerke der 4. Reinigungsstufe wird auf den maximalen stündlichen Trockenwetterabfluss ausgelegt. Dieser entspricht in etwa dem doppelten Bemessungsabfluss $Q_{T,2h,max} = 2 \times 144 = 288 \text{ m}^3/\text{h}$ (80 L/s). Somit stehen ausreichende Reserven für eine spätere Erweiterung zur Verfügung. Die im Vollstrom durchflossenen Bauwerke und Rohrleitungen werden für den maximalen RW-Abfluss ($454 \text{ m}^3/\text{h}$) dimensioniert.

Maßgebend für die hydraulischen Berechnungen ist der höchste Wasserstand an der Einleitungsstelle bei Hochwasser. Hier wird angesetzt: 79.70 m ü. NN. Der Wert wurde abgeleitet aus der Geländehöhe an der Grenze des festgesetzten Überschwemmungsgebiets im Bereich der Einleitungsstelle. Im Rahmen der Studie wurden überschlägliche hydraulische Berechnungen aufgestellt. Diese sind im Fall einer späteren Entwurfsplanung detailliert aufzustellen.

Erweiterungsmöglichkeiten:

Die Anlagen der 4. Reinigungsstufe werden modular aufgebaut, sodass für den Fall einer Erhöhung der Kläranlagenauslastung eine einfache Erweiterung der Anlagen zur Mikroschadstoffelimination möglich ist.

Zusammenfassung der Auslegungsdaten:

$Q_{\text{Bem, Teilstrom}}$:	144 m ³ /h	
$Q_{\text{Bem, Vollstrom}}$:	454 m ³ /h	
Q_{min} :	25 m ³ /h	
Q_{daM} :	2.600 m ³ /d	(tägl. Abwasseranfall, Jahresmittel)
$Q_{\text{T, daM}}$:	2.100 m ³ /d	(tägl. Abwasseranfall TW, Jahresmittel)
$Q_{\text{beh, daM}}$:	2.400 m ³ /d	(Im Teilstrom behandelt, Jahresmittelwert)
$Q_{\text{nbeh, daM}}$:	200 m ³ /d	(nicht behandelt, Jahresmittelwert)

Angesetzt werden:

DOC:	6,0 g/m ³
NO ₂ -N:	0,1 g/m ³
P _{ges} :	0,5 g/ m ³
AFS _{daM} :	5,0 g/m ³
AFS _{max} :	8,0 g/m ³

4 Stand der Forschung und Technik

Kommunale Kläranlagen gehören zu den bedeutenden Eintragspfaden von Mikroschadstoffen in Oberflächengewässer. Die dort eingesetzten konventionellen Reinigungsverfahren ermöglichen aber nur eine begrenzte Elimination dieser Stoffe. Ohne den Einsatz weitergehender Reinigungsverfahren ist die geforderte Elimination von 80% der Indikatorsubstanzen nicht möglich. Diese werden in der Regel mittels einer 4. Reinigungsstufe in den konventionellen Reinigungsprozess eingebunden.

Als technische Lösungen zur Realisierung einer gezielten Mikroschadstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen haben sich neben **oxidativen Verfahren** (z.B. Einsatz von Ozon) auch **adsorptive Verfahren** (z.B. Einsatz von Aktivkohle) als großtechnisch, wirtschaftlich umsetzbar erwiesen [ABEGGLEN ET AL., 2012].

Die Oxidation, z.B. mittels Ozon, beschreibt einen chemischen Reaktionsprozess bei dem ein Abbau der Mikroschadstoffe durch Aufspaltung bzw. Umwandlung in entsprechende Reaktionsprodukte erfolgt. Die Mikroschadstoffe werden durch diesen Prozess folglich nicht vollständig aus dem Abwasser entnommen, sondern lediglich in kleinere Teilchen zerlegt. Die Oxidationsprodukte können zum Teil toxisch sein, sind zumeist aber gut biologisch abbaubar. Um negative Auswirkungen auf die aquatische Umwelt zu vermeiden, wird derzeit eine biologische Nachbehandlung des ozonierten Abwassers als erforderlich erachtet. Hier kommen beispielsweise biologisch aktive Sandfilter, Schönungsteiche oder Wirbel- und Festbettreaktoren zum Einsatz.

Bei der Adsorption handelt es sich um ein physikalisch / chemisches Trennverfahren bei dem die zu eliminierenden Stoffe durch elektrostatische Wechselwirkungen an ein hochreaktives Adsorbens angelagert bzw. gebunden werden. Die Adsorptionskräfte werden hierbei aufgrund einer extrem großen, fein-porösen (inneren) Oberfläche des Adsorbens generiert. Die Entfernung der angelagerten Stoffe aus dem Abwasservolumenstrom erfolgt über die anschließende Entnahme und Weiterbehandlung bzw. Regeneration des beladenen Adsorbens.

Eine Kombination der aufgeführten Verfahren ist möglich.

Die kommunale Abwasserbehandlung stellt auf Grund der unterschiedlichen Abwasserzusammensetzungen und der hydraulischen Dynamik spezielle Anforderungen an das jeweilige Verfahren. Weitere Einschränkungen ergeben sich aus dem erforderlichen Platzbedarf für bestimmte Techniken. Daher muss jede weitergehende Abwasserbehandlung an die jeweiligen Bedingungen angepasst werden. Die Verfahrensauswahl erfolgt jeweils in einer Einzelfallentscheidung.

Eine Bewertung / Einschätzung der verschiedenen Verfahren auf ihre Eignung zur Entfernung von Mikroverunreinigungen ist in den nachfolgenden Tabellen aufgeführt.

Einschätzung der Eignung von Verfahren zur Entfernung von Mikroverunreinigungen

Verfahren	Eignung	Breitbandwirkung	Abfälle / Nebenprodukte	Anwendbarkeit	Kosten/ Nutzen
Ozon	+	+	0	+	+
Pulveraktivkohle	+	+	0	+	+
Granulierte Aktivkohle	+ / F	+	0	+	F
Dichte Membranen (NF, RO)	- / F	+	-	?	-
AOP	- / F	+	0	?	-
Nachgeschaltete biologische Verfahren	-	-	0	-	0 / +
Ferrat	F	0 / +	0 / -	F	F
Fällung / Flockung	-	-	0	-	-
Chlor / Chlordioxid	-	-	-	-	-
Photolyse	-	-	0 / -	+ / -	0
Ultraschall	F	F	0 / -	?	?
Adsorptionsverfahren (Ionenaustauscher, Nanoflockung)	- / F	-	0 / -	-	+
Nanotechnologie	? / F	?	?	?	?

+: gut geeignet, 0: neutral, schwierig, ?: unbekannt, nicht anwendbar, F: Forschungsbedarf

Tab. 4.1: Verfahren zur Entfernung von Mikroverunreinigungen [ABBEGLEN ET AL., 2012]

Als großtechnisch erprobt gelten folgende Verfahren:

- a) Einsatz von Ozon
- b) Einsatz von Pulveraktivkohle (PAK)
- c) Einsatz von granulierter Aktivkohle (GAK)

Stoff	Entfernbarkeit mittels Ozon	Entfernbarkeit mittels PAK/GAK
1H-Benzotriazol	mittel	gut
Carbamazepin	gut	gut
Diclofenac	gut	gut
Metoprolol	mittel	gut
Clarithromycin	gut	mittel
Sulfamethoxazol	gut	mittel

Tab. 4.1: Umfang der Indikatorsubstanzen zur Bewertung der Reinigungsleistung [KOMPE-
TENZZENTRUM MIKROSCHADSTOFFE NRW, 2016]

Im Folgenden werden die einzelnen Verfahren kurz dargestellt.

4.1 Einsatz von Ozon

Ozon wird zur Desinfektion von Trinkwasser europaweit bereits seit über 100 Jahren in der öffentlichen Wasserversorgung eingesetzt. Auch Badewasser und einige Industrieabwässer (z. B. Kläranlage Ochtrup) werden bzw. wurden durch Ozon gereinigt.

In den vergangenen Jahren wurden Ozonanlagen auf kommunalen Kläranlagen in Deutschland (z.B. Bad Sassendorf, Schwerte und Duisburg-Vierlinden, Detmold) und der Schweiz (z.B. Regensdorf, Lausanne) erfolgreich halb- und großtechnisch erprobt. Das Verfahren der Ozonung hat sich hierbei als eine technische und wirtschaftliche Option für eine effiziente Spurenstoffelimination behauptet [ABBEGLEN ET AL., 2009].

Die Anlagentechnik ist am Markt verfügbar. Zahlreiche Ausrüster haben sich auf die Lieferung von Einzelkomponenten bis zum Bau kompletter Anlagen spezialisiert.

Aktuell ist eine Ozonanlage zur Vollstrombehandlung (1.200 l/s Trockenwetter und 2.988 l/s Regenwetter) auf der Kläranlage Aachen-Soers (458.300 EW) geplant. Die Anlage befindet sich zur Zeit im Bau. Der Regelbetrieb soll Anfang 2018 realisiert werden [ROLFS ET AL., 2016]

Ozon kann technisch aus Sauerstoff oder sauerstoffhaltigem Gas (Luft) gebildet werden indem von außen Energie (z.B. durch "stille elektrische Entladung" in einem Hochspannungs-Wechselfeld) zugeführt wird. Die Sauerstoffmoleküle nehmen diese Energie auf und wandeln sich hierbei in energiereiches Ozon um.

Ozon ist hoch reaktionsfähig, es reagiert mit fast allen Stoffen, die chemische Doppelbindungen haben oder die als Moleküle existieren, die oxidierbare Elemente enthalten [LEITZKE, 1993]. Wenn ein Ozonmolekül auf Bakterien, Viren, Chemikalien, Lösungsmittel etc. trifft, nehmen diese Partikel die Energie auf und werden in Oxidationsprodukte transformiert. Die Oxidationsprodukte gelten im Vergleich zum Ausgangsprodukt als weniger schädlich als der Ausgangsstoff. Durch Ozonierung von biologisch gereinigtem Abwasser werden reaktive bzw. biologisch abbaubare Zwischenprodukte generiert, welche gemäß Empfehlung des Schweizer BAFU in einer nachgeschalteten biologisch aktiven Reinigungsstufe weitestgehend eliminiert werden sollen [BÖHLER ET AL., 2016].

Ozon gilt als sehr instabil und muss daher schnell mit organischen Wasserinhaltsstoffen reagieren, um die gewünschte Wirkung zu erzielen, da es ansonsten zu reinem Sauerstoff zerfällt.

Durch Ozon kann ein breites Spektrum an Mikroschadstoffen mit Eliminationsraten von über 80 % aus dem Abwasserstrom entfernt werden. Aus Versuchsanlagen in der Schweiz und Deutschland geht hervor, dass hierzu in Abhängigkeit der DOC-Konzentration (dissolved organic carbon) im Zulauf der Verfahrensstufe eine Ozondosis von 0,6 - 0,9 mg O₃ / mg DOC für die Elimination der meisten Spurenstoffe ausreichend ist. Die Aufenthaltszeit im Ozonreaktor ist abhängig von der Ozonzehrung und beträgt hierbei 15 bis 30 Minuten [ABBEGGLEN ET AL., 2012], [BARJENBRUCH und FIRK, 2014].

Die Ozonung wird, aus verfahrenstechnischer Sicht, der biologischen Stufe nachgeschaltet.

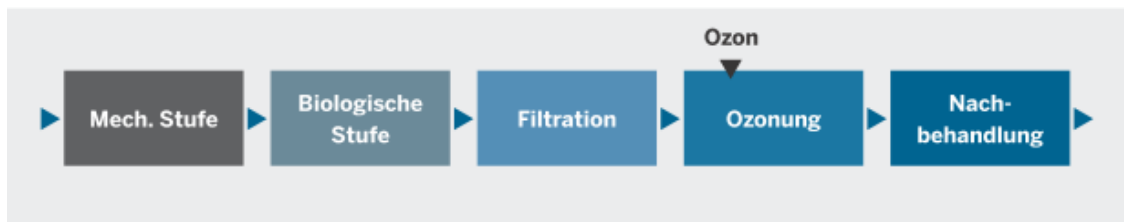


Abb. 4.1.1: Schematische Darstellung Einbindung einer Ozonanlage [KOMPETENZZENTRUM MIKROSCHADSTOFFE NRW, 2016]

Eine wichtige Voraussetzung für einen effizienten Betrieb einer Ozonanlage ist eine stabile Nitrifikation der vorgelagerten biologischen Stufe, da durch Ozon ggf. vorhandenes Nitrit zu Nitrat oxidiert wird. Sofern im Zulauf der Ozonanlage Nitrit analysiert wird ist dessen Oxidation bei der Ozondosierung entsprechend zu berücksichtigen. Ozon sollte in Wässern mit Bromiden nur sehr vorsichtig eingesetzt werden, weil die Bildung von Bromat möglich ist. Ferner ist für eine gezielte und effektive Mikroschadstoffelimination eine gut funktionierende Nachklärung der biologischen Stufe erforderlich. Andernfalls finden konkurrierende chemische Reaktionen statt, bei denen anstelle der Mikroschadstoffe auch weitere organische Abwasserinhaltsstoffe oxidiert werden.

Um die organische Hintergrundbelastung so weit wie möglich zu verringern, kann der Ozonung ggf. eine Filtration vorgeschaltet werden. Die tatsächliche Erfordernis einer solchen Filtrationsstufe ist für jede Anlage individuell zu prüfen.

Gleiches gilt für die biologische Nachbehandlung. Hierzu können diverse Einrichtungen (z.B. Sandfiltration, GAK-Filtration, Wirbelbett- und Festbettreaktoren, Schönungsteiche, etc. eingesetzt werden.

Auf der ARA Neugut (Schweiz) wurden verschiedene Nachbehandlungsverfahren getestet. Es konnte festgestellt werden, dass alle untersuchten Verfahren eine Reduktion der negativen ökotoxikologischen Effekte, welche durch die Ozonung generiert werden können, bewirken. Dieses betrifft vor allem die Reduktion von assimilierbaren organischen Kohlenstoffverbindungen (AOX) und gebildete Nitrosamine (NDMA). Eine bedeutende Elimination von DOC konnte nur in den Filtrationen (Sand- und GAK-Filtration) beobachtet werden. Dieses gilt auch für den Rückhalt von Feststoffen [BÖHLER ET AL., 2016].

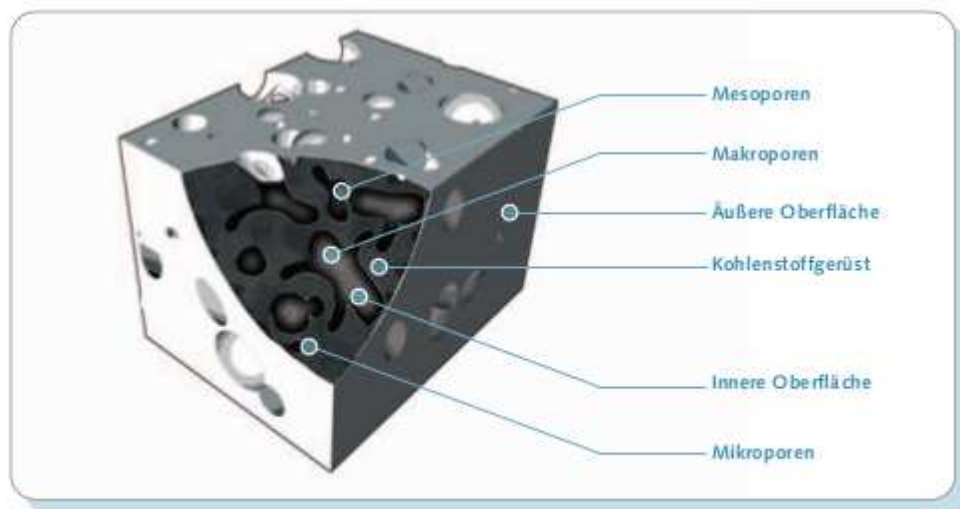
Eine Ozonanlage zur Elimination von Mikroschadstoffen besteht im Wesentlichen aus folgenden Komponenten:

- **Einsatzgastank** (z.B. Sauerstoff, LOX),
- **Ozongenerator**, zur vor-Ort Ozonproduktion,
- **Ozoneintragssystem**, bestehend aus Diffusoren oder Injektoren,
- **Ozonreaktor**, gasdicht, als Kontaktbecken (z.B. kaskadiertes Becken, Schlaufenreaktor mit Leitwänden, Rohrreaktor) für die Reaktion des Ozon mit den organischen Abwasserinhaltsstoffen,
- **Restozonvernichter**, zur Vernichtung des ausgasenden Restozons im Ablauf des Ozonreaktors, (Ozon stellt ein Gesundheitsrisiko für das Betriebspersonal dar),
- **E/MSR-Technik**, zur Regelung und Steuerung des Eliminationsprozesses sowie Messung der Ozonkonzentrationen, etc.
- **biologische Nachbehandlung**, zur Entfernung der Transformationsprodukte.

4.2 Einsatz von Pulveraktivkohle

Aktivkohle wird weltweit als Adsorbens in der Reinigung von Gasen und Flüssigkeiten eingesetzt. Dabei findet sie Anwendung in der Trink- und Abwasserreinigung, in der chemischen Industrie, bei der Reinigung von Abgasen, in der Getränkeindustrie und in vielen anderen industriellen Prozessen.

Aktivkohle besteht aus einem unregelmäßig angeordneten Kristallgitter von Kohlenstoffatomen. Sie verfügt daher über eine sehr poröse Struktur und damit einer großen inneren Oberfläche. Diese kann bei handelsüblicher Aktivkohle zwischen 500 und 1.500 m²/g betragen. Die innere Fläche der Aktivkohle wird anhand des Porensystems charakterisiert. So wird zwischen Makroporen (Zuleitungsporen in das Korninnere) und Adsorptionsporen differenziert.



Oberflächeneigenschaften von Aktivkohle

Abbildung A:
Porensystem von Aktivkohle

Abb. 4.2.1: Porensystem der Aktivkohle (Quelle: Carbonit Filtertechnik GmbH)

In der Abwasserbehandlung kommt neben der granulierten Aktivkohle auch pulverisierte Aktivkohle (PAK) zur Anwendung. Beiden Aktivkohlearten unterscheiden sich im Wesentlichen in ihrer Herstellung, ihrer Porengröße, der Korngröße sowie in ihren Anwendungsmöglichkeiten.

Die üblichen Korngrößen bewegen sich, nach den Angaben unterschiedlicher Hersteller, zwischen 0,5 und 300 µm. Für die Abwasserbehandlung zur Elimination von Mikroschadstoffen sind Aktivkohlen mit hohem Feinkornanteil zu bevorzugen [RUMMLER ET AL., 2014]. Dieses liegt darin begründet, dass die adsorptive Wirkung von PAK direkt mit deren Korngröße zusammenhängt. Je feiner die Korngrößenverteilung der PAK, desto besser ist die kinetische Leistung. Dies bedeutet, dass es zu einer effektiveren und damit schnelleren und gründlicheren Adsorption von Spurenstoffen kommt.

Der Einsatz von PAK in kommunalen Kläranlagen zur Elimination von Mikroschadstoffen wurde durch eine Vielzahl von Pilotanlagen getestet und wird bereits bei einigen Kläranlagen (z.B. Kläranlagen Steinhäule, Lahr und Dülmen) im großtechnischen Maßstab praktiziert.

Für die Einbindung einer PAK-Stufe kommen verschiedene Verfahrenstechniken in Frage. Zur Abscheidung von feindispersen PAK-Anteilen aus dem gereinigten Abwasser ist der Betrieb einer nachgeschalteten Filtration (z.B. Sandfilter, Tuchfilter, Fuzzy-Filter, etc.) bei allen Varianten mit PAK erforderlich.

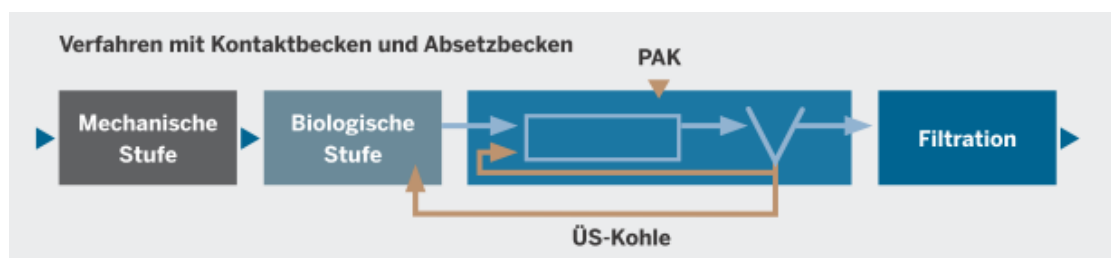


Abb. 4.2.2: Schematische Darstellung Einbindung einer PAK-Stufe mit Kontaktreaktor und Sedimentation [KOMPETENZZENTRUM MIKROSCHADSTOFFE NRW, 2016]

Grundsätzlich besteht die der biologischen Stufe nachgeschaltete Adsorptionsstufe einer PAK Anlage aus einem Kontaktreaktor, einem Feststoffabscheider (z.B. Sedimentationsbecken) und einer Filtrationsstufe.

Die Dosierung sollte, nach neueren Erkenntnissen, stets nach der biologischen Stufe in das biologisch gereinigte Abwasser erfolgen. Dieses Konzept hat sich für eine

effiziente Nutzung der Adsorptionskapazität der Kohle als günstig erwiesen, da die organische Hintergrundbelastung des zu behandelnden Abwasser an dieser Stelle relativ gering ist. Grundvoraussetzung ist eine gut funktionierende Nachklärung.

Die Dosierung von PAK erfolgt proportional zum zufließenden Abwasservolumenstrom in den Zulauf des Kontaktbeckens. Die Dosiermenge ist abhängig vom gewünschten Reinigungsziel, der Kohleart, dem Dosierort und einer ggf. vorgesehenen "Rezirkulation" mit einem Rückführverhältnis zwischen 0,5 und 1,0. Letzteres hat sich als sinnvoll erwiesen um die Kohle weitestgehend mit Mikroschadstoffen zu beladen. Üblicherweise werden bei einer separaten Adsorptionsstufe Dosiermengen von 10 bis 20 mg PAK/L Abwasser eingestellt [KOMPETENZZENTRUM MIKROSCHADSTOFFE NRW, 2016].

Für die Dosierung sollten möglichst präzise, zuverlässige und staubdichte Dosierreinrichtungen verwendet werden. Diese Anforderungen werden z.B. durch die Verwendung einer gravimetrischen Dosierung erfüllt. Die PAK wird hierbei unmittelbar nach dem Abwiegen mit Hilfe einer Wasserstrahlpumpe in einen Impfwasserstrahl eingemischt und in den Abwasservolumenstrom injiziert.

Es gibt Hinweise darauf, dass eine signifikante Adsorption von Mikroschadstoffen auf Aktivkohle innerhalb von wenigen Minuten erfolgen kann. Das Volumen des Kontaktreaktors sollte jedoch aus technischen Gründen auf eine Kontaktzeit von mindestens 30 Minuten bezogen auf den Bemessungszufluss ausgelegt werden [METZGER ET AL., 2014]. Das Kohleschlammalter hat keinen direkten Einfluss auf das Volumen des Kontaktbeckens, da hierdurch die Adsorptionskinetik nicht beeinflusst wird [KOMPETENZZENTRUM MIKROSCHADSTOFFE NRW, 2016].

Die beladene PAK wird innerhalb des Feststoffabscheider abgeschieden, in die biologische Stufe abgeführt, mit dem Belebtschlamm vermischt und mit dem Überschussschlamm der Schlammbehandlung zugeführt. Da bisher keine Desorption der Spurenstoffe von der PAK beobachtet werden konnte ist eine gemeinsame Schlammbehandlung möglich. Durch die Anreicherung mit PAK und ggf. Flockungshilfsmitteln wird die zu verwertende Klärschlammmasse um 5 bis 10 % erhöht. Der anfallende Klärschlamm ist zwingend der thermischen Verwertung zuzuführen. Der Anteil an PAK im Klärschlamm wirkt sich insgesamt positiv auf die Entwässerungsleistung und den Heizwert aus. Bei einer entsprechenden Vorbehand-

lung (z.B. Trocknung) können sich ggf. wirtschaftlich interessante Verwertungswege eröffnen.

Für den Einsatz von PAK auf bestehenden kommunalen Kläranlagen sind die korrosiven Eigenschaften der Aktivkohle zu berücksichtigen. Alle mit der Aktivkohle in Kontakt stehenden Anlagenkomponenten müssen aus entsprechend beständigem Material gefertigt oder entsprechend beschichtet werden. Bestehende Anlagenteile können entweder durch spezielle Beschichtungen verstärkt oder durch beständige Materialien wie V4A-Edelstahl, HDPE oder Beton ersetzt werden [ABBEGGLEN ET AL., 2012]. Eine abrasive Wirkung auf die mechanische Ausrüstung von Kläranlage ist nicht zu erwarten [STOLL ET AL., 2015].

Zur Abscheidung der PAK aus dem Abwasser stehen verschiedene Techniken zur Verfügung. Neben konventionellen Absetzbecken (Rund- oder Rechtecken) können beispielsweise auch Flotationsanlagen oder, Lamellenseparatoren eingesetzt werden. Absetzbecken werden auf eine Oberflächenbeschickung von $q_a = 2,0$ m/h ausgelegt. Der Absetzvorgang kann durch Fäll- und Flockungshilfsmittel unterstützt werden. Die optimale Dosierung ist vor Ort zu ermitteln. Für den Betriebskostenvergleich kann mit einer Dosiermenge von $0,5$ mg Fe/L gerechnet werden [METZGER ET AL., 2014].

