

Machbarkeitsstudie Spurenstoffelimination KA Flonheim

Studie zur Verfahrensauswahl für eine gezielte Elimination der
Spurenstoffe auf der Kläranlage Flonheim

- SCHLUSSBERICHT -

Im Auftrag von



Rheinland-Pfalz

MINISTERIUM FÜR
KLIMASCHUTZ, UMWELT,
ENERGIE UND MOBILITÄT

Kaiserslautern, im März 2022

Autorenübersicht:

Technische Universität Kaiserslautern
Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft
Fachgebiet Ressourceneffiziente Abwasserbehandlung
Paul-Ehrlich-Str. 14
D-67663 Kaiserslautern

Prof. Dr.-Ing. Heidrun Steinmetz
Prof. Dr.-Ing. Ulrich Dittmer
Dr.-Ing. Henning Knerr

Wupperverbandsgesellschaft für integrale
Wasserwirtschaft (WIW) mbH
Untere Lichtenplatzer Straße 100
D-42289 Wuppertal

Dr.-Ing. Gerd Kolisch
Dipl.-Ing. Yannick Taudien

Zitation:

Steinmetz, H., Dittmer, U., Knerr, H., Kolisch, G., Taudien, Y. (2022): „Machbarkeitsstudie Spurenstoffelimination KA Flonheim“, Studie im Auftrag des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität des Landes Rheinland-Pfalz, Deutschland, Schlussbericht, März 2022

INHALTSVERZEICHNIS

1 VERANLASSUNG4

- 1.1 AUFGABENSTELLUNG4
- 1.2 HANDLUNGSBEDARF5

2 RAHMENBEDINGUNGEN SPURENSTOFFE9

- 2.1 RELEVANZ VON SPURENSTOFFEN9
- 2.2 RECHTLICHE UND POLITISCHE RAHMENBEDINGUNGEN10
- 2.3 TECHNISCHE RAHMENBEDINGUNGEN11
- 2.4 SYNERGIEN ZU PHOSPHOR-ELIMINATION14
- 2.5 KLIMARELEVANTE ASPEKTE14

3 VORUNTERSUCHUNGEN UND ÖRTLICHE RANDBEDINGUNGEN16

- 3.1 BESCHREIBUNG KLÄRANLAGE FLONHEIM16
- 3.2 AUSWERTUNG RELEVANTER BETRIEBSDATEN19
- 3.3 MÖGLICHE ÜBERLEITUNG DER KA NACK-NIEDERWIESEN21
- 3.4 KAPAZITÄT BIOLOGISCHE REINIGUNGSSTUFE22
- 3.5 SPURENSTOFFSCREENING23
- 3.6 AUFSTELLFLÄCHE FÜR EINE WEITERGEHENDE REINIGUNGSSTUFE25
- 3.7 BEMESSUNGSWASSERMENGE WEITERGEHENDE REINIGUNGSSTUFE26

4 AUSARBEITUNG TECHNISCHER VARIANTEN28

- 4.1 VORAUSWAHL VON VERFAHREN28
- 4.2 VARIANTE 1: „OZON“ OZONBEHANDLUNG MIT SANDFILTER ALS NACHBEHANDLUNG29
 - 4.2.1 *Beschreibung*29
 - 4.2.2 *Bemessung*29
 - 4.2.3 *Umsetzungskonzept*31
 - 4.2.4 *Investitionskosten*33
 - 4.2.5 *Betriebs- und Jahreskosten*34
- 4.3 VARIANTE 2: „GAK-FILTER“ FESTBETTFILTRATION MIT GRANULIERTER AKTIVKOHLE35
 - 4.3.1 *Beschreibung*35
 - 4.3.2 *Bemessung*35
 - 4.3.3 *Umsetzungskonzept*36
 - 4.3.4 *Investitionskosten*38
 - 4.3.5 *Betriebs- und Jahreskosten*38
- 4.4 VARIANTE 3: „PAK-STUFE“ PULVERAKTIVKOHLE MIT EIGENEM SCHLAMMKREISLAUF40
 - 4.4.1 *Beschreibung*40
 - 4.4.2 *Bemessung*40
 - 4.4.3 *Umsetzungskonzept*42
 - 4.4.4 *Investitionskosten*44
 - 4.4.5 *Betriebs- und Jahreskosten*44

5 VARIANTENVERGLEICH46

- 5.1 KOSTENVERGLEICH46
- 5.2 CO₂-BILANZ49
- 5.3 BEWERTUNG50

6 ZUSAMMENFASSUNG UND VERFAHRENSEMPFEHLUNG52

LITERATURVERZEICHNIS53

TABELLENVERZEICHNIS55

ABBILDUNGSVERZEICHNIS56

ANHANG58

1 VERANLASSUNG

1.1 Aufgabenstellung

Der Zweckverband Abwasserentsorgung Rheinhessen (ZAR) betreibt die Kläranlage (KA) Flonheim mit einer Ausbaugröße von 14.500 E bei Normallast und 60.000 E bei Spitzenlast. Die biologische Reinigungsstufe wird derzeit mit simultaner aerober Schlammstabilisierung betrieben. Zukünftig ist ein Schlammverbund mit der KA Alzey mit gemeinsamer, getrennt anaerober Schlammstabilisierung am Standort Alzey geplant. Durch Nachrüstung einer Vorklärung und Absenkung des Schlammalters kann so auf der KA Flonheim Energie eingespart bzw. die Eigenstromerzeugung auf der KA Alzey erhöht werden.

Die KA Flonheim leitet das mechanisch-biologisch gereinigte Abwasser in den Wiesbach ein, dessen Einzugsgebiet stark landwirtschaftlich geprägt ist und einen hohen Anteil an Sonderkulturen (Weinbau) aufweist. Bedingt durch den niedrigen Gewässerabfluss von 0,4 m³/s an der Einmündung in die Nahe, haben die insgesamt neun einleitenden kommunalen KAn im Einzugsgebiet als Punktquellen einen großen Einfluss auf den Gewässerzustand der betreffenden Wasserkörper (WK). Daher sind die WK des Wiesbach in der sogenannten p1- Bewertung¹ eingestuft, mit einem hohen Belastungsniveau an Phosphorverbindungen. Zur Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) sollen Phosphoreinträge aus KAn in p1-WK reduziert werden (MUEEF, 2019). Neben Phosphor werden auch Spurenstoffe in hohen Konzentrationen nachgewiesen. Die Notwendigkeit einer weitergehenden Abwasserreinigung zur gezielten Elimination dieser Substanzen wird derzeit sowohl in der Öffentlichkeit als auch in der Fachwelt intensiv diskutiert.

In dem vom Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität Rheinland-Pfalz (MKUEM, ehemals MUEEF) geförderten Forschungsvorhaben „Mikro-System - Modellgestützte Stoffbilanzierung zur systematischen Identifikation von Maßnahmenswerpunkten für eine kombinierte Reduktion von Phosphor- und Spurenstoffen“ (Schmitt et al., 2020) wurde exemplarisch für den Wiesbach und die Lauter das Potenzial technischer Maßnahmen zur kombinierten Spurenstoff- und Phosphorelimination an hoch belasteten Gewässern untersucht. Dabei wurde die KA Flonheim als zielführende Anlage identifiziert. Ziel der vorliegenden Studie ist die Verfahrensauswahl und Umsetzung einer Spurenstoffelimination auf der KA Flonheim. Die Studie soll als repräsentatives Beispiel für weitere Studien in Rheinland-Pfalz (RLP) dienen. In der Studie soll, unter Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten und Bausubstanz, das Vorgehen zur Integration einer weitergehenden Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination geprüft und dargestellt werden.

Es bestehen folgende grundsätzlichen **Anforderungen** an die Studie

1. Technische Verfahrensauswahl für eine weitergehende Spurenstoffelimination am Standort
2. Gesamtbetrachtung des Gewässers mit den Ergebnissen der Stoffflussbilanzierung (Mikro-System)
3. Berücksichtigung vorhandener Leitfäden (KOM.M-NRW, KOM|S – BW)
4. Berücksichtigung des Orientierungsrahmens der Spurenstoff-Strategie des Bundes
5. Berücksichtigung der energetischen Effizienz der Maßnahme
6. Berücksichtigung der Synergie mit der Phosphorelimination

Dazu wurden in Kooperation der Technischen Universität Kaiserslautern (TUK) und der Wupperverbands-gesellschaft für integrale Wasserwirtschaft (WiW) folgende **Arbeitspakete** bearbeitet:

- Beschreibung des Handlungsbedarfs und der Kläranlagensituation
- Beschreibung der aktuellen Rahmenbedingungen zu Spurenstoffen
- Auswertung eines Sondermessprogramms zur Bewertung der Spurenstoffbelastung
- Auswertung der Betriebsdaten zur Ermittlung einer Bemessungswassermenge
- Auslegung und Dimensionierung von drei Verfahrensvarianten
- Variantenvergleich und Ermittlung einer Vorzugsvariante

¹ p1-Belastung: = pressure 1 = Belastung durch punktuelle Einträge (insbesondere Kläranlagen)

1.2 Handlungsbedarf

Umsetzung Orientierungsrahmen des Bundes in Rheinland-Pfalz

Es gibt bisher keine einheitliche rechtliche Vorgabe für die Festlegung des Bedarfs einer weitergehenden Reinigungsstufe auf kommunalen Kläranlagen mit dem Ziel der Elimination von Spurenstoffen (vgl. Kapitel 2.2). Das MKUEM RLP orientiert sich daher an der systematischen Vorgehensweise zur Prüfung einer weitergehenden Abwasserbehandlung, die in dem „Spurenstoff-Dialog“ des Bundes als Orientierungsrahmen vorgegeben wird (Ergebnisbericht 2.Phase, BMU/UBA, 2019).

Das vorgeschlagene Vorgehen sieht zunächst die Festlegung eines Betrachtungsraums vor, für den Belastungen und Schutzbedürftigkeit der Gewässer zu prüfen sind. Bei hoher Schutzbedürftigkeit oder bei relevanten Belastungen soll eine Prüfung zur Priorisierung von Handlungsoptionen und anschließend eine Auswahl von Kläranlagen erfolgen. Aufschluss über die Gewässerbelastung geben z. B. Monitoring-Ergebnisse, der Abwasseranteil im Gewässer oder eine Stoffflussmodellierung. Einen allgemeingültigen Ansatz zur Herleitung eines entscheidungsrelevanten Abwasseranteils in einem Gewässersystem sowie an der jeweiligen Einleitungsstelle gibt es derzeit jedoch nicht.

In RLP wird der Orientierungsrahmen des Bundes in einem ersten Schritt durch die Erstellung einer Positivliste zur Auswahl potenzieller Kläranlagen und Gewässer umgesetzt und mögliche KA-Standorte ausgewählt. Für alle Gewässer wurden in der Liste die Schutzbedürftigkeit und die Belastung mit Spurenstoffen bewertet. Die Auswahl der Kläranlagen erfolgte zusammenfassend nach drei Strategien (vgl. Abbildung 1):

1. **„Hohe gewässerbiologisch und naturschutzfachliche Wertigkeit“** des Gewässers
(Wertigkeit > 6, Diclofenac-Konzentration mindestens 0,05 µg/L in einem WK)
2. **„Hohe Arzneimittelbelastung“**
(Wertigkeit > 1; Diclofenac-Konzentration mindestens 0,10 µg/L in einem WK)
3. **„Hohe Frachtreduzierung je Euro“**
(Kläranlagen mit über 100.000 E)

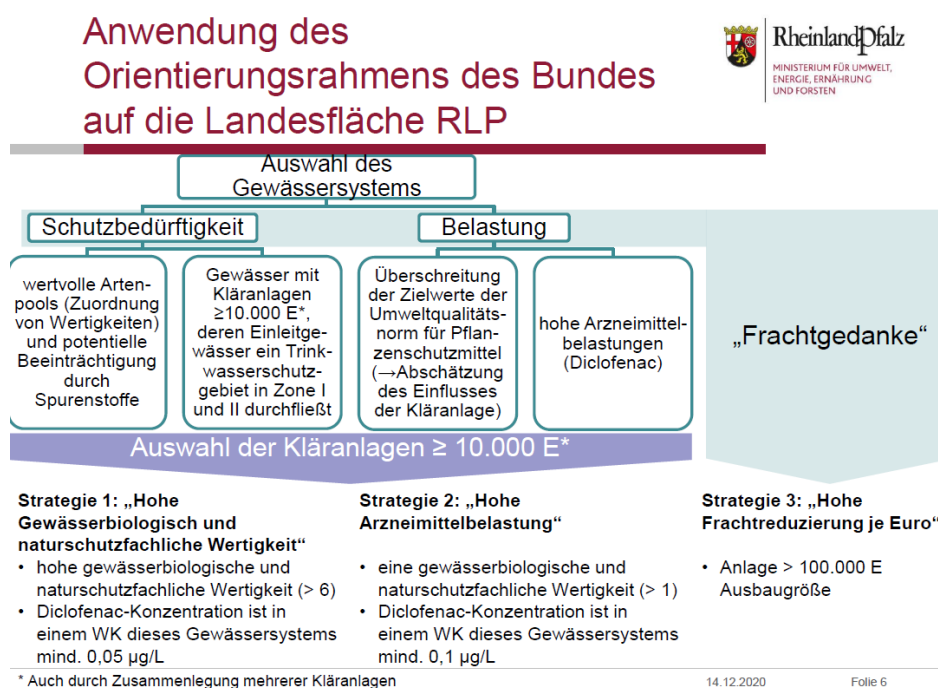


Abbildung 1: Umsetzung des Orientierungsrahmens (MKUEM RLP, 2021)

Bewertung der KA Flonheim und des Wiesbachs

Im Falle der KA Flonheim ist die zweite Auswahlstrategie der „hohen Arzneimittelbelastung“ maßgebend. In Monitoring-Kampagnen des Landesamts für Umweltschutz RLP (LfU) wurden Diclofenac-Konzentrationen in Höhe von bis zu 0,92 µg/l an der Mündung des Wiesbachs in die Nahe festgestellt (Abbildung 2). Die Kläranlage wurde daher in die Positivliste des Landes Rheinland-Pfalz von Kläranlagen aufgenommen, bei denen die Einrichtung einer 4. Reinigungsstufe aus fachlichen Gründen grundsätzlich sinnvoll ist. Die Positivliste ist nicht öffentlich und die Betreiber werden zu dem Thema individuell angesprochen. In der aktuellen Wasser-rahmenrichtlinien (WRRL)-Bewertung mit Stand 03/2020 werden die WK des Wiesbach zudem mit einer hohen stofflichen Belastung und einem schlechten ökologischen Zustand auf fast der gesamten Fließstrecke bewertet. Der chemische Zustand wird mit gut bewertet. Bei dieser Herangehensweise werden allerdings nur die bislang geregelten Spurenstoffe bewertet (vgl. Kapitel 2.2).

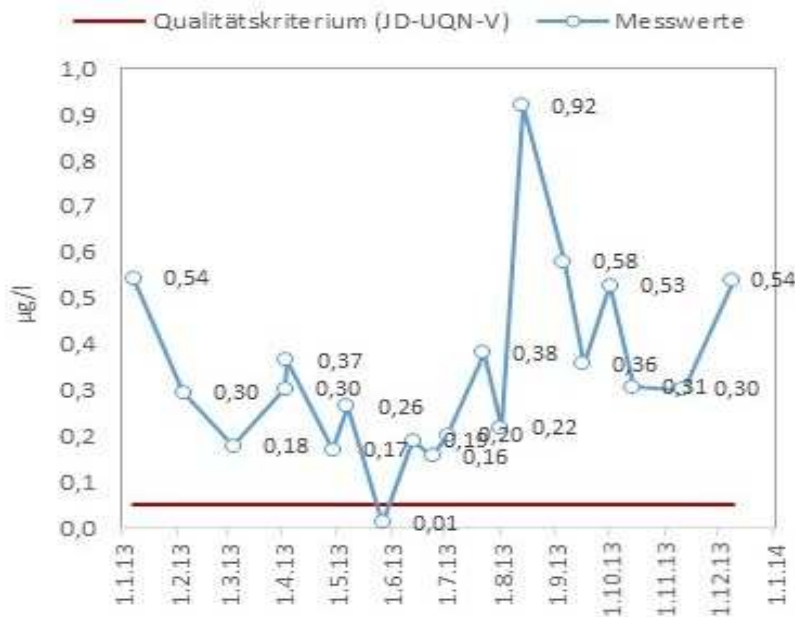


Abbildung 2: Diclofenac-Konzentrationen im Wiesbach an der Messstelle unterhalb Gensingen (Schmitt et al., 2020)

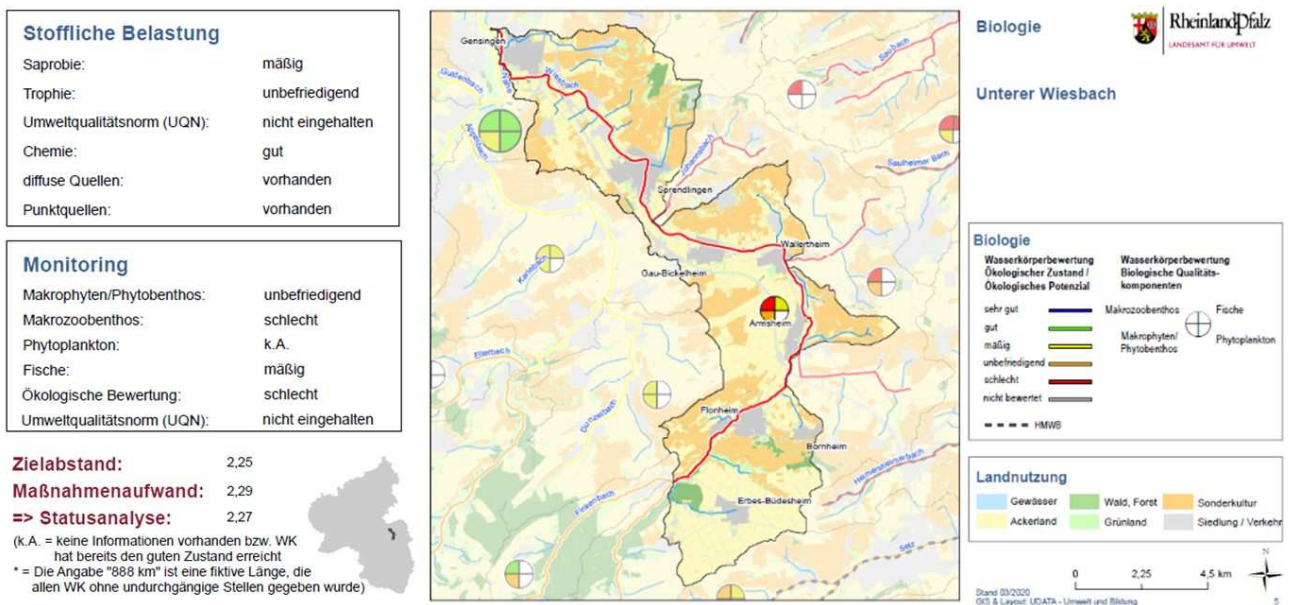


Abbildung 3: Zusammenstellung ausgewählter Parameter aus dem Steckbrief des Wiesbachs zur WRRL-Bewertung Stand 03/2020 (LfU-RLP, 2020)

Prüfung der Handlungsoptionen mittels Stoffflussmodell

In dem vom MKUEM RLP in 2019 bis 2020 geförderten Projekt „Mikro-System“ (Schmitt et al., 2020; Knerr et al., 2020) erfolgte am Beispiel des Wiesbach eine detaillierte und systematische Prüfung mehrerer Maßnahmenkombinationen zur Senkung der Gewässerbelastung, sowohl bezogen auf Phosphor als auch auf Spurenstoffe. Dazu wurden exemplarisch die beiden Gewässer Wiesbach und Lauter betrachtet, die von der Fließstrecke bis zur Mündung in den Glan bzw. die Nahe etwa die gleiche Fließstrecke aufweisen, aber sehr unterschiedlich geprägte Einzugsgebiete aufweisen (Abbildung 4).



Abbildung 4: Darstellung der detailliert betrachteten Gewässersysteme Laute rund Wiesbach (Schmitt et al, 2020)

Im Einzugsgebiet des Wiesbachs leben insgesamt 30.000 Einwohner, deren Abwasser verteilt auf neun Kläranlagen behandelt wird. Der Abwasseranteil im Gewässer ist dennoch verhältnismäßig hoch. Die betrachteten Maßnahmen beinhalteten eine weitergehende Reinigungsstufe, einen Retentionsbodenfilter zur weitergehenden Mischwasserbehandlung oder strukturelle Maßnahmen (Schließung von Kläranlagen und Überleitungen des Abwassers) für verschiedene Kombinationen (Abbildung 5).

Einzugsgebiet Wiesbach

Variante	Abfluss	Gau-Bickelheim 13.000 E		Flonheim 14.500 E		Ensheim 3.600 E		Nack- Niederwiesen 1.300 E	
		KA	MWE	KA	MWE	KA	MWE	KA	MWE
Ist	MQ	-	-	-	-	-	-	-	-
	MNQ	-	-	-	-	-	-	-	-
3	MQ	4.RS	-	-	-	-	-	-	-
4	MQ	4.RS	RBF	-	-	-	-	-	-
5	MQ	-	-	4.RS	-	-	-	-	-
6	MQ	-	-	4.RS	RBF	-	-	-	-
7	MQ	-	-	4.RS	RBF	-	-	ÜL	-
8	MQ	-	-	4.RS	RBF	ÜL	-	-	-
9	MQ	-	-	4.RS	RBF	ÜL	-	ÜL	-
10	MQ	4.RS	-	4.RS	-	-	-	-	-
11	MQ	4.RS	RBF	4.RS	RBF	-	-	-	-
12	MQ	4.RS	RBF	4.RS	RBF	ÜL	-	ÜL	-
13	MNQ	4.RS	-	-	-	-	-	-	-
14	MNQ	-	-	4.RS	-	-	-	-	-
15	MNQ	4.RS	-	4.RS	-	-	-	-	-



Abbildung 5: Mit Stoffflussbilanzierung untersuchte Maßnahmen zur Reduzierung der Spurenstoffbelastung im Einzugsgebiet des Wiesbach (Schmitt et al., 2020)

Durch die Umsetzung einer gezielten Spurenstoffelimination auf der KA Flonheim (80 % Elimination im Teilstrom) kann gemäß Bilanzmodell im Gewässer eine deutliche Verringerung der mittleren DCF-Konzentration von ca. 0,26 µg/l auf 0,08 µg/l erreicht werden (Abbildung 6, links). Durch weitere Maßnahmen wie der Überleitung der KA Nack-Niederwiesen und einer Reduzierung der Mischwasserentlastung könnte die mittlere Konzentration auf 0,05 µg/l reduziert werden. Auch in Bezug auf Phosphor wäre eine Verbesserung durch Reduzierung der Ablaufkonzentration auf 0,15 mg/l möglich. An der Einleitstelle der KA Flonheim könnte die P_{ges} -Gewässerkonzentration von 0,22 mg/l auf 0,15 mg/l reduziert werden (Abbildung 6, rechts).

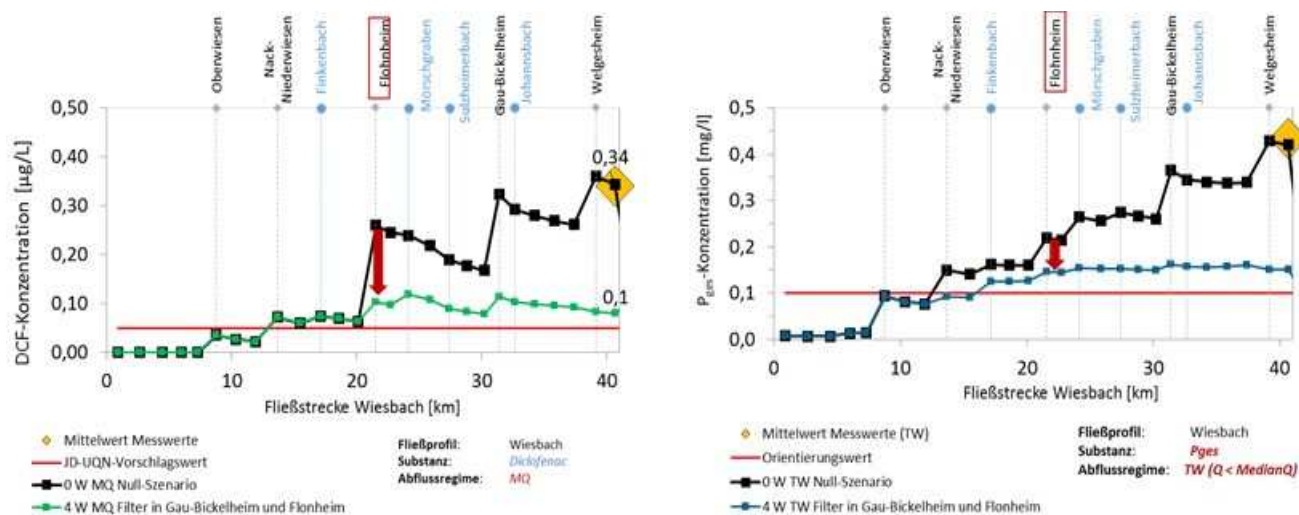


Abbildung 6: Einfluss einer erweiterten Abwasserreinigung auf die Gewässerkonzentrationen gemäß Stoffflussbilanzierungsmodell, links Diclofenac-Konzentrationen bei mittlerem Abfluss MQ, rechts: P_{ges} -Konzentrationen bei Trockenwetterabfluss im Gewässer, jeweils mit und ohne weitergehende Reinigungsstufe in Flonheim (Daten aus Schmitt et al., 2020)

Weitere Strategien zur Auswahl von Kläranlagen für eine weitergehende Spurenstoffelimination

Im Arbeitspapier „Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen in Baden-Württemberg“ (UM Baden-Württemberg, 2018) werden ebenfalls Kriterien für eine Priorisierung von Maßnahmen vorgeschlagen. Hier wird als eindeutiges Kriterium für den Ausbau der Fall genannt, dass in ein Gewässer eingeleitet wird, bei dem der Abwasseranteil im Abstrom der Kläranlage bei mittlerem Niedrigwasserabfluss (MNQ) größer als die Hälfte (50 %) des Gesamtabflusses ist. Als Kriterium zur Einzelfallprüfung wird hier ein Abwasseranteil bei MNQ größer als ein Drittel genannt (33 %). Ausnahmen seien hierbei jedoch Kläranlagen der Größenklasse (GK) 1 bis 3, bei denen aus Effizienzgründen bis auf weiteres kein Ausbau erforderlich ist.

Kriterien zur Prüfung einer weitergehenden Abwasserbehandlung bezüglich der Schutzbedürftigkeit des Gewässers und der Nutzungsanforderungen betreffen nach BMU/UBA (2019) insbesondere:

- Trinkwasserversorgung
- Ökologie des Gewässers oder Gewässer in ökologisch sensiblen Gebieten
- Nutzungsanforderungen wie z.B. Fischerei oder Brauchwassernutzung

In Bezug auf die Kosten sind Aspekte wie die Größe (Skaleneffekt), der Zustand ((Re-)Investitionsbedarf) und bauliche Voraussetzungen zu beachten. Inwieweit die betrachtete KA im Kontext der Kläranlagen eines Gewässersystems und weiterer Belastungsquellen von Bedeutung hinsichtlich der Gewässerbelastung mit relevanten Spurenstoffen ist, ist nach BMU/UBA (2019) zu prüfen.

Bezogen auf die Spurenstofffracht besteht auf großen Kläranlagen ein höheres Eliminationspotential. Wird jedoch ein qualitätsbezogener Ansatz verfolgt, erreichen Maßnahmen auf einer kleinen KA im Oberlauf eines Gewässersystems eine Verbesserung für viele Fließkilometer.

2 RAHMENBEDINGUNGEN SPURENSTOFFE

2.1 Relevanz von Spurenstoffen

Als Spurenstoffe werden organische oder synthetische organische Substanzen bezeichnet, die im Mikro- bis Nanogrammbereich pro Liter in den Wasserkörpern nachgewiesen werden und teilweise bereits in diesen sehr niedrigen Konzentrationen nachhaltige Wirkungen auf die aquatischen Ökosysteme haben können (u. a. Bergmann und Götz, 2013; UBA, 2015). Bei diesen Stoffen handelt es sich u. a. um Arzneimittelwirkstoffe, synthetische Hormone, Geruchsstoffe, Pestizide (Pflanzenschutzmittel und sonstige Biozide) sowie mineralische Brenn- und Treibstoffe.

Der Stoffeintrag von Spurenstoffen in die Gewässer erfolgt aufgrund der großen Stoffvielfalt über mehrere Eintragspfade (vgl. Abbildung 7). Diese unterteilen sich als punktförmige und diffuse Quellen in die Teilbereiche: Regenentlastung, Leckagen in Kanalnetzen, Landwirtschaft (Wirtschaftsdünger, Pestizideinsatz), Kläranlagenabläufe (Siedlungsgebiete) sowie Sickerwasser von Deponien oder Altlasten.

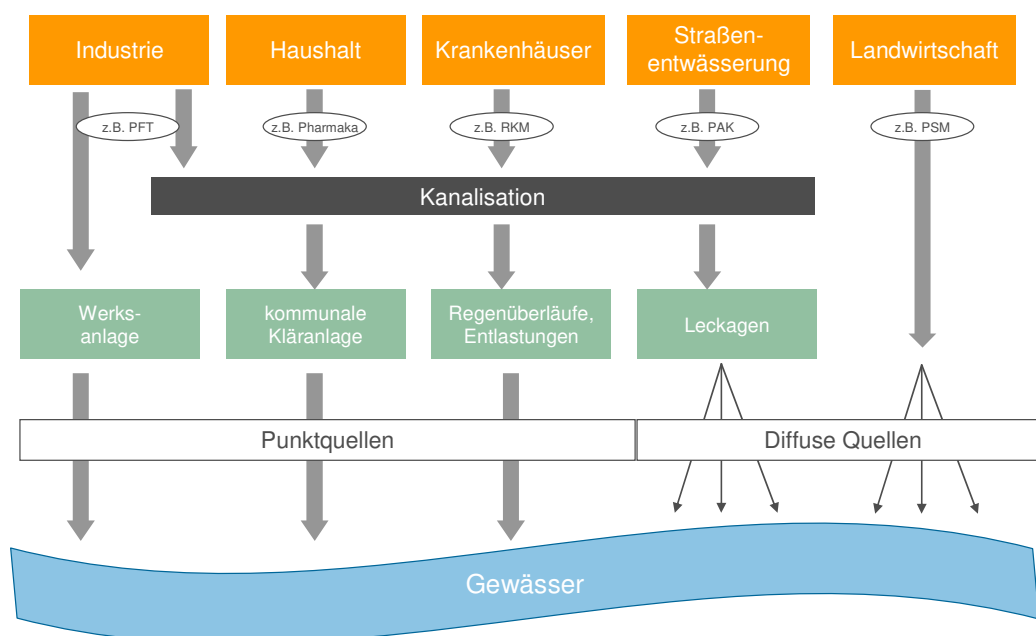


Abbildung 7: Mögliche Eintragspfade von Spurenstoffen

Bereits in den bestehenden Reinigungsstufen einer KA kommt es zu einer teilweisen Elimination von Spurenstoffen durch Verflüchtigung (Strippung), biochemischen Abbau und Sorption an Partikel oder Belebtschlamm. Ein hohes Schlammalter in der biologischen Stufe, eine Kaskadierung und damit ein hoher Konzentrationsgradient sowie eine möglichst weitgehende Suspensatentnahme, beispielsweise durch eine Filtrationsstufe, wirken sich positiv auf eine Spurenstoffelimination aus (Bode et al., 2010). Für eine deutliche und gezielte Reduzierung der Einträge der meisten relevanten Spurenstoffe reichen diese Entnahmeleistungen der konventionellen Abwasserbehandlung jedoch nicht aus.