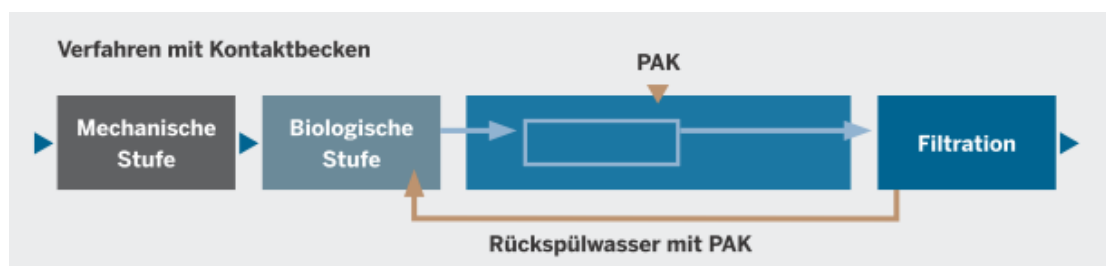


Abb. 4.2.3: Schematische Darstellung Einbindung einer PAK-Stufe mit Kontaktreaktor [KOMPETENZZENTRUM MIKROSCHADSTOFFE NRW, 2016]

Eine weitere Alternative zu der beschriebenen separaten Adsorptionsstufe stellt die Dosierung von PAK direkt in die Biologie dar.



Abb. 4.2.4: Schematische Darstellung PAK-Dosierung direkt in die Belebung [KOMPETENZ-ZENTRUM MIKROSCHADSTOFFE NRW, 2016]

Für die Elimination von Spurenstoffen ist bei der direkten Dosierung in die Belebung die nicht erschöpfte Rücklaufkohle von wesentlich größerer Bedeutung als die dosierte Frischkohle. Es ist deshalb wesentlich wichtiger, ein bestimmtes „Kohleschlammalter“ im System zu fahren, als die Kohledosierung dynamisch in Bezug bestimmter Inputgrößen zu regeln [STOLL ET AL., 2015].

Bei einer Dosierung direkt in die Biologie ist mit einem, gegenüber der Dosierung in den Ablauf der Nachklärung, erhöhten PAK-Bedarf zu rechnen. Die Eliminationsleistung von 80% der Indikatorsubstanzen kann im Trockenwetterfall mit einer Dosiermenge von 11 – 18 mg PAK/L erreicht werden. Bei Regenwetter kann mit 19 mgPAK /L die geforderte Elimination von 80% ebenfalls erreicht werden [STOLL ET AL., 2015].

Da stets frische Kohle eingesetzt werden muss, wirkt sich ein erhöhter Bedarf an PAK negativ auf die Betriebskosten aus. Hinsichtlich der Investitionskosten ist diese Lösung in der Regel günstiger, da hier auf den Bau der Kontakt- und Sedimentationsbecken verzichtet werden kann. Die Sedimentation der PAK erfolgt bei dieser Variante zusammen mit dem Belebtschlamm.

Durch die Dosierung von PAK in die Biologie verbessern sich die Schlammeigenschaften. Hierzu ist jedoch der Einsatz eines organischen Flockungsmittels zwingend notwendig [STOLL ET AL., 2015]. Der AFS-Ablaufwert einer Belebungsanlage war bei einer Dosierung von 10 mg/L PAK mit 6,3 mg/L besser als bei der Vergleichsanlage ohne PAK-Dosierung (8,9 mg/L) [EVERS ET AL., 2017]. Zum Rückhalt feindisperser PAK-Anteile ist der Betrieb einer nachgeschalteten Filtration erforderlich.

Eine weitere Alternative ist mit der Dosierung von PAK unmittelbar in den Flockungsraum einer Filtration gegeben.

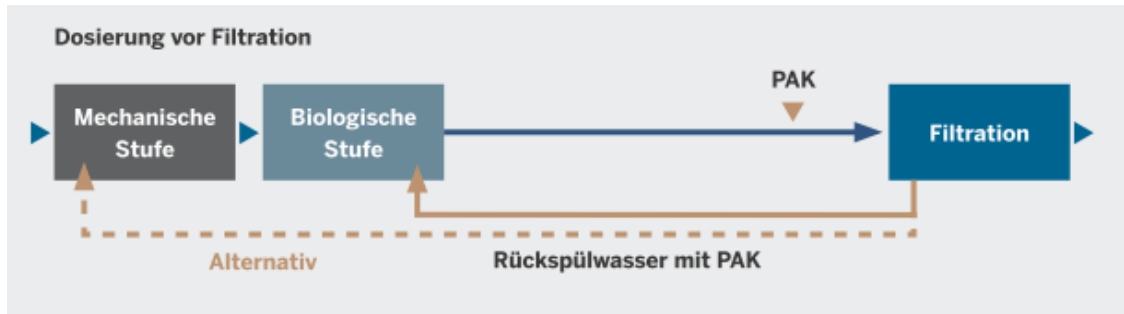


Abb. 4.2.5: Schematische Darstellung PAK-Dosierung vor Flockungsfilter [KOMPETENZ-ZENTRUM MIKROSCHADSTOFFE NRW, 2016]

Bei einer PAK Dosierung in den Flockungsraum einer Filtrationsanlage ist, gegenüber dem Verfahren mit einem separaten Kontakt- und Sedimentationsbecken, eine kürzere Kontaktzeit möglich. Wegen der fehlenden Sedimentationsstufe ist der PAK-Rückhalt in diesem Fall vollständig durch die Filtrationsanlage sicher zu stellen. Zur Unterstützung der Flockungsvorgänge ist hierzu bei einer PAK-Dosiermenge von 20 mg PAK/L eine Zugabe von 0,2 gFe/g PAK erforderlich [BORNEMANN ET AL., 2012].

Für einen sicheren Betrieb der Filtration sind zyklische Filter-Rückspülungen erforderlich. Dieses führt, gegenüber der Variante mit Kontakt- und Sedimentationsbecken, zu einer zusätzlichen Erhöhung des PAK-Bedarfs. Das Rückspülwasser kann der biologischen Stufe zugeführt werden.

Im Rahmen einer Bachelorarbeit wurde der Einsatz von ultrafeiner S-PAK mit einer Korngröße von $1,0\mu\text{m}$ in Verbindung mit einer Tuchfiltration in einer Pilotanlage auf der ARA Rapperswill-Jona (Schweiz) getestet. Es zeigte sich, dass die Kontaktzeit im Vergleich zum Stand der Technik ($20\mu\text{m}$) um mindestens 75 % verkürzt werden kann, da die Adsorptionsleistung der ultrafeinen PAK nach dieser Zeit kaum mehr anstieg. Trotz der kürzeren Kontaktzeit wurden je nach Substanz ca. 30–50 % höhere Eliminationsraten erreicht [HODEL, 2017].

Der Einsatz von Fäll- und Flockungshilfsmitteln zur Steigerung des S-PAK-Rückhalts ist hier unbedingt erforderlich.

Ein Wechsel von einer konventionellen PAK zur S-PAK führt jedoch zu erheblichen Investitionen, da PAK ab einem Korndurchmesser $d_{50} \leq 5 \mu\text{m}$ flüssig gemahlen wird. Dieser Prozess erfolgt in der Regel direkt am Einsatzort, da andernfalls unnötig hohe Transportkosten anfallen würden (TS-Gehalt S-PAC in der Lösung ca. 10%) [HODEL, 2017].

Eine Verfahrensstufe zur Pulveraktivkohledosierung besteht im Wesentlichen aus folgenden Komponenten:

- **PAK-Silo**, in ausreichender Größe (Berücksichtigung der Expansion während der Befüllung), mit Rüttler oder Stickstoffeinperlung zur Auflockerung der Kohle, mit Sicherheitseinrichtungen,
- **Dosiervorrichtung für PAK**, als z.B. gravimetrische Dosierung, Montage unmittelbar unterhalb des Silos, Ex-geschützte Ausführung,
- **Kontaktbecken**, in ausreichender Größe zur Sicherstellung einer weitestgehenden Adsorption,
- **ggf. Sedimentationsbecken**, zum Rückhalt der PAK,
- **Filtration**, für den Rückhalt von feindisperser PAK,
- **E/MSR-Technik und Sicherheitstechnik**, zur Regelung und Steuerung des Eliminationsprozesses sowie diverse Messung, etc.

4.3 Einsatz von granulierter Aktivkohle

In der Trinkwasseraufbereitung werden persistente Stoffe bereits seit Jahrzehnten erfolgreich durch GAK-Filtration entfernt. Der Einsatz von GAK in kommunalen Kläranlagen zur Elimination von Mikroschadstoffen wurde durch eine Vielzahl von Pilotanlagen getestet und wird bereits bei einigen Kläranlagen im großtechnischen Maßstab praktiziert. In diesem Zusammenhang können die Kläranlagen Düren-Merken bzw. Obere Lutter, Rietberg, Gütersloh-Putzhagen und Harsewinkel genannt werden.

Neben den bereits umgesetzten Projekten zur Spurenstoffelimination mittels GAK-Filtration wurden für einige Kläranlagen in Nordrhein-Westfalen Machbarkeitsstudien durchgeführt, bei denen die GAK-Filtration als Vorzugsvariante hervorging. Hier sind die Kläranlagen Dülken und Bad Oeynhausen zu nennen. Die Umsetzung der Maßnahmen ist bereits beschlossen und befindet sich in der Planungsphase [Quelle Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW].

Im Kreis Lippe ist die Umsetzung einer GAK-Anlage auf der Kläranlage Lage (125.000 EW) vorgesehen. Hier sollen zukünftig zwei der vorhandenen sieben Filterbecken einer nachgeschaltete Flockungsfiltration mit GAK betrieben werden [ZIESEL, 2016].

GAK-Filter können der biologischen Reinigungsstufe nachgeschaltet werden und gewährleisten somit neben dem Rückhalt von Mikroschadstoffen auch einen Rückhalt von Suspensa. Zur Minimierung der organischen Hintergrundbelastung und zur Vermeidung einer schnellen Filterbettbelegung mit häufigen Rückspülvorgängen kann optional eine zusätzliche Filtrationsstufe vorgeschaltet werden.



Abb. 4.3.1: Schematische Darstellung der Einbindung einer GAK-Filtration [KOMPETENZ-ZENTRUM MIKROSCHADSTOFFE NRW, 2016]

Der Einbau der GAK erfolgt innerhalb von konventionellen Rückspülfiltern oder in Druckkesselfiltern. Sofern konventionelle Rückspülfilter bereits vorhanden sind, können diese für den Filterbetrieb mit GAK in der Regel ohne größeren baulichen Aufwand genutzt werden. Durch die durchgeführten Versuche an vorhandenen kontinuierlich gespülten Filtern liegen hier bereits positive Erfahrungen hinsichtlich des Austauschs des vorhandenen Filtermaterials gegen GAK vor. In Abhängigkeit der eingesetzten GAK ist ggf. der Rückspülvorgang anzupassen, um ein Ausschwemmen der GAK zu verhindern.

Eine GAK-Filtration wird auf eine Leerbettkontaktzeit von 5 bis 30 Minuten und eine Filtergeschwindigkeit von 5 bis 15 m/h bemessen [KOMPETENZZENTRUM MIKROSCHADSTOFFE NRW, 2016].

Für einen wirtschaftlichen Betrieb einer GAK-Filtration sind die erreichbaren durchsetzbaren Bettvolumina (BV) von entscheidender Bedeutung. Der Parameter BV gibt die behandelte Abwassermenge an, die durch das Filterbett geführt werden kann bis dieses ausgetauscht werden muss.

Das durchsetzbare Bettvolumen ist für verschiedene Aktivkohlen durch Labortest und/oder halbtechnische Versuche im Einzelfall zu ermitteln. Die Erfahrungen aus vorausgegangenen Pilotversuchen zeigen, dass mit einer passend gewählten Aktivkohle im Minimum zwischen 3.000 und 16.000 BV behandelt werden können. Für einzelne Stoffe konnten auch längere Standzeiten beobachtet werden [HERTEL ET AL., 2014].

Um möglichst hohe durchsetzbare Bettvolumina zu erreichen, ist eine zuverlässig und gut funktionierende Nachklärung zwingend erforderlich. Neben des BV ist auch die erforderliche Häufigkeit der Filterspülung von der Qualität (Feststoffgehalt \ll 15 mg AFS/l) des Filterzulaufs abhängig. Es besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der Zulaufqualität, der Filterrückspülung sowie dem Austausch des Filtermaterials.

In diesem Zusammenhang wird darauf hingewiesen, dass häufiges Spülen mit Luft zu Abrasionsverlusten an der GAK führt. Spülprogramm bzw. Spülfrequenz sind daher auf die mechanische Stabilität der eingesetzten GAK, unter Beachtung der Filterlaufzeit und dem zulässigen Filterwiderstand abzustimmen. Unnötige, häufige Rückspülvorgänge sind zu vermeiden [KOMPETENZZENTRUM MIKROSCHADSTOFFE NRW, 2016].

Um eine möglichst hohe Leerbettkontaktzeit zu erreichen, sollten die GAK-Filter parallel beschickt werden.

Das Filtermaterial muss regelmäßig ausgetauscht werden. Die beladene GAK ist entweder zu entsorgen oder nach einer Reaktivierung der Adsorptionskapazität wiederzuverwenden. Die Verluste bei einer Reaktivierung liegen bei 10 bis 20 %. Reaktivierungsverluste sind mit frischer GAK aufzufüllen [ALT ET AL., 2014].

Zur Ermittlung des Austauschintervalls sind derzeit noch Probenahmen zur Spurenanalyse im Labor erforderlich [ABBEGGLEN ET AL., 2012].

Eine GAK-Filtration besteht im Wesentlichen aus folgenden Komponenten:

- **Zwischenpumpwerk**, zur Beschickung der GAK-Filtereinheiten,
- **GAK-Filtereinheiten**, im Parallelbetrieb, in ausreichender Anzahl und Größe zur Sicherstellung der Hydraulik und einer weitestgehenden Adsorption,
- **E/MSR-Technik**, zur Regelung und Steuerung des Filtrerrückbetriebs, etc.

4.4 Verfahrenskombinationen

Da die Eliminationsraten der beschriebenen Verfahren unterschiedlich sind können in speziellen Fällen auch Kombinationen der primären Verfahren (Ozon, PAK und GAK) eine effektive und wirtschaftliche Lösung darstellen. Hierdurch kann z.B. eine Erweiterung des eliminierbaren Stoffspektrums oder eine weitergehenden Entfernung von Transformationsprodukten erzielt werden. Aktuelle Ergebnisse aus Paderborn und Detmold weisen darauf hin, dass hierdurch auch eine Senkung der Betriebskosten möglich ist [KOMPETENZZENTRUM MIKROSCHADSTOFFE, 2016].

Da diese Variante eine interessante Lösung für die Kläranlage Borgholzhausen darstellt, wird die Kombination "Ozonung" und "GAK-Filtration" hier beispielhaft beschrieben.

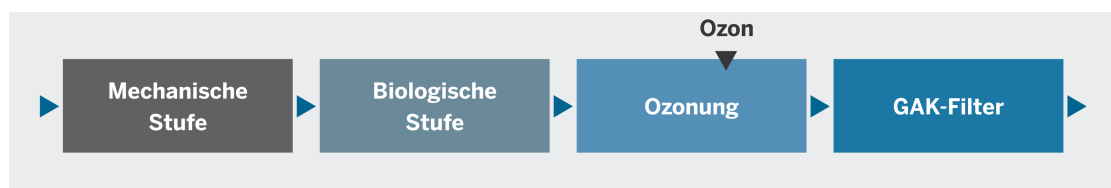


Abb. 4.4.1: Schematische Darstellung der Verfahrenskombination Ozon und GAK [KOMPETENZZENTRUM MIKROSCHADSTOFFE NRW, 2016]

Bei dieser Verfahrenskombination wird die Ozonierung mit möglichst geringer Ozondosis betrieben. Angestrebt wird eine Ozondosis von 2,0 mg/L. Durch die geringe Ozondosis kann die Bildung von Transformationsprodukten (z.B. Bromat) vermieden werden. Der Ozonung wird ein Aktivkohlefilter nachgeschaltet. Da sich auf der Aktivkohleschüttung des nachgeschalteten GAK-Filters ein Biofilm bildet, wird diese Verfahrenskombination auch BAK-Filtration (biologisch aktivierte Aktivkohlefiltration) genannt. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens auf der Kläranlage Detmold konnte eine höhere mikrobiologische Aktivität der Aktivkohle gegenüber einem konventionell betriebenen GAK-Filter nachgewiesen werden [AUSTERMANN-HAUN ET AL., 2017]. Im Rahmen des Forschungsvorhabens konnte weiter gezeigt werden, dass neben der Elimination von Mikroschadstoffen zusätzlich eine Reduzierung der Parameter CSB und AFS, gegenüber einem konventionell betriebenen GAK-Referenzfilter, erreicht werden kann. Dieses deutet auf

eine gute Eignung des Verfahrens im Hinblick auf die auf der ZKA Borgholzhausen zukünftig erforderliche hohe P-Eliminationsleistung hin.

Bei der BAK-Filtration ist zudem, gegenüber einer GAK-Filtration, mit einer deutlichen Erhöhung der erreichbaren Bettvolumina zu rechnen.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass die Kombination einer Ozonung mit nachgeschalteter BAK-Filtration positive Auswirkungen sowohl auf die Standard-Abwasserparameter, als auch auf die Mikroverunreinigungen besitzt [AUSTERMANN-HAUN ET AL., 2017].

5 Ausarbeitung von technischen Anlagenkonzepten

Für die Einbindung der Anlagen zur Mikroschadstoffelimination steht im südlichen Teil des Kläranlagengeländes, unmittelbar unterhalb des Kombinationsbeckens II, eine Freifläche von $20,0 \times 50,0 = 1.000 \text{ m}^2$ zur Verfügung.

Die hydraulische Anbindung der Anlagen zur Elimination von Mikroschadstoffen erfolgt für alle Lösungsvarianten innerhalb des Nassschachtes hinter der heutigen Ablaufmengenmessung (MID). Das MID-Schachtbauwerk liegt unmittelbar im Bereich der neu zu schaffenden Zuwegung zu den Anlagen der 4. Reinigungsstufe. Da die Ablaufmengenmessung an dieser Stelle zukünftig nicht weiter benötigt wird, werden alle Armaturen und die Messeinrichtung zurückgebaut. Die Ablaufrohrleitung wird innerhalb des ehemaligen Trockenschachtbauwerks fest verrohrt. Die Decke und die Wände aus Stahlbeton werden bis zu einer Tiefe von 0,8 m unter GOK abgetrennt und abgebrochen. Die verbleibende Wanne mit der Rohrleitung wird mit Beton verfüllt. Der zum Bauwerk gehörende Nassschacht bleibt erhalten. Dieser wird nur soweit abgetrennt, dass eine neue Stahlbetondecke mit eingebauter, überfahrbarer Schachtabdeckung hergestellt werden kann.

Die Zulaufleitung zu den Anlagen der 4. Reinigungsstufe wird innerhalb des Nassschachtes mit einer Sohlhöhe von ca. 79,60 m ü. NN eingebunden.

Das vorhandene hydraulische Gefälle zwischen der Nachklärung und der Ablaufleitung reicht nicht aus um die Anlagen der 4. Reinigungsstufe mit einem freien Gefälledurchfluss zu integrieren. Je nach Lösungsvariante ist daher die Installation zusätzlicher Pumpwerke erforderlich. Die besten Wirkungsgrade bei geringen Förderhöhen und relativ großen Wassermengen liefern Schneckenpumpen. Ferner können Schneckenpumpen ihre Fördermenge stufenlos zwischen dem Tastpunkt und dem Füllpunkt selbst regeln. Sie fördern jede zufließende Wassermenge bis zu ihrer Nennleistung, unabhängig von deren Schwankungen. Aus den genannten Gründen werden die erforderlichen Pumpwerke, wenn möglich, mit Schneckenpumpen geplant.

Die relativ niedrigen CSB- und Nitritfrachten im Ablauf der Nachklärung lassen hohe Standzeiten der Aktivkohle bzw. eine geringe Zehrung bei den oxidativen Verfahren erwarten.

Die Bromidkonzentration im Abwasser wurde maximal bestimmt zu 80 µg/L. Die Bromatbildung kann die Anwendung der Ozonung von kommunalem Abwasser limitieren, da Bromat als potenziell kanzerogen eingestuft ist und als derzeit einziges bekanntes Transformationsprodukt einer gesetzlichen Regulierung unterliegt. Aktuelle Forschungen zeigen, dass die Bromatbildung erst ab einer spezifischen Ozondosis im Bereich von 0,4–0,6 mg O₃/mg DOC deutlich ansteigt. Bei Werten ≤ 0,6 mg O₃/mg DOC ist mit einer erhöhten Bromatbildung nicht zu rechnen [SOLTERMANN ET AL., 2016]. Aus den genannten Gründen sollte die Anwendung von Ozon mit möglichst geringen Ozondosen erfolgen.

Die Feststoffkonzentrationen im Ablauf der Nachklärung liegen gegenwärtig im Mittel mit 5,0 mgTS/L (maximal 8,0 mgTS/L) deutlich unter 15 mgTS/L. Somit ist eine feststoffarme Beschickung der nachfolgenden Reinigungsstufen zur Mikroschadstoffelimination gewährleistet.

Mit dem neuen Erlaubnisbescheid der Einleitung von Abwasser aus der Kläranlage Borgholzhausen in die Hessel, welcher in Kürze erwartet wird, wird der Überwachungswert für den Parameter P_{ges} von 1,2 mg/L auf voraussichtlich 0,3 mg/L reduziert. Der P_{ges}-Ablaufwert liegt bereits heute bei Betrieb einer Simultanfällung und ohne Flockungsfiltration in diesem Bereich. Um diesen geringen Überwachungswert sicher einhalten zu können, ist dennoch der Betrieb einer Flockungsfiltration im Ablauf der Kläranlage erforderlich. Die Flockungsfiltration wird für eine Belastung von 25 mgTS/L ausgelegt. Unter Berücksichtigung einer maximalen AFS-Konzentration im Ablauf NKB von 8,0 mgTS/L, des Schlammanfalls aus der Nachfällung (ca. 2,0 mgTS/L) sowie der Fällmitteldosierung zur Fällung von PAK in Höhe von ca. 0,2 mgFe/mgPAK ergibt sich eine mögliche Belastung der Filtration mit $15 * 0,8 = 12 \text{ mgPAK/L}$.

Die aufgeführten Randbedingungen sind bei der Auswahl der Lösungsvarianten zur Elimination von Mikroschadstoffen entsprechend berücksichtigt worden.

5.1 Variante 1: Ozonierung

Eine Möglichkeit der Elimination von Mikroschadstoffen ist die Abwasserbehandlung mit Ozon. Im Rahmen der Studie werden zwei Lösungsvarianten betrachtet:

- a) Ozonierung mit biologischer Nachbehandlung (Wirbelbett) im Teilstrom, Tuchfiltration im Vollstrom
- b) Ozonierung und BAK-Filtration im Vollstrom

Die Anlagen werden jeweils dem konventionellen biologischen Reinigungsprozess nachgeschaltet. Im Anschluss an die oxidative Behandlung ist stets eine biologische Nachbehandlung vorgesehen. Die verfahrenstechnische Auslegung der Anlagen zur Elimination von Mikroschadstoffen erfolgt auf der Grundlage der innerhalb von Kapitel 3 aufgeführten Bemessungsgrößen.

5.1.1 Kurzbeschreibung Variante 1a

Über eine neue Zulaufleitung DN400 wird das gesamte Abwasser zunächst einem Abschlagbauwerk zugeführt. Der innerhalb der Ozonanlage zu behandelnde Teilstrom wird über eine MID-Messstrecke abgezweigt und über ein Pumpwerk dem Ozonreaktor zugeführt. Innerhalb des Abschlagbauwerks ist eine Überfallschwelle installiert, so dass der Q_{Bem} übersteigende Abwasservolumenstrom zum Pumpwerk der Filtration geleitet wird und somit keine Behandlung in der 4. Reinigungsstufe erfährt. Die aktivierte Pumpenleistung wirkt hier als Drossel.

Die Beschickung des Ozonreaktors wird über ein Schneckenpumpwerk mit zwei Stück Rohrschneckenpumpen mit Förderleistungen von jeweils bis zu $144 \text{ m}^3/\text{h}$ (redundante Ausführung) realisiert. In der Summe können somit bis zu $288 \text{ m}^3/\text{h}$ in die Ozonanlage gefördert werden.

Der Ozonreaktor wird zweistraßig aus Stahlbeton hergestellt. Es wird jedoch zunächst nur eine Straße ausgerüstet und betrieben. Die zweite Straße dient als Reserve für eine spätere Erweiterungsmöglichkeit.

Für O_3 -Konzentrationen unter 20 ppm ist Beton der Qualität "WU-Beton" (Weiße Wanne) ausreichend beständig gegen Ozon. Die Ausführung einer speziellen Beschichtung ist daher nicht erforderlich.

Im hinteren Teilbereich des Bauwerks erfährt das Abwasser eine biologische Nachbehandlung in einem Wirbelbettreaktor. Die Nachbehandlungsstufe ist bereits für die zweifache Bemessungswassermenge ausgelegt und zu 30% mit Aufwuchskörpern aus Kunststoff mit großer Oberfläche bestückt. Die Aufwuchskörper werden durch ein langsam laufendes Rührwerk kontinuierlich in Schwebelage gehalten. Mikroorganismen lagern sich dabei unter Bildung eines Biofilms an den Aufwuchskörpern an. Der Ablauf aus dem Wirbelbettreaktor erfolgt über eine Lochblechwand mit grobblasiger Belüftung zum Rückhalt der Aufwuchskörper.

Nach der oxidativen und biologischen Behandlung wird der behandelte Teilvolumenstrom in eine Filtrationsanlage (hier Tuchfiltration) geführt.

Im Regenwetterfall wird das zusätzlich anfallende Abwasser über ein weiteres Schneckenpumpwerk in die Filtrationsanlage gehoben, so dass der gesamte Ablauf der Kläranlage in der Filtration behandelt wird. Das Schneckenpumpwerk wird mit drei Rohrschneckenpumpen (Q_{P1} , Q_{P2} , Q_{P3} = jeweils $155 \text{ m}^3/\text{h}$) für einen redundanten Betrieb ausgelegt. Somit kann bei einem Betrieb von zwei Pumpen die erforderliche Spitzenwassermenge bei Regenwetter ($310 \text{ m}^3/\text{h}$) sicher gefördert werden. In der Spitze werden $465 \text{ m}^3/\text{h}$ abgedeckt. Der Betrieb der Pumpen ist zudem über Frequenzumformer vorgesehen, sodass eine gute Anpassung der Förderleistung an die tatsächlichen zu fördernden Abwasservolumenströme möglich ist.

Im Zulauf der Tuchfiltration erfolgt die Zugabe von Fäll- und Flockungsmitteln zur P-Elimination. Die im Abwasser vorhandenen Fällungsprodukte und Suspensa werden durch die Filtration eliminiert und in die biologische Abwasserreinigung zurückgeführt.

Vor der Einleitung des gereinigten Abwassers in die vorhandenen Ablaufrohrleitung wird der Gesamtvolumenstrom über ein MID gemessen. Hinter dem MID wird eine Probenahmestelle (PN) eingerichtet.

Zur Minimierung der Betriebskosten werden die Bauwerke, unter Beachtung der hydraulischen Gegebenheiten, gerade so tief gegründet, dass der Ablauf frostfrei mit ausreichender Fallhöhe über dem maximalen Wasserspiegel (Lastfall Hochwasser) in die Ablaufleitung eingeleitet werden kann.

Die Anlagen zur Ozonerzeugung sowie die erforderliche Niederspannungsunterverteilung werden als Containeranlagen geplant und oberhalb des Ozonreaktors bzw. auf Streifenfundamenten aufgestellt.

Die Flüssigsauerstoffanlage, bestehend aus einem Lagertank und einem Verdampfer, wird beim Sauerstofflieferanten lediglich gemietet. Hier ist baulich ein geeignetes Fundament aus Stahlbeton vorzusehen.



Abb. 5.1.1: Ozonanlage Bad Sassendorf in Containerbauweise (Quelle: MKULNV, 2013)

Die Abbildung 5.1.1 zeigt die Ozonanlage der Kläranlage Bad Sassendorf, welche nach einem ähnlichen Planungskonzept errichtet wurde.

Die Flüssigsauerstoffanlage (LOX-Anlage) wird in unmittelbarer Nähe zum Ozonreaktor aufgestellt. Die Positionierung des Sauerstofftanks in unmittelbarer Nähe zur Ozonanlage ermöglicht eine wirtschaftliche Ausführung der erforderlichen verbindenden Rohrleitungen.

Die vorhandenen Verkehrswege werden für die Belieferung mit Flüssigsauerstoff entsprechend erweitert.

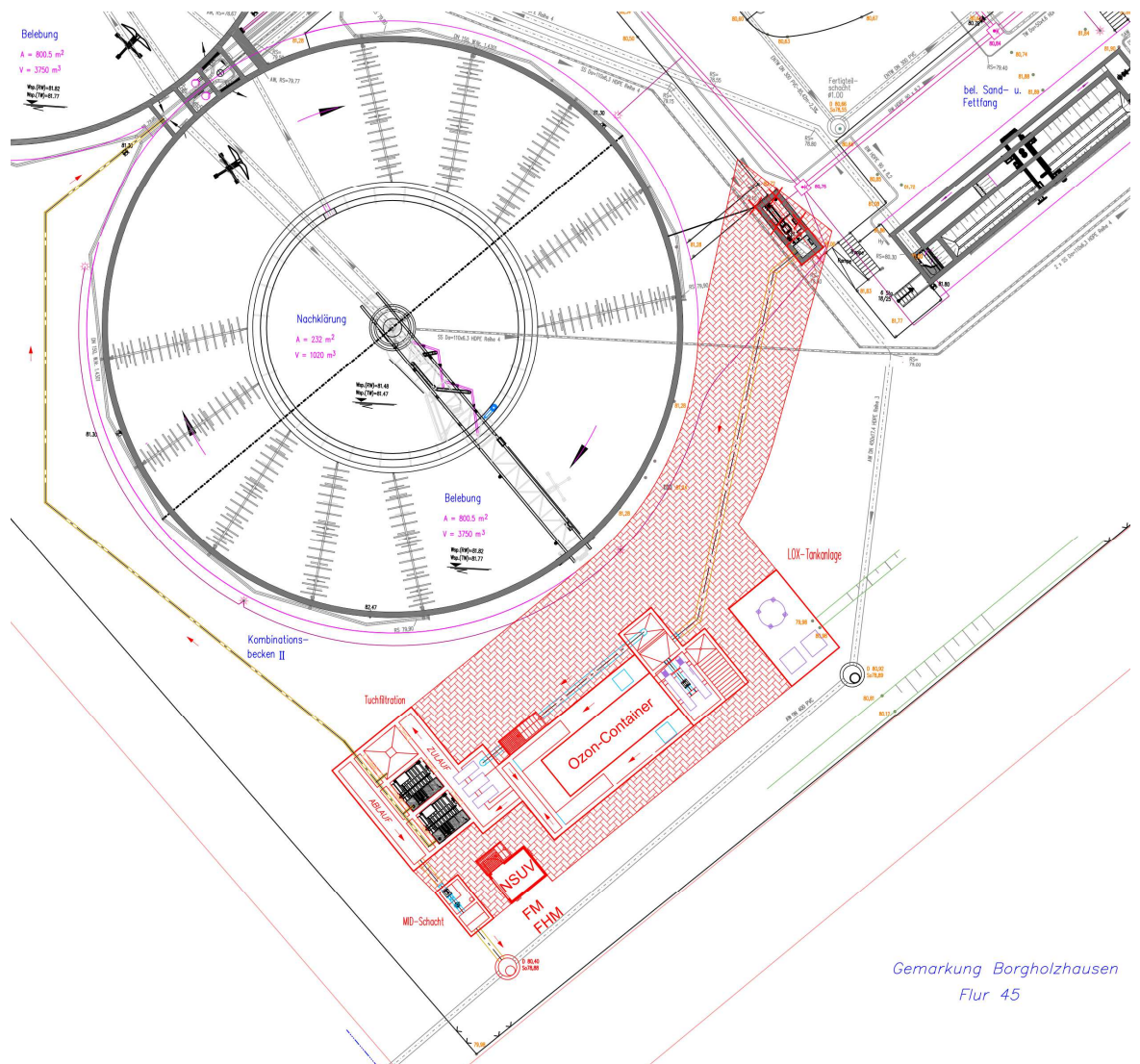


Abb. 5.1.2: Anordnung Bauwerke Variante 1a auf dem Gelände der ZKA Borgholzhausen

Die Abbildung 5.1.2 zeigt die Anordnung der Anlagenkomponenten auf dem Kläranlagengelände.

verfahrenstechnische Auslegung der Ozonanlage:

Die Auslegung der Ozonanlage erfolgt über die Ozondosis in Abhängigkeit der DOC- Konzentration im Zulauf der 4. Reinigungsstufe. Als Auslegungsgröße wird eine spezifische Dosierung von 0,6 bis 0,8 mgO₃/mgDOC angegeben [BARJENBRUCH UND FIRK, 2014]. Geringe Ozondosen sind im Fall der ZKA Borgholzhausen insbesondere auch zur Vermeidung von gefährlichen Transformationsprodukten (Bromat) anzustreben.

Für die Anlagenauslegung werden zunächst die Ozon-Produktionskapazitäten für die maximale und minimale Anlagenbelastung ermittelt.

Die maximale und minimale Ozon-Produktionskapazität ($B_{O_3, \max}$) bei maximaler bzw. minimaler Anlagenbeschickung wird in Abhängigkeit der Parameter DOC und Nitrit im Ablauf der Nachklärung ermittelt zu:

$$B_{O_3, \max} = Q_{\text{Bem}} * z_{\text{spez}} * c_{\text{DOC}} + 3,43 \text{ gO}_3/\text{gNO}_2\text{-N} * c_{\text{NO}_2\text{-N}}$$

$$B_{O_3, \max} = 144\text{m}^3/\text{h} * 0,8\text{gO}_3/\text{gDOC} * 6\text{gDOC}/\text{m}^3 + 3,43\text{gO}_3/\text{gNO}_2\text{-N} * 0,1\text{NO}_2\text{-Ng}/\text{m}^3$$

$$B_{O_3, \max} = 0,74 \text{ kgO}_3/\text{h}$$

$$B_{O_3, \min} = Q_{\text{T,2h,min}} * z_{\text{spez}} * c_{\text{DOC}} + 3,43 \text{ gO}_3/\text{gNO}_2\text{-N} * c_{\text{NO}_2\text{-N}}$$

$$B_{O_3, \min} = 25\text{m}^3/\text{h} * 0,4\text{gO}_3/\text{gDOC} * 6\text{gDOC}/\text{m}^3 + 3,43\text{gO}_3/\text{gNO}_2\text{-N} * 0,1\text{NO}_2\text{-Ng}/\text{m}^3$$

$$B_{O_3, \min} = 0,04 \text{ kgO}_3/\text{h}$$

Es wird eine maximalen Produktionskapazität von $2 \times 0,5 = 1,0 \text{ kgO}_3/\text{h}$ gewählt.

Diese Auslegung wird als sinnvoll erachtet um, im Falle einer temporär hohen Belastung des Abwassers mit Mikroschadstoffen und einer akut steigenden Anlagenauslastung, genügend Reserven bereitstellen zu können. Vor diesem Hintergrund und zur Gewährleistung einer Redundanz, werden die Anlagen zur Ozonerzeugung zweistraßig ausgeführt.

Die Ozonerzeuger können modulierend zwischen 1 und 100% der maximalen Produktionskapazität (hier jeweils 0,005 bis 0,5 kgO₃/h) betrieben werden.

Innerhalb der Ozonerzeuger wird aus Sauerstoff auf elektrischem Weg Ozon erzeugt. Hierbei wird ein nicht unerheblicher Teil an Wärme frei. Die Ozonreaktoren

sind daher im Betrieb aktiv zu kühlen. Als Kühlmedium wird Abwasser aus Zentrat genutzt. Dieses wird über Pumpen einem Wärmetauscher zugeführt. Der Wärmetauscher ist über einen separaten, geschlossenen Kühlkreislauf mit den Ozonerzeugern verbunden.

Die minimale und maximale Ozon-Dosis beträgt $2,7 \text{ gO}_3/\text{m}^3$ bzw. $5,1 \text{ gO}_3/\text{m}^3$. Unter Beachtung einer mittleren spezifischen Dosierung in Höhe von $0,6 \text{ g O}_3/\text{g DOC}$ werden im Mittel $3,9 \text{ gO}_3/\text{m}^3$ benötigt. Der zugehörige mittlere Sauerstoffbedarf beträgt $2,8 \text{ m}^3\text{O}_2/\text{h}$. Die Mittelwerte werden für die Berechnung der Betriebskosten (Energie- und Sauerstoffbedarf) benötigt. Bei der Ermittlung werden neben dem Ansatz des mittleren täglichen zu behandelnden Abwasservolumenstroms zusätzlich auch Schwankungen des DOC mit berücksichtigt. Insgesamt ergibt sich für die Variante 1a ein Sauerstoffbedarf in Höhe von $24.178,5 \text{ m}^3\text{O}_2/\text{a}$ respektive $34,6 \text{ tO}_2/\text{a}$.

Im Rahmen der Studie werden keine Batch-Tests zur Bestimmung der Ozonzehung durchgeführt. Die Berechnung des erforderlichen Reaktorvolumens erfolgt ersatzweise auf der Basis einer Kontaktzeit von 25 Minuten (anstelle von 15 Minuten) bei Beschickung mit Q_{Bem} . Das erforderliche Volumen des Ozonreaktors wurde ermittelt zu rd. 60 m^3 . Diese Wahl enthält Sicherheiten. Im Rahmen weiterführender Planungen wird hier noch Einsparpotential erwartet.

Der Ozoneintrag kann generell über zwei Arten von Eintragungssystemen (Diffusoren, Injektor) in das Abwasser eingetragen werden. Da beide Verfahren keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Eliminationsleistung aufweisen [HERBST, ET AL., 2011] wird der Ozoneintrag in das Abwasser über Diffusoren geplant. Dieses Verfahren birgt energetische Vorteile, da hierbei keine zusätzliche Energie benötigt wird. Der Eintrag über Diffusoren erfordert eine möglichst große Beckentiefe (hier ca. 5,0 m).

Zur Effizienzsteigerung der Ozonreaktion werden innerhalb des Reaktionsbehälters Leit- und Tauchwände aus Edelstahl vorgesehen. Die strömungsmechanisch optimale Ausbildung des Reaktors ist im Rahmen weiterer Planungen z.B. durch Simulation zu ermitteln. In diesem Zusammenhang kann auch die Ausbildung einer zweiten Begasungszone betrachtet werden.

Der Ozonreaktor wird gasdicht hergestellt. Oberhalb des Abwassers austretendes Gas wird über einen Restozonvernichter geführt.

verfahrenstechnische Auslegung Filtration:

Aufgrund der nachgewiesenen Eignung und Leistungsfähigkeit, den geringen hydraulischen Verlusten, des relativ geringen Platzbedarfs sowie der niedrigen Investitions- und Betriebskosten [ANDERS, 2016], wird die Filtration als Tuchfilteranlage geplant. Hierbei handelt es sich um einen Flächenfilter.

Bei den Tuchfiltern der Fa. Mecana-Umwelttechnik GmbH strömt das Wasser von außen nach innen durch eine Filtertrommel. Mit der Tuchfiltration können TS-Ablaufkonzentrationen bis 2 mg/L erzielt werden. Hierbei können auch ultrafeine Partikel (z.B. S-PAK) mit einer Größe von 1µm wirksam abgeschieden werden [HODEL, 2017].

Ein Vorteil der Tuchfiltration ist, dass der Zulaufstrom nicht unterbrochen werden muss. Während des Filterprozesses lagern sich die abfiltrierbaren Stoffe auf und im Filterbett des Tuchfilters ab. Mit fortschreitender Tuchbeladung nimmt der Filterwiderstand zu. Hierdurch steigt der Wasserspiegel in der Filterkammer. Ab einem definierten Niveau erfolgt automatisch eine Filterreinigung. Im Rahmen der kontinuierlichen und regelmäßigen Filterreinigung werden die filtrierte bzw. abgeschiedenen Feststoffe von der Filteroberfläche bzw. aus den Filterkammern abgesaugt. Die so entnommenen Feststoffe können anderen Prozessen zugeführt werden.

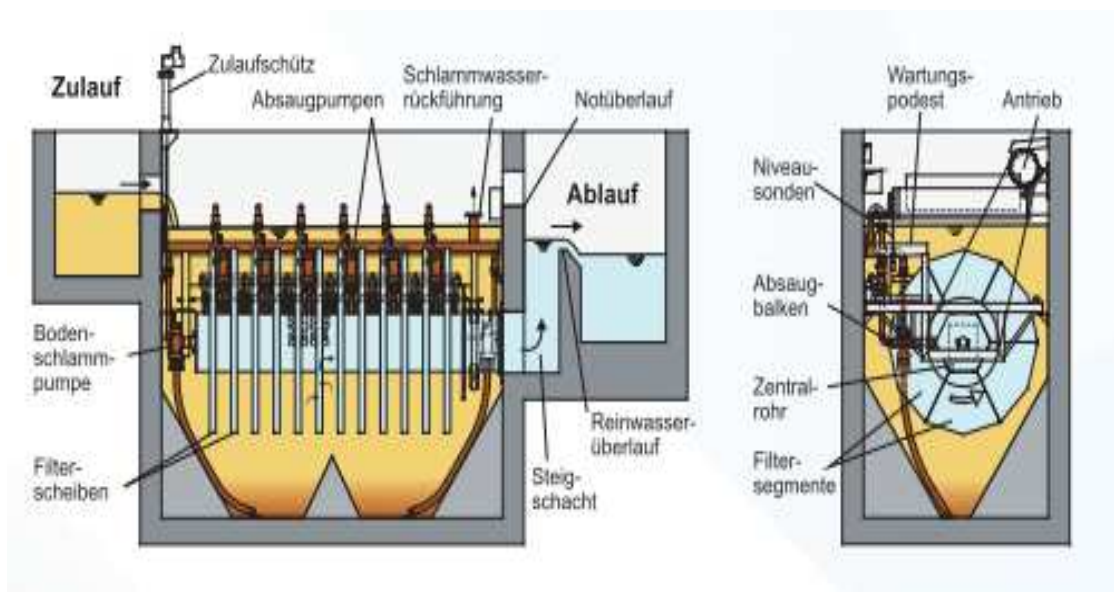


Abb. 5.1.3: Tuchfilteranlage (Quelle: Mecana Umwelttechnik GmbH, 2016)

Die hier geplante Tuchfiltration besteht aus zwei parallel beschickten Filtermodulen mit einer Filterfläche von jeweils 30 m². Die Filtermodule werden innerhalb von Filterkammern aus Stahlbeton eingebaut.

Die Filtration wird für eine Zulauf-Feststoffkonzentration von 25 mg/l bei einer hydraulischen Belastung von 500 m³/h ausgelegt. Als Erweiterungsmöglichkeit wird baulich eine dritte Filterkammer bereit gestellt, welche später mit einfachen Mitteln mit einem weiteren Tuchfiltermodul nachgerüstet werden kann.

E-/MSR-Technik:

geplante Regelstrategie:

Die O₃-Konzentration im "Offgas" wird gemessen und steht ggf. für eine Steuerung zur Begrenzung der Ozondosierung zur Verfügung. Im Regelfall ist grundsätzlich eine DOC-mengenproportionale Ozondosierung vorgesehen. Hierzu werden der Zulaufvolumenstrom sowie die DOC-Konzentration im Zulauf zum Reaktor "online" gemessen. Neben einem MID kommt hier eine geeignete Spektralsonde zum Einsatz. Mit dieser Sonde kann neben dem Parameter DOC u.a. auch der Parameter SAK gemessen werden. In Kombination mit einer weiteren Sonde im Ablauf der Ozonanlage kann ggf. die Regelstrategie einer Erfolgsmessung praktiziert werden.

Die gesamte Anlage verfügt über eine elektrische Anschlussleistung (Ozonanlage, Pumpwerke, Nachbehandlung und Filtration) von ca. 30 kW. Für die elektrische Einbindung der Anlagen zur Mikroschadstoffelimination wird ein Leistungsabgang innerhalb der NSHV im Betriebsgebäude eingerichtet.

Innerhalb des E-/MSR-Containers wird eine Niederspannungsschaltanlage zur Versorgung, und Steuerung der Anlagen errichtet.

Weitere Details zur verfahrenstechnischen Auslegung können den Anlagen entnommen werden

5.1.1.1 Kostenermittlung Variante 1a

Die Investitions- und Betriebskosten der beschriebenen Variante 1a werden auf der Grundlage aktueller Angebotspreise, vorliegender Preisanfragen bei Herstellern/Lieferanten oder Werten aus der aktuellen Fachliteratur ermittelt.

Investitionskosten:

Zur Bestimmung der erforderlichen Investitionskosten werden im Wesentlichen die Herstellungskosten der nachfolgend aufgeführten Komponenten berücksichtigt:

- Rückbau des vorh. MID-Schachtes, Umbau Nassbereich.
- Einbindung einer Rohrleitung mit Absperrarmatur in den vorhandenen MID-Schacht (Nassbereich).
- Neubau Schneckenpumpwerk aus Stahlbeton (PW-Ozonanlage), einschl. 2 Stück Rohrschneckenpumpen und MID-Messung.
- Neubau Ozon- und Nachbehandlungsreaktor aus Stahlbeton einschl. der erf. technischen Ausrüstung.
- Neubau Ozon-Containeranlage mit Ozonerzeuger, Restozonvernichter, Kühlwasserversorgung, Instrumentenluftversorgung, Messungen Umgebungsluft (O_2 und O_3), O_3 -Messungen im Produkt- und Abgas, interne Verrohrung und Verkabelung.
- Neubau Fundamente aus Stahlbeton für die Aufstellung der LOX-Anlage und des E-/MSR-Containers.
- Neubau Schneckenpumpwerk aus Stahlbeton (PW-Filtration), einschl. 3 Stück Rohrschneckenpumpen.
- Neubau 3 Stück Filterkammern einschl. Zu- und Ablaufrinnen aus Stahlbeton für die Aufstellung von 2 Stück Tuchfiltern.
- Neubau MID-Schacht zur Ablaufmengenmessung.
- Elektrische Schaltanlage der v.g. Anlage sowie Herstellung der Spannungsversorgung (Abgang NSHV und Kabeltrasse zwischen NSHV - und NSUV Ozon).

- Herstellen der verbindenden Rohrleitungen.
- Erstellung der Verkehrsflächen.

Die Kostenermittlung für die Kostengruppen Bau, Maschinentechnik und Technische Ausrüstung erfolgt per EDV. Es ergeben sich folgende Herstellungskosten:

	EUR (netto)	EUR (brutto)
Bautechnik:	587.164,40	698.725,64
M.-Technik:	764.950,00	910.290,50
E-/MSR-Technik:	304.000,00	361.760,00
Baunebenkosten (Genehmigungen, Honorare, etc.):	326.500,00	388.535,00
Summe:	1.982.614,40	2.359.311,14

Tab. 5.1.1.1: Zusammenstellung der Herstellungskosten Variante 1a

Betriebskosten:

Die Betriebskosten beinhalten die wesentlichen Betriebsstoffe wie: Energie, O₂-Bedarf, etc., sowie Wartungs- und Personalkosten.

Die Kosten für den Bezug von elektrischer Energie sind auf der Grundlage der Jahresabrechnung 2016 abgeleitet worden.

Die angegebenen spezifischen Kosten für den Bezug von Flüssigsauerstoff sowie die Mietkosten für den Lagertank stammen aus aktuellen Angeboten. Sie enthalten sämtliche Kosten für die Herstellung und den Transport.

Für die Ozonanlage gilt für Wartungs- und Instandhaltungskosten ein Prozentsatz in Höhe von 4,0% der Herstellungskosten. Die Berechnungsbasis für die Wartungskosten der Ozonanlage ist ein Wartungsvertrag der Fa. Xylem Water Solutions Deutschland GmbH.

Kostengruppe	Kostenansätze (brutto)	Betriebskosten (brutto)
Energiebezug:	0,20 EUR/kWh	13.944 EUR/a
O ₂ -Bezug:	0,23 EUR/m ³	5.561 EUR/a
Miete O ₂ -Lagertank:	500,0 EUR/Monat	6.000 EUR/a
FeCl ₃ -Bezug	150,00 EUR/t	128 EUR/a
zusätzliche Entsorgungskosten Klärschlamm:	56,70 EUR/t (landw.)	269 EUR/a
Wartung- / Instandhaltung:		
für Bautechnik:	1,0% der Baukosten	6.987 EUR/a
für M-Technik:	4,0% der Baukosten	36.412 EUR/a
für E-Technik:	2,0% der Baukosten	7.235 EUR/a
Personal	50.000 EUR/(P*a)	25.000 EUR/a
Summe:		101.536 EUR/a

Tab. 5.1.1.2: Zusammenstellung der Betriebskosten Variante 1a

Beim Betrieb einer Tuchfiltration fallen Ersatzteil-, Wartungs- und Reparaturkosten in Höhe von rd. 4,5% der Herstellungskosten an. Für den Ersatz der Filtertücher wird eine Standzeit von 4 Jahren angesetzt. Eine Intensivreinigung sollte jährlich erfolgen. Für die weiteren Herstellungskosten im Bereich M-Technik fallen im Verhältnis weniger Wartungs- und Reparaturkosten an, so dass in der Summe ein Prozentsatz in Höhe von 4,0 % angesetzt werden kann.

Aufgrund einer erforderlichen P-Nachfällung und dem Betrieb einer Flockungsfiltration wird der Einsatz von Fäll- und Flockungshilfsmittel erforderlich. Als Fällmittel kommt Eisen(III)-Chlorid zum Einsatz. Die erforderliche Dosiertrate wird ermittelt zu rd. 0,11 gFe/m³. Diese ergibt sich aufgrund der Annahme einer zusätzlich erforderlichen P-Elimination von $X_{P,Fäll} = 0,5 - 0,3 = 0,2$ mg/L. Unter Beachtung der Wirksubstanz von 0,138 kgFe/kgFM und einer Dichte von 1,42 t/m³ ergibt sich durch die Nachfällung ein jährlicher Fällmittelbedarf von 0,9 tFM/a bzw. 0,6 m³FM/a. Die Lagerung erfolgt in Liefergebinden (IBC). Der zusätzlich benötigte Flockhilfsmittelbe-

darf ist marginal und wird im Rahmen der Studie vernachlässigt. Der durch den Betrieb der Filtration bedingte zusätzliche Schlammanfall beträgt rd. 4,7 t/a.

Unabhängig von den Lösungsvarianten werden für den Betrieb einer weitergehenden Reinigungsstufe zur Elimination von Mikroschadstoffen spezielle Fachkenntnisse und gut ausgebildetes Personal vorausgesetzt. Insgesamt wird für die Lösungsvariante 1a ein, gegenüber dem IST-Zustand, erhöhter Personalaufwand in Höhe von 0,5 Personen angesetzt.

Dynamische Kostenvergleichsrechnung nach KVR-Leitlinie

Zum Vergleich der einzelnen Lösungsvarianten wird eine dynamische Kostenvergleichsrechnung durchgeführt. Als Bezugszeitpunkt für die Bewertung der Investitionen wird der Investitionsbeginn gewählt. Für die Ermittlung des Projektkostenbarwertes (PKBW) und der Jahreskosten werden ein einheitlicher Zinssatz von 3,0 % und unterschiedliche Preissteigerungen zwischen 0 und 3 % (siehe Tabellen der Anlage 5) berücksichtigt. Die Nutzungsdauern der einzelnen Kostengruppen betragen:

Bautechnik:	30 Jahre
M-Technik:	15 Jahre
E-Technik:	10 Jahre

Im betrachteten Nutzungszeitraum werden demnach für die M-Technik einmal und für die E-Technik zweimal Reinvestitionskosten berücksichtigt.