Mehrere Studien weisen KAn als Haupteintragspfad für viele Spurenstoffe aus, da insbesondere Humanpharmaka durch ihre häusliche Anwendung sowie eine Vielzahl von Bioziden durch die Verwendung im Fassadenbau und auf privaten Verkehrsflächen abwasserbürtig sind. Eine erweiterte Reinigungsstufe auf den Kläranlagen bietet sich aus diesem Grund zwar als „End-of-pipe“-Maßnahme grundsätzlich an, im Sinne einer effizienten Reduzierung der Stofffrachten wird jedoch vielfach darauf hingewiesen, dass auch dezentrale und quellenorientierte Maßnahmen zu berücksichtigen sind (UBA, 2015). Auf die verfahrenstechnischen Möglichkeiten zur erweiterten Abwasserreinigung wird explizit in Kapitel 2.3 eingegangen, da diese technischen Ansätze Fokus der vorliegenden Studie sind.

2.2 Rechtliche und politische Rahmenbedingungen

Aktuelle Anforderungen aus der WRRL und der Oberflächengewässerverordnung

Die Europäische Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) bzw. die Tochterrichtlinie 2013/39/EU listet prioritäre bzw. prioritär gefährliche Stoffe auf, deren Einleitung in Gewässer schrittweise reduziert werden muss. Um einen guten chemischen Zustand eines Oberflächengewässers zu erreichen, darf u. a. keiner dieser Stoffe die für ihn festgelegte Umweltqualitätsnorm (UQN) überschreiten.

Arzneimittelwirkstoffe sind noch nicht in regulären Überwachungsprogrammen nach der WRRL oder der nationalen Oberflächengewässerverordnung (OGeVV) enthalten und stehen nicht auf der Liste der prioritären Stoffe. Der chemische Zustand eines Gewässers gibt daher keinen Aufschluss über eine Belastung mit Arzneimittelwirkstoffen.

EU-Beobachtungsliste

Die europäische Kommission erstellt jedoch eine Beobachtungsliste von Stoffen für eine unionsweite Überwachung, auf der sich unter anderem Arzneimittelwirkstoffe befinden. Das bedeutet, dass diese systematisch an Messstellen in ganz Europa erfasst werden, um ein repräsentatives Bild der Umweltbelastung durch diese Wirkstoffe zu bekommen. Diese sogenannte „EU Watch List“ trägt dazu bei, den Handlungsbedarf für die Aufnahme der Wirkstoffe in die Liste der prioritären Stoffe zu ermitteln (UBA, 2018).

Die Antibiotika Amoxicillin und Ciprofloxacin, die Hormone 17 α -Ethinylestradiol und 17 β -Estradiol sowie drei Makrolid-Antibiotika (Erythromycin, Clarithromycin und Azithromycin) stehen gemäß Durchführungsbeschluss (EU) 2018/840 auf der aktuellen EU Watch List.

Die EU Watch List wird alle zwei Jahre aktualisiert, ein Stoff darf maximal vier Jahre auf der Liste bleiben (UBA, 2019). Das Schmerzmittel Diclofenac stand auf der ersten EU Watch List. Hierfür liegen nun ausreichend Überwachungsdaten für das Priorisierungsverfahren der WRRL vor.

Die Aktivitäten im Umweltausschuss des Europäischen Parlaments verdeutlichen die Relevanz der Reduzierung von Einträgen an Arzneimittelwirkstoffen in Gewässern und lassen darauf schließen, dass weitergehende Reinigungsstufen zur Spurenstoffelimination zukünftig auf europäischer Ebene verpflichtend eingeführt werden könnten.

Stakeholder-Dialog des Bundes und Spurenstoffabgabe im neuen Abwasserabgabengesetz

Für die nationale Umsetzung in Deutschland ist auf Bundesebene insbesondere der Spurenstoff-Dialog unter Beteiligung der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) zu nennen. Im Rahmen des Dialogs mit den Stakeholdern wurde auch festgestellt, dass die Abwasserabgabe einer Modernisierung und Anpassung bedarf (BMU/UBA 2017, 2019). Aus diesem Grund hat das BMU einen Entwurf für die Novelle des Abwasserabgabengesetzes (AbwAG-E) vorgelegt (Stand 12.01.2020). Die Novelle beinhaltet in den §§ 13 und 14 AbwAG-E eine neue pauschalisierte eigenständige Spurenstoffabgabe (bzw. Spurenstoffabgabe). Es wird vorgeschlagen, dass Anlagen, die eine prozentuale Elimination von 80 % der in Anlage 2 zum AbwAG-E aufgeführten Spurenstoffe vorweisen, von der Spurenstoffabgabe befreit sind. Dadurch soll ein finanzieller Anreiz für die Integration einer weitergehenden Reinigungsstufe geschaffen werden.

Weitere Hinweise für eine Fokussierung der Politik auf Spurenstoffreduktion finden sich in:

- Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR): mindestens 30 % Reduktion bis 2030
- Fortschreibung Kommunalabwasserrichtlinie: Spurenstoffe sollen mit aufgenommen werden
- EU Green Deal: „Null-Schadstoffziel für eine Schadstofffreie Umwelt“

2.3 Technische Rahmenbedingungen

Verfahrensansätze

Die gezielte Elimination von Spurenstoffen auf kommunalen Kläranlagen kann über verschiedene verfahrenstechnische Ansätze erfolgen (Abbildung 8). Die Ansätze teilen sich in adsorptive Verfahren, oxidative Verfahren und physikalische Verfahren auf. Daneben gibt es noch eine Reihe von Kombinationsmöglichkeiten u. a. auch mit Berücksichtigung von Bodenfiltern. Auf eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Verfahren wird an dieser Stelle verzichtet und auf die Fachliteratur verwiesen. Es folgt aber eine kurze Zusammenfassung der prinzipiellen Wirkmechanismen und Verfahrensunterschiede. Außerdem werden die notwendigen Nachbehandlungsstufen sowie der derzeitige Verbreitungsstand der Verfahren beschrieben.

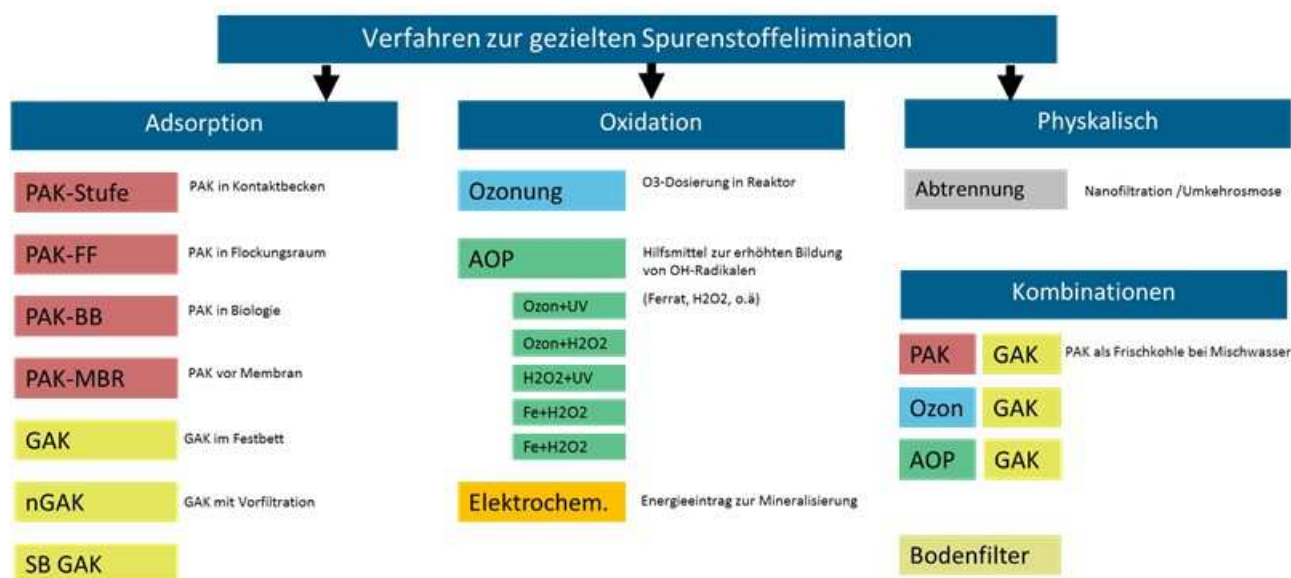


Abbildung 8: Verfahren zur gezielten Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen

Die verschiedenen **Adsorptionsverfahren** basieren auf einem Gleichgewichtsprozess, bei dem sich im Abwasser gelöste Substanzen bis zu einem Gleichgewichtszustand auf der Oberfläche des Adsorbens (Aktivkohle) anlagern. Das mit Schadstoffen beladene Adsorbens muss anschließend aus dem System entnommen werden. Dies erfolgt entweder über Dosierung von feiner Pulveraktivkohle (PAK), die mit dem Überschussschlamm entnommen wird, oder über eine Festbettfiltration mit granulierter Aktivkohle (GAK), die regelmäßig ausgetauscht wird.

Durch die **oxidativen Verfahren** werden die gelösten Substanzen chemisch verändert und dabei partiell oxidiert, wodurch Transformationsprodukte ohne oder mit reduzierter schädlicher Wirkung entstehen. Eine vollständige Mineralisierung wird in der Regel nicht erreicht. Die Oxidation kann beispielsweise durch Zugabe von Ozon (O₃) erfolgen, das einerseits direkt mit den Wasserinhaltsstoffen und andererseits indirekt über den Zerfall in Hydroxyl-Radikale (ARGE "Envelos", 2011) wirkt. Ozon reagiert auch mit den organischen (z. B. CSB, DOC) und mit anorganischen Inhaltsstoffen (z. B. Nitrit) (Abegglen und Siegrist, 2012). Das Gas ist sehr instabil und muss daher direkt am Einsatzort aus getrockneter Luft oder flüssigem Sauerstoff erzeugt werden.

Die **physikalischen Verfahren** wie Nanofiltration und Umkehrosiose werden in erster Linie nicht Spurenstoffelimination in der Abwasserbehandlung eingesetzt, da der Energieverbrauch aufgrund des benötigten Drucks sehr hoch ist und das Permeat als Restprodukt noch zusätzlich entsorgt werden muss.

Je nach Verfahrensart bestehen unterschiedliche Optionen zur Einbindung in den Prozess der Abwasserreinigung. Grundsätzlich handelt es sich dabei eher um nachgeschaltete Verfahren, die mechanisch-biologisch gereinigtes Abwasser behandeln.

Die nachfolgende Tabelle 1 gibt einen Überblick über die verschiedenen Lösungsmöglichkeiten zur weitergehenden Spurenstoffelimination.

Für eine detaillierte Beschreibung der Verfahren mit Auslegungsparametern, Energieverbrauch, Kosten, Reinigungsleistungen und Referenzprojekten wird z. B. auf den Schlussbericht des Projektes „Mikro-N - Relevanz, Möglichkeiten und Kosten einer Elimination von Spurenstoffen auf kommunalen Kläranlagen in Rheinland-Pfalz, aufgezeigt am Beispiel der Nahe“ verwiesen (Schmitt et al., 2016).

Tabelle 1: Überblick über Verfahren zur Spurenstoffelimination (Schmitt et al., 2016)

Varianten		Beschreibung	Fließbild
Adsorption	PAK-Stufe	PAK-Zugabe in Kontaktbecken mit Absetzbecken	
	PAK-FF	PAK-Zugabe in Flockungsraum	
	PAK-BB	PAK-Zugabe in Biologie	
	GAK	Austausch Filtermaterial durch GAK	
	nGAK	nachgeschalteter GAK-Filter	
Oxidation	Ozonung	nachgeschalteter Ozonreaktor	
	AOP	z. B: H2O2 + UV (mit Nachbehandlung und Vorfilter)	
Kombination	Ozon + GAK	Ozonreaktor mit nachgeschaltetem GAK-Filter	
Filtration	Nano-filtration/ Umkehr-osmose	UF/NF	

Nachbehandlung

Der Einsatz von Ozon erfordert zur Sicherheit einen nachgeschalteten biologischen Abbau der gebildeten Transformationsprodukte (DWA, 2014). Dies ist bei Aktivkohle nicht erforderlich, allerdings bedingt der Einsatz von PAK die Abtrennung der feinen Kohlepartikel aus dem Abwasserstrom. Bei GAK als Adsorptionsmaterial ist keine Nachbehandlung erforderlich. Der Materialverlust durch Abrieb ist gering. Allerdings kann es bei GAK sinnvoll sein, eine Vorfiltration anzuordnen, um die Prozesse der Feststoffabtrennung und Adsorption zu trennen (Bornemann et al., 2015). Einen Überblick über die Nachbehandlungsverfahren bei Einsatz von Ozon und PAK gibt folgende Abbildung 9.

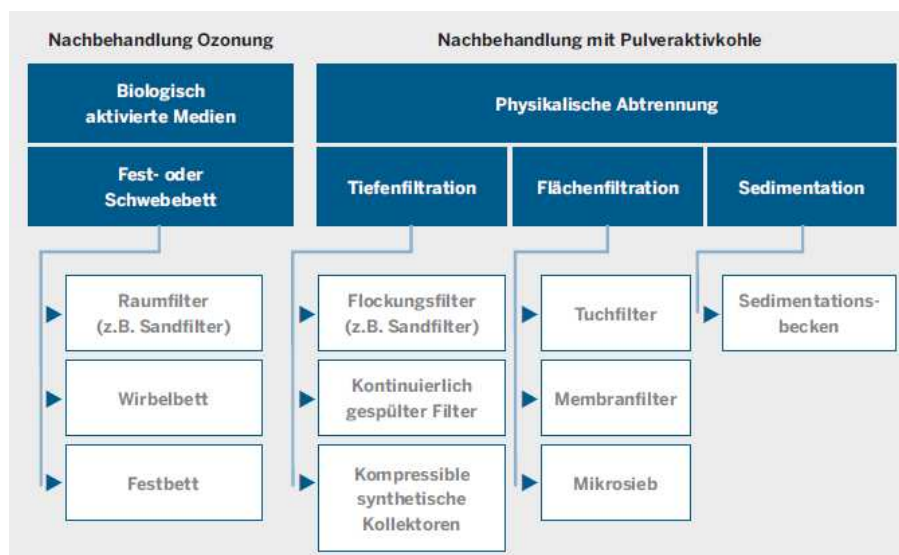


Abbildung 9: Überblick über Nachbehandlungsstufen für Ozon oder Pulveraktivkohle (KOM.M-NRW, 2016)

Verbreitung der Verfahren

Derzeit werden in Deutschland, Schweiz und Österreich insgesamt 38 Anlagen zur gezielten Spurenstoff-elimination betrieben und weitere 42 sind in Planung oder in Bau. Zudem gibt es mindestens 20 Forschungsprojekte (VSA, 2021). Sehr oft kommen PAK-Verfahren und Ozonanlagen zum Einsatz. Derzeit nehmen aber für große Anlagen Kombinationsverfahren, insbesondere O_3 / GAK zu.



Abbildung 10: Übersichtskarte zu den aktuellen Anlagen zur Spurenstoffelimination (VSA, 2021)

2.4 Synergien zu Phosphor-Elimination

Die Verfahren zur gezielten Spurenstoffelimination benötigen in der Regel eine Abwasserfiltration. Entweder in Form eines Festbettfilters mit granulierter Aktivkohle, eines Sand- oder Tuchfilters zum Rückhalt von Pulveraktivkohle oder eines biologisch aktivierten Filters zur Nachbehandlung und zum Abbau von Transformationsprodukten. Zum Teil werden auch Hilfsstoffe wie Fäll- und Flockungsmittel eingesetzt.

Die Filtration begünstigt auch den Rückhalt von partikulär gebundenem Phosphor (X_P). Gleichzeitig werden bei Zugabe von Hilfsstoffen auch PO_4 -P-Verbindungen in X_P überführt, so dass auch gelöster Phosphor zusätzlich zurückgehalten wird.

Die weitergehende Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination kann somit auch direkt als Kombination zur Phosphor- und Spurenstoffelimination geplant werden. Es ist beispielsweise ein gestufter Ausbau denkbar, bei dem zunächst nur die Phosphor-Elimination im Fokus steht. Es ist jedoch wichtig, für die spätere Integration der Spurenstoffelimination einige Randbedingungen bei der Planung bzw. Realisierung der Stufe zur weitergehenden Phosphor-Elimination zu beachten. Beispielsweise kann ein Tuchfilter die kostengünstigere Option gegenüber einer Sandfiltration darstellen, allerdings eignet sich der Tuchfilter nicht für eine biologische Nachbehandlung im Ablauf einer Ozonbehandlung.

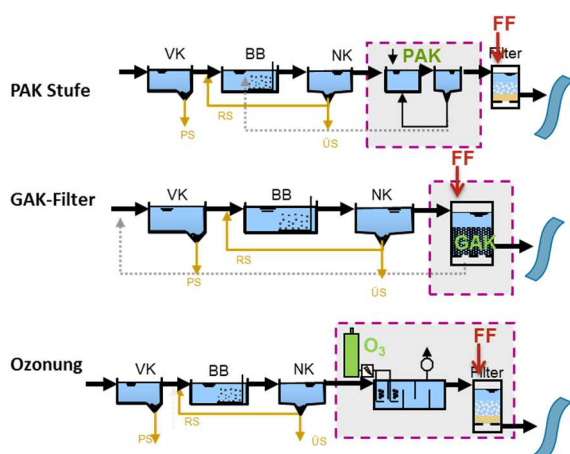


Abbildung 11: Exemplarische Darstellung für ausgewählte 4. Reinigungsstufen, die jeweils auch einen Flockungsfilter mit Fällmittelzugabe beinhalten

2.5 Klimarelevante Aspekte

Eine weitergehende Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination verursacht einen Mehrverbrauch an Strom und Ressourcen. Je nach Verfahren kann dieser Mehrverbrauch unterschiedlich ausfallen und sollte bei der Entscheidungsfindung für die Wahl des Verfahrens berücksichtigt werden.

Klimarelevante Aspekte sind hierbei:

- Kumulierter Energieaufwand (fossil + nuklear = nicht-erneuerbar)
- Treibhausgaspotenzial (CO_2 -Fußabdruck in CO_2 -äquivalenten Emissionen)

Neben der Wahl des Verfahrens beeinflussen verschiedene örtliche Randbedingungen den Energieaufwand und das Treibhausgaspotenzial. Dazu zählen die notwendige Förderhöhe, die Abwassermatrix, Lieferentfernungen, der örtliche Strommix etc. Im Mittel liegt pro behandelten m^3 Abwasser die CO_2 -Belastung bei 0,14 bis 0,86 $kg CO_2$ -eq/ m^3 Abwasser (Abbildung 12)

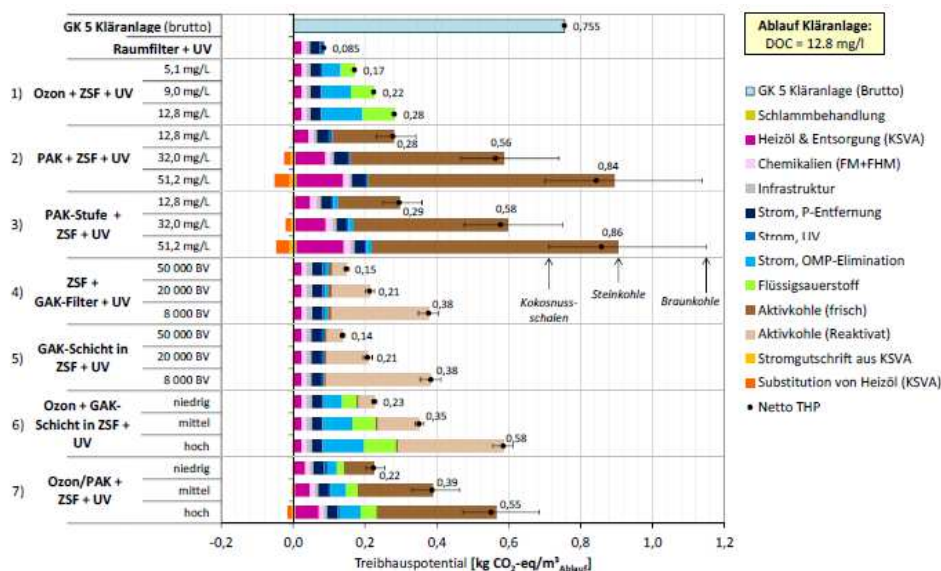


Abbildung 12: Treibhausgaspotential verschiedener Verfahren zur Spurenstoffelimination (Remy et al., 2015)

Einflüsse auf den CO₂-Fußabdruck bei Adsorptionsverfahren

Der spezifische Stromverbrauch für eine PAK-Adsorptionsstufe liegt zwischen 1,3 bis 4,0 kWh/E/a. Hinzu kommen 2,5 bis 6,0 kWh/E/a für den Betrieb einer Raumfiltration, sofern diese noch nicht vorhanden ist. Eine PAK-Stufe erhöht den Stromverbrauch damit um etwa 7,0 kWh/E/a. Neben dem Stromverbrauch muss für die Herstellung und den Transport der Aktivkohle Energie aufgewendet werden.

Der CO₂-Footprint der Aktivkohle (AK) hängt dabei von dem Verfahren und dem Ausgangsstoff (Stein-/Braunkohle, Kokussnussschalen, Holz, Torf, etc.) ab. Die Aktivierung ist energieintensiv und verbraucht etwa 3,5 bis 6,5 kg Kohle pro kg Aktivkohle. Der CO₂-Fußabdruck von frischer Aktivkohle liegt daher bei etwa 5 bis 18 kg CO_{2e}/kg AK je nach Ausgangsprodukt. (DWA, 2016).

Bei dem Einsatz von GAK ist eine Reaktivierung möglich. Dabei werden die gebundenen Schadstoffe desorbiert und entfernt. Der Verbrennungsprozess der organischen Schadstoffe ist nicht energieautark, d.h. es muss Energie zugeführt werden. Zudem gibt es einen Abbrandverlust, der durch Frischkohle ersetzt werden muss. Insgesamt liegt der CO₂-Fußabdruck von Reaktivat im Vergleich zu Frischkohle dennoch um den Faktor 5 bis 10 niedriger. Je nach Aktivkohle und Ausgangsprodukt beträgt der CO₂-Fußabdruck des Reaktivats daher bei 1 bis 4 kg CO_{2e}/kg AK.

Einflüsse auf den CO₂-Fußabdruck bei Oxidationsverfahren

Eine Ozonbehandlung hat einen hohen Stromverbrauch von 0,04 bis 0,17 kWh/m³. Der Verbrauch hängt dabei von der notwendigen Förderhöhe und der erforderlichen Dosiermenge ab (ARGE "Envelos" II, 2015). Zudem werden für die Herstellung von 1 kg Ozon etwa die zehnfache Menge an Sauerstoff benötigt, der zumeist als Flüssigsauerstoff extern hergestellt und vor Ort in Lagertanks transportiert wird. Erfolgt die Herstellung von Ozon aus Luftsauerstoff, ist der Energieaufwand deutlich höher. Alternativ kann auch auf Sauerstoff eingesetzt werden, welches als Nebenprodukt einer Wasserstoffherstellung mittels Elektrolyse anfällt. Hierbei ist aber ggf. eine Aufbereitung (Trocknung) des Sauerstoffs erforderlich, um die Anforderungen des Ozongenerators zu erfüllen.

Erschließung neuer Energiequellen und Nutzung noch vorhandener Energieeinsparpotentiale

Es besteht der Anspruch, den Mehrbedarf an Energie zur Entfernung von Spurenstoffen durch einen Ausbau der Anlagen zur Energieerzeugung (Biomasse; Photovoltaik) oder durch eine Nutzung noch vorhandener Einsparpotentiale zu decken. Dies sollte bei einer Umsetzung geprüft werden.

3 VORUNTERSUCHUNGEN UND ÖRTLICHE RANDBEDINGUNGEN

3.1 Beschreibung Kläranlage Flonheim

Die KA Flonheim hat eine Ausbaugröße von 14.500 E. Die Anlage ist jedoch auch für eine Belastung von 60.000 E im Spitzenlastfall (Weinkampagne) bemessen. Die aktuelle mittlere Belastung beträgt, bezogen auf eine einwohnerspezifische CSB-Fracht von 120 g/E/d 22.807 E Die Anlage verfügt über ein Kombibecken mit außenliegender Belebung und innenliegender Nachklärung mit simultaner aerober Schlammstabilisierung. Das mechanisch-biologisch gereinigte Abwasser wird dem Wiesbach als dem natürlichen Vorfluter zugeführt, der Klärschlamm wird derzeit landwirtschaftlich verwertet.



Abbildung 13: Luftbild der Kläranlage Flonheim ([www. Zweckverband-abwasserentsorgung-rheinhausen.de](http://www.Zweckverband-abwasserentsorgung-rheinhausen.de))

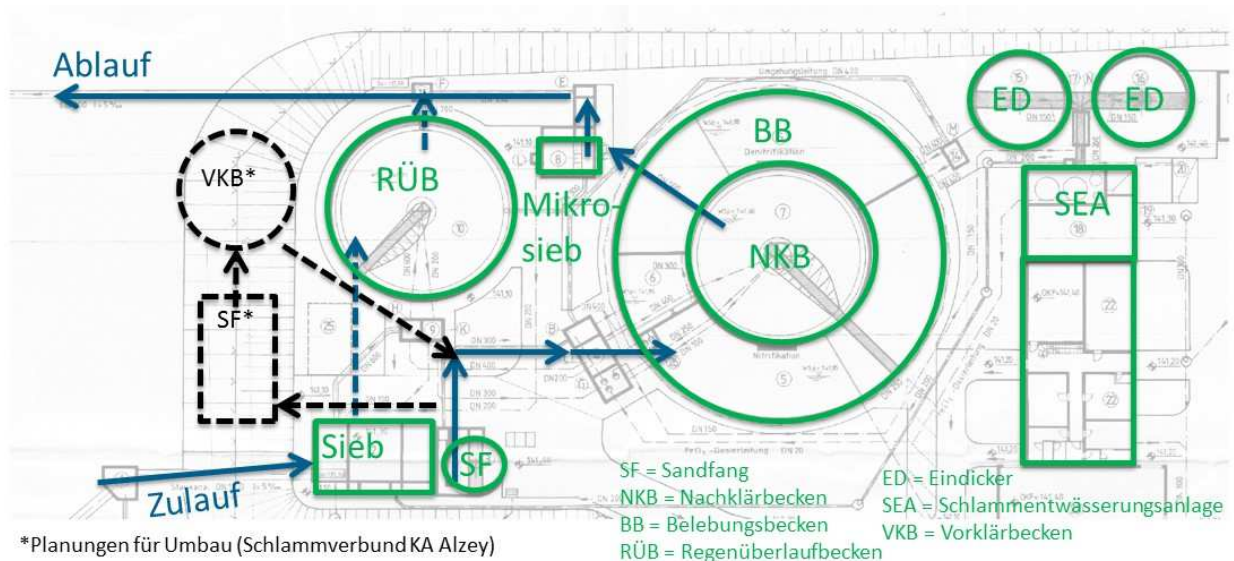


Abbildung 14: Lageplanschema der Kläranlage Flonheim mit Skizzierung des Wasserwegs

Anlagendaten

Die Anlagendaten der Kläranlage Flonheim sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 2: Kenngrößen KA Flonheim

Kenngröße	Abk.	Wert	Einheit	Quelle
Ausbaugröße	EW _{Normallast} EW _{Kampagne}	14.500 60.000	[E]	Genehmigung
Aktuelle Belastung im Mittel	EW _{120, MW}	22.807	[E]	Auswertung 2018-2020
Aktuelle Belastung 85% Perzentil	EW _{120,85%}	32.156	[E]	Auswertung 2018-2020
Jahresabwassermenge	JAM	817.198	[m ³ /a]	Mittelwert (2018 - 2020)
Jahresschmutzwassermenge	JSM	620.221	[m ³ /a]	Mittelwert (2018 - 2020)

Einzugsgebiet

Das Einzugsgebiet der KA umfasst die Ortsgemeinden Bornheim, Lonsheim, Erbes-Büdesheim und Flonheim mit Uffhofen der Verbandsgemeinde Alzey-Land sowie der zur Verbandsgemeinde Wöllstein gehörende Ortsgemeinde Wendelsheim. Zusätzlich werden in dem Kanalsystem vier Regenüberläufe, ein Regenüberlaufbecken und zwei Stauraumkanäle betrieben.

Weinbau

In dem Einzugsgebiet der KA Flonheim wird intensiv Weinbau betrieben. Während der Kampagne entstehen hierdurch Belastungen von bis zu 80.000 E.

Indirekteinleiter

In Bezug auf die untersuchten Spurenstoffe sind insbesondere Krankenhäuser von Bedeutung. Im Einzugsgebiet der KA Flonheim befinden sich keine Krankenhäuser. Als größeren Indirekteinleiter gibt es aber eine Großwäscherei in Wendelsheim mit mehr als 50 Mitarbeitern.

Regenüberlaufbecken

Die Zuflüsse über 240 m³/h werden mit extra Regenwetterpumpen in ein rundes Regenüberlaufbecken (20 m Durchmesser, 2,9 m Wassertiefe) gefördert. Der Überlauf des Beckens gelangt in die Ablaufleitung zum Wiesbach.

Mechanische Reinigungsstufe

Das Abwasser wird zunächst mit einer Feinsiebanlage mit 2,0 mm Spaltweite und anschließend in einem belüfteten Rundsandfang (Durchmesser 6,0 m) mechanisch gereinigt. Eine Vorklärung als Absetzstufe ist nicht vorhanden.

Biologische Reinigungsstufe

Die biologische Abwasserreinigung befindet sich im Außenring des Kombibeckens. Das Belebungsbecken hat ein Volumen von 3.600 m³ bei 5 m Wassertiefe und ist in fünf Kaskaden unterteilt. Die vorderste Kaskade wird als anoxisches Becken zur P-Rücklösung mit Zugabe des Rücklaufschlammes betrieben. Die zweite Kaskade dient als vorgeschaltete Denitrifikation mit Zugabe der Rezirkulationswassermenge, die dritte Kaskade ist als Kombibecken (Nitrifikation/Denitrifikation) vorgesehen und die letzten beiden Zonen dienen als belüftete Becken zur Nitrifikation.

Nachklärung

Die Nachklärung befindet sich im Innenring des Kombibeckens ($V = 1.525 \text{ m}^3$). Der Rücklaufschlamm wird über zwei Tauchmotorpumpen in den Zulauf der Belebungsbecken gefördert und der Überschussschlamm gelangt in zwei Schlammstapelbehälter.

Filtration

Der Nachklärung ist ein zusätzliches Mikrosieb nachgeschaltet (Abbildung 15). Dabei handelt es sich um ein Mikrotrommelsieb mit dem Baujahr 1993 (Fa. Passavant). Das Abwasser wird in das Innere der Trommel geleitet, die sich langsam dreht. Dabei bildet sich eine Filtrationsschicht, die zusätzlich zu dem Siebgewebe Feststoffe zurückhält. Als Siebgewebe wird Polyester mit $20 \mu\text{m}$ Porenweite eingesetzt. Bei zunehmender Belegung steigt der Differenzdruck und es wird eine automatische Reinigung über eine Abspritzvorrichtung aktiviert. Die Reinigung erfolgt im laufenden Betrieb, so dass keine Stillstandzeiten (nur für den Austausch des Gewebes) erforderlich sind. Der Durchsatz liegt bei maximal $150 \text{ m}^3/\text{h}$. Ziel der Mikrosiebung ist eine Verbesserung der Ablaufqualität (Feststoffe, Phosphor).

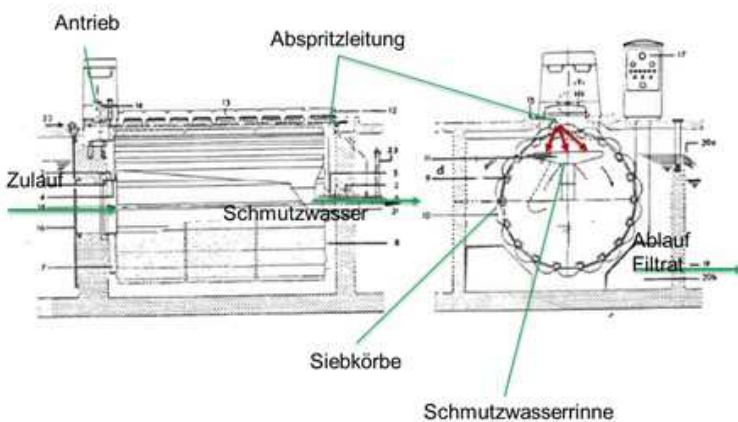


Abbildung 15: Schnittzeichnung Vorhandenes Mikrosieb

Schlammbehandlung

Der simultan aerob stabilisierte Belebtschlamm wird einem Stapelbehälter zugeführt und anschließend landwirtschaftlich verwertet. Bei sehr hoher Belastung während der Weinbaukampagne kann die aerobe Stabilisierung in der Biologie unzureichend sein, daher gibt es die Möglichkeit einer Nachbelüftung in den Eindrückern. Der eingedickte und stabilisierte Schlamm wird anschließend mittels Kammerfilterpresse entwässert.