Für die Variante 1a beträgt der Projektkostenbarwert: **rd. 5,79 Mio. €.**

Die zugehörigen Jahreskosten werden ermittelt zu: **rd. 295.270 €/a**

Dies entspricht spezifischen Kosten pro m³ behandeltes Abwasser oder pro m³ Frischwasser in Höhe von: **0,34 €/m³** bzw. **0,84 €/m³**.

Für den Kostenvergleich wird die in Aussicht gestellte Förderung in Höhe von 70% der Investitionskosten zunächst nicht berücksichtigt.

5.1.2 Kurzbeschreibung Variante 1b

Der wesentliche Unterschied zwischen den Varianten 1a und 1b liegt einerseits in der Menge des zu behandelnden Abwassers (V1a: $Q_{\text{Bem}} = 144 \text{ m}^3/\text{h}$, Teilstrom, V1b: $Q_{\text{Bem}} = 454 \text{ m}^3/\text{h}$, Vollstrom) und andererseits in der biologischer Nachbehandlung (V1a: Wirbelbettreaktor, V1b: BAK-Filtration). Da innerhalb einer BAK-Filtration sowohl die Standard-Abwasserparameter als auch Mikroverunreinigungen eliminiert werden, kann die Ozondosis, gegenüber der Variante 1a, deutlich reduziert werden. Insgesamt können bei dieser Lösung Synergieeffekte erzielt werden (siehe auch Abschnitt 4.4).

Über eine neue Zulaufleitung DN400 wird das gesamte Abwasser einem Pumpwerk zugeführt. Der Zulaufvolumenstrom wird über eine MID-Messstrecke gemessen und ca. 2,0 m angehoben. Das Pumpwerk wird mit drei Rohrschneckenpumpen (Q_{P1} , Q_{P2} , $Q_{P3} =$ jeweils $234 \text{ m}^3/\text{h}$) für einen redundanten Betrieb ausgelegt. Somit kann bei einem Betrieb von zwei Pumpen die erforderliche Spitzenwassermenge bei Regenwetter ($454 \text{ m}^3/\text{h}$) sicher gefördert werden. Die dritte Pumpe dient als Reserve. Der Betrieb der Pumpen ist zudem über Frequenzumformer vorgesehen, sodass eine gute Anpassung der Förderleistung an die tatsächlichen zu fördernden Abwasservolumenströme möglich ist.

Der Ozonreaktor wird zweistraßig aus Stahlbeton hergestellt und betrieben.

Nach der oxidativen Behandlung erfolgt eine biologische Nachbehandlung innerhalb eines zweistraßigen offenen Einschicht-Festbettfilter mit GAK-Füllung.

Im Zulauf der Filtration erfolgt die Zugabe von Fäll- und Flockungsmitteln zur P-Elimination. Die im Abwasser vorhandenen Fällungsprodukte und Suspensa werden durch die Filtration eliminiert und in die biologische Abwasserreinigung zurückgeführt.

Vor der Einleitung des gereinigten Abwasser in die vorhandenen Ablaufrohrleitung wird der Gesamtvolumenstrom über ein MID gemessen. Hinter dem MID wird eine Probenahmestelle (PN) eingerichtet.

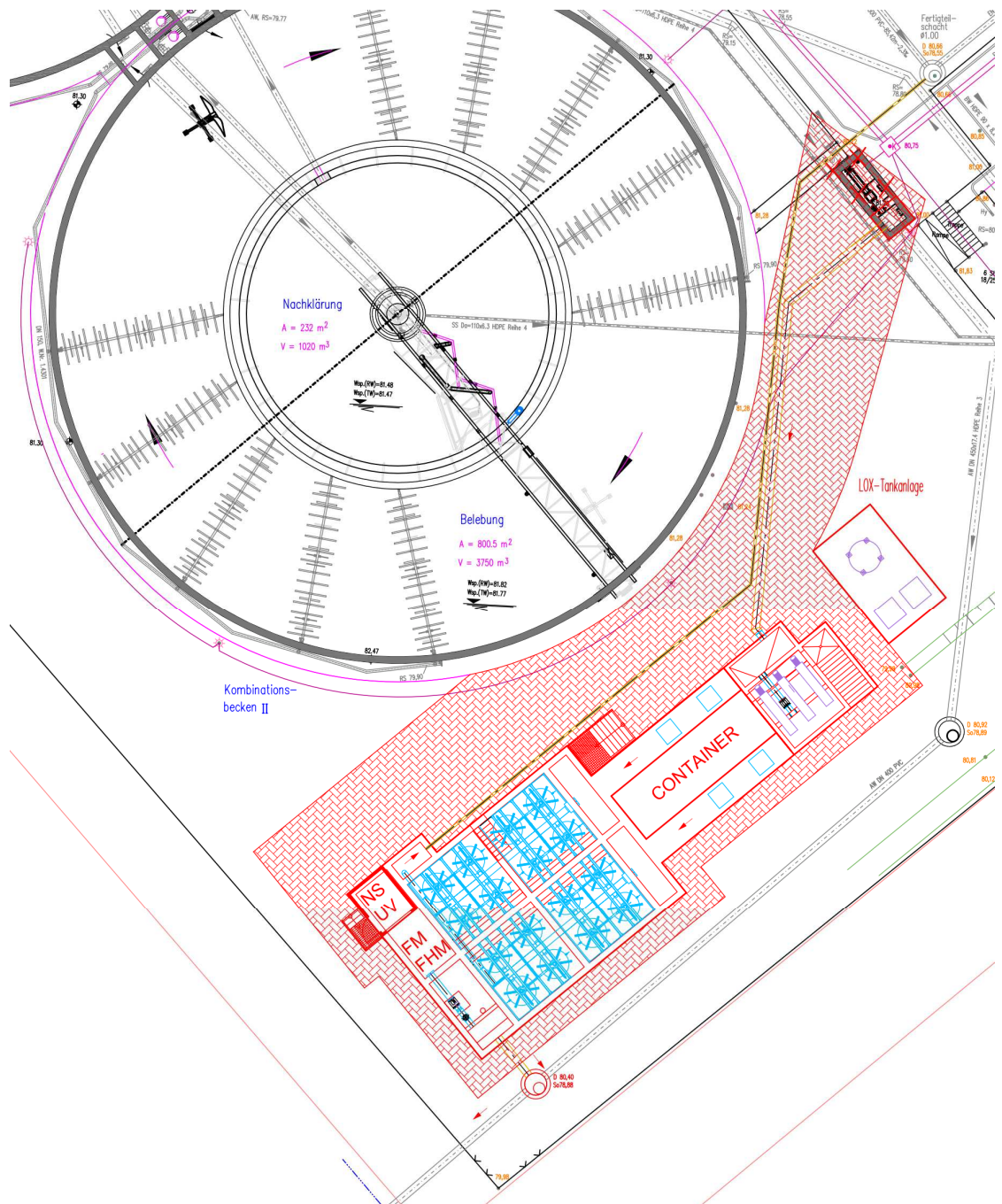


Abb. 5.1.4: Anordnung Bauwerke Variante 1b auf dem Gelände der ZKA Borgholzhausen

Zur Minimierung der Betriebskosten werden die Bauwerke, unter Beachtung der hydraulischen Gegebenheiten, gerade so tief gegründet, dass der Ablauf frostfrei mit ausreichender Fallhöhe über dem maximalen Wasserspiegel (Lastfall Hochwasser) in die Abflaufleitung eingeleitet werden kann.

Die Anlagen der Ozonerzeugung sowie die erforderliche Niederspannungsunterverteilung werden als Containeranlagen geplant und oberhalb der Bauwerke aufgestellt.

verfahrenstechnische Auslegung der Ozonanlage:

Die maximale und minimale Ozon-Produktionskapazität ($B_{O_3, \max}$) bei maximaler bzw. minimaler Anlagenbeschickung wird in Abhängigkeit der Parameter DOC und Nitrit im Ablauf der Nachklärung ermittelt zu:

$$B_{O_3, \max} = Q_{Bem} * Z_{spez} * C_{DOC} + 3,43 \text{ gO}_3/\text{gNO}_2\text{-N} * C_{NO_2\text{-N}}$$

$$B_{O_3, \max} = 454 \text{ m}^3/\text{h} * 0,4 \text{ gO}_3/\text{gDOC} * 6 \text{ gDOC}/\text{m}^3 + 3,43 \text{ gO}_3/\text{gNO}_2\text{-N} * 0,1 \text{ NO}_2\text{-Ng}/\text{m}^3$$

$$B_{O_3, \max} = 1,2 \text{ kgO}_3/\text{h}$$

$$B_{O_3, \min} = Q_{T,2h,\min} * Z_{spez} * C_{DOC} + 3,43 \text{ gO}_3/\text{gNO}_2\text{-N} * C_{NO_2\text{-N}}$$

$$B_{O_3, \max} = 25 \text{ m}^3/\text{h} * 0,1 \text{ gO}_3/\text{gDOC} * 6 \text{ gDOC}/\text{m}^3 + 3,43 \text{ gO}_3/\text{gNO}_2\text{-N} * 0,1 \text{ NO}_2\text{-Ng}/\text{m}^3$$

$$B_{O_3, \max} = 0,02 \text{ kgO}_3/\text{h}$$

Aus Gründen der Redundanz wird eine maximalen Ozon-Produktionskapazität von $2 * 0,6 = 1,2 \text{ kgO}_3/\text{h}$ gewählt. Die minimale und maximale Ozon-Dosis beträgt $0,6 \text{ gO}_3/\text{m}^3$ bzw. $2,7 \text{ gO}_3/\text{m}^3$. Unter Beachtung einer mittleren spezifischen Dosierung in Höhe von ca. $0,3 \text{ gO}_3/\text{gDOC}$ werden im Mittel $2,0 \text{ gO}_3/\text{m}^3$ benötigt. Der zugehörige mittlere Sauerstoffbedarf beträgt $1,5 \text{ m}^3\text{O}_2/\text{h}$. Insgesamt ergibt sich für die Variante 1b ein Sauerstoffbedarf in Höhe von rund $13.440 \text{ m}^3\text{O}_2/\text{a}$ respektive $19,2 \text{ tO}_2/\text{a}$. Durch die Verfahrenskombination von Ozonierung und GAK-Filtration können gegenüber der Variante 1a somit in etwa 50% des Sauerstoffbedarfs eingespart werden.

Das erforderliche Volumen des Ozonreaktors wurde unter Ansatz einer Aufenthaltszeit von 25 Minuten ermittelt zu rd. 190 m^3 .

verfahrenstechnische Auslegung Filtration:

Die Raumfiltration besteht im Wesentlichen aus 2 Betonbecken mit jeweils 8 offenen Einschicht-Festbettfilter. Im Rahmen der Studie wurde eine Ausrüstung mit Aktivkohlefiltern des Fabrikats HUBER betrachtet. Die Fa. Huber SE bietet die Raumfilter in zwei Varianten an. Bei kleinen zu behandelnden Wassermengen werden die Filtermodule innerhalb von Stahlbehältern (Typ CONTIFLOW® SS), bei größeren Wassermengen in Betonbehältern (Typ CONTIFLOW® C) installiert. Aufgrund einer zu behandelnden Wassermenge von $454 \text{ m}^3/\text{h}$ kommt hier der Typ CONTIFLOW®-GAK 50-C zum Einsatz.



Abb.: 5.1.5: Filtrationsanlage CONTIFLOW® SS, Quelle Fa. HUBER SE

Die Beschickung der Filtermodule erfolgt parallel über eine Sammelrohrleitung. Die Filter werden im Aufstrom bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von $5,7 \text{ m/h}$ betrieben. Die im Abwasser enthaltenen partikulären Feststoffe (AFS) werden in der Filterschicht zurückgehalten. Gleichzeitig werden Mikroverunreinigungen an der sehr großen inneren Oberfläche der Aktivkohle adsorbiert.

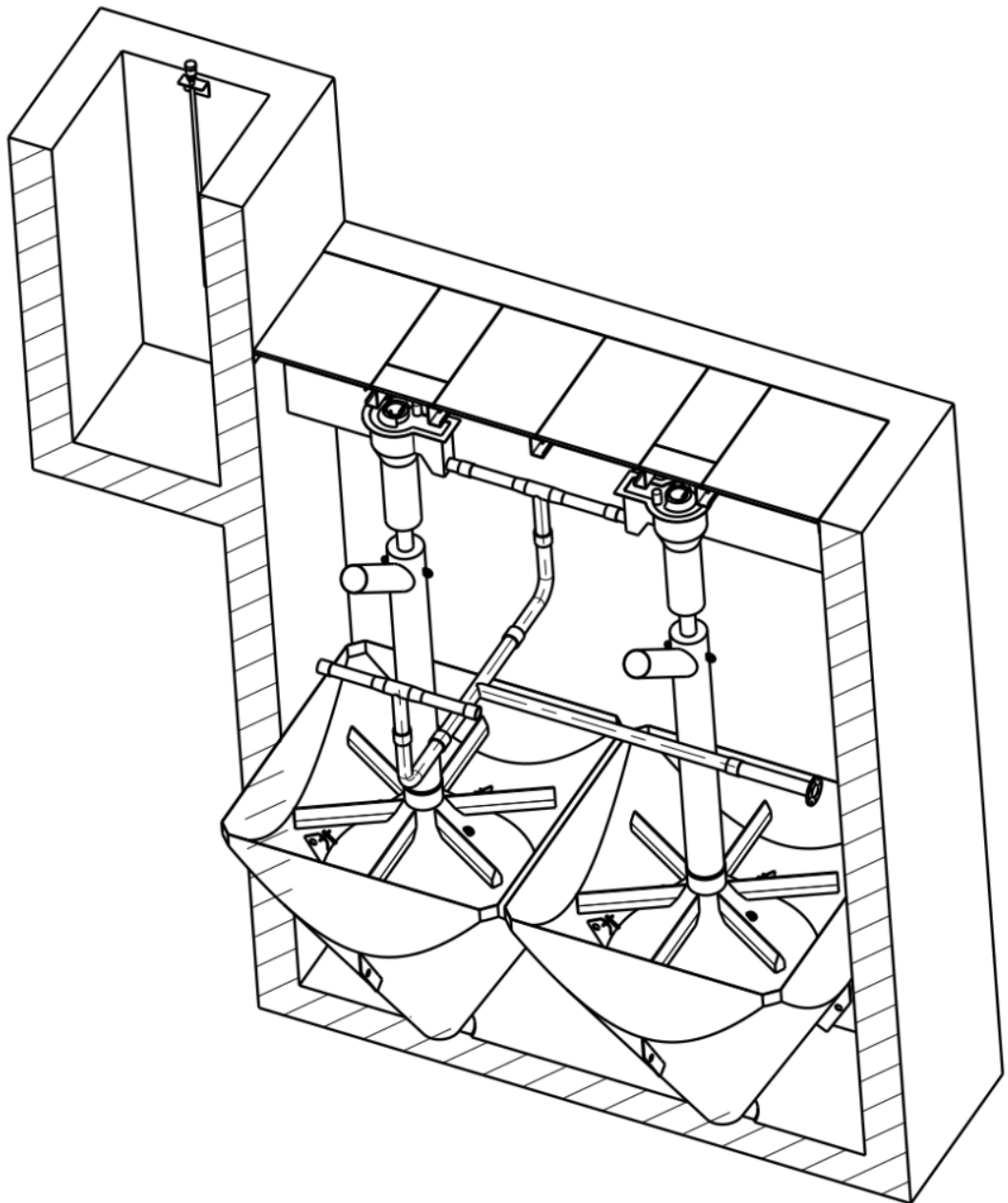


Abb.: 5.1.6: Schnitt Filtrationsanlage CONTIFLOW® C, Quelle Fa. HUBER SE

Das gereinigte Filtrat fließt über ein Wehr im oberen Bereich des Filters ab. Die mit Schmutzpartikeln beladene Aktivkohle bewegt sich während des Filtrationsprozesses kontinuierlich nach unten in den Trichterboden.

Der Filter wird für eine Aufenthaltszeit ("empty bed contact time", EBCT) im Aktivkohlebett von 25 Minuten ausgelegt. Die GesamtfILTERfläche beträgt $16 \cdot 5,0 \text{ m}^2 = 80 \text{ m}^2$.

Für den Betrieb der Filtration ist eine Filterdurchflussregulierung erforderlich. Im vorliegenden Fall wird das Prinzip der Überstauregulierung gewählt. Die zwei Filterkammern werden hierbei über exakt gleiche Überfallschwellen gleichmäßig beschickt. Der Zulauf wird von oben über einen Ringspalt zwischen Zulaufrohr und Druckluftheber in das Filterbett mittels radial angeordneter Verteiler eingeleitet. Der Filterwiderstand nimmt in Abhängigkeit der Filterbelegung zu, so dass sich im Zulauf ein unterschiedlicher Überstau einstellt. Sobald der maximal zulässige Filterwiderstand erreicht ist wird die betroffene Filterkammer mit jeweils 8 Filtermodulen gespült. Eine gleichzeitige Spülung beider Filterkammern ist ausgeschlossen. Der Spülprozess erfolgt ausschließlich mit Druckluft.

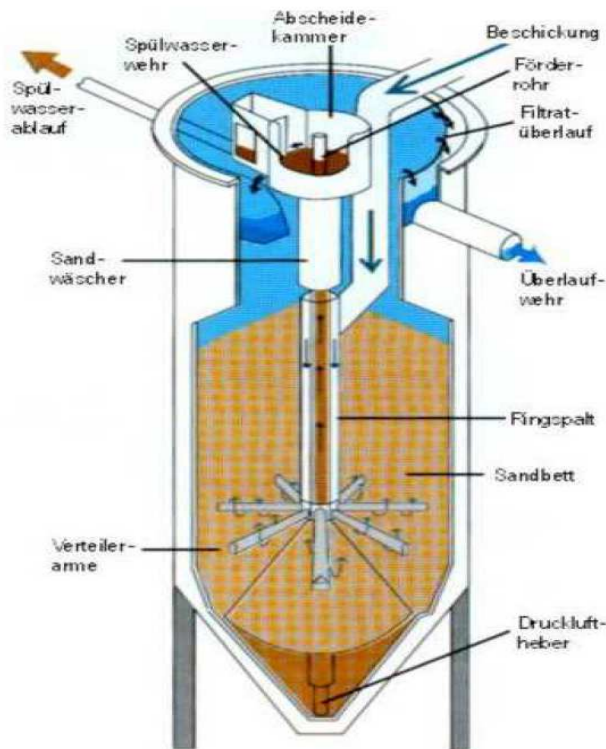


Abb. 5.1.7: Prinzipskizze Raumfilter CONTIFLOW®, Quelle Fa. HUBER SE

Diese wird im Fußpunkt des Filtermoduls eingetragen und bewirkt eine Anhebung der GAK in den sogenannten Aktivkohlewäscher. Dort findet die Abtrennung der Feststoffpartikel von der Aktivkohle statt, welche mit einem Teilstrom (ca. 6-8% des Filtrates) dem "Waschwasser", abgeschieden werden. Die von Feststoffen gereinigte, aber nach wie vor mit Mikroverunreinigungen beladene Aktivkohle fällt anschlie-

ßend nach unten auf das Filterbett zurück. Dadurch entsteht ein interner Aktivkohlekreislauf.

Der Waschprozess der Aktivkohle benötigt keine Betriebspausen oder Rückspülungen. Nach der Beschreibung des Herstellers (Fa. HUBER SE) erfolgt der Prozess der Filtration quasi kontinuierlich.

Für die Bereitstellung des "Waschwassers" muss Filtrat in einer Menge von ca. 6 bis 8 % des Zulaufs vorgehalten werden. Hierzu wird ein Sammelbehälter mit einem Fassungsvermögen von 50 m³ eingeplant.

Die für den Betrieb erforderliche Druckluftversorgung wird über zwei Schraubenkompressoren gewährleistet. Die Aggregate werden innerhalb eines Maschinencontainers aufgestellt. Insgesamt werden $8 * 5,6 \text{ Nm}^3/\text{h} = \text{rd. } 45 \text{ Nm}^3/\text{h}$ Prozessluft benötigt.

Nach der Spülung der Filterzellen wird das Spülabwasser über ein Rohrleitungssystem in einen Spülabwasserspeicher geleitet. Von dort aus wird es über zwei Pumpen zurück in den Zulauf der Kläranlage gefördert.

Unter Berücksichtigung der im Ablauf der Nachklärung der ZKA Borgholzhausen vorhandenen organischen Hintergrundbelastung und des Betriebs der Filtration als BAK-Filter wird für die Ermittlung der Standzeit der granulierten Aktivkohle ein Bettvolumen (BV) von 35.000 angesetzt. Hieraus ergibt sich eine rechnerische Standzeit der Kohle von rd. 8 Jahren. Es wird ein mittlerer Jahresverbrauch von rd. 8 t GAK/a angesetzt. Für die Erstbefüllung der Filterzellen werden, ca. 67 t GAK benötigt.

E-/MSR-Technik:

Die geplante Regelstrategie der Ozondosierung entspricht im Wesentlichen der Variante 1a und wird daher hier nicht weiter erläutert.

Die gesamte Anlage verfügt über eine elektrische Anschlussleistung (Ozonanlage, Pumpwerke und Filtration) von ca. 40 kW. Für die elektrische Einbindung der Anla-

gen zur Mikroschadstoffelimination wird ein Leistungsabgang innerhalb der NSHV im Betriebsgebäude eingerichtet.

Innerhalb des E-/MSR-Containers wird eine Niederspannungsschaltanlage zur Versorgung, und Steuerung der Anlagen errichtet.

Weitere Details zur verfahrenstechnischen Auslegung können den Anlagen entnommen werden

5.1.1.2 Kostenermittlung Variante 1b

Die Investitions- und Betriebskosten der beschriebenen Variante 1b werden auf der Grundlage aktueller Angebotspreise, vorliegender Preisanfragen bei Herstellern/Lieferanten oder Werten aus der aktuellen Fachliteratur ermittelt.

Investitionskosten:

Zur Bestimmung der erforderlichen Investitionskosten werden im Wesentlichen die Herstellungskosten der nachfolgend aufgeführten Komponenten berücksichtigt:

- Rückbau des vorh. MID-Schachtes, Umbau Nassbereich.
- Einbindung einer Rohrleitung mit Absperrarmatur in den vorhandenen MID-Schacht (Nassbereich).
- Neubau Schneckenpumpwerk aus Stahlbeton, einschl. 3 Stück Rohrschneckenpumpen und MID-Messung.
- Neubau Ozonreaktor aus Stahlbeton einschl. der erf. technischen Ausrüstung.
- Neubau Ozon-Containeranlage mit Ozonerzeuger, Restozonvernichter, Kühlwasserversorgung, Instrumentenluftversorgung, Messungen Umgebungsluft (O_2 und O_3), O_3 -Messungen im Produkt- und Abgas, interne Verrohrung und Verkabelung.
- Neubau Fundamente aus Stahlbeton für die Aufstellung der LOX-Anlage und des E-/MSR-Containers.
- Neubau Raumfiltrationsbecken aus Stahlbeton einschl. Zu- und Ablaufrinnen aus Stahlbeton für die Aufstellung einer GAK-Filtrationsanlage mit integrierter MID-Messung.

- Erstbefüllung der Filtermodule mit GAK.
- Neubau Maschinencontainer für die Aufnahme der elektrischen Schaltanlage sowie diverser Aggregate für den Betrieb der Filtration,
- Herstellung der Spannungsversorgung (Abgang NSHV und Kabeltrasse zwischen NSHV - und NSUV Ozon).
- Herstellen der verbindenden Rohrleitungen.
- Erstellung der Verkehrsflächen.

Die Kostenermittlung für die Kostengruppen Bau, Maschinenteknik und Technische Ausrüstung erfolgt per EDV. Es ergeben sich folgende Herstellungskosten:

	EUR (netto)	EUR (brutto)
Bautechnik:	1.233.449,40	1.467.804,78
M.-Technik:	675.850,00	804.261,50
E-/MSR-Technik:	311.000,00	370.090,00
Baunebenkosten (Genehmigungen, Honorare, etc.):	389.500,00	463.505,00
Summe:	2.609.799,40	3.105.661,28

Tab. 5.1.1.3: Zusammenstellung der Herstellungskosten Variante 1b

Betriebskosten:

Die Betriebskosten beinhalten die wesentlichen Betriebsstoffe wie: Energie, O₂-Bedarf, GAK-Bedarf, etc., sowie Wartungs- und Personalkosten.

Die Kosten für den Bezug von elektrischer Energie sind auf der Grundlage der Jahresabrechnung 2016 abgeleitet worden.

Die angegebenen spezifischen Kosten für den Bezug von Flüssigsauerstoff sowie die Mietkosten für den Lagertank stammen aus aktuellen Angeboten. Sie enthalten sämtliche Kosten für die Herstellung und den Transport.

Für die Ozonanlage gilt für Wartungs- und Instandhaltungskosten ein Prozentsatz in Höhe von 4,0% der Herstellungskosten. Die Berechnungsbasis für die Wartungskosten der Ozonanlage ist ein Wartungsvertrag der Fa. Xylem Water Solutions Deutschland GmbH.

Kostengruppe	Kostenansätze (brutto)	Betriebskosten (brutto)
Energiebezug:	0,20 EUR/kWh	10.775 EUR/a
O ₂ -Bezug:	0,23 EUR/m ³	3.091 EUR/a
Miete O ₂ -Lagertank:	500,0 EUR/Monat	6.000 EUR/a
GAK-Bezug	1.700,00 EUR/t	13.828 EUR/a
FeCl ₃ -Bezug	150,00 EUR/t	128 EUR/a
zusätzliche Entsorgungskosten Klärschlamm:	56,70 EUR/t (landw.)	269 EUR/a
Wartung- / Instandhaltung:		
für Bautechnik:	1,0% der Baukosten	14.678 EUR/a
für M-Technik:	3,0% der Baukosten	24.128 EUR/a
für E-Technik:	2,0% der Baukosten	7.402 EUR/a
Personal	50.000 EUR/(P*a)	25.000 EUR/a
Summe:		105.299 EUR/a

Tab. 5.1.1.4: Zusammenstellung der Betriebskosten Variante 1b

Für den Betrieb des Raumfilters werden Ersatzteil-, Wartungs- und Reparaturkosten in Höhe von rd. 2,0% der Herstellungskosten angesetzt. Insgesamt kann somit in der Summe ein Prozentsatz in Höhe von 3,0 % angesetzt werden.