Überwachungswerte

Die Überwachungswerte (ÜW), die für das eingeleitete Abwasser einzuhalten sind, sind in Tabelle 3 aufgeführt. Die ÜW werden ganzjährig sicher eingehalten.

Tabelle 3: Überwachungswerte für die Kläranlage Flonheim gemäß aktuellem Erlaubnisbescheid

Parameter	Einheit	Überwachungswert	
		01.03.-31.08.	01.09.-28/29.02.
CSB	mg/l	48	60
BSB ₅	mg/l	15	15
N _{ges,anorg.}	mg/l	9,0	18
NH ₄ -N	mg/l	5 (> 12°C)	5 (> 12°C)
P _{ges}	mg/l	1,0	1,0

3.2 Auswertung relevanter Betriebsdaten

Zulaufwassermenge

Die tägliche Zulaufwassermenge der KA Flonheim beträgt $Q_{d,aM} = 2.430 \text{ m}^3/\text{d}$. Die Wassermenge bei Trockenwetter wurde nach Arbeitsblatt A 198 (ATV-DVWK, 2003) bestimmt. Als Trockenwettertag gelten hierbei die Tage, an denen der Zulauf bis zu 20 % über der Minimallinie (21 Tage-Minimum) liegt. Im Mittel ergibt sich ein Trockenwetterzufluss von rund $1.722 \text{ m}^3/\text{d}$ (Abbildung 16). Der Monatsmittelwert der Trockenwetterwassermenge bei Bemessungstemperatur von 12°C ($Q_{d,konz}$) liegt mit $2.661 \text{ m}^3/\text{d}$ allerdings vergleichsweise hoch. Dies ergibt sich aus hohen Zuflüssen im Frühjahr 2018 und Anfang 2020, die im genannten Temperaturbereich lagen. Die stündliche Abwassermenge beträgt maximal $240 \text{ m}^3/\text{h}$ (Q_m) und im Mittel $100 \text{ m}^3/\text{h}$ ($Q_{h,aM}$). Die maximale Trockenwetterzulauf liegt bei $140 \text{ m}^3/\text{h}$ ($Q_{t,hmax}$)

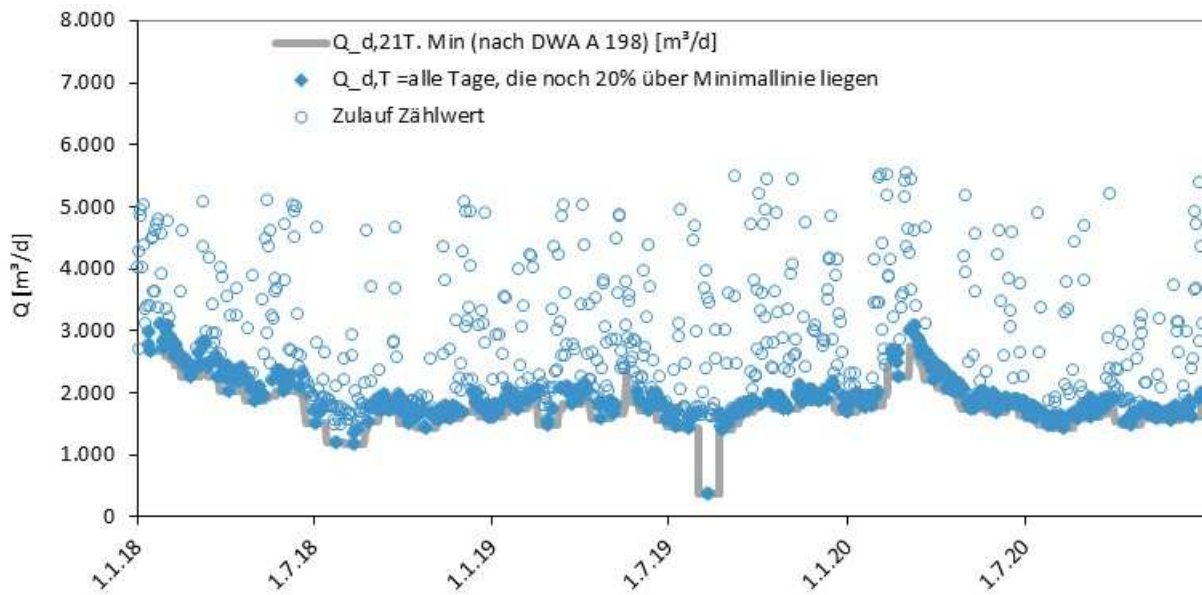


Abbildung 16: Tägliche Zulaufwassermengen mit Auswertung der Trockenwettertage

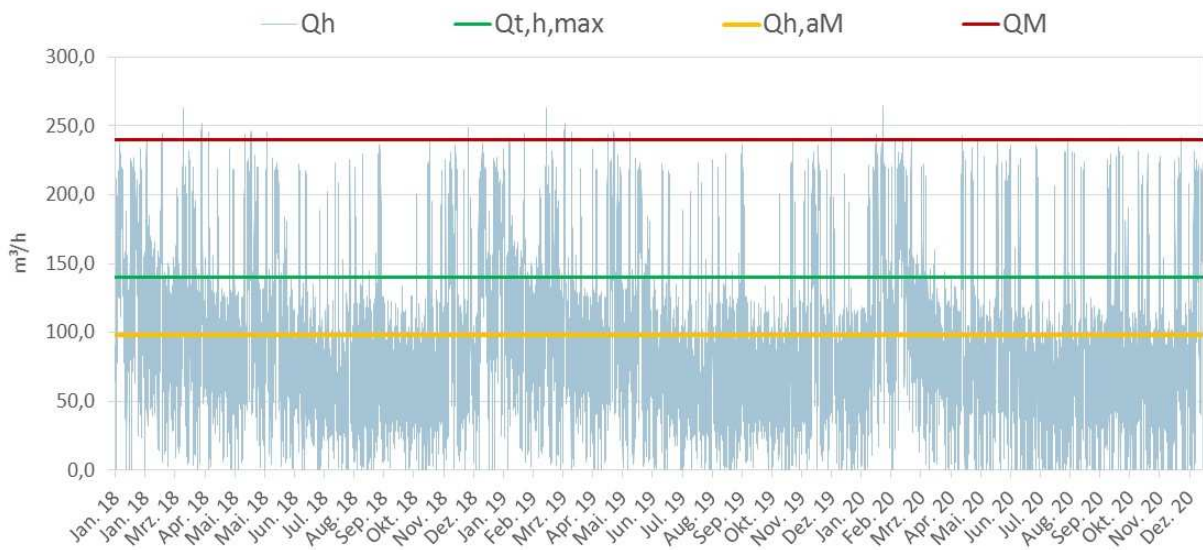


Abbildung 17: Stündliche Zulaufwassermengen

Belastungsdaten Zulauf Kläranlage

Es wurden Betriebsdaten über drei Jahre von 2018 bis 2020 ausgewertet. Die Daten wurden aus den zur Verfügung gestellten Betriebstagebüchern entnommen. Die Auswertung der Zulaufbelastung als 85-Perzentilbelastung über die gesamte Zeit ergibt eine Belastung bezogen auf den CSB von 32.156 E₁₂₀ (Tabelle 4). Der Unterschied zu den 14.944 E_{1,8} für den Parameter P_{ges} zeigt deutlich den großen Einfluss der Weinkampagne. Der Kampagnenzulauf ist sehr regelmäßig im März und September (Abbildung 18). Die CSB-Ablaufkonzentrationen sind trotz Kampagneneinfluss relativ konstant (Abbildung 19).

Tabelle 4: Belastungsdaten Zulauf Kläranlage

Zulauf Kläranlage (2018-2020)		BSB ₅	CSB	AFS*	P _{ges}	N _{ges} **	NH ₄ -N	N _{org}
Mittelwert	B _d [kg/d]	1.654	2.737	627	21	99	61	37
85-Perzentilwert	B_d [kg/d]	2.554	3.859	792	27	124	78	47
Mittelwert	C [mg/l]	751	1.215	284	9	45	28	12
Anzahl	[-]	60	122	-	122	-	113	-
EW (85-Perz.)	[E]	42.571	32.156	11.308	14.944	11.308		
spez EW-Fracht	[g/(E*d)]	60	120	70	1,8	11		

* AFS über Verhältniswert 70/11 auf Basis g/E/d N_{ges}
 ** N_{ges} über Verhältnis TKN zu NH₄ anhand 12 Monatsstichproben 2020

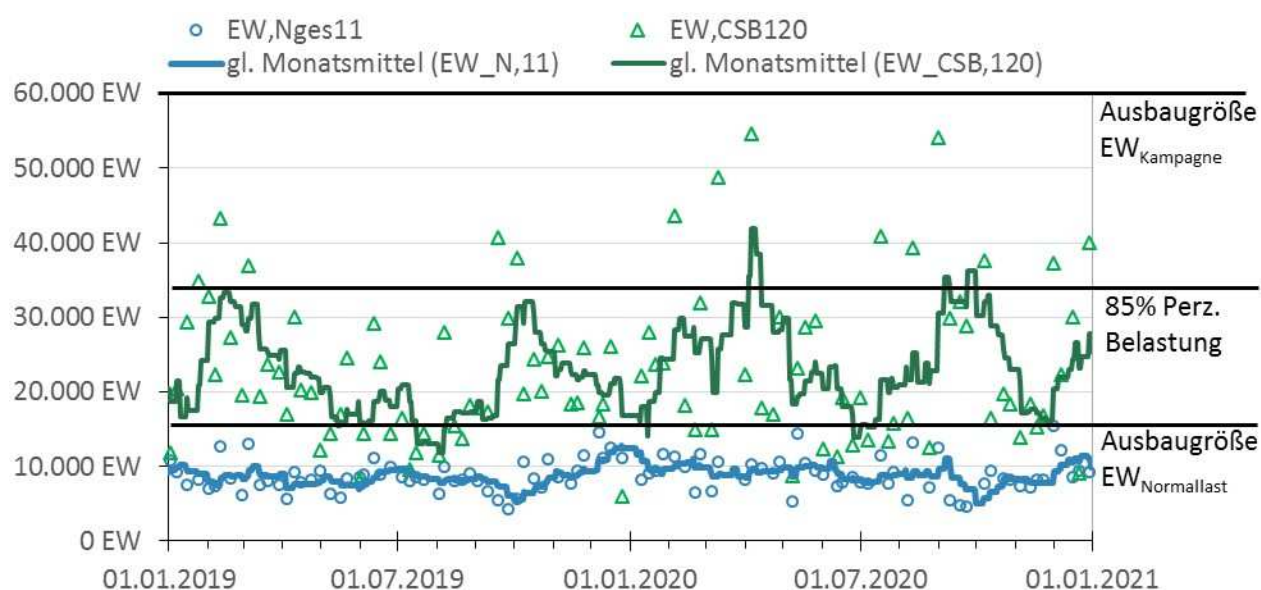


Abbildung 18: Zulauffrachten als Einwohnergleichwerte für CSB und N_{ges} mit gleitendem Monatsmittelwert

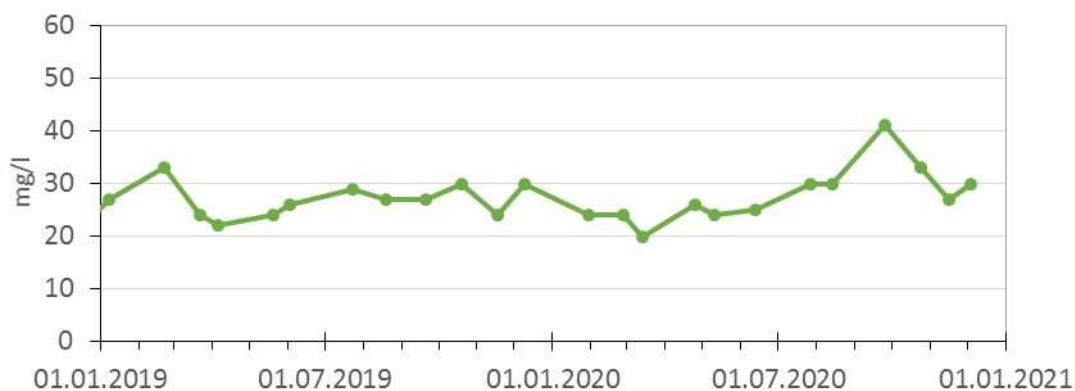


Abbildung 19: CSB-Ablaufkonzentrationen

3.3 Mögliche Überleitung der KA Nack-Niederwiesen

Die KA Nack-Niederwiesen wird ebenfalls durch den ZAR betrieben. Es handelt sich um eine Anlage mit einer Ausbaugröße von 1.300 E. Gemäß Eigenüberwachungsbericht hat die KA folgende Kennwerte:

- Ausbaugröße 1.300 E
- Jahresabwassermenge (JAM): 78.161 m³/a
- Jahresschmutzwassermenge (JSM): 59.550 m³/a
- Fremdwasseranteil 14 %

Die Entfernung zur KA Flonheim beträgt etwa 8 km mit 63 m Höhendifferenz und einem mittleren Gefälle von ca. 0,8 %. Für die Realisierung der Überleitung wäre eine Anbindung nur bis zum Kanal in Wendelsheim etwa auf halber Strecke ausreichend. Dadurch verringert sich die notwendige Überleitung auf etwa 4.000 m mit nur ca. 30 m Höhendifferenz. Eine Zusammenlegung der beiden KAn erscheint technisch realisierbar. Sie hätte den Vorteil, dass der Wiesbach im Oberlauf zusätzlich entlastet wird und eine gemeinsame Behandlung inklusive Spurenstoffelimination auf der KA Flonheim erfolgen kann. Anstehende Sanierungskosten und laufende Betriebskosten in Nack-Niederwiesen könnten entfallen. Bei einer DN50 Druckleitung unter Ansatz von ca. 1,5 EUR/m/DN betragen die Baukosten etwa 300.000 €. Auf der KA Flonheim wird die Überleitung vereinfacht mit einer Zunahme der Bemessungswassermenge der weitergehenden Reinigungsstufe von 10 % berücksichtigt, was in etwa dem Verhältnis der Ausbaugrößen bei Normallast entspricht.

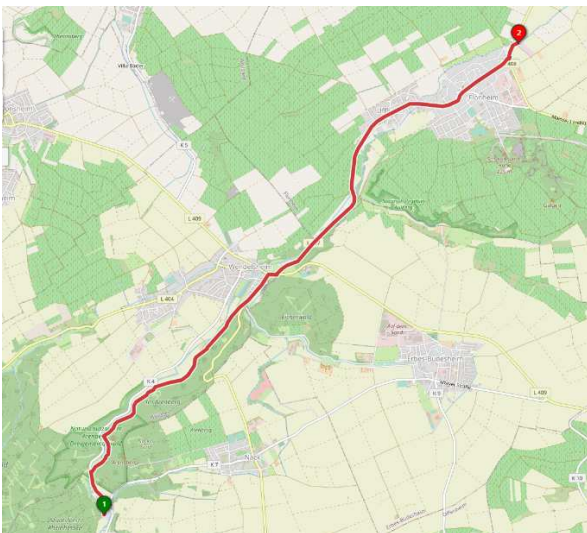


Abbildung 20: Route von Nack-Niederwiesen nach Flonheim (© openrouteservice.org by HeiGIT | Map data © OpenStreetMap contributors)



Abbildung 21: Lage der möglichen Überleitung im Einzugsgebiet (Schmitt et al., 2020)

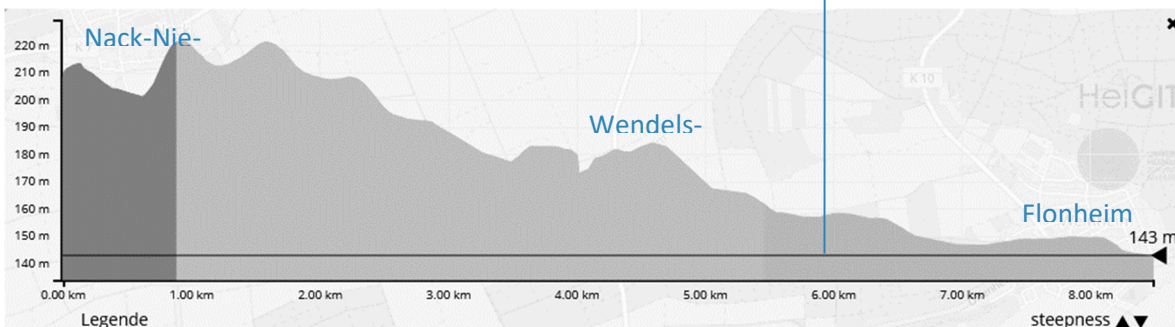


Abbildung 22: Höhenprofil (© openrouteservice.org by HeiGIT | Map data © OpenStreetMap contributors)

3.4 Kapazität biologische Reinigungsstufe

Da einige Verfahren auch Einfluss auf die Kapazität der biologischen Reinigungsstufe oder die Schlammbehandlung haben können, wird die vorhandene Situation der KA Flonheim nachfolgend bewertet. Ein Einfluss könnte sich z. B. durch die Direktdosierung von PAK zur Adsorption der Spurenstoffe ergeben, wodurch zum einen aktive Biomasse verdrängt würde und zum anderen die Schlammmenge erhöht wird, oder durch die Zusammenlegung von Kläranlagen.

Daher wird unter Berücksichtigung der maßgebenden Frachten im Zulauf zur biologischen Stufe die KA für einen 85-Perzentillastfall bei 12°C Bemessungstemperatur statisch nach DWA-A 131 (DWA, 2016a) nachgerechnet. Die gewählte Belastung enthält den Einfluss der Weinbaukampagne mit 32.000 E₁₂₀ (Ausbaugröße Normallast 14.500 E). Es handelt sich aber nicht um einen worst-case-Lastfall mit bis zu 60.000 E, da hier nur eine überschlägige Nachbemessung erfolgt.

Es werden fünf Betriebszustände, die nachfolgend Lastfall (LF) genannt werden, betrachtet:

1. Ist-Zustand: getrennt aerobe Schlammstabilisierung (bei 9 d Schlammalter mit Nachbelüftung in den Eindickern)
2. Ist-Zustand: simultan aerobe Schlammstabilisierung (bei 25 d Schlammalter)
3. Schlammverbund (ohne aerobe Schlammstabilisierung, 9 Tage Schlammalter mit Vorklärbecken)
4. Schlammverbund (mit reduziertem TS_{BB}-Gehalt in der Biologie)
5. Überleitung der KA Nack-Niederwiesen mit +10% Frachterhöhung

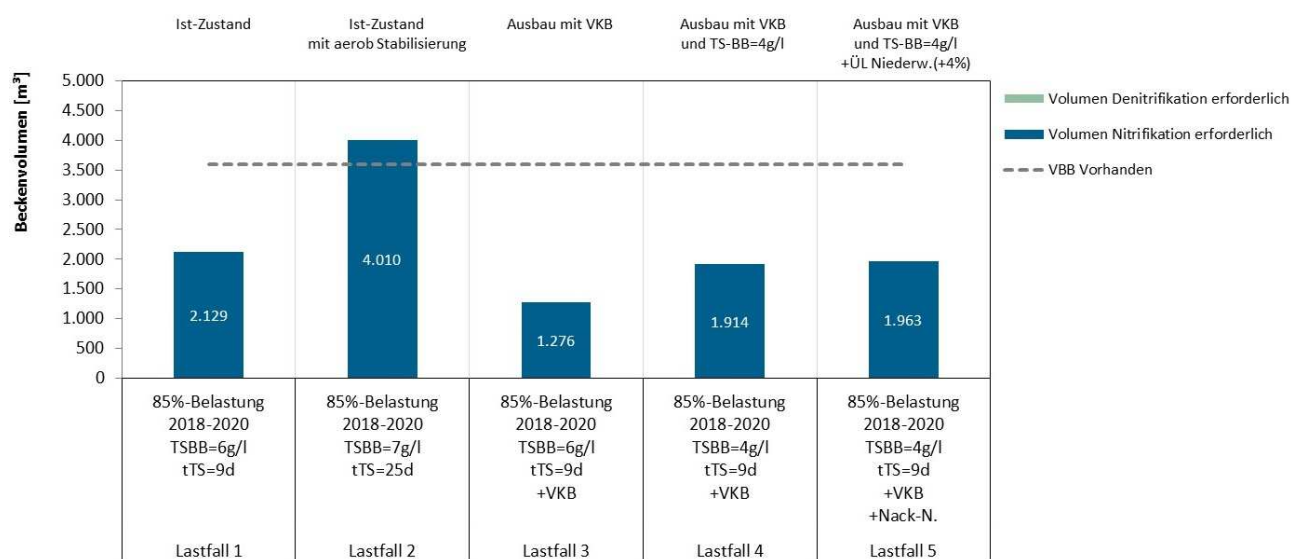


Abbildung 23: Erforderliches Belebungsbeckenvolumen (V_{BB}) für unterschiedliche Betriebszustände der Kläranlage Flonheim im Lastfall 85%Perzentil-Belastung (32.000EW) auf Basis einer Nachbemessung nach DWA-A131, 2015 mit Eingangsdaten der Jahre 2018-2020

Die überschlägige Nachbemessung der biologischen Stufe zeigt, dass das Verfahrensziel der simultan aeroben Schlammstabilisierung (LF 2) mit dem vorhandenen Belebungsbeckenvolumen, auch unter Ansatz eines sehr hohen TS_{BB}-Gehaltes von 7,0 g/l nicht eingehalten werden kann. Die Integration einer Vorklärung wie auch eine Absenkung des Schlammalters entlastet die Anlage deutlich, erfordert aber eine separate externe Stabilisierung bzw. einen zukünftig thermisch orientierten Verwertungsweg für den Klärschlamm.

3.5 Spurenstoffscreening

Zielsetzung

Das Spurenstoffscreening soll folgende Ziele erfüllen:

- Darlegung des Handlungsbedarfs für die Spurenstoffelimination
- Prüfung von Kriterien für die Verfahrenswahl und -dimensionierung (Bromid, DOC, NO₂-N, AFS, ...)
- Ermittlung der vorhandenen Reinigung der biologischen Reinigung bzgl. Spurenstoffen
- Festlegung kläranlagenspezifischer Referenzparameter
- Festlegung von Besonderheiten für die Kläranlage (und idealerweise für RLP)

LfU-Screening 2016/ 2017

Von Juli 2016 bis August 2017 wurde ein Sondermessprogramm des LfU RLP mit 29 Messungen durchgeführt, bei dem u. a. der Ablauf KA Flonheim beprobt wurde. Der Fokus lag dabei in einer breiten Stoffpalette von insgesamt 227 unterschiedlichen Pflanzenschutzmitteln (PSM), zusätzlich wurden aber auch 28 Pharmaka analysiert. Die Probenahme erfolgte als 14 d-Mischprobe. Die Analyse erfolgte aus der filtrierten Probe durch die Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt Speyer (LUFA). Von den 28 analysierten Pharmaka konnten 20 in mindestens einer Probe nachgewiesen werden und 12 in fast jeder Probe (Tabelle 5). Die mittleren Konzentrationen unterscheiden sich je nach Substanz, liegen aber in einem erwarteten Bereich von bis zu 7 µg/l. Von den 227 PSM konnten 54 in mindestens einer Probe nachgewiesen werden und 20 sogar in mehr als der Hälfte der Proben (darunter Diuron und Glyphosat). Eine ausführliche Tabelle findet sich im Anhang D. Der Fokus liegt hier zunächst auf den Pharmaka da hier mehr Vergleichswerte vorliegen.

Tabelle 5: Auswertung für Pharmaka im LfU-Screening 2016/2017 im Ablauf der KA Flonheim

Substanz	Bestimmungsgrenze	Nachweisgrenze	Konzentration			Auswertung Befunde			
	BG	NG	Max.	Mittel	Min.	Anz > NG	Anz > BG	%>NG	%>BG
	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L				
4-Acetamidoantipyrin	50	20	5.482,0	2.169,8	200,6	29	29	100%	100%
4-Formylaminoantipyrin	50	20	3.863,2	2.630,4	859,9	29	29	100%	100%
Carbamazepin	50	20	2.421,6	803,6	237,0	29	29	100%	100%
Carbamazepin-dihydroxy	50	20	2.589,5	1.728,2	1.037,2	29	29	100%	100%
Cetirizin	50	20	271,3	151,0	55,7	29	29	100%	100%
Diclofenac	50	20	7.295,6	3.477,7	1.728,7	29	29	100%	100%
Lamotrigin	50	20	508,3	329,9	153,4	29	29	100%	100%
Primidon	50	20	392,5	240,1	118,9	29	29	100%	100%
Amidotrizoesäure	300	100	6.631,7	2.876,6	1.006,2	29	29	100%	100%
Metoprolol	50	20	2.167,6	949,2	234,0	29	28	100%	97%
Sotalol	50	20	216,1	100,3	22,3	29	24	100%	83%
Phenazon	50	20	156,7	81,6	35,7	29	22	100%	76%
Licarbazepin	50	20	203,6	145,3	87,5	29	12	100%	41%
Naproxen	50	20	808,6	475,0	260,4	29	12	100%	41%
Sulfapyridin	50	20	117,3	52,4	10,8	29	12	100%	41%
Hydrochlorothiazid	50	20	6.206,4	3.735,9	2.059,4	29	12	100%	41%
Carbamazepin-epoxid	50	20	478,2	73,8	29,0	29	11	100%	38%
Carbamazepin-hydroxy	50	20	101,9	67,6	21,2	29	11	100%	38%
Sulfamethoxazol	50	20	143,7	85,9	42,4	29	10	100%	34%
Bezafibrat	50	20	134,8	47,1	20,7	29	4	100%	14%
Flubendazol	50	20	0,0	0,0	0,0	29	0	100%	0%
Loratadin	50	20	0,0	0,0	0,0	29	0	100%	0%
Propyphenazon	50	20	0,0	0,0	0,0	29	0	100%	0%
Sulfadimethoxin	50	20	0,0	0,0	0,0	29	0	100%	0%
Sulfadimidin	50	20	0,0	0,0	0,0	29	0	100%	0%
Tylosin	50	20	0,0	0,0	0,0	29	0	100%	0%
Clofibrinsäure	50	20	0,0	0,0	0,0	29	0	100%	0%
Sildenafil	50	20	0,0	0,0	0,0	29	0	100%	0%

Für einen Vergleich mit anderen Monitoringprogrammen werden die Konzentrationen unter Verwendung der Ablaufwassermengen in Frachten umgerechnet und diese auf die angeschlossenen Einwohner bezogen. Dieser spezifische Emissionswert pro Kopf kann besser verglichen werden, weil die Verdünnung je nach Kläranlage sehr unterschiedlich ausfallen kann und die Höhe der absoluten Frachten maßgeblich von den im Einzugsgebiet lebenden Einwohnern abhängt. Die rechnerisch ermittelten pro Kopf-Frachten ergaben hierbei keine signifikant erhöhten Werte gegenüber den Literaturangaben.

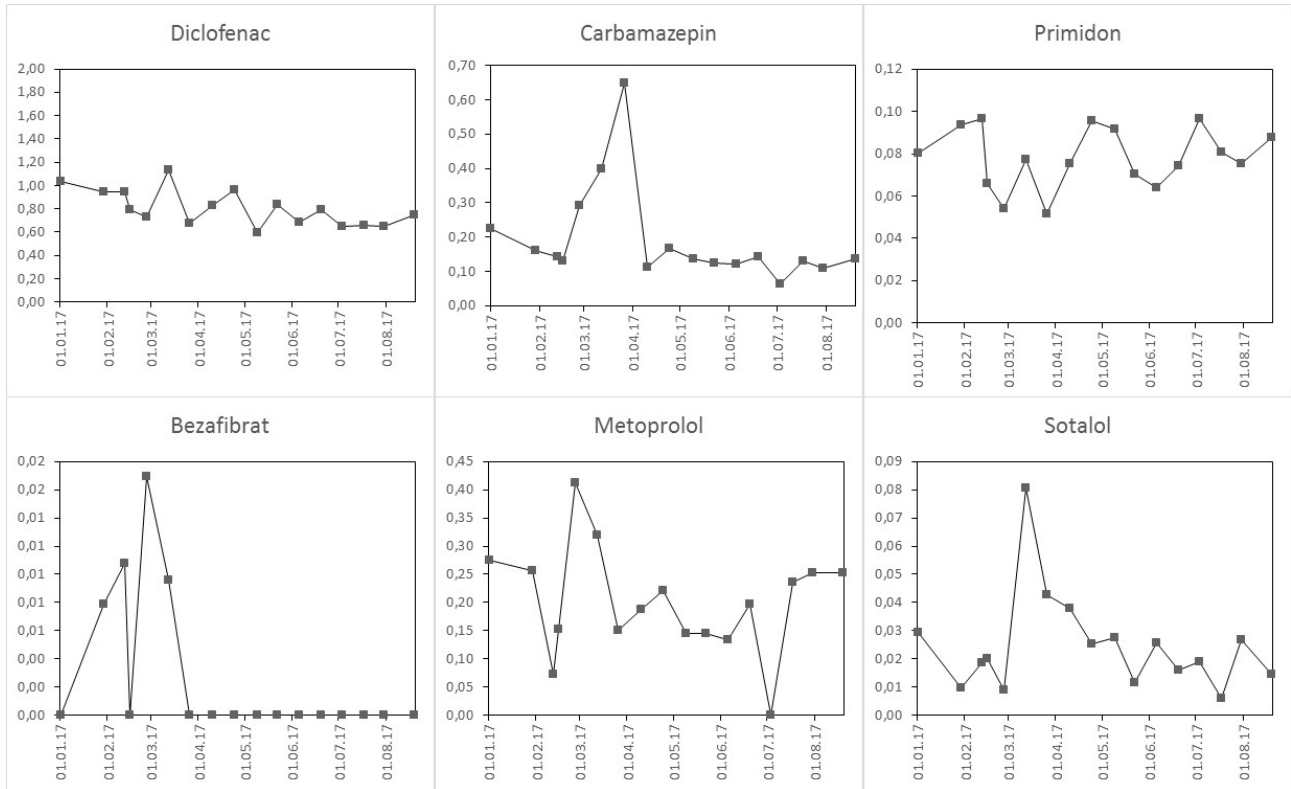


Abbildung 24: Berechnete tägliche Spurenstofffracht pro Kopf in mg/E/d im Ablauf der Kläranlage Flonheim

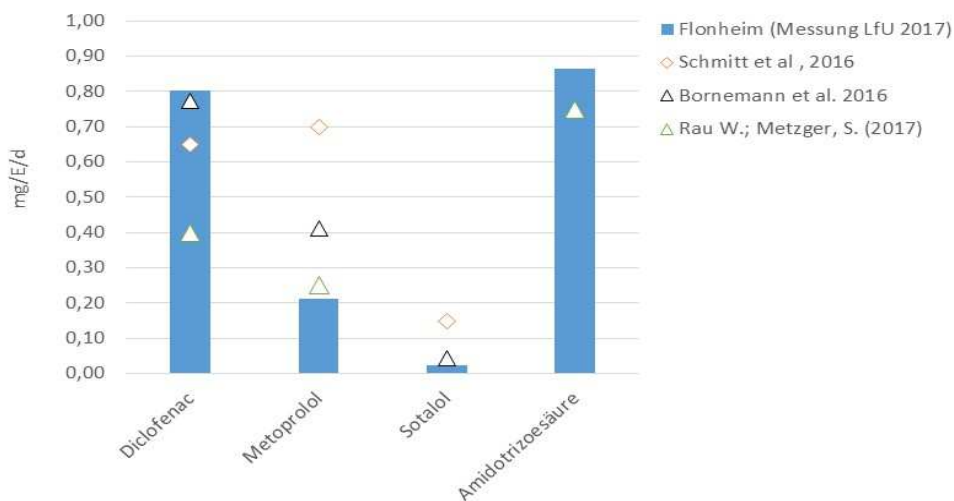


Abbildung 25: Vergleich der pro-Kopf-Frachten im Kläranlagenablauf mit Literaturwerten für ausgewählte Substanzen

Aktuelles Screening

Es ist ein neuerliches Screening geplant, das als Orientierung für andere Anlagen in RLP dienen soll. Dazu wird neben der Berücksichtigung der KOMS-A-Substanzliste auch RLP-spezifische Verdachtssubstanzen aufgenommen werden, die anhand bisheriger Screenings ausgewählt werden.

3.6 Aufstellfläche für eine weitergehende Reinigungsstufe

Da die KA Flonheim mit einem neuen Sandfang und einem zusätzlichen Vorklärbecken erweitert werden soll, steht ein Teil der vorhandenen Reserveflächen nicht mehr für bauliche Erweiterungen zur Verfügung. In der Nähe der Einleitung in den Wiesbach besteht aber eine große Freifläche von etwa 1.200 m² (Abbildung 26), die prinzipiell gut erreichbar ist und einen Anschluss an die Ablaufleitung ermöglichen würde. Die Ablaufwassermenge kann an dieser Stelle allerdings auch das Regenwasser aus dem RÜB bei Abschlagsereignissen enthalten. Somit müsste der unverdünnte Zulauf zur Spurenstoffelimination über eine zusätzliche Druckleitung erfolgen oder die Ablaufleitung des RÜB müsste verlegt werden. Zudem wäre eine Mitnutzung des vorhandenen Mikrosiebs an dieser Stelle nicht möglich. Weitere potenzielle Teilflächen liegen im Bereich Belebungsbecken, Mikrosieb/ Ablaufschacht und RÜB (Abbildung 27). Diese Flächen sind mit 10 x 14 = 140 m², 6 x 24 = 144 m² und 6 x 6 = 36 m² nicht groß, sind aber von der Lage besser für eine Einbindung einer weitergehenden Reinigungsstufe geeignet. Sie werden daher prioritär für die Konzepterstellung für eine Spurenstoffelimination berücksichtigt.

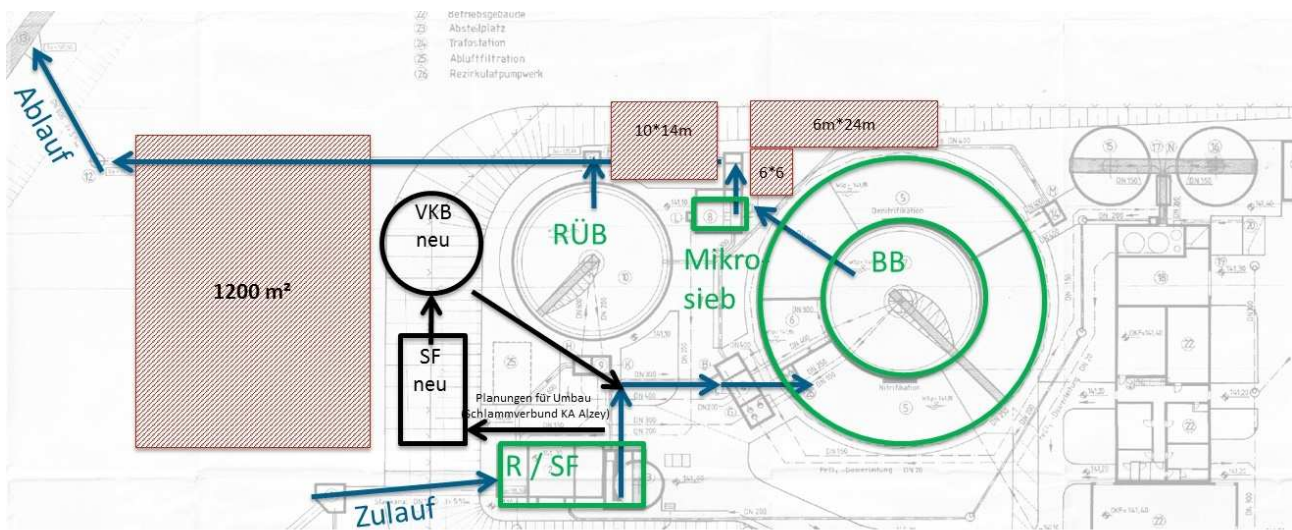


Abbildung 26: Vorhandene Flächen, die sich für eine weitergehende Reinigungsstufe eignen



Abbildung 27: Luftbild RÜB, Ablaufschacht / Mikrosieb und Belebungsbecken

3.7 Bemessungswassermenge weitergehende Reinigungsstufe

Methodik

Die maximal zu behandelnde Abwassermenge in der weitergehenden Reinigungsstufe muss als Auslegungswert für die Anlagendimensionierung festgelegt werden. Sie wird u. a. als $Q_{\text{Auslegung}}$ (KOMS.NRW, 2016) oder $Q_{\text{SPUR,MAX}}$ (MUKE-BW, 2018) bezeichnet. Im Folgenden wird der Begriff **Bemessungswassermenge** Q_{Bem} verwendet. Die Festlegung der Bemessungswassermenge erfolgt hier in Anlehnung an die Handlungsempfehlungen des Kompetenzzentrums Spurenstoffe Baden-Württemberg (KOMS, 2020; KOMS, 2018):

1. Bestimmung der **maximalen Trockenwetterwassermenge** $Q_{\text{T,max}}$ (siehe unten)
2. Für Anlagen mit **Mischsystem**:
 - Auslegung mindestens für $Q_{\text{T,max}}$
 - Kriterium 1: Es muss mindestens 70 % der Jahresabwassermenge (JAM) behandelt werden
 - Kriterium 2: Wenn mit $Q_{\text{T,max}} > 90\%$ von JAM behandelt wird, kann Q_{Bem} auf 90 % reduziert werden
3. Für Anlagen mit **Trennsystem** ist eine Vollstrombehandlung vorzusehen

Festlegung von $Q_{\text{T,max}}$

Zur Festlegung sind Abflusswerte der letzten drei Jahre als 15 min-Werte oder mindestens als Stundenwerte erforderlich. Das Vorgehen ist wie folgt:

1. Ermittlung des **Maximalabflusses pro Tag** ($Q_{\text{Inv15-60,max}}$) als 15 min- oder als 1 h-Wert
2. Ermittlung der **Trockenwettertage** (über Wetterschlüssel oder gl. 21-Tage-Minima nach DWA-A 198)
3. Bestimmung des **85 Perzentils der maximalen Abflüsse aller Trockenwettertage** ($Q_{\text{T,max,85}}$)
4. Festlegung von der **maximalen Trockenwetterabflussmenge** $Q_{\text{T,max}}$ über einen Sicherheitsfaktor

Die Trockenwettertage wurden zur Sicherheit sowohl über das gleitende 21-Tage-Minimum als auch über den Wetterschlüssel der Betriebstagebücher ausgewertet. Der 85 Perzentilwert beträgt in beiden Fällen etwa $155 \text{ m}^3/\text{h}$. Dies entspricht relativ genau der maximalen Trockenwetterwassermenge $Q_{\text{t,h,max}}$ aus den Bemessungsdaten der Kläranlage.

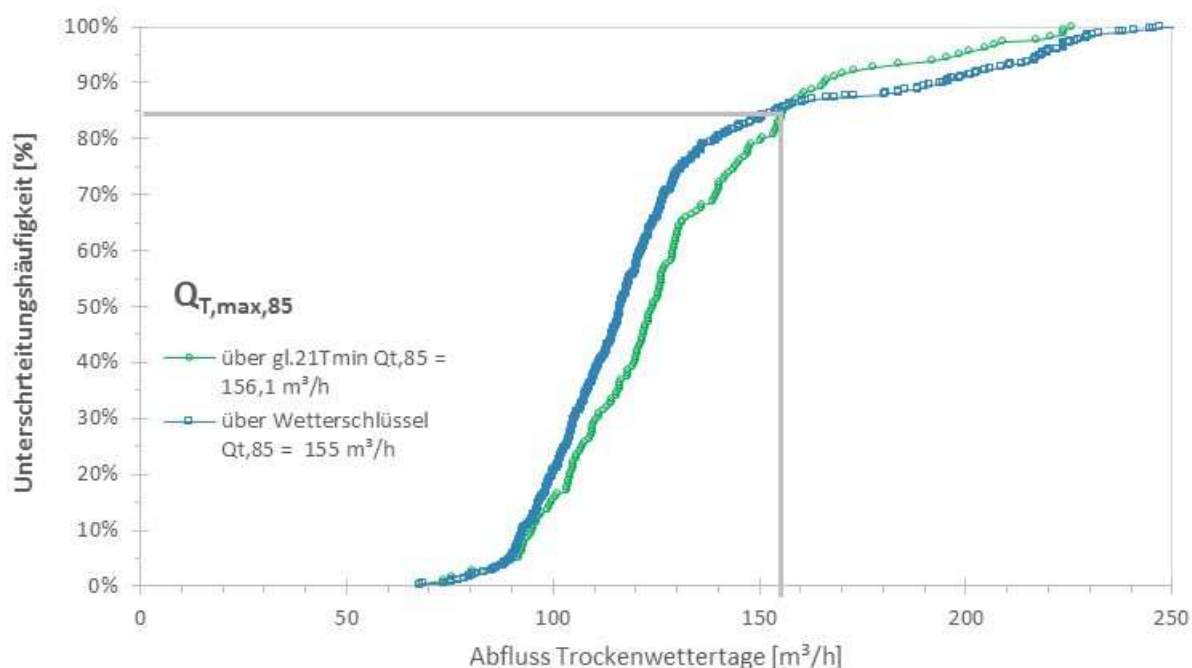


Abbildung 28: Statistische Auswertung der Trockenwetterwassermengen auf Basis von Stundenwerten aus 3 Jahren

Bemessungswassermenge weitergehende Reinigungsstufe KA Flonheim

Für die Dimensionierung der weitergehenden Reinigungsstufe auf der Kläranlage Flonheim wurde eine maximale Bemessungswassermenge $Q_{Bem} = 165 \text{ m}^3/\text{h}$ gewählt. Nach den o. g. Kriterien würden theoretisch auch $150 \text{ m}^3/\text{h}$ ausreichen, um die geforderten 70 % der Jahresabwassermenge zu behandeln, allerdings wird hier eine zusätzliche Reserve von 10 % vorgesehen, die u. U. für die Überleitung weiterer Kläranlagen relevant werden kann. Eine weitere Erhöhung der Bemessungswassermenge auf bis zu $200 \text{ m}^3/\text{h}$ führt zu keiner großen Veränderung der insgesamt im Jahresverlauf behandelten Wassermenge (Abbildung 29).

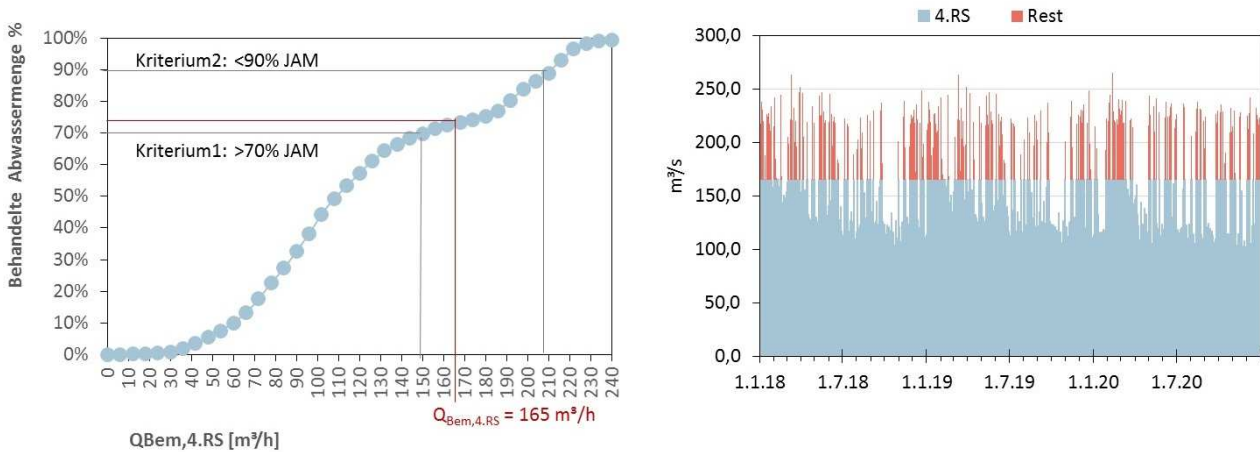


Abbildung 29: Behandelte Abwassermenge in Abhängigkeit der Bemessungswassermenge (links) und beispielhafter Jahresgang der behandelten und unbehandelten Wassermengen (rechts)

Abschätzung der im Teilstrom behandelten Fracht

Zusätzlich zu der o.g. Festlegung der Bemessungswassermenge erfolgte eine Abschätzung der hiermit behandelten jährlichen Spurenstofffracht (kg/a). Die Festlegung auf maximal $165 \text{ m}^3/\text{h}$ führt dazu, dass ca. 73 % der Jahresabwassermenge behandelt werden. Da die Spurenstoffe in dem nicht behandelten Anteil der Jahreswassermenge verdünnt vorliegen, liegt die behandelte Jahresfracht deutlich höher. Unter Annahme einer Verdünnung von bis zu 50 % der Trockenwetterkonzentration bei maximalem Mischwasserzulauf, ergibt sich so ein Anteil der behandelten Spurenstofffracht von 85 % bei der gewählten Bemessungswassermenge.

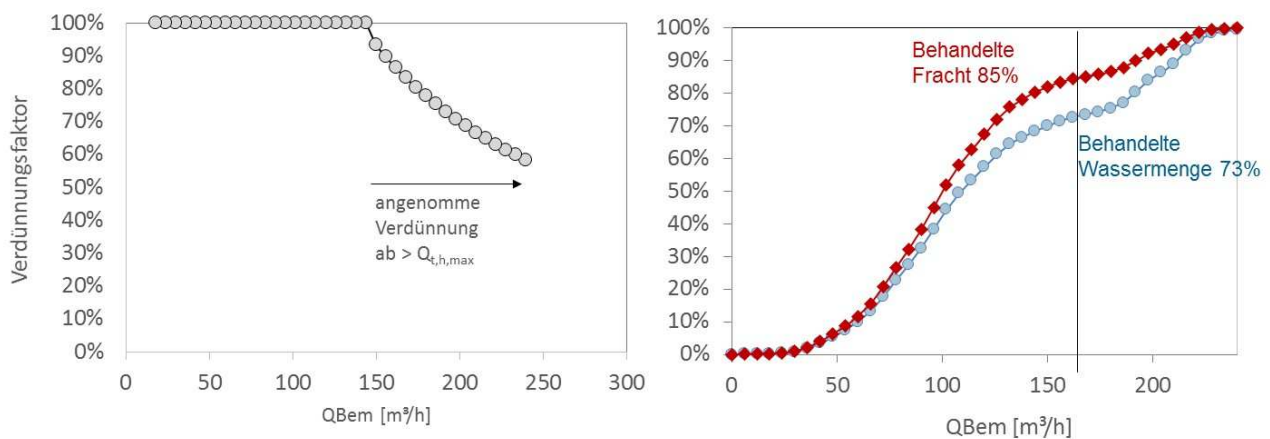


Abbildung 30: Angenommene Verdünnung bei Wassermengen über $150 \text{ m}^3/\text{h}$ (links) und resultierender Anteil der behandelten Fracht im Vergleich zu der behandelten Wassermenge

4 AUSARBEITUNG TECHNISCHER VARIANTEN

4.1 Vorauswahl von Verfahren

Aus den zur Verfügung stehenden Verfahrensmöglichkeiten zur Spurenstoffelimination wurden in einer ersten Vorauswahl unter Berücksichtigung der örtlichen Rahmenbedingungen geeignete Ansätze ausgewählt (Tabelle 6). Die Verfahren wurden wie folgt bewertet:

- **Pulveraktivkohle**
 - Der anfallende Klärschlamm der KA Flonheim soll so lange wie rechtlich möglich in der Landwirtschaft stofflich verwertet werden. Da die beladene Pulveraktivkohle mit über den Klärschlamm aus dem System ausgeschleust wird, wäre eine Anreicherung der Schadstoffe bei Desorption im Boden möglich.
 - Mit einer separaten „PAK_Stufe“ ist es jedoch möglich, den „PAK-Schlamm“ gesondert von dem normalen Klärschlamm zu entsorgen. Bei einer PAK-Dosierung könnte die vorhandene Mikrosiebung zwecks Rückhalts der PAK-Partikel mitgenutzt werden.
- **Granulierte Aktivkohle**
 - Eine GAK-Filtration zur Adsorption bietet sich für die KA Flonheim an, da mit dem vorhandenen Mikrosieb eine Vorfiltration erfolgt und so die GAK-Stufe nicht mit Feststoffen aus der Nachklärung belastet wird.
- **Oxidationsverfahren**
 - Der Einsatz von Ozon ist insbesondere bei hoher Bromid-Konzentration nicht zu empfehlen, da dadurch bei der Oxidation das toxische Bromat entsteht. Aufgrund fehlender Analysewerte zur Bromid-Belastung wird dieses Verfahren auch für die KA Flonheim betrachtet.
 - Weitere Oxidations-Verfahren wie AOP unter Verwendung von UV-Bestrahlung, und/ oder Wasserstoffperoxid erscheinen für diese Anlagengröße zu komplex und unwirtschaftlich.
- **Kombinationen**
 - Der bewachsene Bodenfilter stellt sich besonders in Kombination mit einer Adsorption oder einer Ozonung als interessantes und einfaches Verfahren dar, das u. a. auch Synergien bezüglich des Parameters Phosphor aufweist. Aufgrund des Flächenbedarfs und der resultierenden hohen Investitionen wird dieser Ansatz hier nicht verfolgt.

Tabelle 6: Zusammenfassung der Vorauswahl von Verfahren

Verfahren			Eignung für Flonheim ?		
Adsorption	PAK-Stufe	PAK in Kontaktbecken	➡	wenn PAK-ÜS gesondert entsorgt wird.	
	PAK-FF	PAK in Flockungsraum	⬇	nein, weil PAK mit Schlamm entsorgt werden müsste der derzeit in die LW geht	
	PAK-BB	PAK in Biologie	⬇	nein, weil PAK mit Schlamm entsorgt werden müsste der derzeit in die LW geht	
	PAK-MBR	PAK vor Membran	⬇	Membranverfahren zu teuer für die Anlagengröße, keine MBR vorhanden	
	GAK	GAK im Festbett	⬆	geeignet, da Vorfiltration vorhanden ist. Raumfilter könnte für Nachfällung genutzt werden	
	n-GAK	GAK mit Vorfiltration	⬇	Vorfiltration wäre bereits durch Mikrosiebung gegeben	
	SB-GAK	Mikro-GAK im Schwebebett	⬇	Zu wenig Referenzen	
Oxidation	Ozonung	O3-Dosierung in Reaktor	➡	hängt insbesondere noch von Ergebnissen Bromid im Zulauf ab.	
	AOP	Erweiterte Oxidation über Zusatzstoffe	⬇	zu komplex / teuer für Anlagengröße	
	Elektrochem.	Energieeintrag zur Mineralisierung	⬇	Zu wenig Referenzen	
Physikalisch	NF/UF	Nanofiltration/Umkehrosiose	⬇	zu komplex / teuer für Anlagengröße	
Kombinationen	PAK	GAK	PAK als Frischkohle + GAK	⬇	zu komplex / teuer für Anlagengröße
	O3	GAK	O3 in niedriger Dosierung + GAK	⬇	zu komplex / teuer für Anlagengröße
	AOP	GAK	Adsorption als Nachbehandlung	⬇	zu komplex / teuer für Anlagengröße
	BF		Bewachsener Bodenfilter	➡	Einfaches Verfahren mit Synergien bzgl. Phosphor, aber Flächenbedarf ggf. zu groß

4.2 Variante 1: „Ozon“ Ozonbehandlung mit Sandfilter als Nachbehandlung

4.2.1 Beschreibung

Für die großtechnische Umsetzung einer Ozonbehandlung sind ein Zwischenpumpwerk, ein Sauerstofftank, ein Ozongenerator, ein Kontaktbecken inklusive Eintragungssystem und Abgasbehandlung vorzusehen. Aufgrund der möglichen Bildung von reaktiven Umwandlungs- bzw. Transformationsprodukten sollte der Ozonung eine biologische Nachbehandlung (z. B. Sand-/Biofilter oder Wirbelbett) folgen (Abegglen, Siegrist, 2012). Eine mögliche Verfahrensführung zeigt Abbildung 31.

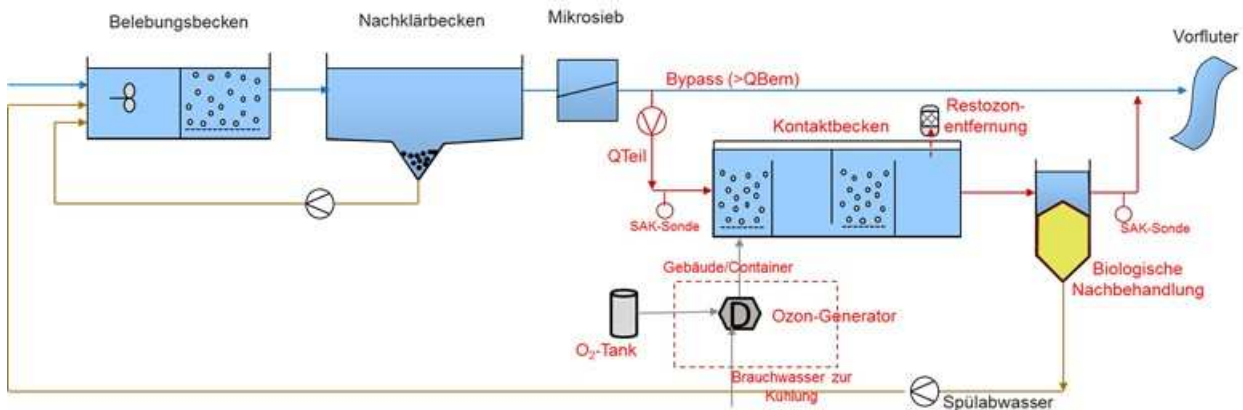


Abbildung 31: Verfahrensschema für die Variante einer Ozonbehandlung

4.2.2 Bemessung

Zunächst wird die erforderliche Größe des Kontaktbeckens bestimmt. Da Ozon sehr schnell reagiert, sind prinzipiell nur etwa 7 min Zehrungszeit vorzusehen. Allerdings muss die Durchmischung berücksichtigt werden, woraus sich eine Kontaktzeit von 20 min ergibt (Maus et al., 2014). Das hierfür erforderliche Volumen bei Bemessungswassermenge ($Q_{Bem} = 165 \text{ m}^3/\text{h}$) beträgt 55 m^3 . Zusätzlich wird noch eine Ausgasungszone von 14 m^3 vorgesehen, so dass in Summe 70 m^3 als Ozonreaktor gewählt werden. Bei einer gewählten Tiefe von 6 m ist ein Becken von etwa $2 \times 6 \text{ m}^2$ erforderlich.

Tabelle 7: Bestimmung der notwendigen Größe des Ozonreaktors

Ozonreaktor			
erf. Mindestkontaktzeit	=		
Zeit bis Ozon aufgezehrt ist	$t_{Zehrung}$	= 7 min	Literaturwert (Maus et al. 2014)
Faktor ungleichmäßig Durchströmung	$f_{Strömung}$	= 0,35 -	Literaturwert (Maus et al. 2014)
resultierende erf. Aufenthaltszeit	t	= 20 min	($t_{Zehrung}/f_{Strömung}$)
erf. Volumen Reaktor	=		
erf. Volumen Reaktor	V_{erf}	= 55 m^3	$V_{erf} = \frac{Q_{Bem} \cdot t_{Zehrung}}{0,35}$
zzgl. Ausgasungszone (=1/4 von V)		= 14 m^3	
gewähltes Volumen	V_{gew}	= 70 m^3	gewählt
Hydraulische Aufenthaltszeit V_{ges}	=		
bei V_{ges} und Q_{Bem}	t_K	= 25,5 min	
bei V_{ges} und $Q_{T,h,min}$	t_K	= 138,8 min	
Gewählte Dimensionierung	=		
gewählte Tiefe	h	= 6,0 m	gewählt
Oberfläche	A	= $11,7 \text{ m}^2$	
Länge	L	= 2,0 m	gewählt
Breite	B	= 5,8 m	

Die Ozondosierung wird über eine spezifische Ozondosis (z_{spez}) bezogen auf den DOC ($\text{mgO}_3/\text{mgDOC}$) bestimmt. Aktuelle Erfahrungswerte zeigen, dass mit einem $z_{spez} = 0,5 \text{ mgO}_3/\text{mgDOC}$ eine ausreichende Elimination erreicht werden kann. Dafür ist bei einem DOC von etwa $9,3 \text{ mg/l}$ (abgeschätzt mit Faktor 1/3 bezogen

auf den mittleren CSB von 28 mg/l im Ablauf NKB) eine O₃-Dosierung von 4,7 mg/l erforderlich. Die bereitgestellte Ozonmenge liegt damit bei 0,8 kg/h für Q_{Bem} bzw. 0,37 kg/h im Mittel bezogen auf die behandelte Abwassermenge.

Tabelle 8: Bemessung der erforderlichen Ozondosierung

Ozondosierung			
Dosierung			
spez. Ozondosis (gewählt)	Z _{spez.}	=	0,5 mg _{O₃} /mg _{O₂} Erfahrungswert
mittlere DOC-Konzentration Ablauf NK	C _{DOC,NKa}	=	9,3 mg/l Annahme
benötigte O ₃ -Dosierung	C _{O₃,erf.}	=	4,67 mgO ₃ /l
gewählte O ₃ -Dosierung	C _{O₃,gew.}	=	5,00 mgO ₃ /l gewählt
maximale Ozonerzeugung			
max Zulauf	Q _{Bem}	=	46 l/s
max Ozonmenge	B _{O₃,max}	=	0,8 kg/h 19,8 kg/d $B_{O_3,max} = Q_{Bem} \cdot C_{O_3}$ 7.227 kg/a
Jährliche Ozonerzeugung			
behandelte Abwassermenge	Q _{Teil,d}	=	1.761 m ³ /d
mittlere Ozonmenge	B _{O₃}	=	0,37 kg/h 8,80 kg/d $B_{O_3,d} = Q_{Teil,d} \cdot C_{O_3}$ 3.214 kg/a
minimale Ozonerzeugung			
min Zulauf	Q _{T,h,min}	=	8 l/s
min Ozonmenge	B _{O₃,min}	=	0,151 kg/h 3,63 kg/d $B_{O_3,min} = Q_{T,2h,min} \cdot C_{O_3}$ 1.325 kg/a

Aus dem Ozonbedarf ergibt sich auch die erforderliche Sauerstoffmenge zur Erzeugung des Ozons. Für die Erzeugung von 1,0 kg O₃ werden etwa 10 kg O₂ benötigt. Der jährliche O₂-Bedarf liegt damit bei 32.000 kg/a mit einer maximalen Abnahmemenge von 8,3 kgO₂/h.

Tabelle 9: Ermittlung des Sauerstoffbedarfs für die Ozonherstellung vor Ort

Sauerstoffbedarf			
Jährlicher Sauerstoffbedarf für behandelte Abwassermenge	B _{O₂}	=	3,7 kgO ₂ /h $1\text{kg O}_3 \text{ benötigt } 10\text{kg O}_2$ 88 kgO ₂ /d 32.138 kgO ₂ /a
maximale Menge	B _{O₂,max}	=	8,3 kgO ₂ /h 198 kgO ₂ /d 72.270 kgO ₂ /a

Durch Bildung von Transformationsprodukten ist eine Nachbehandlung des ozonierten Abwassers erforderlich. Diese erfolgt hier über einen Sandfilter mit einer maximalen Filtergeschwindigkeit von 11 m/h. Die erforderliche Filterfläche bei Bemessungswassermenge liegt bei 15 m². Dafür werden drei Filter mit je 5 m² Fläche gewählt.

Tabelle 10: Dimensionierung der Nachbehandlung mittels Sandfiltration

Nachbehandlung / Sandfilter			
Vorgaben			
max Filtergeschwindigkeit	v _{max}	=	11,0 m/h gewählt als Dimensionierungsvorgabe
erf. Filterfläche bei v _{max}	A	=	15,0 m ² $A=Q/v$
resultierende Kontaktzeit bei Q _{Bem}	t	=	8,2 min $t=V/Q \cdot 60$
Filterbetthöhe	H	=	1,5 m
erf. Volumen	V	=	22,5 m ³ $V=h \cdot A$
Gewählte Abmessungen (3x DynaSand DS5000AE in Beton)			
Anzahl Filter	n	=	3,0 -
Filterfläche pro Filter	A	=	5,0 m ²
Filterfläche gesamt	A _{ges}	=	15,0 m ²
Filterbettvolumen pro Filter	V	=	10,0 m ³
Filterbettvolumen gesamt	V _{ges}	=	30,0 m ³ (inkl. Konus)

4.2.3 Umsetzungskonzept

Das gereinigte Abwasser wird von dem bestehenden Ablaufschacht des Mikrosiebs über ein integriertes Trennbauwerk mit Tauchmotorpumpen in das oberirdisch aufgestellte Kontaktbecken geleitet. Der einstrahlige Ozonreaktor hat ein Volumen von 70 m³ und eine Aufstellfläche von etwa 2 x 6 m² bei einer Wassertiefe von 6 m (Beispiel siehe Abbildung 34). Bei dem Einsatz von Diffusoren zum Ozoneintrag sollte eine Beckentiefe von 5,0 m nicht unterschritten werden, um einen weitestgehenden Übergang des gasförmigen Ozons in die Wasserphase zu erreichen (Maus et al., 2014).

Für den Eintrag des Ozons stehen zwei Varianten zur Verfügung. Entweder über Diffusoren, bei denen das ozonhaltige Gas analog zu der Belüftung in den Belebungsbecken direkt eingetragen wird, oder alternativ über Injektoren, die einen Teilstrom des Abwassers über Injektorpumpen mit dem Gas versetzen und anschließend mit dem Hauptstrom vermischen. Da bei dem Eintrag über Injektoren ein aufwändiger Pumpenkreislauf notwendig ist und aktuell kein verfahrenstechnischer Vorteil bekannt ist, wird der Eintrag über Diffusoren gewählt.

Für die optimale Gasverteilung wird der Ozonreaktor über Leitbleche in zwei Begasungszonen unterteilt. So kann in Schwachlastzeiten eine der Zonen abgeschaltet werden, damit die Beaufschlagung der Diffusoren nicht zu gering wird. Um eine Belegung der Belüfterelemente zu verhindern, können die Zonen wechselseitig begast werden. Eine zusätzliche Ausgasungszone stellt die Reaktionszeit und auch das Ausgasen nicht gelösten Sauerstoffs und Ozons sicher. Das Gas sammelt sich und wird als Off-Gas in einem Restozonvernichter behandelt.

Die Erzeugung des Ozongases erfolgt in einem Ozongenerator (z. B. Typ SMOecoPLUS 410, Fa. Wedeco). Der Generator ist in einem Maschinencontainer aufgestellt und benötigt neben der Stromversorgung einen Kühlwasseranschluss mittels Brauchwasser. Der Container beinhaltet alle sicherheitstechnischen Einrichtungen mit Ozonsensoren zur Leckageüberwachung usw.

Es wird ein vertikaler Flüssigsauerstofftank gewählt (16 – 18 bar, $\varnothing = 1,6$ m, Fundament 2,5 m x 2,5 m). Über einen luftbeheizten Verdampfer wird der gespeicherte Sauerstoff in einen gasförmigen Aggregatzustand umgewandelt und dem Ozongenerator zugeführt.