Aufgrund einer erforderlichen P-Nachfällung und dem Betrieb einer Flockungsfiltration wird der Einsatz von Fäll- und Flockungshilfsmittel erforderlich. Als Fällmittel kommt Eisen(III)-Chlorid zum Einsatz. Die erforderliche Dosiertrate wird ermittelt zu rd. $0,11 \text{ gFe/m}^3$. Diese ergibt sich aufgrund der Annahme einer zusätzlich erforderlichen P-Elimination von $X_{P,\text{Fäll}} = 0,5 - 0,3 = 0,2 \text{ mg/L}$. Unter Beachtung der Wirksubstanz von $0,138 \text{ kgFe/kgFM}$ und einer Dichte von $1,42 \text{ t/m}^3$ ergibt sich durch die Nachfällung ein jährlicher Fällmittelbedarf von $0,9 \text{ tFM/a}$ bzw. $0,6 \text{ m}^3\text{FM/a}$. Die Lagerung erfolgt in Liefergebinden (IBC). Der zusätzlich benötigte Flockhilfsmittelbedarf ist marginal und wird im Rahmen der Studie vernachlässigt. Der durch den Betrieb der Filtration bedingte zusätzliche Schlammanfall beträgt rd. $4,7 \text{ t/a}$.

Unabhängig von den Lösungsvarianten werden für den Betrieb einer weitergehenden Reinigungsstufe zur Elimination von Mikroschadstoffen spezielle Fachkenntnisse und gut ausgebildetes Personal vorausgesetzt. Insgesamt wird für diese Varianten ein, gegenüber dem IST-Zustand, erhöhter Personalaufwand in Höhe von 0,5 Personen angesetzt.

Dynamische Kostenvergleichsrechnung nach KVR-Leitlinie

Zum Vergleich der einzelnen Lösungsvarianten wird eine dynamische Kostenvergleichsrechnung durchgeführt. Als Bezugszeitpunkt für die Bewertung der Investitionen wird der Investitionsbeginn gewählt. Für die Ermittlung des Projektkostenbarwertes (PKBW) und der Jahreskosten werden ein einheitlicher Zinssatz von 3,0 % und unterschiedliche Preissteigerungen zwischen 0 und 3 % (siehe Tabellen der Anlage 5) berücksichtigt. Die Nutzungsdauern der einzelnen Kostengruppen betragen:

Bautechnik:	30 Jahre
M-Technik:	15 Jahre
E-Technik:	10 Jahre

Im betrachteten Nutzungszeitraum werden demnach für die M-Technik einmal und für die E-Technik zweimal Reinvestitionskosten berücksichtigt.

Für die Variante 1b beträgt der Projektkostenbarwert: **rd. 6,53 Mio. €.**

Die zugehörigen Jahreskosten werden ermittelt zu: **rd. 333.370 €/a**

Dies entspricht spezifischen Kosten pro m³ behandeltes Abwasser oder pro m³ Frischwasser in Höhe von: **0,35 €/m³** bzw. **0,95 €/m³**.

5.2 Variante 2: PAK-Adsorption

Eine weitere Möglichkeit der Elimination von Mikroschadstoffen ist die Abwasserbehandlung mit Pulveraktivkohle (PAK). Von den in Kapitel 4.2 beschriebenen Möglichkeiten der verfahrenstechnischen Einbindung werden für einen wirtschaftlichen Betrieb auf der ZKA Borgholzhausen ebenfalls zwei Varianten in Betracht gezogen.

- a) PAK-Adsorption innerhalb eines Kontaktbeckens (Teilstrom) mit direkt nachgeschalteter Filtration (Vollstrom) und Rückführung der Kohle in die Belebung.
- b) PAK-Adsorption direkt in der Belebung mit Filtration (Vollstrom).

Die Variantenauswahl erfolgte vor dem Hintergrund, dass eine Maximierung der Reinigungsleistung bei möglichst geringen Betriebskosten erzielt werden soll. Weiter soll die auf der ZKA Borgholzhausen vorhandene Bausubstanz und Beckenkapazität möglichst mit einbezogen werden.

Bei beiden Varianten erfolgt eine Einmischung der Kohle in die Belebungsanlage über den Eintragspfad der Überschussskohle oder direkt in den Belebtschlamm, so dass der gesamte Kläranlagenablauf (bis 454 m³/h) zum Rückhalt feindisperser PAK über eine Filtration zu führen ist. Durch einen Kontakt der Kohle mit dem Belebtschlamm wird die Effizienz der Mikroschadstoffelimination durch Adsorption positiv beeinflusst. Dieses ist im Grunde auf die längere Kontaktzeit der Kohle mit dem Abwasser zurückzuführen. Die Einmischung der PAK in die Biologie führt allerdings zu einer größeren Schlammmenge in der biologischen Stufe und in der gesamten Schlammbehandlung. Bei der Planung einer Stufe zur Elimination von Mikroverunreinigungen ist die zusätzliche Schlammmenge zu berücksichtigen [STOLL ET AL., 2015].

Ein Nachteil der Einmischung der PAK in die Biologie ist die erhöhte Abrasion, welche sich besonders im Bereich der Schlammentwässerung auswirken kann. Hier sind ggf. Anpassungen an der eingesetzten Entwässerungsmaschine (Dekanter) vorzunehmen. Eine abrasive Wirkung auf die mechanische Ausrüstung von Kläranlagen (Pumpen, Rührwerke, etc.) ist hingegen nicht zu erwarten [STOLL ET AL., 2015].

Grundsätzlich ist eine PAK-Dosierung innerhalb eines Kontaktbeckens (Variante 2a) gegenüber der Dosierung in die Belebung (Variante 2b) als vorteilhaft zu bewerten, da die geringere organische Hintergrundbelastung eine Verringerung der erforderlichen PAK-Menge in einer Größenordnung von rd. 50% bewirkt (ca. 10 mgPAK/L bzw. 18 mg PAK/L. Ferner liegen für die Lösung nach Variante 2b derzeit nur wenige großtechnische Betriebserfahrungen vor.

5.2.1 Variante 2a: PAK Adsorption mit Kontaktbecken und Tuchfiltration

Die verfahrenstechnische Auslegung der Anlagen zur PAK Adsorption erfolgt auf der Grundlage der innerhalb von Kapitel 3 aufgeführten Bemessungsgrößen für einen Teilstrom. Die nachgeschaltete Filtration wird hingegen für den Vollstrom ausgelegt. Die Anlage zur PAK Adsorption der Lösungsvariante 2a besteht grundsätzlich aus folgenden Komponenten:

- PAK Lager und -Dosiereinrichtung
- Beschickungspumpwerk Kontaktbecken (Auslegung: $Q_{\text{Bem}}: 144 \text{ m}^3/\text{h}$)
- Kontakt- /Flockungsbecken, FM/FHM-Station
- RW-Pumpwerk Filtration (Auslegung $Q_M: 454 \text{ m}^3/\text{h}$)
- Tuchfiltration
- Ablaufmengenmessung

Aufgrund der vorhandenen Randbedingungen muss der Teilvolumenstrom zur Behandlung im PAK Kontaktbecken angehoben werden. Hierzu wird ein Pumpwerk mit 2 Schneckenpumpen je $144 \text{ m}^3/\text{h}$ vorgesehen (redundante Ausführung). Über die neue Zulaufleitung DN400 wird das gesamte Abwasser zunächst einem Abschlagbauwerk zugeführt. Der zu behandelnde Abwasservolumenstrom wird über eine MID-Messstrecke in den Unterwasserbereich des Pumpwerks geleitet. Die aktivierte Pumpenleistung wirkt hier als Drossel. Der Q_{Bem} übersteigende Abwasservolumenstrom wird über ein Wehr abgeschlagen und zum Pumpwerk der nachgeschalteten Filtration geleitet. Die PAK-Behandlungsstufe wird als zweistraßige Dreier-Kaskade aus Stahlbeton hergestellt. Es wird jedoch zunächst nur eine Straße technisch aus-

gerüstet und betrieben. Die zweite Straße dient als Reserve für eine kurzfristige Erweiterung der Anlage. Die einzelnen Becken mit den Abmessungen (L/B/H) = 3,0/3,0/3,0 m verfügen jeweils über ein Volumen von ca. 27,0 m³. Bei einem Gesamtvolumen einer Behandlungsstraße von rd. 81,0 m³ beträgt die rechnerische Kontaktzeit rd. 34 Minuten.

Die Dosierung der Kohle erfolgt im Zulauf des Kontaktbeckens. Die PAK wird kontinuierlich aus einem Silo über eine hoch präzise Dosiereinrichtung (Kombination aus volumetrischer und gravimetrischer Dosierung mit TARA-Kompensation für eine Genauigkeit von +/- 1 %) mit einem Treibwasserstrahl in den Zulauf zum Kontaktbehälter dosiert. Es wird eine mittlere Dosierung von 10 mgPAK/l angesetzt. Diese Dosierung sollte für eine 80%ige Eliminierung der gut adsorbierbaren Mikroschadstoffe ausreichend sein. Die genaue Dosierung ist nach den örtlichen Bedingungen mittels Labortests noch festzulegen.

Aufgrund des relativ geringen PAK-Jahresbedarfs rd. 9 t/a. Wird für diese Verfahrensvariante kein Groß-Silo vorgesehen. Stattdessen werden kleine, mobile PAK-Lagerungsbehälter mit einem Nettovolumen von rd. 1,5 m³ eingesetzt.

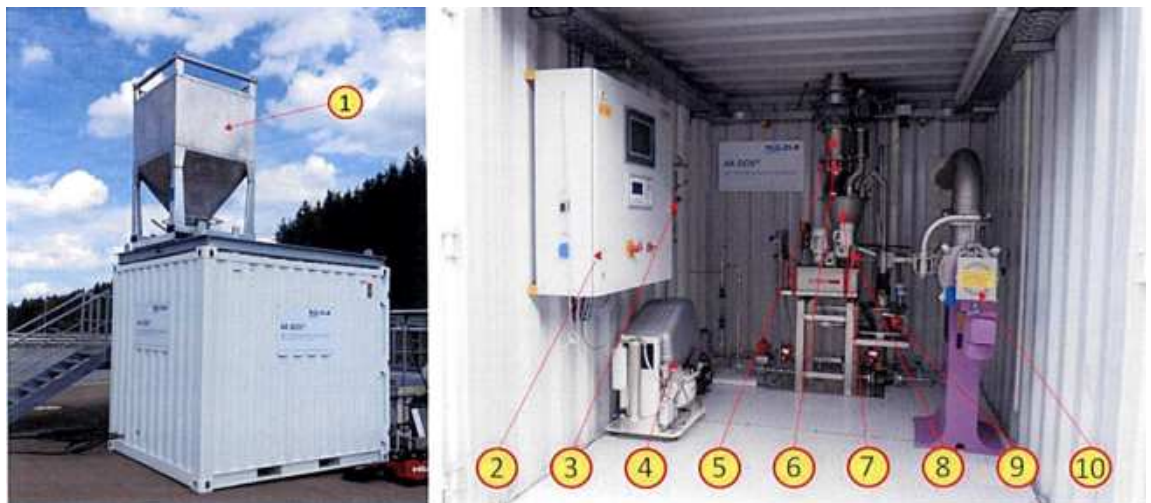


Abb. 5.2.1: PAK-Dosierstation (Quelle: Sülzle Kopf Anlagenbau GmbH, 2016)

1: PAK Lagebehälter (1,5 m³ Nutzvolumen), 2: Schaltanlage, 3: Druckluftverteiler, 4: Kompressor, 5: Vorlagerrohr, 6: Befüllklappe, 7: Dosiervorlagebehälter, 8: Feindosierer, 9: Einspüldisperser, 10: Filter

Bei einer angenommenen Schüttdichte (gestampft) in Höhe von 500 kg/m^3 beträgt die nutzbare PAK-Menge 0,8 t. Der Lagerungsbehälter ist demnach monatlich zu wechseln. Es werden insgesamt 3 Behälter eingeplant, wobei sich ein Behälter in einem monatlichen Wechselmodus befindet. Auf der Kläranlage werden stets zwei Behälter vorgehalten. Ein Behälter wird je Anlieferung ausgetauscht.

Der Lagerungsbehälter wird auf Führungsschienen auf dem Container der PAK-Dosierstation aufgesetzt. Der Wechsel der Lagerungsbehälter erfolgt mittels Stapler oder Radlader durch das Betriebspersonal.

Die Dritte Kammer des Kontaktbeckens dient gleichzeitig als Koagulationsbecken. Hier erfolgt eine Fällung und Flockung durch die Zugabe von Metallsalzen und / oder Flockungshilfsmitteln. Alle drei Kammern werden jeweils mit einem Rührwerk ausgerüstet. Bei geringeren Zulaufvolumenströmen oder für den Fall von Reparatur- und Wartungsarbeiten können einzelne Kammern der Kaskadenanlage umfahren werden.

Auf den Betrieb eines Sedimentationsbeckens wird verzichtet, d.h. es findet keine separate Sedimentation zur Abscheidung der PAK-Fracht statt. Der Ablauf aus dem Kontaktbehälter wird zum Rückhalt der PAK direkt einer Filtrationsanlage zugeführt. Aufgrund der nachgewiesenen Eignung und Leistungsfähigkeit, des relativ geringen Platzbedarfs sowie der niedrigen Investitions- und Betriebskosten [ANDERS, 2016] wird eine Filtration als Tuchfilteranlage vorgesehen. Die Filtration wird für eine Feststoffkonzentration von 25 mg/l bei einer hydraulischen Belastung von $454 \text{ m}^3/\text{h}$ ausgelegt. Diese Verfahrensweise wurde im Rahmen des Projekts Mikroflock (2012) an der Uni Stuttgart mit positiven Ergebnissen untersucht. Großtechnisch soll das Konzept auf der KA Greven umgesetzt werden. Hier ist eine Tuchfiltrationsanlage mit $4 \times 90 \text{ m}^2$ Filtern vorgesehen. Die Ausschreibung soll Anfang nächsten Jahres erfolgen. Im Rahmen einer durch die Firma Mecana geförderten Bachelorarbeit an der Hochschule Rapperswil (Schweiz) wurde das Konzept mit extrem feiner Mikro-PAK ($D_{50} = 1.5 \text{ }\mu\text{m}$) erfolgreich angewendet [GRABBE, 2017].

Im Regenwetterfall wird das zusätzlich anfallende Abwasser über ein weiteres Schneckenpumpwerk in die Filtrationsanlage gehoben. Das Schneckenpumpwerk

wird mit drei Rohrschneckenpumpen (Q_{P1} , Q_{P2} , Q_{P3} = jeweils $155 \text{ m}^3/\text{h}$) für einen redundanten Betrieb ausgelegt. Somit kann bei einem Betrieb von zwei Pumpen die erforderliche Spitzenwassermenge bei Regenwetter ($310 \text{ m}^3/\text{h}$) sicher gefördert werden. In der Spitze werden $465 \text{ m}^3/\text{h}$ abgedeckt. Der Betrieb der Pumpen ist zudem über Frequenzumformer vorgesehen, sodass eine gute Anpassung der Förderleistung an die tatsächlichen zu fördernden Abwasservolumenströme möglich ist.

Im Zulauf der Tuchfiltration kann eine weitere Zugabe von Fäll- und Flockungsmitteln erfolgen. Die im Abwasser vorhandenen Fällungsprodukte und Suspensa werden durch die Filtration eliminiert und in die biologische Abwasserreinigung zurückgeführt.

Als Fällmittel kommt Eisen(III)-Chlorid zum Einsatz. Die Gesamt-Dosierrate wird mit $0,2 \text{ mgFe}/\text{mgPAK}$ angesetzt. Im vorliegenden Fall entspricht dieses einer Dosierung von $2 \text{ gFe}/\text{m}^3$ Abwasser. Unter Beachtung der Wirksubstanz von $0,138 \text{ kgFe}/\text{kgFM}$ und einer Dichte von $1,42 \text{ t}/\text{m}^3$ ergibt sich ein jährlicher Fällmittelbedarf von $12,7 \text{ t FM/a}$ bzw. rund $9 \text{ m}^3\text{FM/a}$. Für die Lagerung wird ein Lagerbehälter mit einer Lagerkapazität von 10 m^3 eingeplant. Die Dosierrate für Flockungshilfsmittel liegt bei $0,6 \text{ gFHM}/\text{m}^3$. Der Jahresbedarf ergibt sich somit zu $0,5 \text{ t/a}$. Die genannten Dosiermengen decken den Bedarf für eine weitestgehende P-Elimination ab, sodass diesbezüglich keine weiteren Fäll- und Flockungshilfsmittel nötig sind.

Aufgrund der geringen Haltbarkeit der Produkte wird das Flockungshilfsmittel aus der Schlammwässerung verwendet. Die Lagerung der Liefergebände erfolgt im vorhandenen Schlammwässerungsgebäude. Die benötigte Dosierlösung wird in der Nähe der Dosierstelle in einer separaten FHM-Ansetzanlage hergestellt.

Um eine Mehrfachbeladung der Kohle mit Mikroschadstoffen zu erzielen, wird ein Teil der beladenen Feststofffracht zurück in den Kontaktbehälter gepumpt. Die restliche Kohle wird als Überschussschamm der Belebungsanlage zugeführt. Hier kann eine weitere Beladung erfolgen. Der Abzug der Kohle aus dem System ist über den Überschussschlamm gewährleistet.

Vor der Einleitung des gereinigten Abwasser in die vorhandenen Ablaufrohrleitung wird der Gesamtvolumenstrom über ein MID gemessen. Hinter dem MID wird eine Probenahmestelle (PN) eingerichtet.

Die Abbildung 5.2.2 zeigt die Anordnung der Anlagenkomponenten auf dem Gelände der ZKA Borgholzhausen.

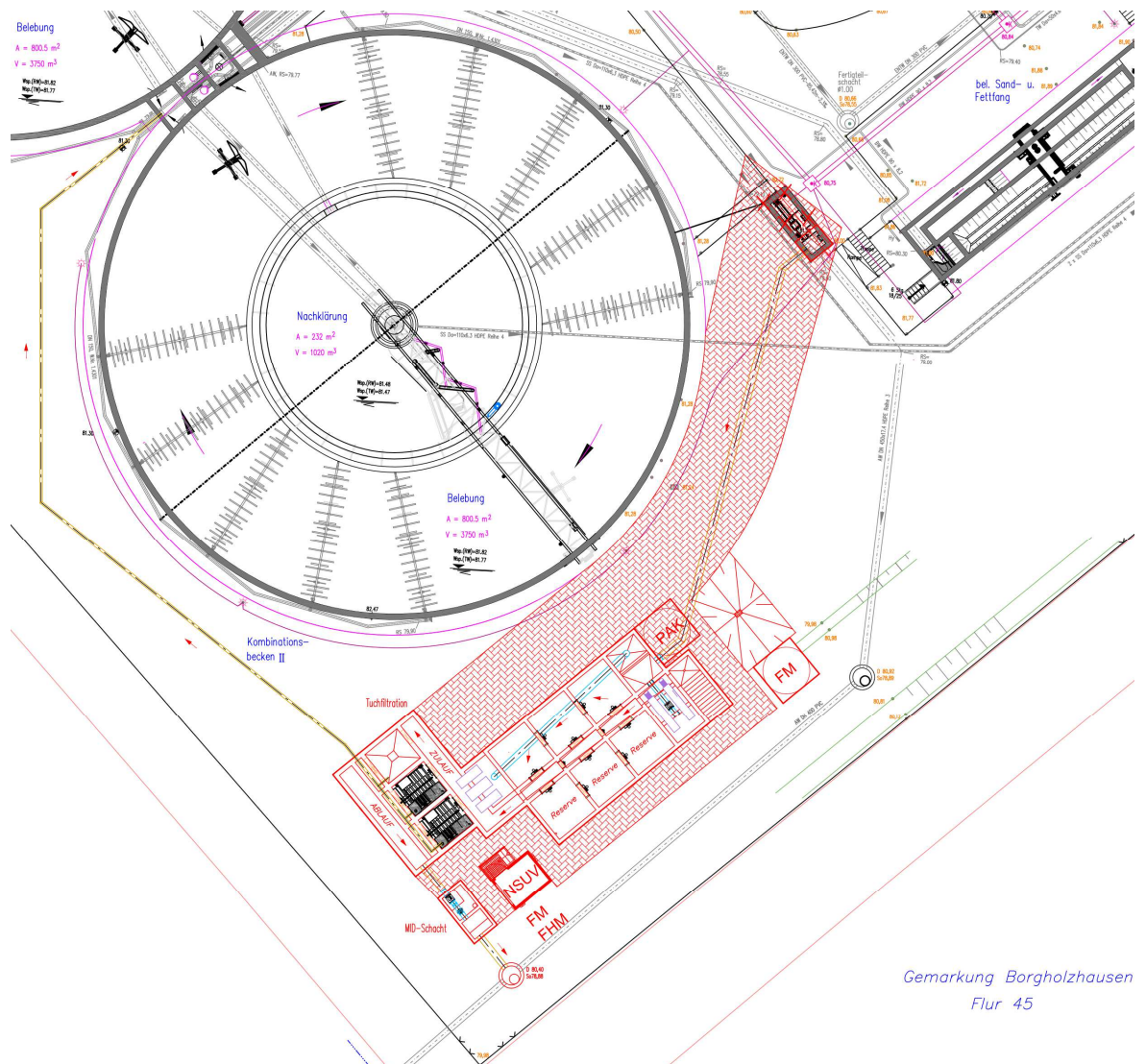


Abb. 5.2.2: Anordnung Bauwerke Variante 2a auf der ZKA Borgholzhausen

Die vorhandenen Verkehrswege werden für die Wartung und den Betrieb der Anlage sowie für die Belieferung mit PAK entsprechend erweitert.

Die PAK- Anlage verfügt über eine elektrische Anschlussleistung (einschl. Beschickungspumpen, Brauchwasserpumpen, RW-Hebewerk und Filtration) von rd. 45 kW. Für die elektrische Einbindung wird ein Leistungsabgang innerhalb der NSHV im Betriebsgebäude eingerichtet.

Die Niederspannungsschaltanlage (NSUV-PAK) zur Versorgung, und Steuerung der Anlagen wird innerhalb eines Schaltschrank-Containers errichtet.

Die Steuerung der Anlage erfolgt mit einer SPS. Es wird eine volumenproportionale Dosierung angestrebt. Sämtliche für einen sicheren und wirtschaftlichen Betrieb der Anlage erforderlichen Messungen werden eingeplant.

5.2.1.1 Kostenermittlung Variante 2a

Die Investitions- und Betriebskosten der beschriebenen Variante 2a werden auf der Grundlage aktueller Angebotspreise, vorliegender Preisanfragen bei Herstellern/Lieferanten oder Werten aus der aktuellen Fachliteratur ermittelt.

Investitionskosten:

Zur Bestimmung der erforderlichen Investitionskosten werden im Wesentlichen die Herstellungskosten der nachfolgend aufgeführten Komponenten berücksichtigt:

- Rückbau des vorh. MID-Schachtes, Umbau Nassbereich.
- Einbindung einer Rohrleitung mit Absperrarmatur in den vorhandenen MID-Schacht (Nassbereich).
- Neubau Schneckenpumpwerk aus Stahlbeton (PW-Kontaktbecken), einschl. 2 Stück Rohrschneckenpumpen und MID-Messung.
- Neubau Kontaktbecken (Dreier-Kaskade).

- Neubau PAK-/FM-/FHM-Station als Containeranlage, mit 10m³ FM-Lagerbehälter und Befüllplatz.
- Neubau Schneckenpumpwerk aus Stahlbeton (PW-Filtration), einschl. 3 Stück Rohrschneckenpumpen.
- Neubau 3 Stück Filterkammern einschl. Zu- und Ablaufrinnen aus Stahlbeton für die Aufstellung von 2 Stück Tuchfiltern.
- Neubau MID-Schacht zur Ablaufmengenmessung.
- Elektrische Schaltanlage der v.g. Anlage, als Containeranlage, einschl. Fundament sowie Herstellung der Spannungsversorgung (Abgang NSHV und Kabeltrasse zwischen NSHV - und NSUV PAK).
- Herstellen der erforderlichen verbindenden Rohrleitungen.
- Erstellung einer Verkehrsfläche für LKW-Verkehr.

Die Kostenermittlung für die Kostengruppen Bau, Maschinenteknik und Technische Ausrüstung erfolgt per EDV. Es ergeben sich folgende Herstellungskosten:

	EUR (netto)	EUR (brutto)
Bautechnik:	501.855,00	597.207,45
M.-Technik:	624.145,00	742.732,55
E-/MSR-Technik:	221.200,00	263.228,00
Baunebenkosten (Genehmigungen, Honorare, etc.):	276.500,00	329.035,00
Summe:	1.623.700,00	1.932.203,00

Tab. 5.2.1.1: Zusammenstellung der Herstellungskosten Variante 2a

Betriebskosten:

Die Betriebskosten beinhalten die wesentlichen Betriebsstoffe wie: Energie, PAK-Bedarf, Fäll- und Flockungshilfsmittel, etc., Wartungs- und Personalkosten, sowie die ggf. anfallenden Mehrkosten für die Schlammensorgung aufgrund einer erforderlichen thermischen Verwertung.

Die Kosten für den Bezug von elektrischer Energie sind auf der Grundlage der Jahresabrechnung 2016 abgeleitet worden.

Die angegebenen spezifischen Kosten für den Bezug von PAK sind der aktuellen Literatur entnommen.