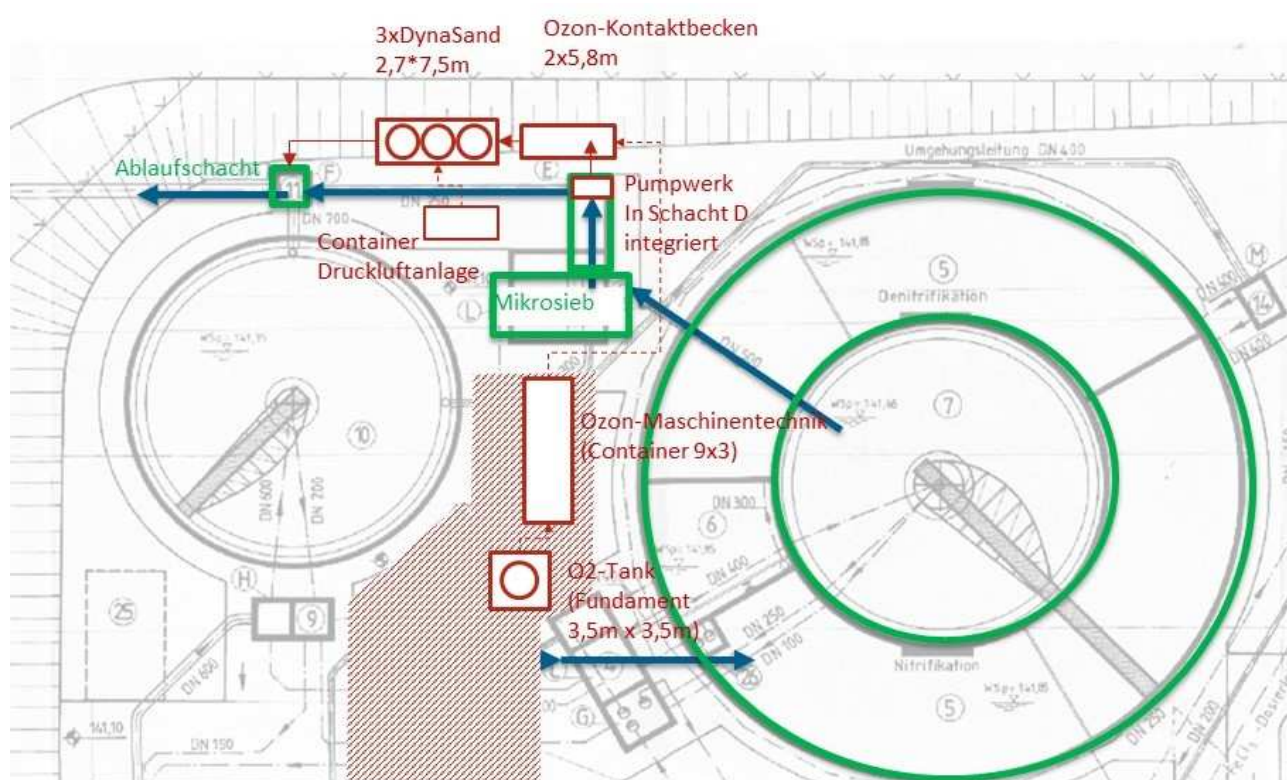


Abbildung 32: Lageplankonzept für Var. 1: „Ozon“



Abbildung 33: O₂-Tank und O₃-Generator



Abbildung 34: Beispielhafter Ozonreaktor (Lyko, 2013)

Der Ablauf des Ozonreaktors fließt in freiem Gefälle zu den nachgeschalteten Sandfiltern (hier: DynaSand[®], Typ DS5000). Es handelt sich um drei parallel betriebene Filter in Behälterbauweise mit 5,6 m Höhe (Abbildung 35).

Die Filter könnten alternativ auch in Betonbauweise ausgeführt werden, indem ein entsprechendes Betonbecken zur Aufnahme der Filter direkt neben den Ozonreaktor errichtet wird.

Jeder Filter hat einen Durchmesser von 5 m². So ergibt sich zusammen die erforderliche Filterfläche von 15 m². Das Filterbett ist 1,5 m tief und das Volumen beträgt etwa 22,5 m³. So kann eine Filtergeschwindigkeit von 11 m/h bei maximaler Bemessungswassermenge erreicht werden. Das gereinigte Filtrat gelangt in den Ablaufschacht und fließt von dort zum Vorfluter.

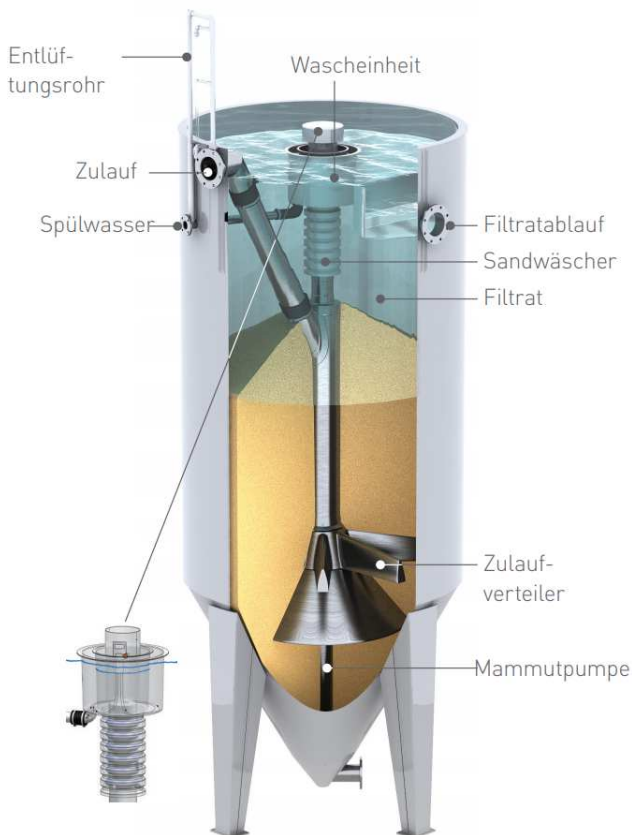


Abbildung 35: Kontinuierlich arbeitender Sandfilter (www.nordicwater.com/de)

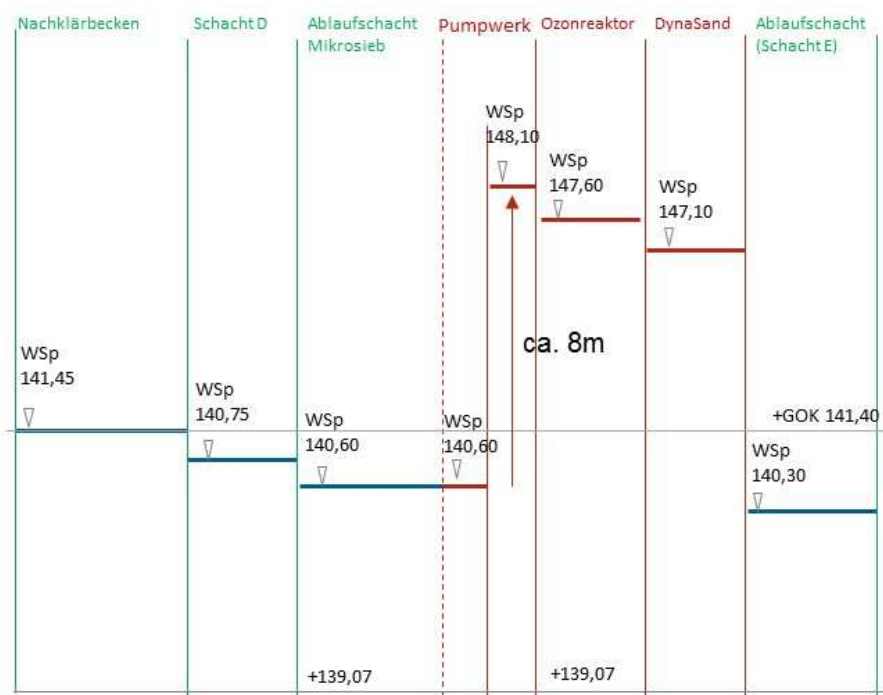


Abbildung 36: Hydraulischer Schnitt

4.2.4 Investitionskosten

Die Investitionskosten wurden auf Basis von Richtpreisangeboten und Erfahrungen aus anderen Projekten abgeschätzt. Eine detaillierte Aufstellung aller Kostenpositionen mit Preisschätzungen findet sich im Anhang.

Die Positionen bei der Ozonbehandlung teilen sich im Wesentlichen auf in: Baustelleneinrichtung und Vorbereitung, Bautechnik für die Errichtung des Kontaktbeckens, Zulaufpumpwerk und Rohrleitungen, Ozongenerator samt Peripherie, O₂-Tank und der nachgeschaltete Sandfilter.

Die Kosten betragen in Summe etwa 844.300 € (Tabelle 11). Zuzüglich unvorhersehbarem und Planungskosten liegen die Gesamtkosten bei 1,14 Mio € netto bzw. 1,36 Mio. € brutto. Bei den Kosten fällt auf, dass der Großteil für die Maschinenteknik der Ozonerzeugung und auch für die Nachbehandlung im Sandfilter verwendet wird.

Tabelle 11: Investitionskostenschätzung Variante 1 „Ozon“

Pos	Beschreibung	Gesamtkosten [€]
1	Baustelleneinrichtung	42.600 €
2	Kontaktbecken / Ozonreaktor	73.600 €
3	Zulaufpumpwerk + Rohrleitungen	29.000 €
4	Ozonanlage	433.100 €
5	O ₂ -Tank / Fundament	8.100 €
6	Sandfilter zur Nachbehandlung	257.900 €
Summe Positionen 1-6		844.300 €
	Unvorhersehbares (15 %)	126.600 €
	Nebenkosten (20%)	168.900 €
Gesamtsumme (netto)		1.139.800 €
	Mehrwertsteuer (19 %)	216.600 €
Gesamtsumme (brutto)		1.356.400 €

4.2.5 Betriebs- und Jahreskosten

Bei der Ozonerzeugung fallen Stromkosten für die Erzeugung des Ozons in dem Ozongenerator an. Zusätzlich muss als Ausgangsstoff Flüssigsauerstoff (LOX) regelmäßig zugekauft werden. Daneben ist auch der Strombedarf des Zwischenhebewerkes zu berücksichtigen und die zusätzlichen Personalkosten, die hier mit 0,5 MA abgeschätzt werden.

Die Betriebskosten der Ozonbehandlung wurden mit folgenden Kennwerten ermittelt

- Strombezugskosten 0,21 EUR/kWh
- Spez. Stromverbrauch Pumpe 4,5 Wh/(m³*m)
- Personalkosten 65.000 EUR/MA/a
- Sauerstoff (O₂ verflüssigt) 150 EUR/Mg, zzgl. 12 EUR/Mg Energiezuschlag
- O₂-Tankmiete inkl. Verdampfer 250 EUR/Monat
- O₂-Tankmanagement 25 EUR/Monat

Wartung und Instandhaltung wurden über folgende Prozentsätze der Netto-Investitionskosten abgeschätzt:

- Bautechnik: 1,0% der netto-Investitionskosten/a
- Maschinenteknik: 4,0% der netto-Investitionskosten/a
- E-/MSR-Technik: 2,0% der netto-Investitionskosten/a

Zusätzliche laufende Kosten ergeben sich aus den kapitalisierten Investitionskosten mit folgenden Kennwerten:

- Nutzungsdauer Bautechnik 30 a
- Nutzungsdauer Maschinenteknik 15 a
- Nutzungsdauer E-/MSR-Technik 10 a
- Zinssatz 3,0 %

Insgesamt betragen die Gesamtbehandlungskosten 199.342 €/a 0,37 €/m³ brutto (Tabelle 12)

Tabelle 12: Gesamtbehandlungskosten Variante 1 „Ozon“

Pos.	Kurztext	Variante 1 Ozon+Sandfilter
A	Kapitalgebundene Kosten	92.510 €/a
A1	Kapitalkosten Bau	15.690 €/a
A2	Kapitalkosten Maschinenteknik	51.890 €/a
A3	Kapitalkosten EMSR-Technik	24.930 €/a
B	Betriebsgebundene Kosten	64.700 €/a
B 1	Wartungs- und Instandhaltungskosten	32.200 €/a
B 2	Personalkosten	32.500 €/a
C	Verbrauchsgebundene Kosten	42.132 €/a
C1	Energiekosten	27.000 €/a
C2	Sauerstoff (flüssig)	13.380 €/a
C3	GAK - Granulierte Aktivkohle	
C4	PAK - Pulverförmige Aktivkohle	
C5	Schlammfällfällung PAK	
C6	Fällmittel	
C7	Kühlwasser	1.752 €/a
A	Kapitalgebundene Kosten	92.510 €/a
B	Betriebsgebundene Kosten	64.700 €/a
C	Verbrauchsgebundene Kosten	42.132 €/a
	Jahreskosten netto	199.342 €/a
	+ 19 % MwSt.	37.875 €/a
	Jahreskosten brutto	237.217 €/a
	spez.Kosten (brutto):	0,37 €/m³

Tabelle 13 : Bemessung der GAK-Filtration

GAK-Filter			
Bemessung			
minimale Kontaktzeit im Filterbett	t	=	20,0 min Vorgabewert
erf. Volumen	V	=	55,0 m ³
Filtergeschwindigkeit	v	=	6,0 m/h Vorgabewert
erf. Filterfläche	A	=	27,5 m ²
Filterbethöhe	H	=	2,0 m
Abmessungen			
Durchmesser Filterkessel	D	=	2,52 m
Anzahl Filterkessel	n	=	6,0
Filterfläche pro Filter	A	=	5,0 m ²
Filterfläche gesamt	A _{ges}	=	30,0 m ²
Filterbethöhe	H	=	2,00 m
Filterbettvolumen pro Filter	V	=	10,0 m ³
Filterbettvolumen gesamt	V _{ges}	=	59,9 m ³
Resultierende Prozessparameter			
Filtergeschwindigkeit maximal (QBem)	v	=	5,5 m/h
Filtergeschwindigkeit mittel (QBeh)	v	=	2,4 m/h
Filtergeschwindigkeit minimal (Qmin)	v	=	1,0 m/h
Kontaktzeit (EBCT) maximal (Qmin)	t _E	=	118,9 min
Kontaktzeit (EBCT) mittel (Qbeh)	t _E	=	49,0 min
Kontaktzeit (EBCT) minimal (Qbem)	t _E	=	21,8 min
Standzeit und GAK-Verbrauch			
behandelte Jahresabwassermenge	Q _{beh}	=	642.751 m ³ /a
Durchsatz bis Durchbruch	BV	=	20.000 m ³ /m ³ Vorgabewert
Zeit bis Durchbruch je Filter	t	=	681 d
Anzahl GAK-Wechsel je Jahr	n _{GAK}	=	0,54 pro Jahr
Filterstandzeit	t _{GAK}	=	22,4 Monate
GAK-Schüttgewicht	P _{GAK}	=	400,0 kg/m ³ Vorgabewert
Material pro Jahr	V _{GAK, Verbrauch}	=	5,4 m ³
	m _{GAK, Verbrauch}	=	2,1 Mg/a

4.3.3 Umsetzungskonzept

Die GAK-Filter werden auf der Fläche zwischen den bauseits vorhandenen Ablaufschächten E und F errichtet (Abbildung 38). Die Filteranlage wird aus dem Ablauf des Mikrosiebs über ein in Schacht D integriertes Pumpwerk beschickt. Die nicht behandelte Abwassermenge wird über die vorhandene Leitung abgeleitet. Für die Zufuhr zu den Filtern ist eine neue Druckleitung vorzusehen mit MID und einem zusätzlichen Schieber für die Bestandsleitung zum Ablauf als Trennbauwerk.

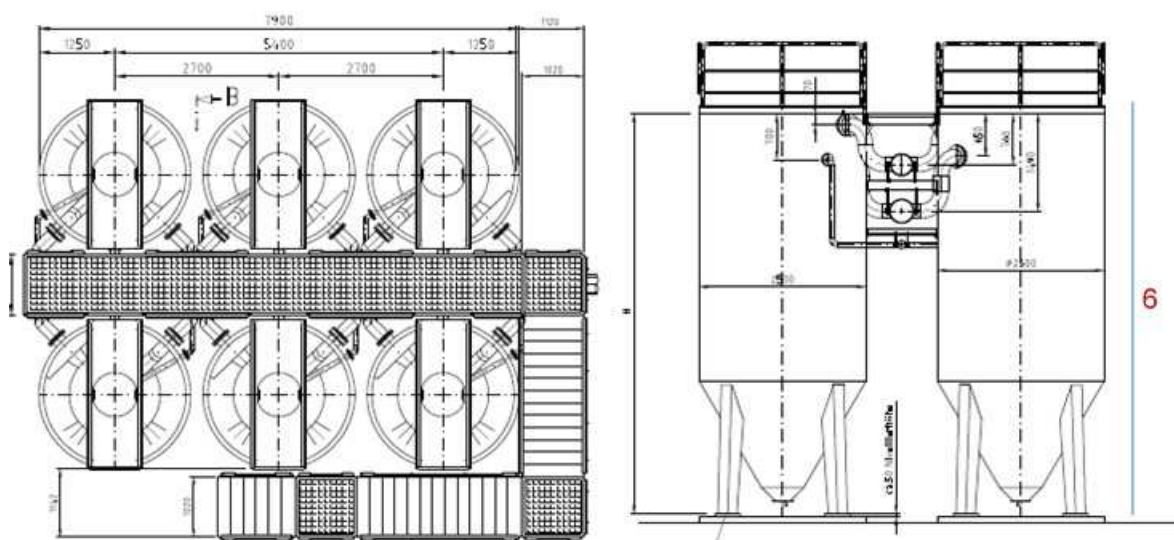


Abbildung 38: Beispielhafte Zeichnungen zu den vorgesehenen Filtern

Die GAK-Filter werden außen in Behälterbauweise aufgestellt und als Stahlkessel auf einem Fundament montiert (Abbildung 38). Es gibt ein zusätzliches Fundament, auf dem der Maschinencontainer mit der Druckluftanlage untergebracht ist. Die Druckluftsteuerung ist vollständig betriebsfertig ausgerüstet und dient zum Betrieb der Mammutpumpen. Sie beinhaltet Schraubenkompressoren und Druckluft-Behälter sowie die notwendige Steuereinheit und einen Adsorptionstrockner für die Druckluft.

Die Filter bestehen aus den GAK-Kesseln (DynaSand Carbon DSC 500 AD) mit dem entsprechenden Zubehör zur kontinuierlichen Spülung (Mammutpumpe). Die Filter werden über eine Stahlkonstruktion mit Bühne erreichbar sein. Jeder Filter ist mit GFK abgedeckt. Optional ist eine Einhausung möglich.

Für die hydraulische Einbindung der Filter ist die Bauhöhe der Filter zuzüglich der Druckverluste im Filterbett zu berücksichtigen. Insgesamt muss das Abwasser so etwa um 7 m gehoben werden und kann dann als Filtrat im freien Gefälle in den Ablaufschacht E zurückgeleitet werden, in den auch das RÜB einleitet.

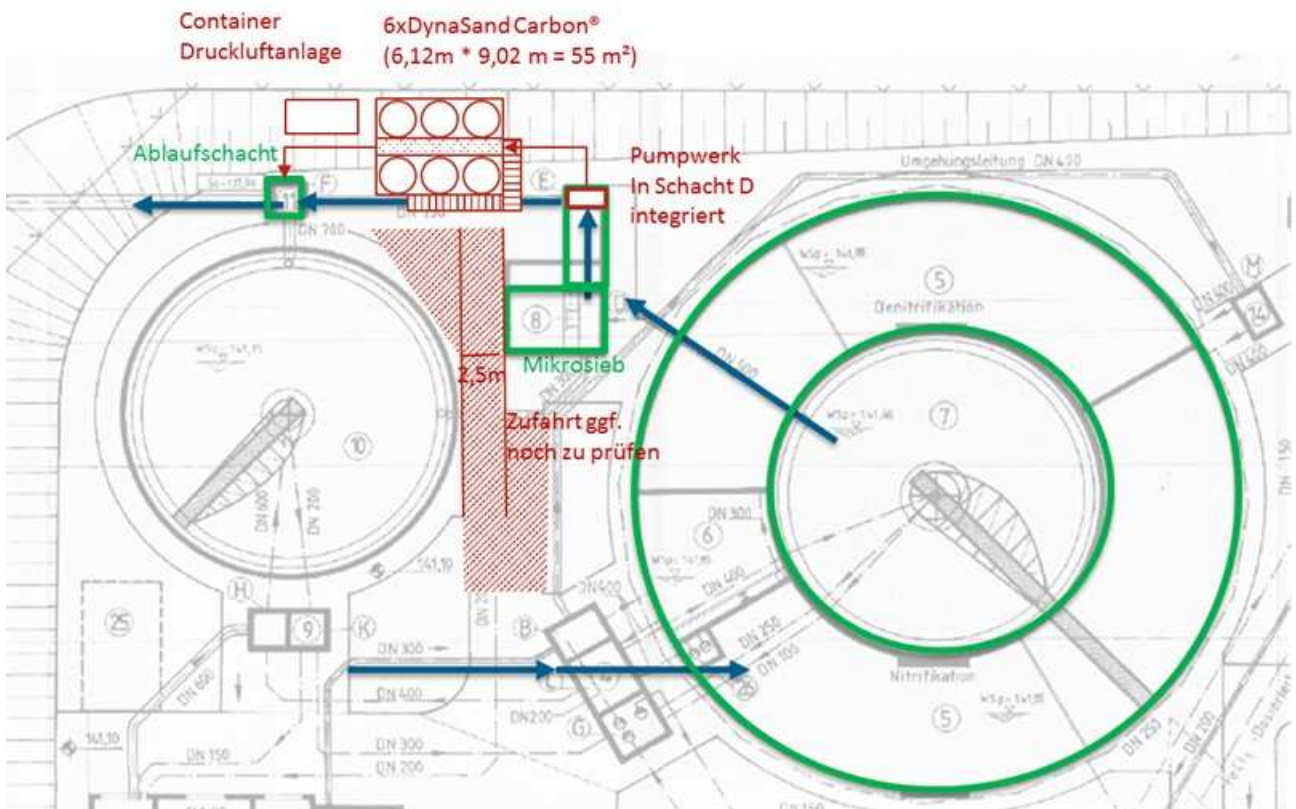


Abbildung 39: Lageplankonzept für Variante 2 mit GAK-Filtration

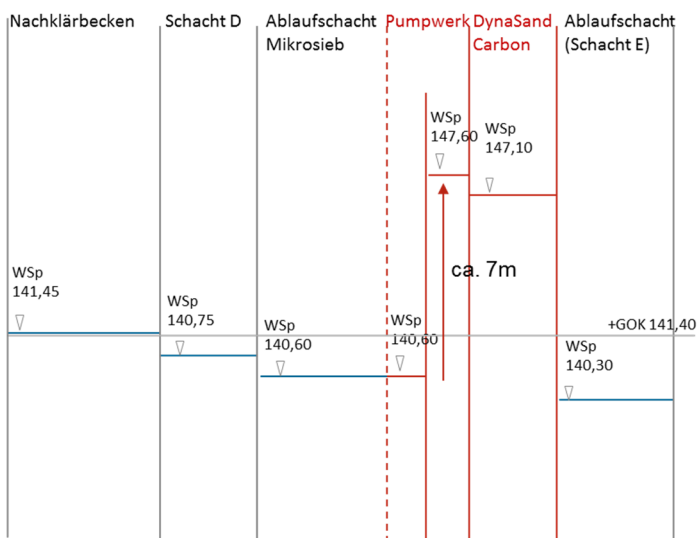


Abbildung 40: Hydraulische Einbindung

4.3.4 Investitionskosten

Die Investitionskosten wurden auf Basis von Richtpreisangeboten und Erfahrungen aus anderen Projekten abgeschätzt. Eine detaillierte Aufstellung aller Kostenpositionen mit Preisschätzungen findet sich im Anhang.

Die Kosten für die GAK-Filtration teilen sich im Wesentlichen auf in: Baustelleneinrichtung und Vorbereitung, Zulaufpumpwerk und Rohrleitungen, Bauseitige Arbeiten als Vorbereitung für den GAK-Filter sowie die vorgefertigten Filter in Behälterbauweise samt Peripherie (Container für Durckluftanlage).

Die Kosten betragen in Summe etwa 524.100 € (Tabelle 14). Zuzüglich unvorhersehbarem und Planungskosten liegen die Gesamtkosten bei ca. 0,71 Mio. € netto bzw. 0,84 Mio. € brutto. Bei den Kosten fällt auf, dass der die Maschinenteknik der Aufstellung der GAK-Filter erwartungsgemäß den größten Teil beansprucht. Hier könnten ggf. auch stattdessen Varianten mit gemieteten Stahlruckkesseln zum Einsatz kommen, um die Investitionskosten weiter zu reduzieren. In diesem Fall wurde aber der Bau eigener Filter betrachtet.

Tabelle 14: Zusammenfassung der Investitionskosten für die Variante 2 „GAK-Filter“

Pos Beschreibung	Gesamtkosten [€]
1 Baustelleneinrichtung	23.400 €
2 Zulauf-/Ablauf	32.000 €
3 Bauseitige Arbeiten GAK-Filter	75.000 €
4 GAK-Filter	393.700 €
Summe Positionen 1-4	524.100 €
Unvorhersehbares (15 %)	78.600 €
Nebenkosten (20%)	104.800 €
Gesamtsumme (netto)	707.500 €
Mehrwertsteuer (19 %)	134.400 €
Gesamtsumme (brutto)	841.900 €

4.3.5 Betriebs- und Jahreskosten

Bei der GAK-Filtration muss regelmäßig ein Austausch des Filtermaterials samt externer Reaktivierung stattfinden. Die Kosten hierfür wurden mit 11.900 €/a abgeschätzt. Weitere Stromkosten fallen für das Zwischenhebewerk und die Spülung des Filters an. Zusätzliche Personalkosten wurden hier mit 0,5 MA abgeschätzt.

Die Betriebskosten der GAK-Filtration wurden mit folgenden Kennwerten ermittelt

- Strombezugskosten 0,21 EUR/kWh
- Spez. Stromverbrauch Pumpe 4,5 Wh/(m³*m)
- Personalkosten 65.000 EUR/MA/a
- Materialkosten GAK 1,6 EUR/kg (450 kg/m³)
- Aufwand Austausch 1000 €/Filter
- Transportkosten GAK 5000 €/Anlieferung

Wartung und Instandhaltung wurden über folgende Prozentsätze der Netto-Investitionskosten abgeschätzt:

- Bautechnik: 1,0% der netto-Investitionskosten/a
- Maschinenteknik: 4,0% der netto-Investitionskosten/a
- E-/MSR-Technik: 2,0% der netto-Investitionskosten/a

Zusätzliche Kosten ergeben sich aus den kapitalisierten Investitionskosten mit folgenden Kennwerten:

- Nutzungsdauer Bautechnik 30 a
- Nutzungsdauer Maschinenteknik 15 a
- Nutzungsdauer E-/MSR-Technik 10 a
- Zinssatz 3,0 %

Insgesamt betragen die Gesamtbehandlungskosten 199.342 €/a 0,37 €/m³ brutto (Tabelle 12)

Tabelle 15: Zusammenfassung der jährlichen Kosten für die Variante 2 „GAK-Filter“

Pos.	Kurztext	Variante2	
		GAK-Filtration	
A	Kapitalgebundene Kosten		58.480 €/a
A1	Kapitalkosten Bau		6.610 €/a
A2	Kapitalkosten Maschinenteknik		39.760 €/a
A3	Kapitalkosten EMSR-Technik		12.110 €/a
B	Betriebsgebundene Kosten		54.900 €/a
B 1	Wartungs- und Instandhaltungskosten		22.400 €/a
B 2	Personalkosten		32.500 €/a
C	Verbrauchsgebundene Kosten		20.000 €/a
C1	Energiekosten		8.100 €/a
C2	Sauerstoff (flüssig)		0 €/a
C3	GAK - Granulierte Aktivkohle		11.900 €/a
C4	PAK - Pulverförmige Aktivkohle		0 €/a
C5	Schlamm Entsorgung PAK		0 €/a
C6	Fällmittel		0 €/a
C7	Kühlwasser		0 €/a
C8	Bodenfilter (pauschal gesamt)		0 €/a
A	Kapitalgebundene Kosten		58.480 €/a
B	Betriebsgebundene Kosten		54.900 €/a
C	Verbrauchsgebundene Kosten		20.000 €/a
	Jahreskosten netto		133.380 €/a
	+ 19 % MwSt.		25.342 €/a
	Jahreskosten brutto		158.722 €/a
	spez.Kosten (brutto):		0,25 €/m³

4.4 Variante 3: „PAK-Stufe“ Pulveraktivkohle mit eigenem Schlammkreislauf

4.4.1 Beschreibung

Bei dieser Variante wird Pulveraktivkohle (PAK) in ein separates Adsorptionsbecken (Kontaktbecken) dosiert. Die beladene Kohle wird anschließend über ein Sedimentationsbecken abgetrennt. Um den Austrag von Partikeln in das Gewässer zu vermeiden wird die vorhandene Mikrosiebung genutzt. Die in dem Sedimentationsbecken abgetrennte PAK wird im Kreis geführt (Rücklaufschlammkohle, PAK-RS). Dadurch ist die Kontaktzeit der Kohle von der hydraulischen Aufenthaltszeit entkoppelt und es kann analog zu der biologischen Reinigungsstufe ein PAK-Schlammalter eingestellt werden und so die Ausnutzung der Aktivkohle optimiert werden. D. h., die Kohle wird möglichst bis zum Gleichgewichtszustand beladen und die notwendige Zufuhr an Frischkohle so minimiert. Aus dem Rücklaufstrom der Kohle wird kontinuierlich auch ein PAK-Überschuss abgezogen, der gesondert entsorgt werden muss. Für einen optimalen Rückhalt der feinen PAK-Partikel müssen zusätzlich Fäll- und Flockungshilfsmittel dosiert werden. Für die großtechnische Umsetzung ist eine Dosieranlage mit einem entsprechenden Lagerbehälter für die Pulverkohle zu errichten. Außerdem müssen Kontakt- und Sedimentationsbecken mit den notwendigen Pumpen für die Schlammrückführung und den Schlammaustrag gebaut werden.

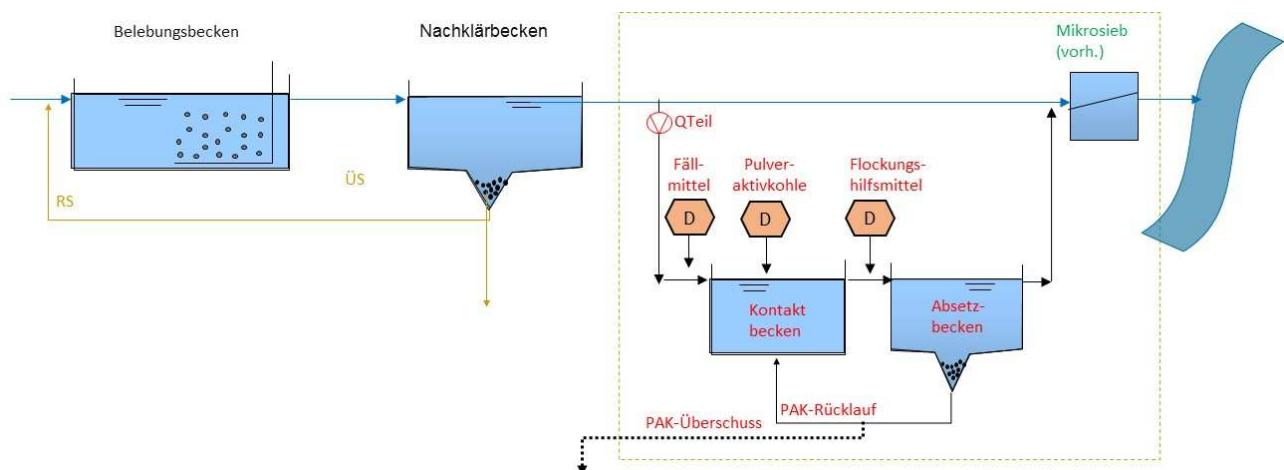


Abbildung 41: Schema Var.3. „PAK-Stufe“ für KA-Flonheim

4.4.2 Bemessung

Für die Auslegung der PAK-Stufe wird zunächst die erforderliche PAK-Dosis ermittelt. Dazu wird als Dosierfaktor $1,7 \text{ mg}_{\text{PAK}}/\text{mg}_{\text{DOC}}$ gewählt (micropoll, 2021). Der DOC im Zulauf zur 4. Reinigungsstufe (Ablauf Nachklärung) wird hier auf Basis der mittleren CSB-Konzentration von $28,0 \text{ mg/l}$ mit $9,33 \text{ mg}_{\text{DOC}}/\text{l}$ abgeschätzt (Faktor $1/3$). Damit ist eine mittlere PAK-Dosierung von $15,9 \text{ mg/l}$ erforderlich, was bezogen auf die Bemessungswassermenge eine Dosierleistung von maximal $2,6 \text{ kg/h}$ und minimal $0,5 \text{ kg/h}$ erforderlich macht.