Die Fällmittelkosten sind auf der Grundlage von Erfahrungswerten verschiedener Kläranlagen der gleichen Größenordnung ermittelt worden.

Kostengruppe	Kostenansätze (brutto)	Betriebskosten (brutto)
Energiebezug:	0,20 EUR/kWh	17.406 EUR/a
PAK-Bezug:	1.700,00 EUR/t	14.892 EUR/a
FeCl ₃ -Bezug:	150,0 EUR/t	1.904 EUR/a
FHM-Bezug		788 EUR/a
zusätzliche Entsorgungskosten Klärschlamm:	56,70 EUR/t (landw.) 100,00 EUR/t (therm.)	49.527 EUR/a
Wartung- / Instandhaltung:		
für Bautechnik:	1,0% der Baukosten	5.972 EUR/a
für M-Technik:	4,0% der Baukosten	29.709 EUR/a
für E-Technik:	2,0% der Baukosten	5.265 EUR/a
Personal	50.000 EUR/(P*a)	25.000 EUR/a
Summe:		150.463 EUR/a

Tab.:5.2.1.2: Zusammenstellung der Betriebskosten Variante 2a

Aufgrund der Beimischung der beladenen PAK ist der Klärschlamm zwingend einer thermischen Verwertung zuzuführen. Da der gesamte Klärschlamm gegenwärtig landwirtschaftlich verwertet wird entstehen hierdurch zusätzliche Kosten. Der durch die Zugabe von PAK, die Nachfällung und den Betrieb der Filtration bedingte zusätzliche Schlammanfall beträgt rd. 15 t/a.

Beim Betrieb einer Tuchfiltration fallen Ersatzteil-, Wartungs- und Reparaturkosten in Höhe von rd. 4,5% der Herstellungskosten an. Für den Ersatz der Filtertücher wird eine Standzeit von 4 Jahren angesetzt. Eine Intensivreinigung sollte jährlich erfolgen. Für die weiteren Herstellungskosten im Bereich M-Technik (PAK-Dosierung, Pumpen, etc.) fallen im Verhältnis weniger Wartungs- und Reparaturkosten an, so dass für die Summe ein Prozentsatz in Höhe von 4,0 % angesetzt werden kann.

Unabhängig von den Lösungsvarianten werden für den Betrieb einer weitergehenden Reinigungsstufe zur Elimination von Mikroschadstoffen spezielle Fachkenntnisse und gut ausgebildetes Personal vorausgesetzt. Insgesamt wird für die Variante 2a ein, gegenüber dem IST-Zustand, erhöhter Personalaufwand in Höhe von 0,5 Personen angesetzt.

Dynamische Kostenvergleichsrechnung nach KVR-Leitlinie

Zum Vergleich der einzelnen Lösungsvarianten wird eine dynamische Kostenvergleichsrechnung durchgeführt. Für die Ermittlung des Projektkostenbarwertes (PKBW) und der Jahreskosten werden ein einheitlicher Zinssatz von 3,0 % und unterschiedliche Preissteigerungen zwischen 0 und 3 % (siehe Tabelle Datenerhebung und Kostenermittlung, Quelle: Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe NRW) berücksichtigt.

Die Nutzungsdauern der einzelnen Kostengruppen betragen:

Bautechnik: 30 Jahre

M-Technik: 15 Jahre

E-Technik: 10 Jahre

Im betrachteten Nutzungszeitraum werden demnach für die M-Technik einmal und für die E-Technik zweimal Reinvestitionskosten berücksichtigt.

Für die Variante 2a beträgt der Projektkostenbarwert: **rd. 6,24 Mio. €.**

Die zugehörigen Jahreskosten werden ermittelt zu: **rd. 318.600 €/a**

Dies entspricht spezifischen Kosten pro m³ behandeltes Abwasser oder pro m³ Frischwasser in Höhe von: **0,36 €/m³** bzw. **0,90 €/€/m³.**

5.2.2 Variante 2b: PAK Adsorption in der Belebung mit Tuchfiltration

Die Dosierung von PAK direkt in die biologische Stufe stellt, hinsichtlich der Investitionskosten, ein relativ günstiges Verfahren dar, da auf der ZKA Borgholzhausen lediglich einer Filtration und eine Dosierstation für die Aktivkohle gebaut werden müssen. Die biologischen Prozesse und die simultane P-Elimination werden durch Aktivkohle im Belebungsbecken nicht beeinträchtigt [STOLL ET AL., 2015].

Die verfahrenstechnische Auslegung der Anlagen zur PAK Adsorption erfolgt auf der Grundlage der innerhalb von Kapitel 3 aufgeführten Bemessungsgrößen (Ablauf NKB) für den Vollstrom. Die Anlage zur PAK Adsorption der Lösungsvariante 2b besteht grundsätzlich aus folgenden Komponenten:

- PAK Lager und -Dosiereinrichtung
- Pumpwerk Filtration (Auslegung Q_M : 454 m³/h)
- Tuchfiltration mit FM/FHM-Station
- Ablaufmengenmessung

Die Dosierung der Kohle sollte an einer Stelle mit möglichst geringer DOC-Hintergrundbelastung erfolgen. Eine geeignete Stelle ist mit dem Ablaufschacht im Bereich des Mittelbauwerks gegeben. Hier werden die Abläufe aus den Belebungsbecken zusammengeführt und auf die Nachklärbecken verteilt. An dieser Stelle befindet sich außerdem die Fällmitteldosierstelle der P-Elimination (Simultanfällung). Das hier dosierte Fällmittel bewirkt zusätzlich eine Flockenbildung der PAK.

Das relativ geringe Beckenvolumen an der Dosierstelle ist für die Eliminationsleistung der PAK von untergeordneter Bedeutung, da der überwiegende Anteil der Spurenstoffe an die Kohle im Rücklaufschlamm adsorbiert wird [STOLL ET AL., 2015].

Die Sedimentation der PAK findet gemeinsam mit dem Belebtschlamm innerhalb der vorhandenen Nachklärbecken statt. Zusätzliche Anlagen zur Sedimentation sind nicht erforderlich. Analog zur Variante 2a wird die PAK kontinuierlich aus einem Silo über eine hoch präzise Dosiereinrichtung mit einem Treibwasserstrahl dosiert.

Die Anlage wird in einem Container in der Nähe des Mittelbauwerks aufgestellt.

Die Direktdosierung in die Biologie ist bei gleichem PAK-Einsatz weniger effizient als die Betriebsweise mit Kontaktbecken und PAK-Rückführung (siehe V2a). Es wird bei gleicher Eliminationsleistung etwa doppelt so viel PAK benötigt.

Um die geforderte 80%ige Elimination der Mikroschadstoffe zu gewährleisten, wird im Trockenwetterfall eine Dosiermenge von 11 – 18 mg PAK/L erforderlich. Da bei großtechnischen Versuchen keine markante Abnahme der Eliminationsleistung bei Regenwetter beobachtet werden konnte, gilt hier eine Dosiermenge von 19 mg PAK/L als ausreichend. Dieses ist nicht nur auf die Zugabe der Frischkohle, sondern vor allem auf die sich bereits im System befindende „Rücklaufkohle“ zurückzuführen [STOLL ET AL., 2015].

Aus Sicherheitsgründen wird für die betrachtete Variante eine mittlere Dosiermenge von 20 mgPAK/L angenommen. Die genaue Dosierung ist nach den örtlichen Bedingungen mittels Labortests noch festzulegen.

Aufgrund des berechneten PAK-Jahresbedarfs in Höhe von rd. 19 t/a. Wird für diese Verfahrensvariante ebenfalls kein PAK-Groß-Silo vorgesehen. Stattdessen werden, analog zu Variante 2a, mobile PAK-Lagerungsbehälter eingesetzt. Der verwendete Lagerbehälter ist 14-tägig zu wechseln. Es werden insgesamt 5 Behälter eingeplant, wobei sich zwei Behälter im Wechselmodus befinden. Somit ist, wie bei Variante 2a, eine Anlieferung in einem monatlichen Zyklus möglich.

Aufgrund der zukünftig geforderten hohen P-Eliminationsleistung und der im Ablauf der Nachklärung vorhandenen feindispersen PAK ist der gesamte Ablauf der Kläranlage über eine Filtration zu führen. Der Ablaufvolumenstrom aus den Nachklärbecken wird über eine neue Zulaufleitung DN400 zum Pumpwerk der Filtration geleitet.

Das Schneckenpumpwerk wird mit drei Rohrschneckenpumpen (Q_{P1} , Q_{P2} , Q_{P3} = jeweils $234 \text{ m}^3/\text{h}$) für einen redundanten Betrieb ausgelegt. Somit kann bei einem Betrieb von zwei Pumpen die erforderliche Spitzenwassermenge bei Regenwetter ($454 \text{ m}^3/\text{h}$) sicher gefördert werden. Die dritte Pumpe dient als Reserve. Der Betrieb der Pumpen ist zudem über Frequenzumformer vorgesehen, sodass eine gute Anpassung der Förderleistung an die tatsächlichen zu fördernden Abwasservolumenströme möglich ist.

Aufgrund der nachgewiesenen Eignung und Leistungsfähigkeit, des relativ geringen Platzbedarfs sowie der niedrigen Investitions- und Betriebskosten [ANDERS, 2016] wird die Filtration als Tuchfilteranlage geplant. Die Filtration wird für eine Feststoffkonzentration von 25 mg/l bei einer hydraulischen Belastung von 454 m³/h (Vollstrom) ausgelegt. Im Zulauf der Tuchfiltration erfolgt eine weitere Zugabe von Fäll- und ggf. auch Flockungshilfsmitteln. Die im Abwasser vorhandenen Fällungsprodukte und Suspensa werden durch die Filtration eliminiert und in die biologische Abwasserreinigung zurückgeführt. Der Abzug der Kohle aus dem System ist über den Überschussschlamm gewährleistet.

Als Fällmittel kommt Eisen(III)-Chlorid zum Einsatz. Die erforderliche Dosierrate wird aufgrund der erforderlichen Nachfällung zur P-Elimination ermittelt zu rd. 0,11 gFe/m³. Zur Elimination der feindispersen PAK wird aus Sicherheitsgründen eine Dosierung von 0,5 gFe/m³ angenommen. Unter Beachtung der Wirksubstanz von 0,138 kgFe/kgFM und einer Dichte von 1,42 t/m³ ergibt sich ein jährlicher Fällmittelbedarf von 3,4 t FM/a bzw. 2,4 m³FM/a. Die Lagerung erfolgt in Liefergebinden (IBC). Der zusätzlich benötigte Flockhilfsmittelbedarf ist marginal und wird im Rahmen der Studie vernachlässigt.

Die genannten Dosiermengen decken den Bedarf für eine weitestgehende P-Elimination ab, sodass diesbezüglich keine weiteren Betriebsstoffe nötig sind. Hinsichtlich der Lagerung, des Ansatzes und der Dosierung gelten die unter V2a gegebenen Erläuterungen.

Der durch die Zugabe von PAK, die Nachfällung und den Betrieb der Filtration bedingte zusätzliche Schlammanfall beträgt rd. 24 t/a.

Vor der Einleitung des gereinigten Abwasser in die vorhandenen Ablaufrohrleitung wird der Gesamtvolumenstrom über ein MID gemessen. Hinter dem MID wird eine Probenahmestelle (PN) eingerichtet.

Die vorhandenen Verkehrswege werden für die Wartung und den Betrieb der Anlage entsprechend erweitert.

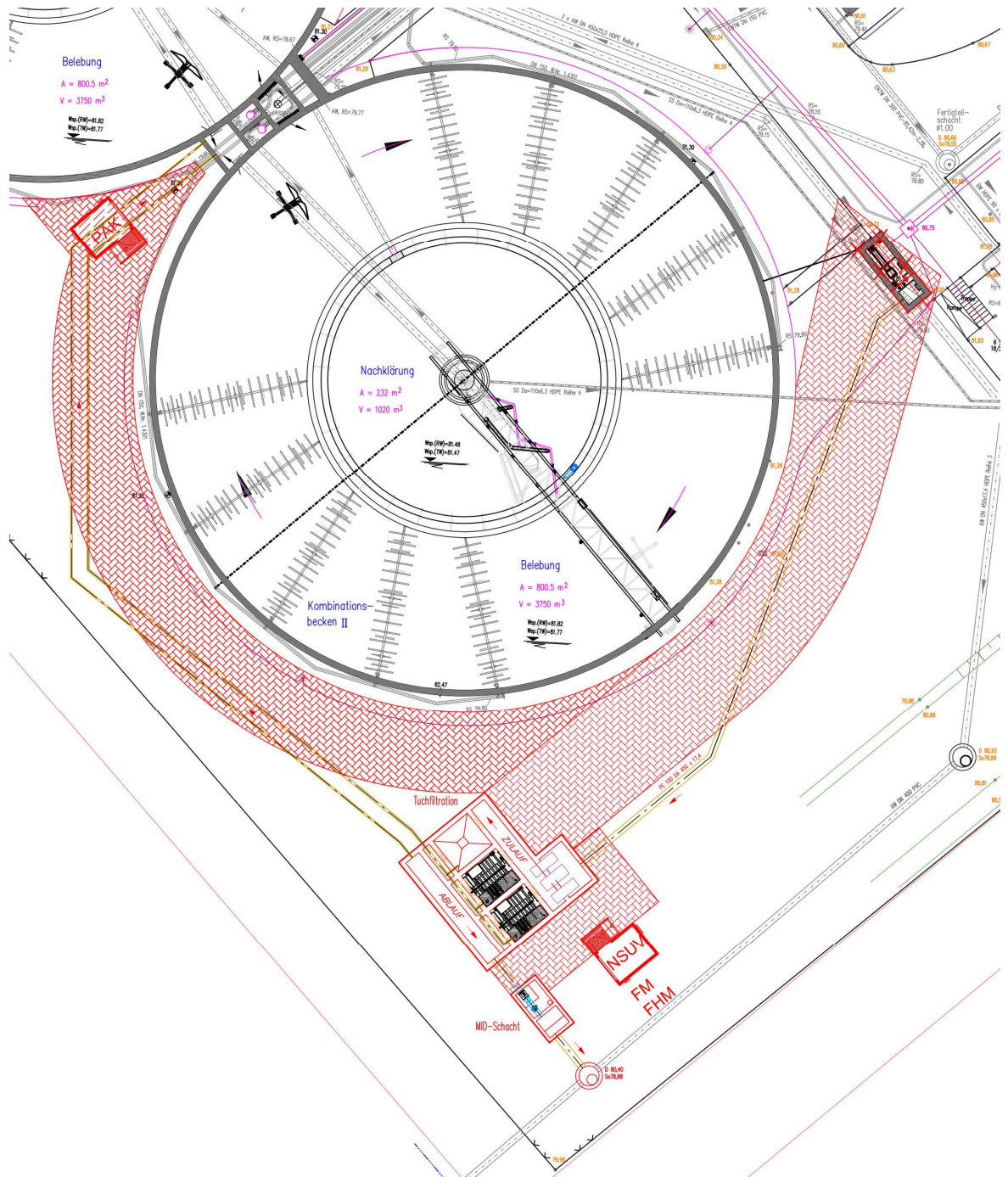


Abb. 5.2.3: Anordnung der Bauwerke Variante 2b auf der ZKA Borgholzhausen

Die PAK- Anlage verfügt über eine elektrische Anschlussleistung von rd. 15 kW. Die Anschlussleistung der NSUV Hebewerk und Filtration beträgt rd. 18 kW. Für die elektrische Einbindung wird ein Leistungsabgang innerhalb der NSHV im Betriebsgebäude eingerichtet.

Die Niederspannungsschaltanlage (NSUV-PAK) zur Versorgung, und Steuerung der Anlagen wird innerhalb eines Schaltschrank-Containers errichtet.

Die Steuerung der Anlage erfolgt mit einer SPS. Es wird eine volumenproportionale Dosierung angestrebt. Zusätzlich kann auch eine Dosierung in Abhängigkeit der NH_4 -Konzentration im Zulauf zielführend sein, da zumindest sich die Diclofenac- und Sulfamethoxazolfracht im Zulauf von Kläranlagen, aufgrund einer nachgewiesenen gute Korrelation, näherungsweise mit den gemessenen Ammoniumfrachten prognostizieren lassen [STOLL ET AL., 2015].

Sämtliche für einen sicheren und wirtschaftlichen Betrieb der Anlage erforderlichen Messungen werden eingeplant.

5.2.2.1 Kostenermittlung Variante 2b

Die Investitions- und Betriebskosten der beschriebenen Variante 2b werden auf der Grundlage aktueller Angebotspreise, vorliegender Preisanfragen bei Herstellern/Lieferanten oder Werten aus der aktuellen Fachliteratur ermittelt.

Investitionskosten:

Zur Bestimmung der erforderlichen Investitionskosten werden im Wesentlichen die Herstellungskosten der nachfolgend aufgeführten Komponenten berücksichtigt:

- Neubau eines PAK-Silos einschl. Dosiereinrichtungen und Fundament aus Stahlbeton.
- Elektrische Schaltanlage der PAK-Anlage, als Containeranlage, einschl. Fundament sowie Herstellung der Spannungsversorgung (Abgang NSHV und Kabeltrasse zwischen NSHV - und NSUV PAK).
- Einbindung einer Rohrleitung mit Absperrarmatur in den MID-Schacht.
- Neubau eines Schneckenpumpwerks aus Stahlbeton, einschl. 2 Stück Rohrschneckenpumpen.
- Neubau von 3 Stück Filterkammern einschl. Zu- und Ablaufrinnen aus Stahlbeton für die Aufstellung von 2 Stück Tuchfiltern.

- Elektrische Schaltanlage der Filteranlage, als Containeranlage, einschl. Fundament sowie Herstellung der Spannungsversorgung (Abgang NSHV und Kabeltrasse zwischen NSHV - und NSUV Filtration).
- Herstellen der erforderlichen verbindenden Rohrleitungen.
- Erstellung einer Verkehrsfläche für LKW-Verkehr.
- Anpassung bzw. Erweiterung des PLS der Kläranlage.

Die Kostenermittlung für die Kostengruppen Bau, Maschinenteknik und Technische Ausrüstung erfolgt per EDV. Es ergeben sich folgende Herstellungskosten:

	EUR (netto)	EUR (brutto)
Bautechnik:	341.210,00	406.039,91
M.-Technik:	496.790,00	591.180,10
E-/MSR-Technik:	182.000,00	216.580,00
Baunebenkosten (Genehmigungen, Honorare, etc.):	226.500,00	269.535,00
Summe:	1.246.500,00	1.483.335,01

Tab. 5.2.2.1: Zusammenstellung der Herstellungskosten Variante 2b

Weitere Details sind den Anlagen zu entnehmen.

Betriebskosten:

Die Betriebskosten beinhalten die wesentlichen Betriebsstoffe wie: Energie, PAK-Bedarf, etc., Wartung- und Personalkosten, sowie die ggf. anfallenden Mehrkosten für die Schlamm Entsorgung aufgrund einer erforderlichen thermischen Verwertung.

Hinsichtlich der Kostenansätze gelten die Angaben aus Variante 2a.

Kostengruppe	Kostenansätze (brutto)	Betriebskosten (brutto)
Energiebezug:	0,20 EUR/kWh	17.069 EUR/a
PAK-Bezug:	1.700,00 EUR/t	32.266 EUR/a
FeCl ₃ -Bezug:	150,0 EUR/t	516 EUR/a
zusätzliche Entsorgungskosten Klärschlamm:	100,00 EUR/t (therm.)	50.410 EUR/a
Wartung- / Instandhaltung:		
für Bautechnik:	1,0% der Baukosten	4.060 EUR/a
für M-Technik:	4,0% der Baukosten	23.647 EUR/a
für E-Technik:	2,0% der Baukosten	4.332 EUR/a
Personal	50.000 EUR/(P*a)	12.500 EUR/a
Summe:		144.800 EUR/a

Tab. 5.2.2.2: Zusammenstellung der Betriebskosten Variante 2b

Dynamische Kostenvergleichsrechnung nach KVR-Leitlinie

Zum Vergleich der einzelnen Lösungsvarianten wird eine dynamische Kostenvergleichsrechnung durchgeführt. Für die Ermittlung des Projektkostenbarwertes (PKBW) und der Jahreskosten werden ein einheitlicher Zinssatz von 3,0 % und unterschiedliche Preissteigerungen zwischen 0 und 3 % (siehe Tabelle Datenerhebung und Kostenermittlung, Quelle: Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe NRW) berücksichtigt.

Die Nutzungsdauern der einzelnen Kostengruppen betragen:

Bautechnik: 30 Jahre

M-Technik: 15 Jahre

E-Technik: 10 Jahre

Im betrachteten Nutzungszeitraum werden demnach für die M-Technik einmal und für die E-Technik zweimal Reinvestitionskosten berücksichtigt.

Für die Variante 2b beträgt der Projektkostenbarwert: **rd. 5,52 Mio. €.**

Die zugehörigen Jahreskosten werden ermittelt zu: **rd. 281.760 €/a.**

Dies entspricht spezifischen Kosten pro m³ behandeltes Abwasser oder pro m³ Frischwasser in Höhe von: **0,30 €/m³** bzw. **0,80 €/m³**.

Für den Kostenvergleich wird die in Aussicht gestellte Förderung in Höhe von 70% der Investitionskosten zunächst nicht berücksichtigt.

5.3 Variante 3: GAK-Filtration

Als dritte und letzte Verfahrensvariante wird eine GAK-Filtration im Vollstrom unter Verwendung offener Einschicht-Festbettfilter (siehe Variante 1b) untersucht. Die verfahrenstechnische Auslegung erfolgt auf der Grundlage der innerhalb von Kapitel 3 aufgeführten Bemessungsgrößen für den Vollstrom.

Die Anlage zur GAK Adsorption der Lösungsvariante 3 besteht grundsätzlich aus folgenden Komponenten:

- Schneckenpumpwerk (Auslegung $Q_{\text{Bem.}}$: $454 \text{ m}^3/\text{h} = 126 \text{ l/s}$),
- Filtration in 16 offenen Einschichtfiltern.

Der Aufbau der Anlage entspricht im Wesentlichen der in der Lösungsvariante 1b beschriebenen Raumfiltration. Details können dem Abschnitt 5.1.2 entnommen werden.

Unter Berücksichtigung der im Ablauf der Nachklärung vorhandenen organischen Hintergrundbelastung wird für die Ermittlung der Standzeit der granulierten Aktivkohle ein Bettvolumen (BV) von 10.000 angesetzt. Hieraus ergibt sich eine rechnerische Standzeit der Kohle von rd. 862 Tagen. Es wird ein mittlerer Jahresverbrauch von rd. 28,5 t GAK/a angesetzt. Für die Erstbefüllung der Filterzellen werden, ca. 67 t GAK benötigt.

Eine Zusammenstellung der verfahrenstechnischen Grobauslegung ist den Anlagen zu entnehmen.

Abbildung 5.3.1 zeigt die Anordnung der Anlagenkomponenten einer GAK-Filtration im Vollstrom auf dem Gelände der ZKA Borgholzhausen.

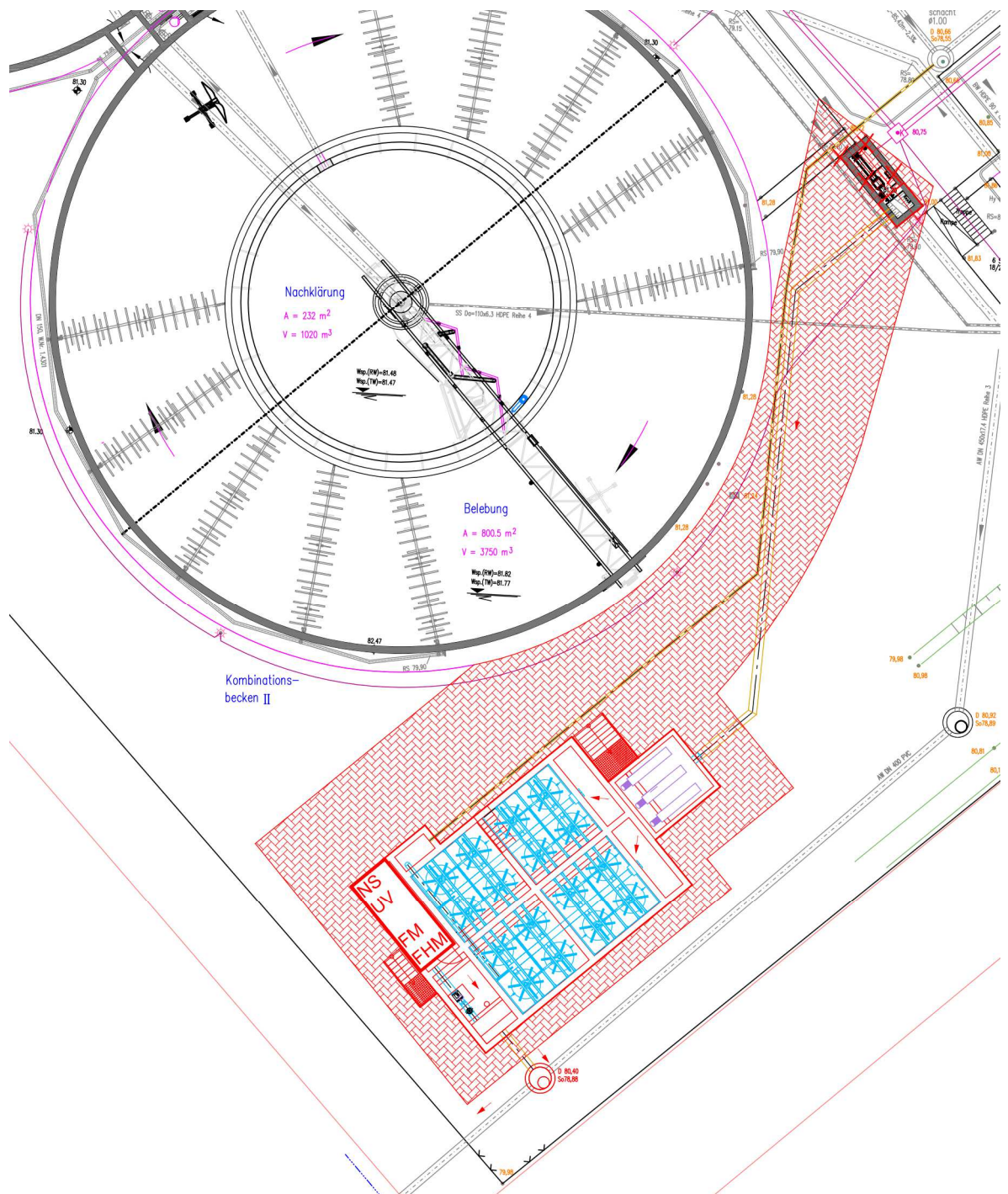


Abb. 5.3.1: Anordnung der Variante 3 auf der ZKA Borgholzhausen

Die vorhandenen Verkehrswege werden für die Wartung und den Betrieb der Anlagen entsprechend erweitert.

Die GAK- Anlage verfügt über eine elektrische Anschlussleistung (einschl. Hebewerk und Filtration) von rd. 25 kW. Für die elektrische Einbindung wird ein Leistungsabgang innerhalb der NSHV im Betriebsgebäude eingerichtet.

Die Niederspannungsschaltanlage (NSUV-GAK) zur Versorgung, und Steuerung der Anlagen wird innerhalb eines Containers errichtet.

Die Steuerung der Anlage erfolgt mit einer SPS. Es wird eine niveauabhängige Steuerung für eine automatische Filtrerrückspülung angestrebt. Sämtliche für einen sicheren und wirtschaftlichen Betrieb der Anlage erforderlichen Messungen werden eingeplant.

5.3.1 Kostenermittlung Variante 3

Die Investitions- und Betriebskosten der beschriebenen Variante 3 werden auf der Grundlage aktueller Angebotspreise, vorliegender Preisanfragen bei Herstellern/Lieferanten oder Werten aus der aktuellen Fachliteratur ermittelt.

Investitionskosten:

Zur Bestimmung der erforderlichen Investitionskosten werden im Wesentlichen die Herstellungskosten der nachfolgend aufgeführten Komponenten berücksichtigt:

- Einbindung einer Rohrleitung mit Absperrarmatur in den MID-Schacht.
- Neubau eines Schneckenpumpwerks aus Stahlbeton, einschl. 3 Stück Rohrschneckenpumpen.
- Neubau Raumfiltrationsbecken aus Stahlbeton einschl. Zu- und Ablaufrinnen aus Stahlbeton für die Aufstellung einer GAK-Filtrationsanlage mit integrierter MID-Messung.
- Erstbefüllung der Filtermodule mit GAK.
- Neubau Maschinencontainer für die Aufnahme der elektrischen Schaltanlage sowie diverser Aggregate für den Betrieb der Filtration.

- Elektrische Schaltanlage der v.g. Anlage, sowie Herstellung der Spannungsversorgung (Abgang NSHV und Kabeltrasse zwischen NSHV - und NSUV-GAK).
- Herstellen der erforderlichen verbindenden Rohrleitungen.
- Erstellung einer Verkehrsfläche für LKW-Verkehr.
- Anpassung bzw. Erweiterung des PLS der Kläranlage.

Die Kostenermittlung für die Kostengruppen Bau, Maschinentechnik und Technische Ausrüstung erfolgt per EDV. Es ergeben sich folgende Herstellungskosten:

	EUR (netto)	EUR (brutto)
Bautechnik:	1.086.714,40	1.293.190,13
M.-Technik:	277.850,00	330.641,50
E-/MSR-Technik:	212.000,00	252.280,00
Baunebenkosten (Genehmigungen, Honorare, etc.):	304.500,00	362.355,00
Summe:	1.881.064,40	2.238.466,63

Tab. 5.3.1: Zusammenstellung der Herstellungskosten Variante 3

Weitere Details sind den Anlagen zu entnehmen.

Betriebskosten:

Die Betriebskosten beinhalten die wesentlichen Betriebsstoffe wie: Energie, GAK-Bedarf, etc. sowie Wartung- und Personalkosten. Darüber hinaus werden die zu erwartenden Einsparungen durch eine ggf. erzielte Verbesserung der Wasserqualität berücksichtigt.

Die Kosten für den Bezug von elektrischer Energie sind auf der Grundlage der Jahresabrechnung 2016 der Kläranlage abgeleitet worden.

Die angegebenen spezifischen Kosten für den Bezug von GAK sind der aktuellen Literatur entnommen.

Kostengruppe	Kostenansätze (brutto)	Betriebskosten (brutto)
Energiebezug:	0,20 EUR/kWh	1.933 EUR/a
GAK-Bezug:	1.700,00 EUR/t	48.399 EUR/a
FeCl ₃ (15%)-Bezug:	150,0 EUR/t	128 EUR/a
zusätzliche Entsorgungskosten Klärschlamm:	56,70 EUR/t (landw.)	269 EUR/a
Wartung- / Instandhaltung:		
für Bautechnik:	1,0% der Baukosten	12.932 EUR/a
für M-Technik:	3,0% der Baukosten	9.919 EUR/a
für E-Technik:	2,0% der Baukosten	5.046 EUR/a
Personal	50.000 EUR/(P*a)	12.500 EUR/a
Summe:		91.126 EUR/a

Tab. 5.3.2: Zusammenstellung der Betriebskosten Variante 3

Für den Betrieb einer Festbettfiltration werden Ersatzteil-, Wartungs- und Reparaturkosten in Höhe von rd. 4,0% der Herstellungskosten angesetzt.

Unabhängig von den Lösungsvarianten werden für den Betrieb einer weitergehenden Reinigungsstufe zur Elimination von Mikroschadstoffen spezielle Fachkenntnisse und gut ausgebildetes Personal vorausgesetzt. Insgesamt wird für die Variante 3 ein, gegenüber dem IST-Zustand, erhöhter Personalaufwand in Höhe von 0,25 Personen angesetzt.

Dynamische Kostenvergleichsrechnung nach KVR-Leitlinie

Zum Vergleich der einzelnen Lösungsvarianten wird eine dynamische Kostenvergleichsrechnung durchgeführt. Für die Ermittlung des Projektkostenbarwertes (PKBW) und der Jahreskosten werden ein einheitlicher Zinssatz von 3,0 % und unterschiedliche Preissteigerungen zwischen 0 und 3 % (siehe Tabelle Datenerhebung und Kostenermittlung, Quelle: Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe NRW) berücksichtigt.

Die Nutzungsdauern der einzelnen Kostengruppen betragen:

Bautechnik:	30 Jahre
M-Technik:	15 Jahre
E-Technik:	10 Jahre

Im betrachteten Nutzungszeitraum werden demnach für die M-Technik einmal und für die E-Technik zweimal Reinvestitionskosten berücksichtigt.

Für die Variante 3 beträgt der Projektkostenbarwert: **rd. 4,83 Mio. €.**

Die zugehörigen Jahreskosten werden ermittelt zu: **rd. 246.430 €/a.**

Dies entspricht spezifischen Kosten pro m³ behandeltes Abwasser oder pro m³ Frischwasser in Höhe von: **0,26 €/m³** bzw. **0,70 €/m³**.

Für den Kostenvergleich wird die in Aussicht gestellte Förderung in Höhe von 70% der Investitionskosten zunächst nicht berücksichtigt.

Übersicht der Lösungsvarianten (Kostenkennzahlen ohne Berücksichtigung einer Förderung)

	Variante 1a: Ozonung	Variante 1b: Ozonung + BAK	Variante 2a: PAK
Anlagen-Kurzbeschreibung	<p>Behandlung: Teilstrom (93% JAM) $Q_{\text{Bem}} = 144 \text{ m}^3/\text{h}$</p> <p>Ozonerzeuger: $2 \times 0,5 \text{ kg O}_3/\text{h}$</p> <p>Reaktionsbehälter: 2 Straßen $V_1=V_2 = 64 \text{ m}^3$ $t_{\text{ges}} = 25 \text{ Minuten}$ (2. Straße als Reserve)</p> <p>Ozoneintragssystem: Diffusoren</p> <p>biol. Nachbehandlung: Wirbelbettreaktor</p> <p>Tuchfiltration: 2 Straßen $A_{\text{F,ges}} = 60\text{m}^2$ $Q_{\text{zul.}} = 500 \text{ m}^3/\text{h}$</p>	<p>Behandlung: Vollstrom (100% JAM) $Q_{\text{Bem}} = 454 \text{ m}^3/\text{h}$</p> <p>Ozonerzeuger: $2 \times 0,6 \text{ kg O}_3/\text{h}$</p> <p>Reaktionsbehälter: 2 Straßen $V_{\text{ges}} = 200 \text{ m}^3$ $t_{\text{ges}} = 25 \text{ Minuten}$</p> <p>Ozoneintragssystem: Diffusoren</p> <p>biol. Nachbehandlung: 16 GAK-Filtermodule 2 Filterzellen $A_{\text{F,ges}} = 80\text{m}^2$ $Q_{\text{zul.}} = 500 \text{ m}^3/\text{h}$</p>	<p>Behandlung: Teilstrom (93% JAM) $Q_{\text{Bem}} = 144 \text{ m}^3/\text{h}$</p> <p>PAK Dosieranlage: volumetrisch & gravimetrisch</p> <p>PAK Silo: $V_{\text{Nutz}} = 3 \times 1,5 \text{ m}^3$</p> <p>Kontaktbecken: 2 Straßen $V_{\text{ges}} = 160 \text{ m}^3$ (3 Kaskaden) $t_{\text{ges}} = 30 \text{ Minuten}$ (2. Straße als Reserve)</p> <p>Tuchfiltration: 2 Straßen $A_{\text{F,ges}} = 60\text{m}^2$ $Q_{\text{zul.}} = 500 \text{ m}^3/\text{h}$</p>
Vorteile:	<p>gute MS-Eliminationsleistungen (ausser RKM)</p> <p>geringer Betreuungsaufwand bei externer Wartung</p> <p>sehr guter Suspensarückhalt durch Filtration</p> <p>Reduzierung der Parameter CSB und P_{ges} unterhalb des Schwellenwerts nach AbwAG</p> <p>keine zusätzlichen Schlammentsorgungskosten</p>	<p>wie Variante 1a, zusätzlich:</p> <p>Vollstrombehandlung => durchgängige MS-Elimination</p> <p>Betrieb mit niedriger O_3-Konzentration (ca. 2,0 mg/L)</p> <p>geringerer O_2-Bedarf gegenüber V1a</p> <p>geringerer Energiebedarf gegenüber V1a</p> <p>sehr geringer jährlicher GAK-Bedarf im Vergleich zu V3</p>	<p>sehr gute MS-Eliminationsleistungen</p> <p>sehr guter Suspensarückhalt durch Filtration</p> <p>Reduzierung der Parameter CSB und P_{ges} unterhalb des Schwellenwerts nach AbwAG</p> <p>gute Ausnutzung der Adsorptionskapazität der Kohle durch Mehrfachbeladung</p>
Nachteile:	<p>Schadstoffe werden nicht entnommen, es entstehen Reaktionsprodukte, deren Wirkung auf die Umwelt nicht erschöpfend erforscht ist => biolog. Nachbehandlung erf.</p> <p>externe Wartung erforderlich => hohe Wartungskosten</p> <p>hohe Arbeitsschutzanforderungen, da Ozon toxisch ist</p> <p>hoher Energiebedarf durch O_3-Produktion</p> <p>hohe Wartungskosten durch hohen Technikanteil und Wechseln der Filtrationstücher</p>	<p>externe Wartung erforderlich und Betrieb von 2 Anlagen zur MS-Elimination => hohe Wartungskosten</p> <p>hohe Arbeitsschutzanforderungen, da Ozon toxisch ist</p> <p>hoher baulicher Aufwand => hohe Investitionskosten</p> <p>Bezug von O_2 und GAK notwendig</p>	<p>hoher Betreuungsaufwand und Energiebedarf aufgrund PAK-Dosierung</p> <p>erhöhte Abrasion durch PAK im Bereich der Schlamm-entwässerung</p> <p>zusätzliche Entsorgungskosten aufgrund einer erf. thermischen Klärschlammverwertung</p> <p>hohe Wartungskosten durch hohen Technikanteil und Wechseln der Filtrationstücher</p>
Kostenkennwerte (brutto)	<p>Investitionskosten: 2.359.311 EUR</p> <p>Betriebskosten: 101.536 EUR/a</p> <p>Projektkostenbarwert: 5.787.510 EUR</p> <p>Jahreskosten: 295.270 EUR/a</p>	<p>Investitionskosten: 3.105.661 EUR</p> <p>Betriebskosten: 105.299 EUR/a</p> <p>Projektkostenbarwert: 6.534.230 EUR</p> <p>Jahreskosten: 333.370 EUR/a</p>	<p>Investitionskosten: 1.932.203 EUR</p> <p>Betriebskosten: 150.463 EUR/a</p> <p>Projektkostenbarwert: 6.244.780 EUR</p> <p>Jahreskosten: 318.600 EUR/a</p>

	Variante 2b: PAK	Variante 3: GAK-Filtration	
Anlagen-Kurzbeschreibung	<p>Behandlung: Vollstrom (100% JAM) $Q_{Bem} = 454 \text{ m}^3/\text{h}$</p> <p>PAK Dosieranlage: volumetrisch & gravimetrisch</p> <p>PAK Silo: $V_{Nutz} = 5 \times 1,5 \text{ m}^3$</p> <p>Tuchfiltration: 2 Straßen $A_{F,ges} = 60 \text{ m}^2$ $Q_{zul.} = 500 \text{ m}^3/\text{h}$</p>	<p>Behandlung: Vollstrom (100% JAM) $Q_{Bem} = 454 \text{ m}^3/\text{h}$</p> <p>Filtration: 2 Filterzellen $A_F = 5 \text{ m}^2, A_{Fges} = 80 \text{ m}^2$ mit jeweils 8 Modulen $V_F = 14 \text{ m}^3, V_{Fges} = 224 \text{ m}^3$ $Q_{zul.} = 500 \text{ m}^3/\text{h}$</p> <p>Spülwasserspeicher: $V = 50 \text{ m}^3$</p> <p>Spülabwasserspeicher: $V = 12 \text{ m}^3$</p>	
Vorteile:	<p>Vollstrombehandlung => durchgängige, sehr gute MS-Eliminationsleistungen sehr guter Suspensarrückhalt durch Filtration</p> <p>Reduzierung der Parameter CSB und P_{ges} unterhalb des Schwellenwerts nach AbwAG</p> <p>geringer baulicher Aufwand (kein Kontaktbecken erf.)</p>	<p>Vollstrombehandlung => durchgängige, sehr gute MS-Eliminationsleistungen sehr guter Suspensarrückhalt durch Filtration</p> <p>einfacher Betrieb mit konventioneller Technik</p> <p>geringer Personalbedarf, geringer Energiebedarf, geringer Wartungsbedarf => geringe Betriebskosten</p>	
Nachteile:	<p>wie Variante 2a, zusätzlich:</p> <p>höhere organische Hintergrundbelastung => höherer PAK-Bedarf</p>	<p>hoher baulicher Aufwand, jedoch geringer als bei V1b</p> <p>höherer GAK-Bedarf gegenüber V1b</p>	
Kostenkennwerte (brutto)	<p>Investitionskosten: 1.483.335 EUR</p> <p>Betriebskosten 144.800 EUR/a</p> <p>Projektkostenbarwert: 5.522.570 EUR</p> <p>Jahreskosten: 281.760 EUR/a</p>	<p>Investitionskosten: 2.238.466 EUR</p> <p>Betriebskosten 91.126 EUR/a</p> <p>Projektkostenbarwert: 4.830.210 EUR</p> <p>Jahreskosten: 246.430 EUR/a</p>	

6 Verfahrensempfehlung

Ein direkter Vergleich der Kostenkennwerte der einzelnen Lösungsvarianten zeigt bereits einen deutlichen Vorteil für die Variante 3 (GAK-Filtration). Auf dem zweiten Rang liegt die Variante 2b, wobei die Differenz zwischen V2b und V1a relativ gering ist.

Für die weitere Bewertung der Lösungen werden zunächst die Auswirkungen von Fördermitteln bei den Investitionskosten auf die Projektkostenbarwerte und Jahreskosten untersucht. Die Höhe der Förderung beträgt 70 % der Herstellungskosten. Die Reinvestitionskosten sowie die Betriebskosten bleiben hiervon unberührt.

In der nachfolgenden Tabelle sind die hierdurch veränderten Kostenkennwerte der einzelnen Varianten dargestellt. Alle Preisangaben in EUR inkl. 19% MwSt.

Variante 1a	Variante 1b	Variante 2a	Variante 2b	Variante 3
Ozonierung, simultane Absorption	Ozonierung, separate Absorption	PAK- Dosierung in Kontaktbecken	PAK- Dosierung in die Belebung	GAK-Filtration
<i>Erstinvestition:</i>	<i>Erstinvestition:</i>	<i>Erstinvestition:</i>	<i>Erstinvestition:</i>	<i>Erstinvestition:</i>
707.793,34	931.698,38	579.660,90	445.000,50	671.539,99
<i>PKB:</i>	<i>PKB:</i>	<i>PKB:</i>	<i>PKB:</i>	<i>PKB:</i>
4.135.990,00	4.360.260,00	4.892.240,00	4.484.230,00	3.263.290,00
<i>Jahreskosten:</i>	<i>Jahreskosten:</i>	<i>Jahreskosten:</i>	<i>Jahreskosten:</i>	<i>Jahreskosten:</i>
211.020,00	222.460,00	249.600,00	228.780,00	166.490,00
127%	134%	150%	137%	100%

Tab. 7.1: Zusammenstellung der Kostenkennwerte bei Berücksichtigung einer Förderung

Auch unter Berücksichtigung der Förderung bleibt die Variante 3 (GAK-Filtration) auf Rang 1. Auf den Rängen 2 bis 4 ergibt sich eine Rangverschiebung. Auf dem 2. Rang liegt nun die Lösungsvariante 1a (Ozonierung), wohingegen die Variante 2b (PAK-Dosierung in das Belebungsbecken) auf Rang 4 abrutscht. Rang 3 wird von der Lösungsvariante 1b (Ozonierung + BAK) belegt. Die Verschiebungen sind auf die relativ niedrigen und hohen Investitionskosten der Lösungsvarianten 2b bzw. 1b zurückzuführen.

Bei Betrachtung der Kostenkennwerte wird deutlich, dass sich bei einer rein monetären Bewertung der verschiedenen Verfahren die Tendenz hin zu einer Lösung mit einer GAK-Filtration verdichten. Im Rahmen einer umfassenden Verfahrensbewertung werden neben den monetären Aspekten auch nicht monetäre Bewertungskriterien berücksichtigt. Insgesamt finden folgende Kriterien Berücksichtigung:

- Betriebssicherheit,
- Erprobungsgrad der Technik (wie viele großtechnisch realisierte Anlagen mit dieser Technologie gibt es) / Referenzanlagen,
- Reinigungsleistung der unterschiedlichen Verfahren,
- Betriebs- und Wartungsaufwand,
- Erstinvestitionskosten,
- Jahreskosten.

Die einzelnen Bewertungskriterien werden in Abstimmung mit dem Auftraggeber wie folgt gewichtet und bewertet:

Kriterium	Wichtung	Bewertung der Lösungsvarianten									
		Variante 1a		Variante 1b		Variante 2a		Variante 2b		Variante 3	
		Punkte	Wertigkeit	Punkte	Wertigkeit	Punkte	Wertigkeit	Punkte	Wertigkeit	Punkte	Wertigkeit
Betriebssicherheit	0,10	3	0,3	5	0,5	4	0,4	4	0,4	5	0,5
Erprobungsgrad	0,10	5	0,5	4	0,4	5	0,5	3	0,3	5	0,5
Reinigungsleistung	0,15	5	0,8	4	0,6	4	0,6	5	0,8	5	0,8
Betriebs- und Wartungsaufwand	0,25	3	0,8	3,5	0,9	3	0,8	4,5	1,1	5	1,3
Erstinvestitionen	0,10	2	0,2	1	0,1	4	0,4	5	0,5	3	0,3
Jahreskosten	0,30	4	1,2	3	0,9	1	0,3	2	0,6	5	1,5
Summe:	1,00	22,00	3,70	20,50	3,38	21,00	2,95	23,50	3,68	28,00	4,80

Tab. 7.3: Wichtung und Wertung nach Punkten (1 = ungenügend, 5 = sehr gut)

Betriebssicherheit:

Eine Anlage ist betriebssicher, wenn im Fall des Versagens einzelner Aggregate, Messungen oder der Anlagensteuerung dennoch die Reinigungsziele erreicht werden und Betriebsstörungen einfach und schnell beseitigt werden können. Dieses ist z.B. der Fall, wenn Anlagenteile oder Aggregate redundant ausgeführt sind oder Ersatzaggregate und Ersatzstrategien bereitstehen. Die Auswirkungen auf weitere Anlagenteile werden in die Beurteilung einbezogen.

Bei allen Lösungsvarianten ist der Betrieb eines Hebewerks erforderlich. Das Hebewerk ist in allen Varianten redundant ausgeführt. Daher sind in diesem Punkt alle Varianten gleich zu bewerten.

Bei der Ozonierung führt ein Ausfall der Ozonerzeugung zu einem Ausfall der Spurenstoffelimination. Bei der Variante 1b ist der Ozonreaktor im Gegensatz zu Variante 1a für einen zweistraßigen Betrieb ausgerüstet. Ferner steht für eine MS-Elimination neben der Ozonierung zusätzlich noch die GAK-Filtration zur Verfügung. Somit wird die Betriebssicherheit der Variante 1b gegenüber der Variante 1a deutlich besser bewertet.

Die Varianten der PAK-Dosierung werden hinsichtlich der Betriebssicherheit etwas geringer, jedoch immer noch als "gut" eingestuft. Diese Bewertung erfolgt aufgrund des höheren technischen Aufwands bezüglich der PAK-Dosierung, der Fällung und Flockung sowie der Rückführung der Kohle in die Belebung. Hier sind gegenüber den anderen Verfahren deutlich mehr Ausfallrisiken vorhanden. Eine Spurenstoffelimination ist bei diesem Verfahren jedoch auch bei einem temporären Ausfall der PAK-Dosierung gegeben, da die Kohle im Gesamtsystem verteilt ist. Daher kann insgesamt eine gute Betriebssicherheit erreicht werden.

Die GAK-Filtration wird mit einer sehr hohen Betriebssicherheit bewertet. Der Betrieb der Filtration erfolgt aufwärtsdurchströmt. Die Spülpumpen sind ebenfalls redundant ausgeführt.

Erprobungsgrad:

Der Erprobungsgrad der einzelnen Verfahrensvarianten ist unterschiedlich zu bewerten.

Die Lösung nach Variante 1a, Ozonierung ist auf mehreren Kläranlagen in NRW im Betrieb. Das Verfahren gilt als erprobt und wird daher mit "sehr gut" bewertet.

Die Lösung nach Variante 1b, Ozonierung und nachgeschaltete BAK-Filtration stellt eine Kombination der Lösungen nach V1a und V3 dar. Die einzelnen Verfahren gelten als "sehr gut" erprobt. In Kombination sind die beiden Verfahren, abgesehen von Pilotanlagen, bislang nicht großtechnisch im Einsatz. Daher wird diese Lösung lediglich mit "gut" bewertet.

Für die Lösung PAK-Dosierung in Kontaktbecken nach Variante 2a liegen gegenwärtig bereits sehr gute Betriebserfahrungen vor. Anders verhält es sich bei der Lösung nach Variante 2b (Dosierung in die Belebung). Hier liegen nur wenige gesicherten Erfahrungen vor. Dieses könnte sich negativ auf die getroffene Annahme des PAK-Bedarfs auswirken. Mit einer Erhöhung der Betriebskosten durch höheren PAK-Bezug ist zu rechnen. Die Variante 2b erhält daher eine "befriedigende" Bewertung hinsichtlich des Erprobungsgrades.

Für die Lösung mit GAK-Filtration (Variante 3) liegen Erfahrungen aus dem Betrieb mehrerer Anlagen in NRW vor. Ferner sind hier im Vorfeld eine große Anzahl großtechnischer Versuche "gefahren" worden. Das Verfahren gilt als erprobt und wird daher ebenfalls mit "sehr gut" bewertet.

Reinigungsleistung:

Hinsichtlich der Reinigungsleistung wird eine Bewertung der Mikroschadstoff (MS)-Eliminationsleistung, der Bildung von schädlichen Reaktionsprodukten und dem Rückhalt von konventionellen Schadstoffparametern vorgenommen. Nach der MS-Elimination erfährt das Abwasser bei allen betrachteten Lösungsvarianten eine Filtration. Somit können auch die konventionellen Schadstoffparameter hier CSB und P_{ges} hinreichend eliminiert werden.

Die Lösungsvarianten mit Ozon (V1a und V1b) sind für den Einsatz auf der ZKA Borgholzhausen, hinsichtlich der MS-Elimination, sehr gut geeignet. Hier erfahren lediglich die Stoffe Metoprolol und Benzotriazol eine mittlere Eliminationsleistung. Für beide Stoffe liegen zur Zeit aber keine Überschreitungen der Bewertungskriterien nach der Stoffliste NRW vor. Vorsicht ist bei hohen Bromid-Konzentrationen im

Abwasser zu wahren. Durch die Ozonbehandlung kann Bromid zu schädlichem Bromat transformiert werden. Bei der Lösung nach V1a wird lediglich ein Teilstrom in Höhe von 93% der Jahresabwassermenge hinsichtlich Mikroschadstoffen behandelt. Dennoch kann hierdurch eine mindestens 80%ige MS-Eliminationsleistung erzielt werden. Aus den genannten Gründen wird die Lösung nach V1a insgesamt mit "gut" bewertet.