Tabelle 16: Bemessung der PAK-Dosierung

PAK-Dosierung		
PAK-Dosis	$C_{\text{PAK, min}} =$	$1,7 \text{ mg}_{\text{PAK}}/\text{mg}_{\text{DOC}}$
DOC im Zulauf	$C_{\text{DOC, zu}} =$	$9,33 \text{ mg/l}$
PAK-Dosierung	$C_{\text{PAK, mittel}} =$	$15,87 \text{ mg/l}$
max PAK-Menge bei Q_{bem}	$B_{\text{d, PAK, max}} =$	$2,6 \text{ kg/h}$
max PAK-Menge bei Q_{beh}	$B_{\text{d, PAK, mittel}} =$	$1,2 \text{ kg/h}$
max PAK-Menge bei Q_{min}	$B_{\text{d, PAK, min}} =$	$0,5 \text{ kg/h}$

Das Kontaktbecken für die Adsorption wird für eine Aufenthaltszeit von mindestens 30 Minuten bei Bemessungswassermenge dimensioniert. Daraus ergibt sich ein erforderliches Volumen von $82,5 \text{ m}^3$. Es wird eine Tiefe von 4,5 m gewählt, wodurch die notwendige Beckenfläche $A = 18,3 \text{ m}^2$ beträgt. Es wird ein Rechteckbecken mit $4,3 \times 4,3 \text{ m}$ angenommen.

Tabelle 17: Bemessung des erforderlichen Kontaktbeckens

Kontaktbecken			
erf. Aufenthaltszeit	t =	30 min	Vorgabewert
erf. Volumen	erf V =	$82,5 \text{ m}^3$	berechnet mit Q_{bem}
gewählte Tiefe	gew h =	4,5 m	gewählt
Oberfläche	A =	$18,3 \text{ m}^2$	berechnet
Anzahl Becken	n =	1 -	gewählt
Länge	L =	4,28	berechnet
Breite	B =	4,28	berechnet

Das Sedimentationsbecken wird für eine Aufenthaltszeit von 90 Minuten bemessen (nach micropoll, 2020). Daraus ergibt sich für Q_{bem} ein erforderliches Volumen von $247,5 \text{ m}^3$. Mit einer maximalen Oberflächenbeschickung von 2 m/h berechnet sich eine erforderliche Fläche von $82,5 \text{ m}^2$. Bei einer Tiefe von 3 m für das Absetzbecken ist somit eine Beckengeometrie von etwa $4 \times 21 \text{ m}$ notwendig.

Tabelle 18: Bemessung des erforderlichen Sedimentationsbeckens

Sedimentationsbecken			
erf. Aufenthaltszeit	t =	90 min	Vorgabewert
erf. Volumen	erf V =	$247,5 \text{ m}^3$	berechnet mit Q_{bem}
erf. Oberflächenbeschickung	erf qA =	2 m/h	Vorgabewert
erf. Oberfläche	erf A =	$82,5 \text{ m}^2$	berechnet aus qA und Q_{bem}
erf. Tiefe	gew h =	3 m	gewählt
gewählte Breite	B =	4	gewählt
erforderliche Länge	L =	20,63 m	berechnet

Die Lagerung der PAK erfolgt hier in kleinen Vorlagebehältern von je $1,50 \text{ m}^3$ Nutzvolumen, die direkt auf den Dosiercontainer gehoben werden können. Bei einer PAK-Dichte von 425 kg/m^3 beträgt die Kapazität eines Behälters damit 638 kg. Es werden zusätzliche drei Behälter vorgehalten und wechselweise ausgetauscht, so dass in Summe 2.550 kg an Kapazität bestehen. Für das Tauschen der Behälter wird eine Krananlage oder ein mobiler Stapler benötigt. Bei der mittleren Dosiermenge ergibt sich eine Standzeit von etwa drei Monaten, so dass die Behälter ca. quartalsweise neu befüllt bzw. ausgetauscht werden müssen. Jährlich werden rund 10 t/a Pulveraktivkohle verbraucht.

Tabelle 19: Bemessung der PAK-Lagerung und des Jahresverbrauchs

PAK-Lagerung (Silo / Lagerbehälter)			
Silogröße (gewählt)	V_{ges} =	$1,65 \text{ m}^3$	(Bruttovolumen)
	V_{nutzbar} =	$1,50 \text{ m}^3$	(Nutzvolumen)
PAK-Dichte	P_{PAK} =	425 kg/m^3	(Rütteldichte)
Kapazität je Silo	$m_{\text{PAK, Silo}}$ =	638 kg	
Anzahl Silos	n_{Silo} =	4 -	
Kapazität gesamt	m_{PAK} =	2.550 kg	
Reichweite für Q_{Teil}	=	91,3 d	
	t_{PAK} =	3,0 Monate	
Jahresverbrauch PAK	$m_{\text{PAK, Verbrauch}}$ =	10,2 Mg/a	
Anzahl Lieferungen pro Jahr	=	4,0 [-]	

Die Filtration erfolgt mit dem vorhandenen Mikrosieb.

4.4.3 Umsetzungskonzept

Für die Umsetzung der PAK-Stufe wird ein zusätzliches Trennbauwerk mit Schacht am Übergabepunkt des Ablaufs der Nachklärung zum Mikrosieb installiert. Der Abwasserteilstrom bis Q_{Bem} von dort mittels Tauchpumpe über eine kurze Druckleitung zu dem Kontaktbecken mit Rührwerk geleitet. An das Kontaktbecken ist ein längs durchströmtes Sedimentationsbecken (20m x 4m) angegliedert (Abbildung 43). Über einen Rümer wird der PAK-Schlamm in einen Trichter zurückgefördert und von dort mittels Rückföhrpumpwerk wieder in das Absetzbecken geleitet. Dabei kann ein Teil als Überschussschle ab entnommen werden. Aus dem Sedimentationsbecken fließt das gereinigte Abwasser anschließend zurück in den Zulauf zum Mikrosieb.

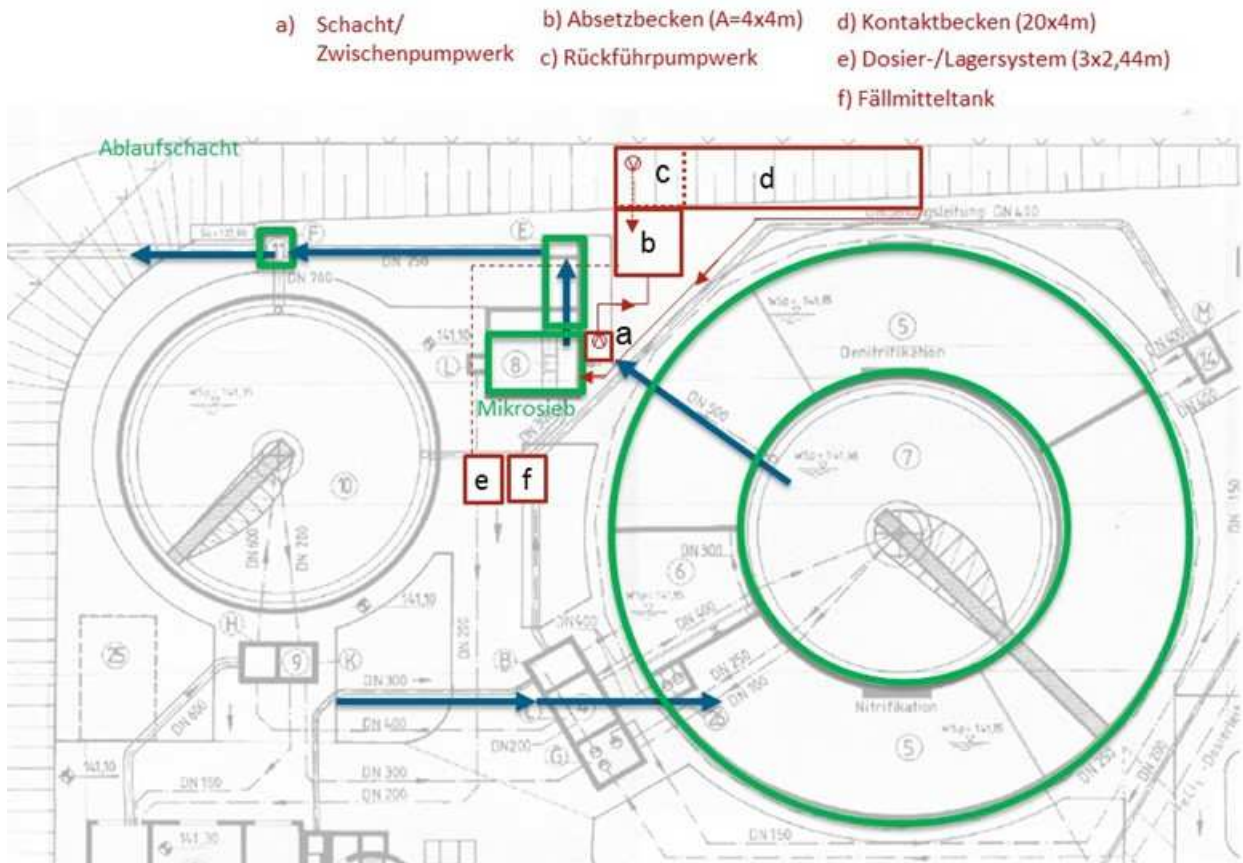


Abbildung 42: Lageplankonzept für die Umsetzung der Variante 3 mit separater PAK-Stufe



Abbildung 43: PAK Zugabe als Suspension (links) (Quelle <https://nrw-mikro.amit-services.de/presse/anlagenfotos>) und Kettenräumer in einem längsdurchströmten Sedimentationsbecken (rechts) (Quelle: https://koms-bw.de/klaeranlagen/bilder_videos/)

Für die Dosierung wird ein kombiniertes Pulveraktivkohlelager- und Dosiersystem in Containerbauweise gewählt (Abbildung 44). Die Dosierung der PAK erfolgt mittels eines Vorlagebehälters, der über eine Zellrad-schleuse aus dem Lagerbehälter befüllt wird. Aus dem Vorlagebehälter wird über eine Dosierschnecke eine Dosierwaage beschickt, mit der die erforderliche Dosiermenge gravimetrisch bestimmt wird. Aus der ausgewogenen PAK-Menge wird in einem Einspültrichter eine PAK-Suspension erzeugt und diese über eine Dosierleitung in den Zulauf zum Kontaktbecken gefördert. Die Dosierung wird in Abhängigkeit der Teilstromwasser-menge geregelt und kann zusätzlich bei Bedarf über eine Messsonde für den DOC optimiert werden. Wei-tere Trübungssonden kontrollieren die Dosierung.

Die Dosierstation muss für einen Austausch und die Neubevorratung der Lagerbehälter erreichbar sein und gleichzeitig möglichst nah am Kontaktbecken liegen. Sie wird daher mittig zwischen RÜB und BB platziert. Für den Austausch der Vorlagebehälter wird ein mobiler Kran bzw. ein Gabelstapler mit eingeplant. Daneben wird eine weitere Dosierstation für Fäll- und Flockungsmittel errichtet.



Abbildung 44: Beispiel einer PAK-Dosieranlage (Typ. AK-Dos, Fa. Sülzle-Kopf) von außen (links) und Innen (rechts)

Nicht sedimentierte PAK-Partikel werden in dem vorhandenen Mikrosieb zurückgehalten. Die Abscheideleistung ist vergleichbar mit der eines Tuchfilters (Tabelle 20). Allerdings sollte das Filtergewebe von 20 µm auf 10 µm gewechselt werden, da die PAK-Partikel üblicherweise (je nach PAK-Sorte) einen Anteil von etwa 30 % kleiner gleich 20 µm aufweisen. Ein Großteil der Abscheidung erfolgt aber bereits in dem Sedimentationsbecken, so dass das Mikrosieb hier nur als „Polzeifilter“ dient.

Tabelle 20: Abscheideleistung von Filtrationseinheiten zum Rückhalt von Pulveraktivkohle (Bornemann et al, 2012)

Betriebsphase	Sedimen-tation	Lamellen-abscheider	Mikrosieb	Tuchfilter	Flotation
10 mg/l PAK	47 %	54 %	83 %	91%	52 %*
20 mg/l PAK	53 %	66 %	87 %	93 %	-
10 mg/l PAK 2 mg/l Fe	48 %	46 %	62 %	90 %	23 %
20 mg/l PAK 2 mg/l Fe	46 %	53 %	79 %	96 %	30 %
10 mg/l PAK; 2 mg/l Fe; 0,5 mg/l Poly.	65 %	69 %	-	92 %	48 %
20 mg/l PAK; 2 mg/l Fe; 0,5 mg/l Poly.	75 %	72 %	-	96 %	47 %

* alte Flotationsanlage

4.4.4 Investitionskosten

Die Investitionskosten wurden auf Basis von Richtpreisangeboten und Erfahrungen aus anderen Projekten abgeschätzt. Eine detaillierte Aufstellung aller Kostenpositionen mit Preisschätzungen findet sich im Anhang.

Die Kosten für die PAK-Stufe im Wesentlichen auf in: Baustelleneinrichtung und Vorbereitung, Baukosten für Kontakt- und Sedimentationsbecken, PAK-Dosiereinheit und Einrichtung der Dosierstelle.

Die Kosten betragen in Summe etwa 836.100 € (Tabelle 21). Zuzüglich unvorhersehbarem und Planungskosten liegen die Gesamtkosten bei ca. 1,13 Mio. € netto bzw. 1,34 Mio. € brutto.

Die Kosten für die Bautechnik zur Errichtung der Kontakt- und Sedimentationsbecken sind deutlich höher als die Kosten der eigentlichen PAK-Dosiertechnik. Bei einer simultanen Dosierung in die Biologie würden diese Kosten entfallen, allerdings wäre dann eine doppelt so hohe Dosierung erforderlich (

Tabelle 21: Zusammenfassung der Investitionskosten für Variante 3 „PAK-Stufe“

Pos	Beschreibung	Gesamtkosten [€]
1	Baustelleneinrichtung	66.222,08 €
2	Sonstiges	7.500,00 €
3	Kontaktbecken	187.783,33 €
4	Sedimentationsbecken	392.275,00 €
5	Filter (bauseits)	0,00 €
6	PAK-Dosiereinheit (AK-Dos)	215.200,00 €
7	Zentrale Dosierstelle	29.600,00 €
8	Pulveraktivkohle (Erstbefüllung)	3.825,00 €
Summe Positionen 1-3		836.183,33 €
	Unvorhersehbares (15 %)	125.427,50 €
	Nebenkosten (20%)	167.236,67 €
Gesamtsumme (netto)		1.128.847,50 €
	Mehrwertsteuer (19 %)	214.481,03 €
Gesamtsumme (brutto)		1.343.328,53 €

4.4.5 Betriebs- und Jahreskosten

Bei der PAK-Zugabe müssen die Lagerbehälter regelmäßig mit Frischkohle aufgefüllt werden. Bei etwa 1.700 €/kg Pulverkohle und vier Lieferungen pro Jahr a 2,5t betragen die jährlichen Kosten für die PAK ca. 27.000 €/a. Weitere Kosten fallen insbesondere für die Entsorgung der ausgeschleusten PAK-Überschusses an, der nicht mit dem normalen Klärschlamm entsorgt werden kann. Hierfür wurden Entsorgungskosten von 600 €/t angesetzt, da der Schlamm vermutlich zu einer externen Verbrennung geführt werden muss. Stromkosten fallen für das Zwischenhebewerk und das Rührwerk im Kontaktbecken an. Zusätzliche Personalkosten wurden hier mit 0,5 MA abgeschätzt.

Die Betriebskosten der GAK-Filtration wurden mit folgenden Kennwerten ermittelt

- Strombezugskosten 0,21 EUR/kWh
- Spez. Stromverbrauch Pumpe 4,5 Wh/(m³*m)
- Personalkosten 65.000 EUR/MA/a
- Materialkosten PAK 1,7 EUR/kg
- Entsorgungskosten PAK-ÜS 600 €/t

Wartung und Instandhaltung wurden über folgende Prozentsätze der Netto-Investitionskosten abgeschätzt:

- Bautechnik: 1,0% der netto-Investitionskosten/a
- Maschinenteknik: 4,0% der netto-Investitionskosten/a
- E-/MSR-Technik: 2,0% der netto-Investitionskosten/a

Zusätzliche laufende Kosten ergeben sich aus den kapitalisierten Investitionskosten mit folgenden Kennwerten:

- Nutzungsdauer Bautechnik 30 a
- Nutzungsdauer Maschinenteknik 15 a
- Nutzungsdauer E-/MSR-Technik 10 a
- Zinssatz 3,0 %

Insgesamt betragen die Behandlungskosten 201.051 €/a bzw. 0,31 €/m³ brutto (Tabelle 22).

Tabelle 22: Zusammenfassung der jährlichen Kosten für die Variante 3 „PAK-Stufe“

Pos.	Kurztext	Variante3
		PAK-Stufe
A	Kapitalgebundene Kosten	78.010 €/a
A1	Kapitalkosten Bau	43.455 €/a
A2	Kapitalkosten Maschinenteknik	21.055 €/a
A3	Kapitalkosten EMSR-Technik	13.500 €/a
B	Betriebsgebundene Kosten	54.357 €/a
B 1	Wartungs- und Instandhaltungskosten	20.857 €/a
B 2	Personalkosten	33.500 €/a
C	Verbrauchsgebundene Kosten	36.583 €/a
C1	Energiekosten	1.200 €/a
C2	Sauerstoff (flüssig)	0 €/a
C3	GAK - Granulierte Aktivkohle	0 €/a
C4	PAK - Pulverförmige Aktivkohle	27.335 €/a
C5	Schlammensorgung PAK	6.119 €/a
C6	Fällmittel	1.928 €/a
C7	Kühlwasser	0 €/a
A	Kapitalgebundene Kosten	78.010 €/a
B	Betriebsgebundene Kosten	54.357 €/a
C	Verbrauchsgebundene Kosten	36.583 €/a
	Jahreskosten netto	168.950 €/a
	+ 19 % MwSt.	32.101 €/a
	Jahreskosten brutto	201.051 €/a
	spez.Kosten (brutto):	0,31 €/m³

5 VARIANTENVERGLEICH

5.1 Kostenvergleich

Investitionskostenvergleich

Bei den Investitionskosten liegt die GAK-Filtration im Vergleich mit nur ca. 0,7 Mio.€ netto auf Rang 1 gefolgt von der Ozonbehandlung mit etwa 1,1 Mio.€ netto. Das ist ein Unterschied von etwa 50 %, der sich im Wesentlichen daraus ergibt, dass für die Ozonbehandlung auch eine Sandfiltration neu gebaut werden muss und die Maschinentechnik deutlich teurer ist. Die PAK-Stufe ist mit 1,2 Mio.€ netto nochmals teurer, da hier das meiste Beckenvolumen und mehrere Pumpwerke samt Dosierstation errichtet werden müssen. Insgesamt ist der Aufwand für den GAK-Filter mit der Errichtung der Filtersäulen und einer Druckluftanlage daher am geringsten. Es ist allerdings zu beachten, dass es sich um außen aufgestellte Filter in Behälterbauweise handelt und eine Einhausung zusätzliche Kosten verursachen würde.

Tabelle 23: Vergleich der Investitionskosten

Pos.	Kurztext		Variante 1	Variante 2	Variante 3
			Ozon-behandlung	GAK-Filtration	PAK-Stufe
1	Bautechnik	€	249.000 €	129.600 €	851.734
2	Maschinentechnik	€	617.400 €	474.600 €	251.358
3	E/MSR-Technik	€	212.700 €	103.300 €	115.155
	Gesamtsumme (netto)	€	1.079.100	707.500	1.218.247
	+ 19 % MwSt.	€	205.000	134.400	231.467
	Gesamtsumme (brutto)	€	1.284.100	841.900	1.449.714
	Verhältnis		153%	100%	172%

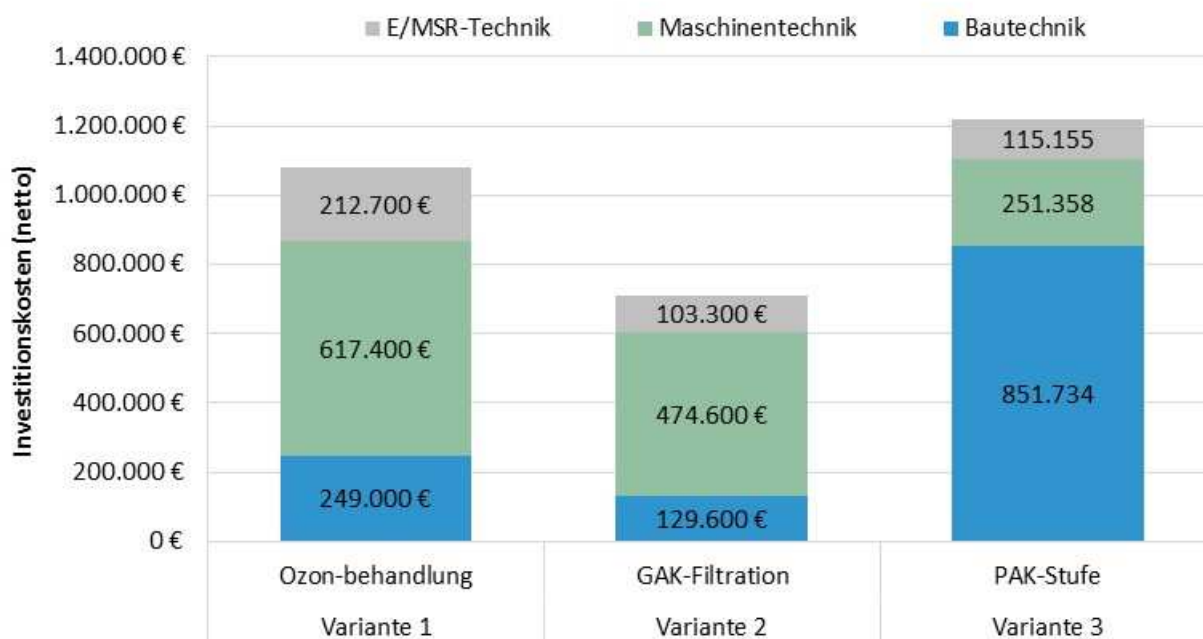


Abbildung 45: Vergleich der Investitionskosten je Variante mit Aufteilung auf die Kostengruppen

Betriebskostenvergleich

Die Betriebskosten teilen sich auf in Wartung/Instandhaltung und Personal. Bedingt durch den höheren Anteil an Maschinentechnik hat die Ozonstufe etwas höhere Wartungskosten, der Unterschied ist aber nur gering. Die Personalkosten sind bei allen Verfahren etwa gleich. Bei den Verbrauchskosten fallen bei der Ozonbehandlung hohe Energiekosten von 16.400 €/a an und zusätzlich laufende Kosten für den Bezug des Flüssigsauerstoffs. Dagegen müssen bei der PAK-Stufe sehr hohe Kosten für die Frischkohle angesetzt werden. Insgesamt sind die Betriebskosten mit 0,14 bis 0,17 €/m³ für alle Varianten vergleichbar. Die GAK-Filtration hat einen leichten Kostenvorteil von ca. 20%. Hierbei ist aber auch anzumerken, dass die Kosten für die GAK marktabhängig sind und auch höher ausfallen können.

Tabelle 24: Betriebskostenvergleich der untersuchten Varianten

Pos.	Kurztext		Variante 1	Variante 2	Variante 3
			Ozonbehandlung	GAK-Filtration	PAK-Stufe
1	Betriebsgebundene Kosten	€/a	64.000	54.900	54.357
1.1	Wartungs- und Instandhaltung	€/a	31.500	22.400	20.857
1.2	Personalkosten	€/a	32.500	32.500	33.500
2	Verbrauchsgebundene Kosten	€/a	29.412	18.400	36.583
2.1	Energiekosten	€/a	16.400	6.300	1.200
2.2	Sauerstoff (flüssig) inkl. Tankmiete	€/a	11.260		
2.3	GAK - Granulierte Aktivkohle	€/a		12.100	
2.4	PAK - Pulverförmige Aktivkohle	€/a			27.335
2.5	Schlamm Entsorgung PAK	€/a			6.119
2.6	Fällmittel / Flockungshilfsmittel	€/a			1.928
2.7	Kühlwasser	€/a	1.752		
	Betriebskosten netto	€	93.412	73.300	90.940
	+ 19 % MwSt.	€	17.700	13.900	17.300
	Betriebskosten brutto	€	111.112	87.200	108.240
	spez.Kosten (nur Betrieb):	€/m ³	0,17 €/m³	0,14 €/m³	0,17 €/m³
	Verhältnis		100%	78%	97%

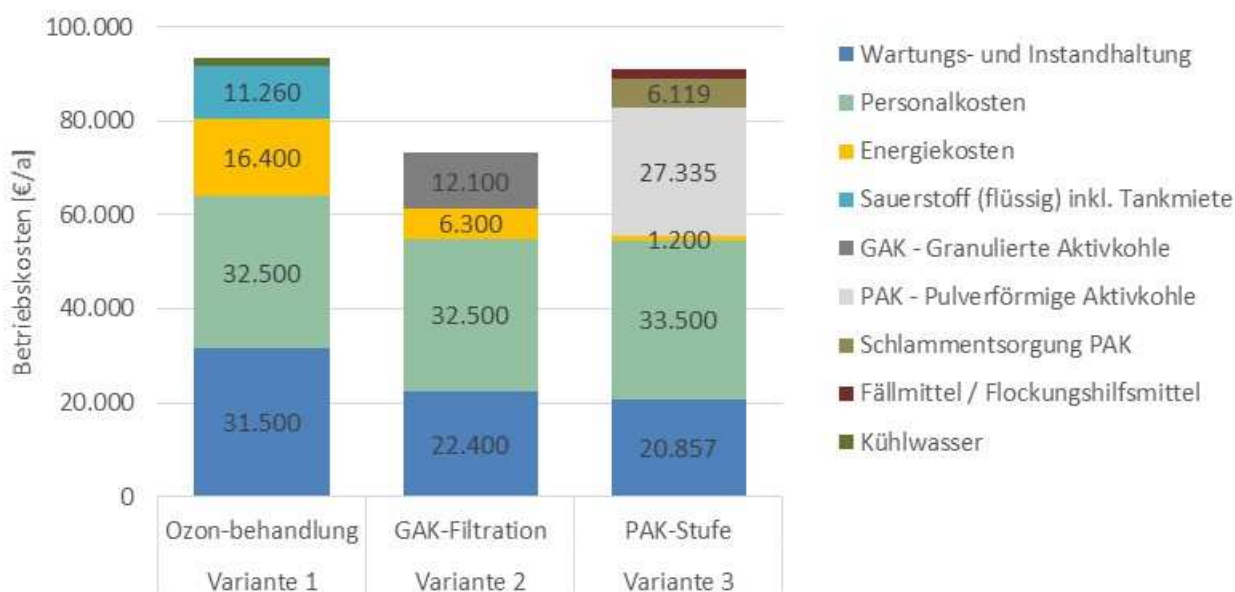


Abbildung 46: Betriebskostenvergleich der untersuchten Varianten

Jahreskosten

Die Jahreskosten wurden aus der Summe der über die Nutzungsdauer kapitalisierten Investitionskosten und der Betriebs- und Verbrauchskosten berechnet. So ergeben sich Gesamtbehandlungskosten, die je nach Verfahren bei 132.000 €/a bis 183.000 €/a netto liegen. Die spezifischen Behandlungskosten bezogen auf die behandelte Wassermenge liegen bei 0,24 bis 0,34 €/m³ brutto. Insgesamt hat die GAK-Filtration einen Kostenvorteil gegenüber den anderen Varianten von 28 % bzw. 39 %.

Tabelle 25: Vergleich der Jahreskosten

Pos.	Kurztext		Variante 1 Ozon	Variante 2 GAK	Variante 3 PAK
A	Kapitalgebundene Kosten	€/a	89.400	58.500	78.010
B	Betriebsgebundene Kosten	€/a	64.000	54.900	54.357
C	Verbrauchsgebundene Kosten	€/a	29.400	18.400	36.583
	Jahreskosten netto	€/a	182.800	131.800	168.950
	spez. Kosten (netto)	€/m ³	0,28	0,21	0,26
	+ 19 % MwSt.	€/a	34.700	25.000	32.101
	Jahreskosten brutto	€/a	217.500	156.800	201.051
	spez. Kosten (brutto):	€/m ³	0,34	0,24	0,31
	Verhältnis		139%	100%	128%

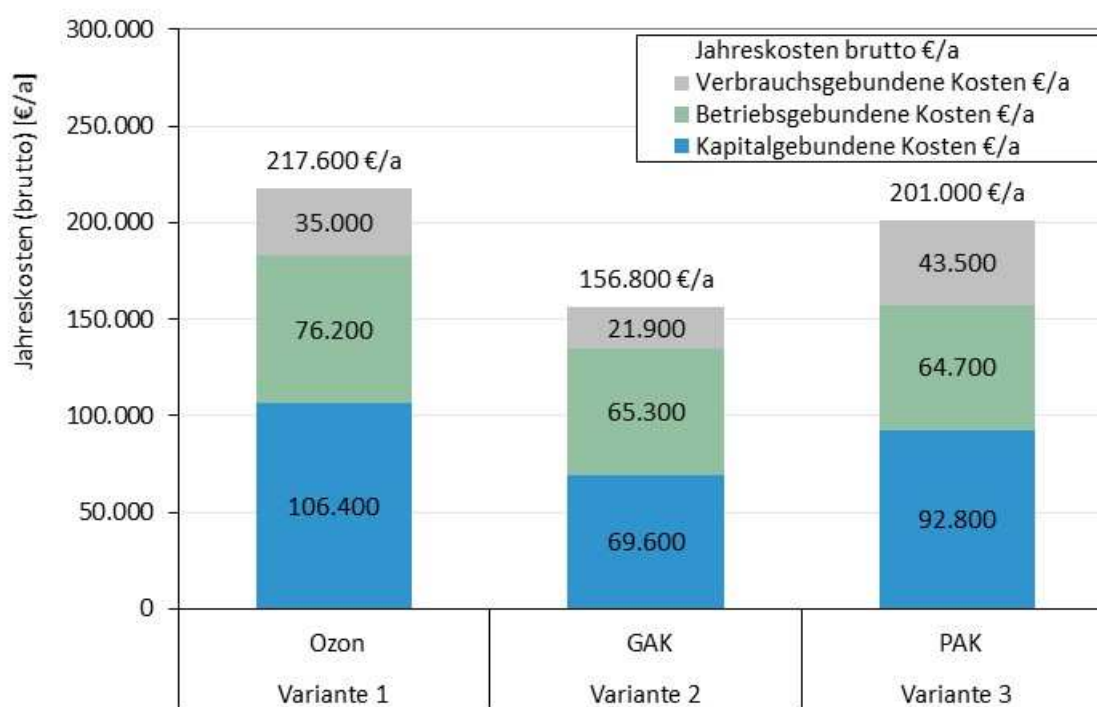


Abbildung 47: Vergleich der Jahreskosten

5.2 CO₂-Bilanz

Im Rahmen der Studie wurde eine vereinfachte CO₂-Bilanzierung zur Ermittlung des Treibhausgaspotenzials durchgeführt. Der Bilanzraum umfasst die gesamte Verfahrensstufe der Spurenstoffelimination mit allen Verbräuchen an Strom und Chemikalien inklusive deren Vorketten. Es wird jedoch keine Bilanzierung der erforderlichen Infrastruktur (Bausubstanz) berücksichtigt.

Für die CO₂-Bilanz werden die Verbrauchsmittel und Energieträger gemäß der beschriebenen Umsetzungskonzepte verwendet. Hinzu kommen die Treibstoffverbräuche der Transporte für Aktivkohle oder Flüssigsauerstoff. Sofern möglich werden jeweils direkte und indirekte Emissionen inklusive der Produktions-Vorketten berücksichtigt. Dazu werden die Verbräuche als äquivalente Treibhausgasemissionen auf den CO₂ normiert.

Für alle Verbrauchsmittel wurden möglichst aktuelle CO₂-Emissionsfaktoren aus entsprechenden Umweltdatenbanken recherchiert. Die Bezugsjahre der recherchierten Emissionskennwerte sind jedoch zum Teil sehr unterschiedlich, so dass Unsicherheiten bei der Bewertung nicht auszuschließen sind. Da Klärschlamm hier als regenerative Ressource (Biomasse) eingestuft wird, werden die direkten Emissionen aus der Verbrennung des Kohlenstoffs nicht bei der CO₂-Bilanz berücksichtigt.

Tabelle 26: Zusammenfassung der CO₂-Bilanzierung der untersuchten Varianten

Pos.	Kurztext		Variante 1 Ozon- behandlung	Variante 2 GAK-Filtration	Variante 3 PAK-Stufe
1	Stromverbrauch Hebewerke	kgCO ₂ /a	12.566	10.989	3.404
2	Stromverbrauch Ozonherstellung	kgCO ₂ /a	27.920	0	0
3	Stromverbrauch Filterspülung	kgCO ₂ /a	1.716	5.147	0
4	Stromverbrauch Rührwerke	kgCO ₂ /a	0	0	3.931
5	Flüssigsauerstoff (Herstellung+Transport)	kgCO ₂ /a	13.203	0	0
6	GAK (Reaktivierung+Transport)	kgCO ₂ /a	0	8.032	0
7	PAK (Herstellung+Transport)	kgCO ₂ /a	0	0	148.654
8	Schlammentsorgung PAK (Transport)	kgCO ₂ /a	0	0	0
9	Gutschrift Schlammverbrennung Heizwert	kgCO ₂ /a	0	0	0
10	Hilfsmittel (Fällmittel, Sand, ...)	kgCO ₂ /a	55	0	0
11	Kühlwasser	kgCO ₂ /a	0	0	0
12	Bodenfilter	kgCO ₂ /a	0	0	0
1-12	Gesamt	kgCO₂/a	55.460	24.167	155.989

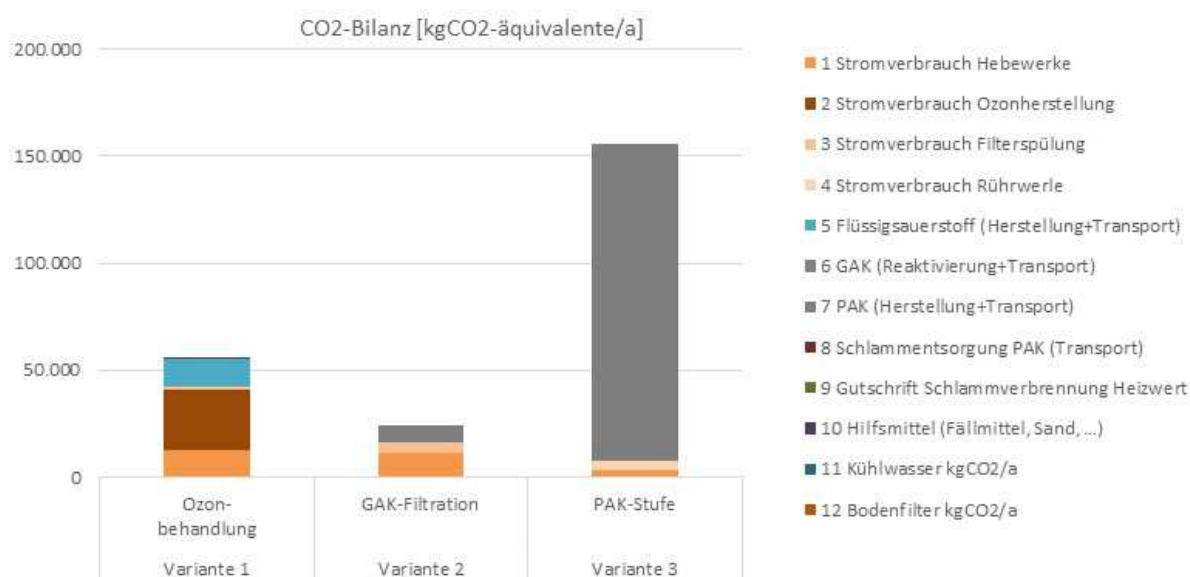


Abbildung 48: Ermittelte netto CO₂-Äquivalente bei Umsetzung der Verfahren

5.3 Bewertung

Für eine abschließende Bewertung der untersuchten Varianten zur Spurenstoffelimination auf der KA Flonheim wird eine Bewertung mit vier Kriterien in unterschiedlicher Gewichtung durchgeführt. Zuvor werden zusätzlich jedoch zunächst drei relevante Vorbedingungen überprüft:

Vorbedingungen

1. Energieverbrauch:

Der zusätzliche Energieverbrauch der gezielten Spurenstoffelimination soll wenn möglich durch Energieeinsparmaßnahmen in anderen Bereichen oder zusätzliche Eigenstromerzeugung regenerativer Energie kompensiert werden. Bei den betrachteten Varianten für die Kläranlage wird etwa 80.000 kWh/a (Ozon), 30.000 kWh/a (GAK) bzw. 15.000 kWh/a (PAK) zusätzlich verbraucht. Durch die geplante Maßnahme des Schlammverbunds mit der KA Alzey können auf der KA Flonheim allerdings allein durch die Integration des Vorklärbeckens ca. 220.000 kWh/a Belüftungsenergie eingespart werden und zusätzlich die Eigenstromerzeugung in Alzey um weitere rd. 200.000 kWh/a erhöht werden (IB Siekmann, 2019). Daher kann für alle drei Varianten zur Spurenstoffelimination davon ausgegangen werden, dass der Mehrverbrauch der Spurenstoffelimination bezogen auf den Strombezug nicht die erzielbaren Stromeinsparungen übersteigt.

2. Synergien zur P-Elimination:

Mit den Maßnahmen zur Spurenstoffelimination soll wenn möglich auch eine Verbesserung der Phosphorelimination mitbetrachtet werden. Bei der Variante 1 (Ozon) bietet der vorgesehene Sandfilter zur Nachbehandlung gleichzeitig auch eine zusätzliche Filtration von partikulärem Phosphor sowie zusätzlich auch die Option der Nachfällung (auch ohne das vorhandene Mikrosieb). Bei der Variante 2 (GAK) ist der GAK-Filter grundsätzlich gemäß Herstellerangaben ebenfalls geeignet um Fällungsprodukte zurückzuhalten. Sollte der Filter für die Nachfällung verwendet werden, wird jedoch empfohlen zusätzlich bei der Auswahl der Aktivkohle in Absprache mit dem Hersteller eine geeignete Körnung zu wählen. Bei der Variante 3 (PAK) gibt es einen positiven Effekt durch die zusätzliche verfahrensbedingte Fällmittelzugabe, die gleichzeitig auch als kontinuierliche Nachfällung dient. Bei allen Varianten ergibt sich somit ein positiver Effekt auf die P-Elimination.

3. Vermeidung von Transformationsprodukten und Sicherstellung Partikelrückhalt

Eine negative Wirkung durch Einleitung von Reaktionsprodukten der Ozonung soll ausgeschlossen werden. Zudem soll auch der Eintrag von Aktivkohlepartikeln ins Gewässer vermieden werden, da die adsorbierten Schadstoffe dort sonst desorbieren können.

Der vorgesehene Sandfilter als Nachbehandlung nach der Ozonung (Variante 1) ist geeignet um die Transformations- und Oxidationsprodukte ausreichend abzubauen. Dazu zählt auch das potenziell kanzerogene Nitrosodimethylamin (NDMA). Je nach Abwasserzusammensetzung kann jedoch auch Bromat durch die Oxidation von Bromid gebildet werden. Da Bromat unter aeroben Bedingungen nicht abgebaut wird (Wunderlin et al, 2015), ist eine Nachbehandlung nicht ausreichend. Eine hohe Bromidkonzentration ist somit ein Ausschlusskriterium für die Ozonbehandlung. Da bisher noch kein Bromid gemessen wurde, kann die Eignung des Abwassers für eine Ozonbehandlung noch nicht vollständig geklärt werden.

Ein Eintrag von Aktivkohlepartikeln kann bei den untersuchten Varianten ausgeschlossen werden. Bei einer simultanen PAK-Dosierung in die Biologie müsste der ausreichende Rückhalt in der Nachklärung und in dem Mikrosieb abgeklärt werden. Aber durch die Sedimentationsstufe mit Zugabe von Flockungshilfsmittel ist ein ausreichender Rückhalt gewährleistet.

Bewertung

- **Jahreskosten (35%):** Die Summe der Kapital- und Betriebskosten geht mit 35 % in die Bewertung ein. Hier wird die GAK-Filtration als kostengünstigste Variante mit 3 Punkten bewertet und die beiden anderen Varianten gleichwertig mit je 2 Punkten.
- **Elimination Spurenstoffe (25%):** Die stoffspezifische Reduzierung der Spurenstoffe wird mit 25 % Wichtigkeit berücksichtigt. Die Bewertung bezieht sich hierbei lediglich auf die Wirkung bezogen auf ausgewählte Indikatorsubstanzen (Terbutryn, Diclofenac, Benzotriazol, Carbamazepin, Sulfamethoxazol, Metoprolol) in Anlehnung an Kom-M.NRW (2018) und KOMS (2020). Je nach Substanzauswahl kann die Einordnung variieren. Aufgrund der höchsten Breitbandwirkung erhält hier die Ozonbehandlung mit 3 Punkten vor den Adsorptionsverfahren mit je 2 Punkten die höchste Bewertung. Grundsätzlich können bei allen Verfahren aber mit den kalkulierten Kosten mindestens 80 % Elimination erreicht werden.
- **Betriebssicherheit/Robustheit (20%):** Die Integration der weitergehenden Reinigungsstufe bedeutet zusätzlichen Aufwand im Kläranlagenbetrieb. Damit sind nicht die Wartungskosten gemeint, sondern die grundsätzliche Komplexität und die resultierende Überwachungsintensität. Grundsätzlich können alle betrachteten Verfahren mit dem gleichen personellen Aufwand stabil betrieben werden. Aber die GAK-Filtration benötigt keine Dosiereinrichtung und ist im Vergleich die robusteste Verfahrenstechnik. Daher wird die Variante 2 hier mit drei Punkten bewertet, während PAK und Ozon nur zwei Punkte erhalten.
- **Nachhaltigkeit / CO₂-Emissionen (20%):** Die Nachhaltigkeit wird auf Basis der CO₂-Bilanz ebenfalls berücksichtigt. Hier erhält die PAK-Stufe die niedrigste Punktzahl aufgrund des hohen Bedarfs an frischer Aktivkohle.

Im Ergebnis erhält die Variante 2 „GAK-Filtration“ mit 2,75 von 3,00 Punkten die höchste Bewertung, gefolgt von der Ozonbehandlung mit 2,25 Punkten und der PAK-Stufe mit 1,80 Punkten.

Tabelle 27: Abschließende Bewertung der Verfahrensvarianten

Kriterium	Wichtigkeit	Variante 1		Variante 2		Variante 3	
		Ozonbehandlung		GAK-Filtration		PAK-Stufe	
	%	Punkte	gewichtet	Punkte	gewichtet	Punkte	gewichtet
1 Wirtschaftlichkeit / Jahreskosten	35	2	0,70	3	1,05	2	0,70
2 Elimination Spurenstoffe ^{1) 2)}	25	3	0,75	2	0,50	2	0,50
3 Betriebssicherheit / Robustheit	20	2	0,40	3	0,60	2	0,40
4 Nachhaltigkeit / CO ₂ -Emission ³⁾	20	2	0,40	3	0,60	1	0,20
Summe	100	14	2,25	16	2,75	13	1,80

1) Bezogen auf ausgewählte Indikatorsubstanzen (Terbutryn, Diclofenac, Benzotriazol, Carbamazepin, Sulfamethoxazol, Metoprolol) in Anlehnung an Kom-M.NRW (2018) und KOMS (2020 (NRW - BW))

2) Zusätzlich unter der Bedingung, dass keine schädlichen Reaktionsprodukte oder Aktivkohlepartikel in das Gewässer gelangen

3) Zusätzliche Energiebedarf sollte wenn möglich durch Energiesparmaßnahmen in anderen Bereichen oder durch eine Ausweitung der regenerativen Energieerzeugung kompensiert werden

6 ZUSAMMENFASSUNG UND VERFAHRENSEMPFEHLUNG

Die KA Flonheim behandelt das Abwasser für aktuell etwa 22.800 Einwohnerwerte und ist für Spitzenbelastungen von bis zu 60.000 E in der Weinbaukampagne ausgebaut. Das gereinigte Abwasser wird in den Wiesbach eingeleitet, der aufgrund der intensiven landwirtschaftlichen Nutzung und des vergleichsweise hohen Abwasseranteils einer hohen stofflichen Belastung unterliegt. Bezogen auf Spurenstoffe wurden beispielsweise Diclofenac-Konzentrationen im Gewässer von bis zu 0,95 µg/L gemessen. Aus diesem Grund ergibt sich aus Sicht des MKUEM-RLP unter Anwendung des Orientierungsrahmes des Bundes für den Wiesbach der Bedarf die Handlungsoptionen für eine Spurenstoffelimination zu prüfen.

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Mikro-System“ wurden in einer Maßnahmenanalyse unter Verwendung eines Stoffmodells mehrere Maßnahmenoptionen systematisch untersucht. Dabei wurde aufgrund der Lage im oberen Wiesbach der Nutzen einer weitergehenden Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination in Flonheim bestätigt. Da die Integration der Spurenstoffelimination in einer weitergehenden Reinigungsstufe auch Auswirkungen auf die Nährstoffeinträge (z. B. Gesamtphosphor) hat, ergeben sich hieraus auch Synergieeffekte für die Nährstoffbelastung.

Bei den hohen Spitzenlasten durch die Weinkampagne ist das vorhandene Beckenvolumen in Flonheim für die simultan aerobe Stabilisierung des Klärschlammes sehr stark ausgelastet. Daher wird die Anlage auf einen Schlammverbund mit gemeinsamer getrennt anaerober Schlammfäulung auf der KA Alzey umgestellt. Dies verbessert die Energiebilanz und schafft freie Kapazitäten in der biologischen Behandlungsstufe der KA Flonheim. Diese könnten genutzt werden um beispielsweise Abwasser der Kläranlage Nack-Niederwiesen zusätzlich mitzubehandeln. Auf diese Weise würde der Wiesbach entlastet.

Für die Umsetzung einer Spurenstoffelimination wurden im Rahmen dieser Studie die örtlichen Randbedingungen geprüft und drei Verfahrensvarianten detailliert in ihrer möglichen Umsetzung vor Ort untersucht. Neben einer Ozonbehandlung mit anschließender Sandfiltration zur Nachbehandlung wurde eine Festbettfiltration mit granulierter Aktivkohle (GAK) in Behälterbauweise sowie eine separate Adsorptionsstufe mit Dosierung von Pulveraktivkohle (PAK) betrachtet. Die technische Einbindung der Verfahrensvarianten erfolgte unter Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten, so wurde zum Beispiel das bereits installierte Mikrosieb mit einbezogen.

In einer wirtschaftlichen Bewertung wurden für jedes Verfahren die Investitionskosten auf Basis von Richtpreisangeboten und ausgeführten Projekten abgeschätzt und miteinander verglichen. Daneben wurden fünf weitere Bewertungskriterien in unterschiedlicher Gewichtung mit einbezogen und so die bestmögliche Variante zur Integration einer Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Flonheim gefunden.

Insgesamt wird für die Kläranlage Flonheim empfohlen, für den Zweck einer Spurenstoffelimination eine GAK-Filtration vorzusehen. Inwieweit die bestehende Vorfiltration mittels Mikrosieb integriert oder aufgegeben wird, ist im Rahmen einer weiterführenden Planung zu untersuchen. Aufgrund der relativ geringen Hintergrundbelastung im gereinigten Abwasser bei Vorfiltration kann von einer guten Ausnutzung der Aktivkohle ausgegangen werden.

Alle betrachteten Varianten bieten Potenzial zur erweiterten Phosphor-Elimination durch zusätzliche Filtration oder Fällmittelzugabe. Ein gestuftes Umsetzungskonzept mit Errichtung der Filtration zunächst nur mit dem Ziel der P-Elimination und späterer Umrüstung zur Spurenstoffelimination wird hier abgesehen, da grundsätzlich durch das vorhandene Mikrosieb schon eine entsprechende Verfahrensstufe besteht. Sollte diese aufgegeben werden, könnte Verfahrensstufe zur Spurenstoffelimination dieses u.U. auch ersetzen.

LITERATURVERZEICHNIS

- Abegglen, C., H. Siegrist (2012): Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser, Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen, Bundesamt für Umwelt, Bern, Umwelt-Wissen Nr. 1214, 2012.
- Arge "Envelos" (2011): Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen - Phase 1. Abschlussbericht ENVELOs Phase 1. Unter Mitarbeit von H. Riße, S. Gredig-Hoffmann, L. Pal-mowski, K. Veltmann, D. Mousel, C. Mauer et al. Aachen.
- ARGE „Envelos“ II (2015). Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen – Phase II, Kurzbericht. Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen (ISA). Im Auftrag des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV)
- ATV-DVWK (2003): Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 198, Vereinheitlichung und Herleitung von bemessungswerten für Abwasseranlagen', Hennef
- Bergmann S. und Götz C. W. (2013): Mikroschadstoffe aus kommunalem Abwasser, Flächendeckende Situationsanalyse der Gewässerbelastungen und Reduzierungsmöglichkeiten in Nordrhein-Westfalen, KW Korrespondenz Wasserwirtschaft, 2013, 6(3), 139-144.
- BMU/UBA (Hrsg.) (2017): Ergebnispapier - Ergebnisse des Stakeholder-Dialogs »Spurenstoffstrategie des Bundes« an die Politik zur Reduktion von Spurenstoffeinträgen in die Gewässer. Eds.: Hillenbrand, T.; Tettenborn, F.; Bloser, M.; Bonn: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit/Dessau: Umweltbundesamt
- BMU/UBA (Hrsg.) (2019): Ergebnispapier - Ergebnisse der Phase 2 des Stakeholder-Dialogs »Spurenstoffstrategie des Bundes« zur Umsetzung von Maßnahmen für die Reduktion von Spurenstoffeinträgen in die Gewässer. Eds.: Hillenbrand, T.; Tettenborn, F.; Bloser, M.; Bonn: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit/Dessau: Umweltbundesamt.
- Bode, H.; Grünebaum T.; Klopp R. (2010): Anthropogene Spurenstoffe aus Kläranlagen, Teil 2: Maßnahmen bei der Abwasserbehandlung- Möglichkeiten, Notwendigkeiten und Voraussetzungen. In: Korrespondenz Abwasser 2010 (57) Nr. 3, S. 240–244.
- Bornemann, C. (2012): Ertüchtigung kommunaler Kläranlagen, insbesondere kommunaler Flockungsfiltrationsanlagen durch den Einsatz von Aktivkohle (MIKROFlock) (2012), Abschlussbericht AZ IV-7-042 600 001E, <http://www.lanuv.nrw.de/wasser/abwasser/forschung/abwasser.htm>
- Bornemann, C.; Alt, K.; Böhm, F.; Hachenberg, M.; Kolisch, G.; Nahrstedt, A.; Taudien, Y. (2015): Technische Erprobung des Aktivkohleeinsatzes zur Elimination von Spurenstoffen in Verbindung mit vorhandenen Filteranlagen „Filter AK+“, Abschlussbericht, gerichtet an das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV).
- DWA (2014): Bedeutung von Transformationsprodukten für den Wasserkreislauf. DWA-Themenband T4/2014, KA 8.1 - August 2014, Hrsg.: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. -DWA-, Hennef 2014, 55 S. Fraunhofer IRB Verlag
- DWA (2016a): Arbeitsblatt DWA-A 131 ‚Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen‘, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef
- DWA (2016b): „Aktivkohleeinsatz auf kommunalen Kläranlagen zur Spurenstoffentfernung“, Arbeitsbericht der DWA-Abreisgruppe KA-8.6, in: KA Korrespondenz Abwasser, Abfall 2016 (63), Nr. 12, S. 1062 – 1067
- IB Siekmann (2019): „Energetisch optimierte Abwasser- und Klärschlammbehandlung im Zuständigkeitsbereich des Zweckverbands Abwasserentsorgung Rheinhessen (ZAR)“, Erläuterungsbericht Vorabzug, Ingenieurgesellschaft Dr. Siekmann + Partner mbH, 06.11.2019
- Knerr, H.; Gretzschel, O.; Valerius, B.; Srednoselec, I.; Zhou, J.; Schmitt, T. G.; Steinmetz, H.; Dittmer, U.; Taudien, Y.; Kolisch, G. (2020): Modellgestützte Bilanzierung von Mikroschadstoffen in Gewässern. In: gwf-Wasser|Abwasser, 3/2020, S. 55-65
- KOMS (2018): „Handlungsempfehlungen für die Vergleichskontrolle und den Betrieb von Verfahrenstechniken zur gezielten Spuzrenstoffelimination“, Hrsg.: Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg, Stuttgart Stand 03/2018
- KOMS (2020): „Leitfaden, Machbarkeitsstudien zur Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen“, Bearbeiter: Fenrich, E.; Metzger, S.; Morck, T.; Launay, M.; Hrsg.: Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg, Stuttgart Stand 09/2020

- Kom-M.NRW (2018): Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination. Hrsg.: ARGE Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW, Köln, 3. Auflage, Bearbeitungsstand 13.04.2018, unveröffentlicht
- LfU-RLP (2020): „Wasserkörper-Steckbrief, Unterer Wiesbach“, Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz, Stand 03/2020
- Lyko, S. Nafo, I. (2013). Erfahrungen mit Anlagen zur Spurenstoffelimination – Ergebnisse und Erkenntnisse. In Tagungsband zum Kölner Kanal und Kläranlagen Kolloquium, Nr.: 14, Serie: Aachener Schriftern zur Stadtentwässerung, Band 17
- Maus, C.; Herbst, H.; Ante, S.; Becker, H-P.; Glathe, W.; Börgers, A. Türk, J. (2014): Hinweise zu Auslegung und Design von Ozonanlagen zur Mikroschadstoffelimination. In: Korrespondenz Abwasser 2014 (61) Nr. 11, S. 998–1006.
- MUEEF-RLP (2021): „Elimination von Phosphor und Spurenstoffen auf kommunalen Kläranlagen – Vorgehen und (rechtlicher) Rahmen in Rheinland-Pfalz“, Vortrag T. Jung, Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten, Fachtagung TU Kaiserslautern 28./29.04.2021,
- Remy, C.; Mutz, D.; Sperlich, A.; Schaller, J.; Windelberg, G.: „Ökobilanz verschiedener Verfahrensoptionen zur Spurenstoffentfernung“, Vortrag im Rahmen der Abschlussveranstaltung der Verbundprojekte ASKURIS und IST4R, 14 September 2015
- Schmitt, T. G., Knerr, H.; Gretzschel, O.; Kolisch, G.; Taudien, Y. (2016): Relevanz, Möglichkeiten und Kosten einer Elimination von Mikroschadstoffen auf kommunalen Kläranlagen in Rheinland-Pfalz, aufgezeigt am Beispiel der Nahe - Mikro_N: Pilotstudie im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten (MULEWF) des Landes Rheinland-Pfalz. 2016. – Schlussbericht.
- Schmitt, T. G., Knerr, H.; Gretzschel, O.; Kolisch, G.; Taudien, Y. (2020): Modellgestützte Stoffbilanzierung zur systematischen Identifikation von Maßnahmenschwerpunkten für eine kombinierte Reduktion von Phosphor- und Mikroschadstoffen: Schlussbericht. Studie im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten des Landes Rheinland-Pfalz. 2020.
- UBA (2015): Maßnahmen zur Verminderung des Eintrages von Mikroschadstoffen in die Gewässer, Kurzbericht, Umweltbundesamt (Hrsg.), unter Mitarbeit von: T. Hillenbrand, F. Tettenborn, E. Menger-Krug, F. Marscheider-Weidemann, S., S. Toshovski, S. Kittlaus, S. Metzger, I. Tjoeng, P.I Wermter, M. Kersting, C. Abegglen UBA Texte 86/2104
- UBA (2018): Arzneimittel in der Umwelt. Im Internet unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/chemikalien/arzneimittel-in-der-umwelt>
- UBA (2019): Chemische Qualitätsanforderungen und Bewertung. Im Internet unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/gewaesser/fluesse/ueberwachung-bewertung/chemisch#textpart-3>
- VSA (2021): „VSA-Plattform Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen, Übersicht ARA Ausbau“, URL: <https://micro-poll.ch/ara-ausbau/>, zuletzt abgerufen 03/2021, VSA Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute, Glattbrugg (CH)
- Wunderlin, P.; Mestanokova, H.; Sahli, E.; Wildhaber, Y.; Schärer, M. (2015): „Behandelbarkeit von Abwasser mit Ozon – Testverfahren zur Beurteilung“, Artikel in AQUA & GAS N°7/8, 2015

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	Überblick über Verfahren zur Spurenstoffelimination (Schmitt et al., 2016).....	12
Tabelle 2:	Kenngrößen KA Flonheim.....	17
Tabelle 3:	Überwachungswerte für die Kläranlage Flonheim gemäß aktuellem Erlaubnisbescheid.....	18
Tabelle 4:	Belastungsdaten Zulauf Kläranlage.....	20
Tabelle 5:	Auswertung für Pharmaka im LfU-Screening 2016/2017 im Ablauf der KA Flonheim	23
Tabelle 6:	Zusammenfassung der Vorauswahl von Verfahren.....	28
Tabelle 7:	Bestimmung der notwendigen Größe des Ozonreaktors.....	29
Tabelle 8:	Bemessung der erforderlichen Ozondosierung.....	30
Tabelle 9:	Ermittlung des Sauerstoffbedarfs für die Ozonherstellung vor Ort	30
Tabelle 10:	Dimensionierung der Nachbehandlung mittels Sandfiltration	30
Tabelle 11:	Investitionskostenschätzung Variante 1 „Ozon“	33
Tabelle 12:	Gesamtbehandlungskosten Variante 1 „Ozon“	34
Tabelle 13:	Bemessung der GAK-Filtration.....	36
Tabelle 14:	Zusammenfassung der Investitionskosten für die Variante 2 „GAK-Filter“	38
Tabelle 15:	Zusammenfassung der jährlichen Kosten für die Variante 2 „GAK-Filter“.....	39
Tabelle 16:	Bemessung der PAK-Dosierung.....	40
Tabelle 17:	Bemessung des erforderlichen Kontaktbeckens	41
Tabelle 18:	Bemessung des erforderlichen Sedimentationsbeckens.....	41
Tabelle 19:	Bemessung der PAK-Lagerung und des Jahresverbrauchs.....	41
Tabelle 20:	Abscheideleistung von Filtrationseinheiten zum Rückhalt von Pulveraktivkohle (Bornemann et al, 2012).....	43
Tabelle 21:	Zusammenfassung der Investitionskosten für Variante 3 „PAK-Stufe“	44
Tabelle 22:	Zusammenfassung der jährlichen Kosten für die Variante 3 „PAK-Stufe“	45
Tabelle 23:	Vergleich der Investitionskosten.....	46
Tabelle 24:	Betriebskostenvergleich der untersuchten Varianten.....	47
Tabelle 25:	Vergleich der Jahreskosten	48
Tabelle 26:	Zusammenfassung der CO ₂ -Bilanzierung der untersuchten Varianten	49
Tabelle 27:	Abschließende Bewertung der Verfahrensvarianten	51

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1:	Umsetzung des Orientierungsrahmens (MKUEM RLP, 2021)	5
Abbildung 2:	Diclofenac-Konzentrationen im Wiesbach an der Messstelle unterhalb Gensingen (Schmitt et al., 2020).....	6
Abbildung 3:	Zusammenstellung ausgewählter Parameter aus dem Steckbrief des Wiesbachs zur WRRRL-Bewertung Stand 03/2020 (LfU-RLP, 2020)	6
Abbildung 4:	Darstellung der detailliert betrachteten Gewässersysteme Laute rund Wiesbach (Schmitt et al, 2020)	7
Abbildung 5:	Mit Stoffflussbilanzierung untersuchte Maßnahmen zur Reduzierung der Spurenstoffbelastung im Einzugsgebiet des Wiesbach (Schmitt et al., 2020)	7
Abbildung 6:	Einfluss einer erweiterten Abwasserreinigung auf die Gewässerkonzentrationen gemäß Stoffflussbilanzierungsmodell, links Diclofenac-Konzentrationen bei mittlerem Abfluss MQ, rechts: P_{ges} -Konzentrationen bei Trockenwetterabfluss im Gewässer, jeweils mit und ohne weitergehende Reinigungsstufe in Flonheim (Daten aus Schmitt et al., 2020).....	8
Abbildung 7:	Mögliche Eintragspfade von Spurenstoffen.....	9
Abbildung 8:	Verfahren zur gezielten Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen.....	11
Abbildung 9:	Überblick über Nachbehandlungsstufen für Ozon oder Pulveraktivkohle (KOM.M-NRW, 2016)	13
Abbildung 10:	Übersichtskarte zu den aktuellen Anlagen zur Spurenstoffelimination (VSA, 2021)	13
Abbildung 11:	Exemplarische Darstellung für ausgewählte 4. Reinigungsstufen, die jeweils auch einen FlockungsfILTER mit Fällmittelzugabe beinhalten	14
Abbildung 12:	Treibhausgaspotenzial verschiedener Verfahren zur Spurenstoffelimination (Remy et al., 2015).....	15
Abbildung 13:	Luftbild der Kläranlage Flonheim (www. Zweckverband-abwasserentsorgung-rheinessen.de)	16
Abbildung 14:	Lageplanschema der Kläranlage Flonheim mit Skizzierung des Wasserwegs	16
Abbildung 15:	Schnittzeichnung Vorhandenes Mikrosieb.....	18
Abbildung 16:	Tägliche Zulaufwassermengen mit Auswertung der Trockenwettertage.....	19
Abbildung 17:	Stündliche Zulaufwassermengen.....	19
Abbildung 18:	Zulauffrachten als Einwohnergleichwerte für CSB und N_{ges} mit gleitendem Monatsmittelwert	20
Abbildung 19:	CSB-Ablaufkonzentrationen.....	20
Abbildung 20:	Route von Nack-Niederwiesen nach Flonheim (© openrouteservice.org by HeiGIT Map data © OpenStreetMap contributors).....	21
Abbildung 21:	Lage der möglichen Überleitung im Einzugsgebiet (Schmitt et al., 2020)	21
Abbildung 22:	Höhenprofil (© openrouteservice.org by HeiGIT Map data © OpenStreetMap contributors)	21
Abbildung 23:	Erforderliches Belebungsbeckenvolumen (V_{BB}) für unterschiedliche Betriebszustände der Kläranlage Flonheim im Lastfall 85%Perzentil-Belastung (32.000EW) auf Basis einer Nachbemessung nach DWA-A131, 2015 mit Eingangsdaten der Jahre 2018-2020.....	22
Abbildung 24:	Berechnete tägliche Spurenstofffracht pro Kopf in mg/E/d im Ablauf der Kläranlage Flonheim.....	24
Abbildung 25:	Vergleich der pro-Kopf-Frachten im Kläranlagenablauf mit Literaturwerten für ausgewählte Substanzen	24
Abbildung 26:	Vorhandene Flächen, die sich für eine weitergehende Reinigungsstufe eignen.....	25
Abbildung 27:	Luftbild RÜB, Ablaufschacht / Mikrosieb und Belebungsbecken	25
Abbildung 28:	Statistische Auswertung der Trockenwetterwassermengen auf Basis von Stundenwerten aus 3 Jahren	26
Abbildung 29:	Behandelte Abwassermenge in Abhängigkeit der Bemessungswassermenge (links) und beispielhafter Jahresgang der behandelten und unbehandelten Wassermengen (rechts).....	27
Abbildung 30:	Angenommene Verdünnung bei Wassermengen über 150 m ³ /h (links) und resultierender Anteil der behandelten Fracht im Vergleich zu der behandelten Wassermenge	27
Abbildung 31:	Verfahrensschema für die Variante einer Ozonbehandlung.....	29
Abbildung 32:	Lageplankonzept für Var. 1: „Ozon“	31