Bei der Lösung nach V1b erfährt das Abwasser eine Vollstrombehandlung. Weiter werden nur sehr geringe Ozonkonzentrationen erzeugt, weswegen eine Bildung von Bromat ausgeschlossen werden kann. Zusätzlich erfolgt eine MS-Elimination durch den Einsatz von Aktivkohle. Die Lösung nach V1b wird daher mit "sehr gut" bewertet.

Die Lösungsvarianten mit Aktivkohle (V2a, V2b und V3) weisen hinsichtlich der Stoffe Clarithromycin und Sulfamethoxazol lediglich eine mittlere Eignung auf. Insbesondere der Stoff Clarithromycin liegt im Ablauf der ZKA Borgholzhausen in Konzentrationen oberhalb des Bewertungskriteriums nach der Stoffliste NRW vor.

Bei der Lösung V2a wird lediglich ein Teilstrom in Höhe von 93% der Jahresabwassermenge hinsichtlich Mikroschadstoffen behandelt. Dennoch kann hierdurch eine mindestens 80%ige MS-Eliminationsleistung erzielt werden. Die Lösung nach V2a wird insgesamt mit "gut" bewertet.

Bei den Lösungen nach V2b und V3 erfährt das Abwasser jeweils eine Vollstrombehandlung. Die Lösungen nach V1b und V3 werden daher mit "sehr gut" bewertet.

Betriebs- und Wartungsaufwand:

Der Betriebs- und Wartungsaufwand ist maßgeblich für den Personalbedarf einer Kläranlage. Um zukünftig ein ausreichendes Budget für den Betrieb sicherzustellen, wurde der jeweils zusätzlich zum Bestand erforderliche Personalbedarf, bei der Ermittlung der Betriebskosten der untersuchten Lösungsvarianten, berücksichtigt. Durch die an dieser Stelle vorgenommene Bewertung des personellen Aufwands kommt diesem Punkt eine wichtige Bedeutung zu. Dieses wird in der angesetzten Wichtigkeit (hier 25%) deutlich.

Nach Einschätzung des Verfassers ist der Betriebs- und Wartungsaufwand für eine GAK-Filtration gering. Gleiches gilt für den Betrieb einer Ozonierung, sofern die Instandhaltung und Wartung der Anlagen zur Ozonerzeugung durch speziell geschultes Fremdpersonal durchgeführt wird. Im Fall der Umsetzung einer Ozonierung ist der Abschluss eines Wartungsvertrags mit dem Hersteller der Anlage vorgesehen.

Die Varianten mit PAK-Dosierung werden insgesamt schlechter bewertet, da der Betriebsaufwand hier größer ist. Variante 2a (PAK-Dosierung mit Kontaktbecken) ist gegenüber der Variante 2b (PAK-Dosierung in die Belebung), aufgrund des höheren Technikanteils, noch etwas ungünstiger einzustufen.

In die vorgenommene Bewertung fließen neben dem Personalaufwand auch die Wartungs- und Reparaturkosten für die installierte Anlagentechnik mit ein.

Erstinvestitionen:

Die erforderlichen Erstinvestitionen unterscheiden sich für die zu bewertenden Varianten recht deutlich. Die Bewertung erfolgt hier stufenweise in Abhängigkeit der angesetzten Erstinvestitionskosten. Es werden 5 Punkte für die Varianten mit den niedrigsten bis 1 Punkt für die Variante mit den höchsten Erstinvestitionskosten vergeben.

Jahreskosten:

Die Jahreskosten beinhalten sämtliche Kosten (Herstellungs- und Betriebskosten), die Kapitalkosten sowie die Preissteigerungsraten der verschiedenen Kostengruppen. Somit sind die Jahreskosten entscheidend für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit der untersuchten Varianten. Die Bewertung der Jahreskosten wird daher mit dem höchsten Anteil (35%) gewichtet. Die Bewertung der einzelnen Lösungsvarianten erfolgt stufenweise in Abhängigkeit der Jahreskosten.

Als Ergebnis der durchgeführten Bewertungen geht die Lösungsvariante 3 (GAK-Filtration im Vollstrom) deutlich als Vorzugsvariante hervor.

7 Zusammenfassung

Trotz einer in den letzten Jahren zu verzeichnenden Verbesserung der Gewässerqualität in NRW, konnte ein ökologisch guter Zustand, entsprechend den Zielen der europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL, 2000/60/EG) und des deutschen Wasserrechts, in 90 % der Gewässer nicht erreicht werden. In diesem Zusammenhang führt der Eintrag von Mikroschadstoffen zu nachweisbaren Belastungen der Gewässer in NRW.

Die Zentralkläranlage Borgholzhausen leitet konventionell gereinigtes kommunales Abwasser in die Hessel ein. Die Hessel gehört zum Einzugsgebiet der Ems. Die Saprobie des Gewässers wurde im Rahmen des 3. EG-WRRL-Monitoringzyklus von "gut auf "mäßig" herabgestuft. Für die Fischfauna besteht Handlungsbedarf. Der ökologische Zustand bzw. das ökologische Potential ist mit unbefriedigend dargestellt. Eine Besonderheit des Einzugsgebietes der Ems in OWL ist die Trinkwassergewinnung aus Uferfiltrat.

Zur Feststellung der Gewässerbelastung mit Mikroschadstoffen durch die Einleitung aus der Zentralkläranlage Borgholzhausen wurden, im Rahmen der Studie, Messungen im Gewässer ober- und unterhalb der Kläranlageneinleitung durchgeführt.

Es zeigte sich, dass oberhalb der Einleitung nahezu keine Belastung mit Mikroschadstoffen gemessen werden konnte. Unterhalb der Einleitungsstelle sind Arznei- und Röntgenkontrastmittel sowie der Korrosionsinhibitor Benzotriazol deutlich nachweisbar. Insbesondere für die Konzentrationen der Arzneimittel Clarithromycin (0,13 µg/L), und Diclofenac (0,44 µg/L) liegen wesentliche Überschreitungen der Qualitätsziele gemäß der durch das Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe NRW herausgegebenen "Stoffliste NRW" vor. Für die Konzentrationen der anderen gelisteten Indikatorsubstanzen gilt, dass diese zwar im Gewässer nachweisbar sind, aber keine Überschreitungen der Qualitätsziele vorliegen.

Die durchgeführten Analysen bestätigen insgesamt einen Eintrag vom Mikroschadstoffen in das Gewässer durch die Einleitung von konventionell gereinigtem Abwasser aus der Zentralkläranlage Borgholzhausen.

Untersuchungen im Ablauf der Nachklärung zeigen, dass die analysierten Arzneimittelkonzentrationen im Ablauf der ZKA Borgholzhausen, mit denen anderer Kläranlagen in OWL vergleichbar sind. Relativ hohe Konzentrationen wurden für die Substanzen Clarithromycin und Diclofenac mit 0,55 bzw. 3,00 µg/L gemessen.

Hinsichtlich der Röntgenkontrastmittel zeigt sich, dass diese im Einzugsgebiet der Kläranlage Borgholzhausen keine wesentliche Rolle spielen. Dennoch überschreiten die im Gewässer gemessenen Konzentrationen der Röntgenkontrastmittel den präventiven Vorsorgewert von 0,1 µg/L.

Das Einzugsgebiet der ZKA Borgholzhausen wird überwiegend im Trennsystem entwässert. Bezogen auf die Gesamteinzugsgebietsfläche beträgt die Verteilung rd. 60% auf Trenn- und 40% auf Mischsystem. Gegenwärtig wird das Abwasser von rund. 7.000 Einwohner (E) in der Anlage gereinigt. Desweiteren wird in der Anlage gewerbliches und industrielles Abwasser von diversen Betrieben behandelt. Die Bandbreite der Betriebe erstreckt sich über die Bereiche Schlachtung und Fleischverarbeitung, Gastronomie, Metallindustrie, Kunststoffindustrie, Kraftverkehr Logistik und diverse Kleinbetriebe. Insgesamt werden für Gewerbe und Industriebetriebe im Einzugsgebiete der ZKA Borgholzhausen rund 5.800 Einwohnergleichwerte (EGW) angesetzt. Eine Auswertung der Zulauffrachten auf der Grundlage der Eigenüberwachungsdaten der Kläranlage ergibt eine Zulaufbelastung in Höhe von rd. 13.000 EW. Die Ausbaugröße der Kläranlage beträgt 21.800 Einwohnerwerte (EW). Somit wird festgestellt, dass die gegenwärtige Belastung mit 13.000 EW deutlich unterhalb der Auslegungsgröße liegt. Durch den Ausbau des interkommunalen Gewerbegebiets "IBV Borgholzhausen-Versmold" ist eine kurzfristige Ansiedlung weiterer abwasserintensiver Betriebe durchaus realistisch. Bei der Planung der Anlagen zur Mikroschadstoffelimination sind daher ausreichende Reserven zu berücksichtigen.

In Abstimmung mit der Stadt Borgholzhausen wurden im Rahmen der Studie folgende Verfahrensvarianten einer 4. Reinigungsstufe zur Elimination von Mikroschadstoffen untersucht:

- **Variante 1a:** Ozonierung (Teilstrom), Tuchfiltration im Vollstrom
- **Variante 1b:** Ozonierung & GAK-Filter (BAK-Verfahren) im Vollstrom

- **Variante 2a:** PAK-Adsorption in einem Kontaktbecken (Teilstrom), Tuchfiltration im Vollstrom
- **Variante 2b:** PAK-Adsorption in der Belebung, Tuchfiltration im Vollstrom
- **Variante 3:** GAK-Filtration im Vollstrom

Für die ausgewählten Lösungsvarianten wurden die technischen Umsetzungsmöglichkeiten auf der ZKA Borgholzhausen beschrieben. Die bauliche und hydraulische Einbindung der Anlagen der Verfahrensstufen der 4. Reinigungsstufe in die vorhandene Anlagentechnik wurde geprüft und zeichnerisch in Form von Lageplanausschnitten dargestellt.

Es zeigte sich, dass alle Lösungsvarianten gut auf dem Kläranlagengelände und in den vorhandenen Abwasserreinigungsprozess integrierbar sind. Für alle Lösungsvarianten ist eine Anhebung des zu behandelnden Abwasservolumenstroms erforderlich ist. Aufgrund erhöhter Anforderungen im Bereich der Phosphatelimination ist für alle Lösungsvarianten eine Filtration im Vollstrom erforderlich.

Für alle Verfahrensvarianten wurden die Investitions- und Betriebskosten mit den für eine Kostenschätzung üblichen Genauigkeitsanforderungen ermittelt. Bei den angesetzten Preisen handelt es sich um Preise aus aktuellen Budgetangeboten, aus Preisanfragen bei Herstellern/Lieferanten, aus Mittelpreisen der Leistungsverzeichnisse aktueller Projekte oder Werte aus der aktuellen Fachliteratur. Die Preisansätze beinhalten insgesamt eine Genauigkeit von +-20%. Die auf dieser Grundlage ermittelten Investitions- und Betriebskosten fließen in eine dynamische Kostenvergleichsrechnung nach KVR-Leitlinie ein. Bei Ansatz der durch das Kompetenzzentrum für Mikroschadstoffe, NRW, vorgegebenen Kalkulationsparameter (Zinssatz, Kostensteigerungen, Nutzungsdauer / Zinszeiträume, etc.) sowie einer Verfahrensbewertung unter Berücksichtigung der Bewertungskriterien: Betriebssicherheit, Erprobungsgrad der Technik, Reinigungsleistung, Betriebs- und Wartungsaufwand, Erstinvestitionskosten und Jahreskosten, ergibt sich die folgende Rangfolge der Lösungsvarianten:

- Rang 1: Variante 3 (GAK-Filtration)
- Rang 2: Variante 2b (PAK-Adsorption in der Belebung)
- Rang 3: Variante 1a (Ozonierung)
- Rang 4: Variante 1b (Ozonierung & GAK-Filtration)
- Rang 5: Variante 2a (PAK-Adsorption mit Kontaktbecken)

Als Ergebnis der durchgeführten Bewertungen geht die Lösungsvariante 3 (GAK-Filtration im Vollstrom) deutlich als Vorzugsvariante hervor.

Kostenkennzahlen Lösungsvariante 3

(alle Angaben in EUR inkl. 19% Mehrwertsteuer)

Herstellungskosten:	2.238.466,00
jährliche Betriebskosten:	<u>91.126,00</u>

Kosten und Kostenkennwerte

(unter Berücksichtigung einer Förderung in Höhe von 70%):

Herstellungskosten	<u>671.539,99</u>
Projektkostenbarwert:	3.263.290,00
Jahreskosten:	166.490,00

Abschließend ist nochmals zu betonen, dass durch die Einleitung von konventionell gereinigtem Abwasser aus der Zentralkläranlage Borgholzhausen die Bewertungskriterien für einige Spurenstoffe überschritten werden.

Derzeit bestehen jedoch für die Mehrheit der Spurenstoffe weder auf europäischer Ebene noch in Deutschland gesetzliche Anforderungen bzw. Grenzwerte hinsichtlich der zu erzielenden Ablaufqualität von Kläranlagen oder für eine tolerierbare Gewässerbelastung. Aus den Anforderungen der EG-Wasserrahmenrichtlinie an

den Zustand europäischer Oberflächengewässer sowie der Oberflächengewässerverordnung (OGewV) können zukünftig jedoch Forderungen nach einer gezielten Mikroschadstoffelimination abgeleitet werden.

Aufgrund des für NRW flächendeckend vorliegenden Stoffflussmodells "Mikroschadstoffe aus kommunalem Abwasser" besteht, aus der Sicht der zuständigen Behörde, für das Gewässer Hessel bereits heute ein grundsätzlicher Handlungsbedarf, da demnach für fast alle betrachteten Mikroschadstoffe Konzentrationen oberhalb der Orientierungswerte vorliegen. Die Gültigkeit des Stoffflussmodells wurde durch diese Studie bestätigt. Ferner ist Handlungsbedarf wegen der insgesamt hohen Abwasserlast gegeben. Das Verhältnis der Einleitungsmenge aus der ZKA Borgholzhausen zum mittleren Niedrigwasserabfluss (MNQ) der Hessel beträgt rd. 60 %.

Gegenwärtig wird die Planung und Errichtung von Anlagen zur Elimination von Mikroschadstoffen durch das Land NRW gefördert. Die Höhe der Kostenübernahme beträgt derzeit 70% der Herstellungskosten.

Aus der vorliegenden Machbarkeitsstudie geht die Lösungsvariante 3 (GAK-Filtration als Vorzugsvariante hervor. Der Verfasser empfiehlt der Stadt Borgholzhausen die Planung und Errichtung einer GAK-Filtration nach der Vorzugsvariante. Zur Sicherung der Fördermittel sollte kurzfristig ein Antrag nach dem Förderprogramm "Ressourceneffiziente Abwasserbeseitigung NRW II" (ResA II) gestellt werden.

Aufgestellt: Blomberg, Dezember 2017

.....
HydroCompact Ingenieure, Blomberg
Dipl.-Ing. D. Klein

8 Literaturverzeichnis

ABEGGLEN, C.; ESCHER, B.; HOLLENDER, J.; ORT, C.; PETER, A.; SIEGRIST, H.; VON GUNTEN, U.; ZIMMERMANN, S.; KOCH, M.; NIEDERHAUSER, P.; SCHÄRNER, M.; BRAUN, C.; GÄLLI, R.; JUNGHANS, M.; BROCKER, S.; MOSER, R.; RENSCH, D. (2009): "Ozonung von gereinigtem Abwasser-Schlussbericht Pilotversuch Regensdorf", Eawag, AWEL, BAFU, BMG, Hunziker Betatech, Eawag, Dübendorf

ABEGGLEN, C.; SIEGRIST, H. (2012): Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser. Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen, Bundesamt für Umwelt, Umwelt-Wissen Nr.1214, Bern

ALT, K.; MAUER, C.; NAHRSTEDT, A.; BURBAUM, H.; FRITZSCHE, J.; SÜRDER, T. (2014): Einsatz granulierter Aktivkohle auf dem Verbandsklärwerk "Obere Lutter", Korrespondenz Abwasser 61. Jahrgang Nr. 5. S. 408-426

ANDERS, G. (2016): Vortrag " Betriebserfahrungen beim Einsatz von PAK und Tuchfiltration auf der Kläranlage Lahr", Elimination im Spannungsfeld ökologischer Anforderungen und technischer Innovation vom 19. und 20. September 2016, Rheinterrasse Düsseldorf

AUSTERMANN-HAUN, U.; MEIER, J. F.; NAHRSTEDT, A.; SIKORSKI, D.; KUHLMANN, S.; ALT, K.; (2017): Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Detmold mittels der Kombination von Ozon mit nachgeschalteter Aktivkohlefiltration. Abschlussbericht, gerichtet an das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen

BARJENBRUCH, M.; FIRK, W. (2014): Möglichkeiten der Elimination von Spurenstoffen auf kommunalen Kläranlagen. In: Korrespondenz Abwasser, Abfall. 61. Jahrgang. Nr. 10. S.861-875

BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2005): Arzneistoffe in der Umwelt. (abrufbar unter: http://www.bayern.de/lfu/umwberat/data/chem/stoff/arznei_2005.pdf)

BIEBERSDORF, N.; URUETA, F. (2015): Machbarkeitsstudie KA Velen 4. Reinigungsstufe zur Elimination von Mikroschadstoffen (abrufbar unter: https://www.lanuv.nrw.de/uploads/tx_mmkresearchprojects/Studie_4RS_KA_Velen_m_Anlagen.pdf)

BÖHLER, M.; MCARDELL, C.S.; KIENLE, C.; TEICHLER, R.; FLEINER, J.; SIEGRIST, H. (2016): "Biologische Nachbehandlung von kommunalem Abwasser nach Ozonung -ReTREAT, Umwelttechnologieförderung des Bundes, (UFT), Schlussbericht, in Bearbeitung, Eawag, Dübendorf

BORNEMANN, C.; YÜCE, S.; HERR, J.; JAGEMANN, P.; LYKO, S.; BENSTÖM, F.; MONTAG, D.; PLATZ, S.; WETT, M.; BIEBERSDORF, N.; KAUB, J.M.; KOLISCH, G.; OSTHOFF, T.; TAUDIEN, Y.; ROLFS, T.; STEPKES, H. (2012): Ertüchtigung kommunaler Kläranlagen, insbesondere kommunale Flockungsfiltrationsanlagen durch den Einsatz von Aktivkohle-MIKRO Flock, (TP5). Abschlussbericht AZ IV-7-042 600 001E. (abrufbar unter: <http://www.lanuv.nrw.de/wasser/abwasser/forschung/abwasser.htm>)

ELWAS-WEB (2013): Elektronisches wasserwirtschaftliches Verbundsystem für die Wasserwirtschaft in NRW, www.elwasweb.nrw.de

EVERS, M.; LANGE, R.-L.; JAGEMANN, P.; TEICHGRÄBER, B.; HEINZ, E.; LÜBKEN, M.; WICHERN, M. (2017): Vergleichende Untersuchungen zur Direktdosierung und nachgeschalteten Dosierung von Pulveraktivkohle. In: Korrespondenz Abwasser, Abfall. 64. Jahrgang. Nr. 12. S.1067-1073.

GÖTZ, C.; KASE, R.; ORT, C.; SINGER, H.; BERGMANN, S. (2012): Mikroschadstoffe aus kommunalem Abwasser, Stoffflussmodellierung, Situationsanalyse und Reduktionspotenziale

GRABBE, U. (2017): Firma Mecana Umwelttechnik GmbH, E-Mail vom 30.11.2017, unveröffentlicht

HERBST, H.; KAUFMANN, M.; TÜRK, J.; LAUNER, M. (2011): Abwasserozonierung Kläranlage Duisburg-Vierlinden – Auslegung – Bau – erste Betriebsergebnisse. In Innovation und Flexibilität – Systemoptimierung und Systemerweiterung; Tagungsband der 25. Karlsruher Flockungstage 2011, Schriftenreihe SWW (Bd. 141), Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe, ISBN 978-3-9813069-4-1

HERTEL, M.; MAURER, P.; STEINMETZ, H. (2014): Auswahl und Überprüfung granulierter Aktivkohle (GAK) für den Einsatz in kontinuierlich gespülten Filtern. Wasser und Abfall, 16. Jahrgang. Heft 11, S. 40-45

HODEL, P. (2017): Bachelorarbeit "Abscheidung ultrafeiner Pulveraktivkohle mittels Tuchfiltration", Hochschule für Technik Rapperswil

HÜBNER, U.; KLETKE, T.; SENGL, M.; MIKLOS, D.; HAAS, S.; BLEISTEINER, S.; EITZEN, L.; HELLIE, A.; BÖHM, B.; DREWES, J.E. (2016): Vortrag "Entfernung von Mikroschadstoffen durch Optimierung der UV-Desinfektionsanlage München Gut Marienhof", Fachkonferenz 2016 "Arzneimittel und Mikroschadstoffe in Gewässern", Elimination im Spannungsfeld ökologischer Anforderungen und technischer Innovation vom 19. und 20. September 2016, Rheinterrasse Düsseldorf

IKSR (2010): Auswertungsbericht Röntgenkontrastmittel, Bericht Nr. 187, Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR), Koblenz

KLEIN, D. (2017): Erläuterungsbericht zum Antrag auf Einleitung von gereinigtem Abwasser aus der KA Borgholzhausen in die Hessel, unveröffentlicht.

KOMPETENZZENTRUM MIKROSCHADSTOFFE NRW (2016): Druckschrift "Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Schadstoffelimination", ARGE Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Stand 01.09.2016

KOMPETENZZENTRUM MIKROSCHADSTOFFE NRW (2015): Druckschrift "Mikroschadstoffentfernung machbar? Wesentliche Inhalte einer Machbarkeitsstudie für Anlagen zur Mikroschadstoffelimination mit aktualisierter Stoffliste vom 01.09.2016", ARGE Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW, Stand 20.10.2015

KRÜGER, T. (2016): Einleitung von gereinigtem Abwasser aus der KA Borgholzhausen in die Hessel, Erlaubnisbescheid vom 21.012.2007, AZ. 54.1-83.10.GT.488011/008, in der Fassung des 2. Änderungsbescheides vom 28.10.2016, Bezirksregierung Detmold.

LEITZKE, O. (1993): Wasseraufbereitung mit Ozon in traditioneller Kombination mit Flockung und Filtration, pp 130-136; Traditionelle Abwasseraufbereitung mit Ozon, pp 137-141; Aufbereitung kontaminierter Grundwässer mit der Ozon/UV-Kombination, pp143-150; Die Reduzierung des chemischen Sauerstoffbedarfs und der chlorierten Kohlenwasserstoffe im Abwasser mit Ozon und UV- Licht (ionische und radikalische Reaktionen), pp 154-156. In: Kontakt und Studium Verfahrenstechnik, Ozonanwendung in der Wasseraufbereitung, Band 118, Expert Verlag

METZGER, S.; TJOENG, I.; RÖßLER, A.; SCHWENTER, G.; RÖLLE, R.(2014): Kosten der Pulveraktivkohleanwendung zur Spurenstoffelimination am Beispiel ausgeführter und im Bau befindlicher Anlagen. In: Korrespondenz Abwasser, Abfall, 61. Jahrgang, Nr. 11, S. 1029-1037

MKULNV NRW (2015): Steckbriefe der Planungseinheiten in den nordrhein-westfälischen Anteilen von Rhein, Weser, Ems und Maas Bewirtschaftungsplan 2016-2021 Oberflächengewässer und Grundwasser Teileinzugsgebiet Ems/Ems NRW. 1. Auflage Dezember 2015

OWL UMWELTANALYTIK GMBH (2017): Prüfbericht vom 19.04.2017 zum Messprogramm ZKA Borgholzhausen (28.03.2017 bis einschl. 31.03.2017), unveröffentlicht

ROLFS, T.; KEYSERS, C.; FIRK, W.(2016): Vortrag "Konzeption, Planung und Bau einer Ozonungsanlage zur Vollstrombehandlung auf der Kläranlage Aachen-Soers", Fachkonferenz 2016 "Arzneimittel und Mikroschadstoffe in Gewässern", Elimination im Spannungsfeld ökologischer Anforderungen und technischer Innovation vom 19. und 20. September 2016, Rheinterrasse Düsseldorf

RUMMLER, M.; HARMJANßEN, K. (2014): Abschlussbericht "Möglichkeiten der Elimination prioritärer Stoffe in der Kläranlage Stadtlohn"

SOLTERMANN, F.; ABEGGLEN, C.; GÖTZ, C.; ZIMMERMANN-STEFFENS, S.; VON GUNTEN, U.(2016): Bromid im Abwasser. In: AQUA & GAS No. 10 2016, S. 64 -71

STOLL, J.-M.; FRANK, K; VON ARX, D.; THOMANN, M.; OBRECHT, J; SOBASZKIEWICZ, M.; BOLLER, M.; FREISLER, P.(2015): PAK im Belebtschlammbecken - Elimination von Mikroverunreinigungen in der ARA mit Pulveraktivkohle im Belebtschlammbecken,
https://www.micropoll.ch/fileadmin/user_upload/Redaktion/Dokumente/01_Berichte/02_Technische_Verfahren/03_Aktivkohle/150218_Abschlussbericht_Mikro_Pak.pdf.

ZIESEL, A: (2016): Mit Aktivkohle gegen Schadstoffe. In: Lippische Landeszeitung, Ausgabe: Donnerstag, 6. Oktober 2016, Rubrik: Lokales, S. 14

9 Anlagenverzeichnis

Anlage 1	Analyse vom 19.05.2017, OWL-Umweltanalytik GmbH“
Anlage 2	Monitoring, Messprogramm vom: 28.03. - 31.03.2017, OWL-Umweltanalytik GmbH 30.05. - 01.06.2017, OWL-Umweltanalytik GmbH 01.08. - 04.08.2017, OWL-Umweltanalytik GmbH
Anlage 3	Anlagenauslegung, Ermittlung der Betriebskosten
Anlage 4	Herstellungskosten
Anlage 5	Dynamische Kostenvergleichsrechnung (ohne Ansatz der Förderung)
Anlage 6	Variantenübersicht