Abbildung 33:	<i>O₂-Tank und O₃-Generator</i>	32
Abbildung 34:	<i>Beispielhafter Ozonreaktor (Lyko, 2013)</i>	32
Abbildung 35:	<i>Kontinuierlich arbeitender Sandfilter (www.nordicwater.com/de)</i>	32
Abbildung 36:	<i>Hydraulischer Schnitt</i>	33
Abbildung 37:	<i>Schema GAK-Filtration</i>	35
Abbildung 38:	<i>Beispielhafte Zeichnungen zu den vorgesehenen Filtern</i>	36
Abbildung 39:	<i>Lageplankonzept für Variante 2 mit GAK-Filtration</i>	37
Abbildung 40:	<i>Hydraulische Einbindung</i>	37
Abbildung 41:	<i>Schema Var.3. „PAK-Stufe“ für KA-Flonheim</i>	40
Abbildung 42:	<i>Lageplankonzept für die Umsetzung der Variante 3 mit separater PAK-Stufe</i>	42
Abbildung 43:	<i>PAK Zugabe als Suspension (links) (Quelle https://nrw-mikro.amit-services.de/presse/anlagenfotos) und Kettenräumer in einem längsdurchströmten Sedimentationsbecken (rechts) (Quelle: https://koms-bw.de/klaeranlagen/bilder_videos/)</i>	42
Abbildung 44:	<i>Beispiel einer PAK-Dosieranlage (Typ. AK-Dos, Fa. Sülzle-Kopf) von außen (links) und Innen (recht) ..</i>	43
Abbildung 45:	<i>Vergleich der Investitionskosten je Variante mit Aufteilung auf die Kostengruppen</i>	46
Abbildung 46:	<i>Betriebskostenvergleich der untersuchten Varianten</i>	47
Abbildung 47:	<i>Vergleich der Jahreskosten</i>	48
Abbildung 48:	<i>Ermittelte netto CO₂-Äquivalente bei Umsetzung der Verfahren</i>	49

ANHANG

A: Investitionskosten

Var1, Ozonbehandlung, Investitionskosten

Investitionskostenabschätzung								
Pos	Beschreibung	Anzahl	Einheit	Einzelkosten [€/Einheit]	Bau-technik	Maschinen-technik	E/MSR-Technik	Gesamtkosten [€]
1	Baustelleneinrichtung							38.600 €
	10% von Bautechnik				16.800 €			
	5% von Maschinentechnik					21.800 €		
2	Kontaktbecken / Ozonreaktor							73.600 €
	Erdaushub und Abfuhr (ca. 1 m unter GOF + 0,2m Oberboden)	28	m³	115 €/m³	3.200 €			
	Einbau und Verdichtung Tragschicht	7	m³	55 €/m³	400 €			
	Neubau Reaktor (1 Straße, 2 Kammern)	70	m³	1.000 €/m³	70.000 €			
3	Zulaufpumpwerk + Rohrleitungen							32.500 €
	Zulauf-/Ablaufleitung von/zu NKB/Filter, inkl. Erdarbeiten	4	m	500 €/m	2.000 €			
	Verteilerbauwerk (Aufteilung auf Ozonreaktor oder Umlaufleitung)	5	m³	1.000 €/m³	5.000 €			
	Anbindung Ablauf an vorh. Schacht	1	psch	5.000 €	5.000 €			
	Schieber (mit E-Antrieb)	3	Stck	3.500 €/Stck		10.500 €		
	Zulaufpumpwerk	1	Stck	10.000 €/Stck		10.000 €		
4	Ozonanlage							433.100 €
	Anlage (Container) bestehend aus	1	psch	375.000 €				
	davon Maschinentechnik (=75% von gesamt)					281.300 €		
	davon Mess und Regeltechnik (=25% von gesamt)						93.800 €	
	N2-Zudosierung inkl. Kompressor	1	inkl.					
	Ozongenerator (Typ SMOevopuls 410)	1	inkl.					
	Eintragsystem (2x2 Rohrdiffusoren inkl. Verrohrung im Kontakttank)	4	inkl.					
	Über-/Unterdruck Ausgleichsventil (Protego VD/SV DN 50)	1	inkl.					
	Automatische Gasverteilung	1	inkl.					
	Restozonvernichter (Typ WOD 102, inkl. Gebläse und Demister)	2	inkl.					
	Tropfenabscheider (Demister D28)	1	inkl.					
	Kühlwasserversorgung (inkl. Wärmetauscher, Pumpe, Armaturen, Typ WCL S400)	1	inkl.					
	Umgebungsluftmonitor Ozon (Typ Honeywell XT Ozon)	1	inkl.					
	Umgebungsluftmonitor Sauerstoff (Typ Honeywell XT Sauerstoff)	1	inkl.					
	Ozongasüberwachung im Produktgas (Dose control)	1	inkl.					
	Ozongasüberwachung im Abgas (Typ BMT 964 OG)	2	inkl.					
	Lokales SP-S-System (Siemes S7 inkl. TP700)	1	inkl.					
	Container 25'	1	Stck					
	Verpackung	1	inkl.					
	Transport (Container)	1	Stck	2.000 €/Stck		2.000 €		
	Fundamentplatte für Container (7,6 m x 3,0 m) inkl. Erdarbeiten	1	psch	16.000 €	16.000 €			
	Verrohrung und Montage vor Ort	1	psch	10.000 €		10.000 €		
	Anbindung Stromversorgung und PLS-Kläranlage	1	psch	20.000 €			20.000 €	
	Messgeräte (CSB, SAK254, Nitrit)	2	Stck	5.000 €/Stck			10.000 €	
5	O2-Tank / Fundament							8.100 €
	Fundamentplatte (2,5 m * 2,5 m) inkl. Erdarbeiten, Statik	1	psch	6.000 €	6.000 €			
	Sicherheitsprüfung Druckluftanlage	1	psch	650 €		650 €		
	Anlieferung, Aufstellung, Montage	1	psch	800 €		800 €		
	Gefährdungsbeurteilung	1	psch	650 €		650 €		
6	Sandfilter zur Nachbehandlung							213.400 €
	Bauseitige Arbeiten							
	Fundament GAK-Filter inkl. Erdarbeiten	1	psch	10.000 €	10.000 €			
	Fundament Container Druckluftanlage inkl. Erdarbeiten	1	psch	4.000 €	4.000 €			
	Container Druckluftanlage (4,6x3,0x2,8m), mit Tür und Fenstern	1	Stck	20.000 €/Stck	20.000 €			
	Druckluftleitung	10	m	100 €/m	1.000 €			
	Stahlbauarbeiten (Bühnenkonstruktion, Geländer)	1	psch	5.000 €	5.000 €			
	Verkehrswegbauarbeiten	50	m²	400 €/m²	20.000 €			
	Filter 3x 5m² (DynaSand DS 5000 AE)	1	psch	135.000 €				
	davon Maschinentechnik (=75% von gesamt)	0				101.300 €		
	davon Mess und Regeltechnik (=25% von gesamt)						33.800 €	
	inkl. Leiter							
	inkl. Rohhalterungen							
	inkl. interne Verrohrung PE-HD (Zulauf, Klarwasser, Spülwasser)							
	inkl. Befüllung mit Sand (3x 15t in Silowagen frei Baustelle)							
	inkl. Elektro-Steuerteil für Magnetventile							
	inkl. Pneumatik-Steuerteil Luftsteuerung							
	inkl. Beleuchtung&Begleitheizung für Außenaufstellung Steuerschrank							
	inkl. Steuerung Waschwasserreduzierung							
	inkl. Quetschventile DN80							
	inkl. Druckmessung 0-0,2 bar							
	inkl. Absperrklappen DN200							
	inkl. Kran und Filtermontage							
	inkl. Montage Filter+Rohrleitungen und Inbetriebnahme							
	inkl. Einweisung							
	Druckluftanlage	1	psch	13.800 €		13.800 €		
	inkl. 2(+1) Schraubenkompressoren 3bar, 36 m³/h							
	inkl. Druckluft-Behälter 11bar, 250 L mit Kondensatablass							
	inkl. Submikrofilter							
	Adsorptionstrockner für Druckluft	1	psch	4.500 €		4.500 €		
	Filterabdeckung GFK	1	psch	1.000 €				
	Zwischensumme ohne Pos1				167.600 €	435.500 €	157.600 €	
	Summe Positionen 1-6				184.400 €	457.300 €	157.600 €	799.300 €
	Unvorhersehbares (15 %)				27.700 €	68.600 €	23.600 €	119.900 €
	Nebenkosten (20%)				36.900 €	91.500 €	31.500 €	159.900 €
	Gesamtsumme (netto)				249.000 €	617.400 €	212.700 €	1.079.100 €
	Mehrwertsteuer (19 %)				47.300 €	117.300 €	40.400 €	205.000 €
	Gesamtsumme (brutto)				296.300 €	734.700 €	253.100 €	1.284.100 €

Var2, GAK-Filtration, Investitionskosten

Investitionskostenabschätzung								
Pos	Beschreibung	Anzahl	Einheit	Einzelkosten [€/Einheit]	Bau- technik	Maschinen- technik	E/MSR- Technik	Gesamtkosten [€]
1	Baustelleneinrichtung							23.400 €
	10% von Bautechnik				7.500 €			
	5% von Maschinenteknik					15.900 €		
2	Zulauf-/Ablauf							32.000 €
	Zulauf-/Ablaufleitung von/zu Filter, inkl. Erdarbeiten	10	m	500 €/m	5.000 €			
	Zulaufpumpen	2	Stck	5.000 €/Stck		10.000 €		
	MID in Zulaufleitung	1	Stck	5.000 €/Stck			5.000 €	
	Schieber in Zulaufleitung (mit E-Antrieb)	1	Stck	3.500 €/Stck			3.500 €	
	Anbindung Ablauf an vorh. Schacht	1	psch	5.000 €	5.000 €			
	Schieber Ablauf	1	Stck	3.500 €/Stck	3.500 €			
3	Bauseitige Arbeiten GAK-Filter							75.000 €
	Fundament GAK-Filter inkl. Erdarbeiten	1	psch	20.000 €	20.000 €			
	Fundament Container Druckluftanlage inkl. Erdarbeiten	1	psch	4.000 €	4.000 €			
	Container Druckluftanlage (4,6x3,0x2,8m), mit Tür und Fenstern	1	Stck	20.000 €/Stck	20.000 €			
	Druckluftleitung	10	m	100 €/m	1.000 €			
	Stahlbauarbeiten (Bühnenkonstruktion, Geländer)	1	psch	10.000 €	10.000 €			
	Verkehrswegebauarbeiten	50	m²	400 €/m²	20.000 €			
4	GAK-Filter							393.700 €
	Filter	1	psch	305.800 €				
	davon Maschinenteknik (=75% von gesamt)					229.400 €		
	davon Mess und Regeltechnik (=25% von gesamt)						76.500 €	
	GAK-Filter (DynaSand Carbon DSC 5000 AD)	6,0	inkl.					
	Zubehör DSC Filter (Mammutpumpe, Sandwäscher, ...)	6,0	inkl.					
	Treppe zur Filterbühne	1,0	inkl.					
	Bühne (8m)	1,0	inkl.					
	Rohrhalterungen (Set)	6,0	inkl.					
	Interne Verrohrung PE-HD	6,0	inkl.					
	Elektro-Steuerteil ES	1,0	inkl.					
	Pneumatik-Steuerteil PS	1,0	inkl.					
	Quetschventil DN80	1,0	inkl.					
	Druckmessung	1,0	inkl.					
	Filtermontage und Krangestellung	1,0	inkl.					
	Montage Bühnen und Rohrleitungen	1,0	inkl.					
	Inbetriebnahme	1,0	inkl.					
	Kundeneinweisung	1,0	inkl.					
	1. Aktivkohle-Spülung	1,0	inkl.					
	Druckluftanlage	1	psch	12.500 €		12.500 €		
	inkl. 2(+1) Schraubenkompressoren 3bar, 36 m³/h	1,0	inkl.					
	inkl. Druckluft-Behälter 11bar, 250 L mit Kondensatablass	1,0	inkl.					
	inkl. Submikrofilter	1,0	inkl.					
	Adsorptionstrockner für Druckluft	1	psch	1.600 €		1.600 €		
	Filterabdeckung GFK	1	psch	8.400 €		8.400 €		
	Aktivkohle Erstbefüllung (80m³ zu 0,40 t/m³)	32,0	t	1.500 €/t		48.000 €		
	Aktivkohle Transport und Einbau	1,0	psch	15.000 €		15.000 €		
	Siebarmatur Filterzulauf	1,0	Stck.	2.300 €/Stk		2.300 €		
	Zwischensumme ohne Pos1				75.000 €	317.200 €	76.500 €	
	Summe Positionen 1-4				96.000 €	351.600 €	76.500 €	524.100 €
	Unvorhersehbares (15 %)				14.400 €	52.700 €	11.500 €	78.600 €
	Nebenkosten (20%)				19.200 €	70.300 €	15.300 €	104.800 €
	Gesamtsumme (netto)				129.600 €	474.600 €	103.300 €	707.500 €
	Mehrwertsteuer (19 %)				24.600 €	90.200 €	19.600 €	134.400 €
	Gesamtsumme (brutto)				154.200 €	564.800 €	122.900 €	841.900 €

Laufende Kosten aus Kapital und Wartungskosten								
Pos	Beschreibung	Anzahl	Einheit	Einzelkosten [€/Einheit]	Bau- technik	Maschinen- technik	E/MSR- Technik	Gesamtkosten [€]
	Wartung- und Instandhaltung (netto)							22.350 €
	1,0 %/a der Baukosten				1.300 €/a			
	4,0 %/a der Kosten für technische Installationen					18.980 €/a		
	2,0 %/a der Kosten für EMSR-Technik						2.070 €/a	
	Kapitalkosten (netto)							58.480 €
	Nutzungsdauer Bautechnik 30 Jahre				30 a			
	Nutzungsdauer Maschinenteknik 15 Jahre					15 a		
	Nutzungsdauer EMSR-Technik 10 Jahre						10 a	
	Zinssatz i				3 %	3 %	3 %	
	Kapitalwiedergewinnungsfaktor KFAKR (i;n)							
	Kapitalwiedergewinnungsfaktor Bau				0,05			
	Kapitalwiedergewinnungsfaktor Maschinenteknik					0,08		
	Kapitalwiedergewinnungsfaktor EMSR-Technik						0,12	
	Kapitalkosten Bau				6.610 €/a			
	Kapitalkosten Maschinenteknik					39.760 €/a		
	Kapitalkosten EMSR-Technik						12.110 €/a	
	Summe laufende Kosten (netto)							80.830 €

Var3, PAK-Dosierung, Investitionskosten

Investitionskostenabschätzung								
Pos	Beschreibung	Anzahl	Einheit	Einzelkosten [€/Einheit]	Bau- technik	Maschinen- technik	E/MSR- Technik	Gesamtkosten [€]
1	Baustelleneinrichtung							66.222,08 €
	10% von Bautechnik				57.356 €			
	5% von Maschinentechnik					8.866 €		
2	Sonstiges							7.500,00 €
	Straßenbau und Gehwege etc.	10	m ²	250 €/m ²	2.500 €			
	Versorgungsleitungen, wie Trink-, Brauchwasser, Sonstiges	1	psch		5.000 €			
3	Kontaktbecken							187.783,33 €
	Erdaushub und Abfuhr (ca. 5 m unter GOF)	91,7	m ³	110 €/m ³	10.083 €			
	Einbau und Verdichtung Tragschicht	22	m ³	55 €/m ³	1.200 €			
	Neubau Reaktor (1 Straße, 2 Kammern)	82,5	m ³	1.000 €/m ³	82.500 €			
	Rohrleitungen Filtration und Ablauf	30	m	1.000 €/m	30.000 €			
	Spülwasserleitung und PAK-Dosierung	40	m	350 €/m		14.000 €		
	Trennbauwerk	1	psch	15.000 €	15.000 €			
	Wasserhaltung	1	psch	20.000 €	20.000 €			
	Verkehrswegebauarbeiten	1	psch	15.000 €	15.000 €			
4	Sedimentationsbecken							392.275,00 €
	Erdaushub und Abfuhr (ca. 5 m unter GOF)	412,5	m ³	110 €/m ³	45.375 €			
	Einbau und Verdichtung Tragschicht	99	m ³	55 €/m ³	5.400 €			
	Neubau Reaktor (1 Straße, 2 Kammern)	247,5	m ³	1.000 €/m ³	247.500 €			
	Rohrleitungen Filtration und Ablauf	30	m	1.000 €/m	30.000 €			
	Spülwasserleitung und PAK-Dosierung	40	m	350 €/m		14.000 €		
	Trennbauwerk	1	psch	15.000 €	15.000 €			
	Wasserhaltung	1	psch	20.000 €	20.000 €			
	Verkehrswegebauarbeiten	1	psch	15.000 €	15.000 €			
5	Filter (bauseits)							0,00 €
6	PAK-Dosiereinheit (AK-Dos)							215.200,00 €
	Dosiereinheit und Lager (Typ AK-DOS) bestehend aus	1	psch	161.200 €				
	PAK-Lagerbehälter (Nettovolumen 1,5 m ³)	1	inkl.					
	Druckluftverteiler	1	inkl.					
	PAK-Dosierung							
	- Zellenradschleuse							
	- Befüllklappe mit Pneumatiktrieb	1	inkl.					
	- Dosiervorlagebehälter							
	- Trockengutdosierer per Schnecke (0,1 bis 3 kg/h)							
	Einspüleinrichtung (Einspülrichter mit Wasserstrahlpumpe)	1	inkl.					
	Druckerhöhungspumpe	1	inkl.					
	Füllstandsmessung	1	inkl.					
	Rohrleitungen	1	inkl.					
	Schaltschrank (Siemens S7, inkl. TP)	1	inkl.					
	Kompressorstation	1	inkl.					
	Anlieferung, Installation, Inbetriebnahme	1	inkl.					
	davon Maschinentechnik (=75% von gesamt)					120.900 €		
	davon Mess und Regeltechnik (=25% von gesamt)						40.300 €	
	Anbindung Stromversorgung und PLS-Kläranlage	1	psch	20.000 €			20.000 €	
	Zusätzliche PAK-Lagerbehälter	3	Stck	3.000 €/Stck		9.000 €		
	Mobiler Kran/Gabelstapler (3 t)	1	Stck	15.000 €		15.000 €		
	Fundament Silo (5m x 5m)	1	psch	10.000 €	10.000 €			
7	Zentrale Dosierstelle							29.600,00 €
	Dosierleitung DN 25 von Silo	20	m	200 €/m	4.000 €			
	Absperrschieber	2	Stck	300 €/Stck		600 €		
	Trübungssonden zur Dosierkontrolle	4	Stck	5.000 €/Stck			20.000 €	
	Trübungssonde zur Kontrolle Feststoffrückhalt	1	Stck	5.000 €/Stck			5.000 €	
8	Pulveraktivkohle (Erstbefüllung)							3.825,00 €
	Aktivkohle	2,6	Mg	1.500 €/Mg		3.825 €		
	Zwischensumme ohne Pos1				573.558 €	177.325 €	85.300 €	
	Summe Positionen 1-3				630.914 €	186.191 €	85.300 €	836.183,33 €
	Unvorhersehbares (15 %)				94.637 €	27.929 €	12.795 €	125.427,50 €
	Nebenkosten (20%)				126.183 €	37.238 €	17.060 €	167.236,67 €
	Gesamtsumme (netto)				851.734 €	251.358 €	115.155 €	1.128.847,50 €
	Mehrwertsteuer (19 %)				161.829 €	47.758 €	21.879 €	214.481,03 €
	Gesamtsumme (brutto)				1.013.564 €	299.116 €	137.034 €	1.343.328,53 €

B: Jahreskosten

Pos.	Kurztext	Variante1		Variante2		Variante3	
		Ozonbehandlung		GAK-Filtration		PAK-Stufe	
A	Kapitalgebundene Kosten		89.350 €/a	58.480 €/a	78.010 €/a		
	Investitionen		1.079.100 €	707.500 €	1.218.247 €		
	Bautechnik		249.000 €	129.600 €	851.734 €		
	Maschinentechnik		617.400 €	474.600 €	251.358 €		
	EMSR-Technik		212.700 €	103.300 €	115.155 €		
	Nutzungsdauer Bautechnik 30 Jahre		30	30	30		
	Nutzungsdauer Maschinentechnik 15 Jahre		15	15	15		
	Nutzungsdauer EMSR-Technik 10 Jahre		10	10	10		
	Zinssatz i		3%	3%	3%		
	Kapitalwiedergewinnungsfaktor KFAKR (i:n)						
	Kapitalwiedergewinnungsfaktor Bau		0,05102	0,05102	0,05102		
	Kapitalwiedergewinnungsfaktor Maschinentechnik		0,08377	0,08377	0,08377		
	Kapitalwiedergewinnungsfaktor EMSR-Technik		0,11723	0,11723	0,11723		
A1	Kapitalkosten Bau		12.700 €/a	6.610 €/a	43.455 €/a		
A2	Kapitalkosten Maschinentechnik		51.720 €/a	39.760 €/a	21.055 €/a		
A3	Kapitalkosten EMSR-Technik		24.930 €/a	12.110 €/a	13.500 €/a		
B	Betriebsgebundene Kosten		64.000 €/a	54.900 €/a	54.357 €/a		
B 1	Wartungs- und Instandhaltungskosten		31.500 €/a	22.400 €/a	20.857 €/a		
	1,0 %/a der Baukosten		2.500 €/a	1.300 €/a	8.500 €/a		
	4,0 %/a der Kosten für technische Installationen		24.700 €/a	19.000 €/a	10.054 €/a		
	2,0 %/a der Kosten für EMSR-Technik		4.300 €/a	2.100 €/a	2.303 €/a		
B 2	Personalkosten		32.500 €/a	32.500 €/a	33.500 €/a		
	Betreuung, Kontrolle, Betriebslabor	Menge	0,5 MA/a	0,5 MA/a	0,5 MA/a		
	spez. Preis		65.000 €/MA	65.000 €/MA	67.000 €/MA		
			32.500 €/a	32.500 €/a	33.500 €/a		
C	Verbrauchsgebundene Kosten		29.412 €/a	18.400 €/a	36.583 €/a		
C1	Energiekosten		16.400 €/a	6.300 €/a	1.200 €/a		
	Ozonherzeugung, Kühlung ...	Menge	51.324 kWh/a				
	spez. Preis		0,21 €/kWh				
			10.800 €/a				
	Pumpwerk	Menge	642.751 m³/a	642.751 m³/a	642.751 m³/a		
	spez. Energieverbrauch		4,5 Wh/(m³·m)	4,5 Wh/(m³·m)	4,5 Wh/(m³·m)		
	Förderhöhe (Annahme)		8,0 m	7,0 m	2,0 m		
	Menge		23.139 kWh/a	20.247 kWh/a	5.785 kWh/a		
	spez. Preis		0,21 €/kWh	0,21 €/kWh	0,21 €/kWh		
			4.900 €/a	4.300 €/a	1.200 €/a		
	Rührwerke, Rücklaufkohle, Dosierpumpe (PAK)	Menge			7.227 kWh/a		
	spez. Preis				0,21 €/kWh		
					1.500 €/a		
	Filterspülung	Menge	3.154 kWh/a	9.461 kWh/a			
	spez. Preis		0,21 €/kWh	0,21 €/kWh			
			700 €/a	2.000 €/a			
C2	Sauerstoff (flüssig)		11.260 €/a	0 €/a	0 €/a		
	(Typ BIOGON) inkl. Energiezuschlag	Menge	32 Mg/a				
	spez. Preis		162 €/Mg				
			5.200 €/a				
	Gefahrtzuschlag Flüssigsauerstoff (GGVSE/Mautgebühr)	Menge	0,59 Anlieferung/a				
	spez. Preis		100 €/Anlieferung				
			60 €/a				
	Tankmiete (Fa. Linde Typ T18/36) inkl. Verdampfer	Menge	12 Monate				
	spez. Preis		500 €/Monat				
			6.000 €/a				
C3	GAK - Granulierte Aktivkohle		0 €/a	12.100 €/a	0 €/a		
	Menge			2,1 Mg/a			
	Filterwechsel			0,54 Wechsel/a			
	Transportkosten			5.000 €/Anlieferung			
	Austausch Kohle			6.000 €/6 Filter			
	spez. Preis			1.600 €/Mg			
C4	PAK - Pulverförmige Aktivkohle		0 €/a	0 €/a	27.335 €/a		
	Menge				10 Mg/a		
	Lieferungen				4,00 Lieferung/a		
	Transportkosten				2.500 €/Lieferung		
	spez. Preis				1.700 €/Mg		
C5	Schlammensorgung PAK		0 €/a	0 €/a	6.119 €/a		
	(Annahme 1g/m³ PAK = 1 gTS/m³)	Menge			10 Mg/a		
	spez. Preis				600 €/Mg		
C6	Fällmittel				1.928 €/a		
	Menge				12,86 Mg FeCl3/a		
	spez. Preis				150 €/Mg		
					ggf. Einsparung bei Simultanfällung		
	Menge				0,19 Mg WS/a		
	spez. Preis				400 €/MgWS		
					77 €/a		
C7	Kühlwasser		1.752 €/a	0 €/a	0 €/a		
	Menge		17.520 m³/a				
	spez. Preis		0,1 €/m³				
A	Kapitalgebundene Kosten	€/a	89.350 €/a	58.480 €/a	78.010 €/a		
B	Betriebsgebundene Kosten	€/a	64.000 €/a	54.900 €/a	54.357 €/a		
C	Verbrauchsgebundene Kosten	€/a	29.412 €/a	18.400 €/a	36.583 €/a		
	Jahreskosten netto	€/a	182.762 €/a	131.780 €/a	168.950 €/a		
	+ 19 % MwSt.	€/a	34.725 €/a	25.038 €/a	32.101 €/a		
	Jahreskosten brutto	€/a	217.487 €/a	156.818 €/a	201.051 €/a		
	spez. Kosten (brutto):	€/m³	0,34 €/m³	0,24 €/m³	0,31 €/m³		
	Verhältnis		139%	100%	128%		

C: CO₂-Bilanz

allgemeine Emissions-faktoren				
Strommix	CO ₂ -Äquivalente Strom	0,54	kg CO ₂ /kWh	KEA 2020, IFEU 2020
Brauchwasser	Brauchw. Tr.	0,0004	kg CO ₂ /kg	Probas (inkl. Vorkette), Öko-Institut 2000
Diesel	Diesel gesamt (direkt+indirekte Emissionen)	3,16	kg CO ₂ /l	LfU-Leitfaden (2009); GEMIS-Datenbank, Version 4.94 - Vorketten Öl-Gas 2010, Diesel frei Tankstelle
	Diselverbrauch LKW	38,00	l/100km	Lastzüge mit 23,t Nutzlast – 38 Liter/ 100 Kilometer, https://www.webfleet.com/de_de/webfleet/blog/so-viel-kraftstoff-verbrauchen-lkw/
	CO ₂ -Emissionen LKW	120,08	kgCO ₂ /100km	
Ozon-Verfahren				
Sauerstoff (LOX)	Stromverbrauch O ₂ -Produktion	0,82	kWh/kgO ₂	ähnlich wie ältere Daten aus Ecolvent Datenbank (Ch. Remy)
	CO ₂ -Äquivalente LOX Herstellung	408,00	kgCO ₂ /t	ifeu, 2012 aus ProBas
	LOX-Bedarf	32.137,56	kg/a	
	CO ₂ -Emissionen LOX Herstellung	13.112,12	kgCO ₂ /a	
	Entfernung LOX-Transport zur KA	37,80	km	Hier als Beispiel Linde-Anlage in WORMS - https://www.linde-gase.de/dp/index.php?standorte_id=38
	Anzahl Transporte pro Jahr	0,59	Anlieferungen/a	aus Dimensionierung für Variante Ozon
	Transportkilometer pro Jahr	75,60	km/a	
	CO ₂ -LOX-Transport	90,78	kgCO ₂ /a	
Sandfiltration	CO ₂ -Abdruck Quarzsand für Sandfilter	0,03	kg CO ₂ /kg	Probas (inkl. Vorkette), Öko-Institut 2020
	Menge Sand	30,00	m ³	aus Dimensionierung für Variante Ozon
	Dichte Quarzsand	1.400,00	kg/m ³	https://www.kiesdirekt.de/shop/menge-rechner.asp?groupid=22&productid=326
	Masse Quarzsand	42.000,00	kg	
	CO ₂ -Emissionen Quarzsand	1.100,40	kg CO ₂	
	Nutzungsdauer Quarzsand	20,00	a	
	jährliche CO ₂ -Emissionen Quarzsand	55,02	kgCO ₂ /a	
	Stromverbrauch Spülungen	3.153,60	kWh/a	aus Dimensionierung für Variante Ozon
	Co ₂ -Emissionen Spülungen	1.715,56	kgCO ₂ /a	
Strom O ₃ -Erzeugung	Stromverbrauch O ₃ -Generator, Kühlung, Offgasbehandlung..	51.324	kWh/a	aus Dimensionierung für Variante Ozon
	CO ₂ -Emissionen	27.920	kgCO ₂ /a	
Hebewerke	Stromverbrauch Pumpwerk	23.100,00	kWh/a	aus Dimensionierung für Variante Ozon
	CO ₂ -Emissionen	12.566	kgCO ₂ /a	
CO ₂ gesamt	LOX+O ₃ -Erzeugung+Hebewerke+Sandfiltration	55.460	kgCO ₂ /a	
GAK-Verfahren				
GAK-Herstellung	Anteil frische Aktivkohle	0,10	-	Annahme
	Anteil reaktivierte Aktivkohle	0,90	-	Annahme
	CO ₂ -Emissionsfaktor Steinkohle Frisch	14,50	kgCO ₂ /kg	DWA (2016b)
	CO ₂ -Emissionsfaktor Steinkohle Reaktivat	2,50	kgCO ₂ /kg	DWA (2016b)
	CO ₂ -äquivalente Gemisch	3,70	kgCO ₂ /kg	
	jährlicher Verbrauch	2.143	kg/a	aus Dimensionierung für Variante GAK
	CO ₂ -Emissionen	7.927	kgCO ₂ a	
GAK-Transport	Annahme Entfernung	81	km	Beispielhaft: Donau Carbon GmbH, Gwinnerstraße 27-33, 60388 Frankfurt
	Anzahl Lieferungen	0,54	Lieferungen/a	aus Dimensionierung für Variante GAK

Machbarkeitsstudie Spurenstoffelimination KA Flonheim

	Entfernung pro Jahr (Hin+Rück)	87	km/a	
	CO2-Emissionen	104	kgCO2/a	
Hebewerke	Stromverbrauch Pumpwerk	20.200	kWh/a	aus Dimensionierung für Variante GAK
	CO2-Emissionen	10.989	kgCO2/a	
Filterspülung	Stromverbrauch	9.461	kWh/a	aus Dimensionierung für Variante GAK
	CO2-Emissionen	5.147	kgCO2/a	
CO2 gesamt	GAK-Herstellung,+Transport+Filterspülung+Hebewerke	24.167	kgCO2/a	
PAK-Verfahren				
PAK-Herstellung	Annahme CO2-Footprint PAK (frische Steinkohle)	14,50	kgCO ₂ /kg	DWA (2016b)
	PAK-Verbrauch hier:	10.198	kg/A	aus Dimensionierung für Variante PAK
	CO2-Emissionen	147.876	kgCO2/a	
PAK-Transport	Annahme Entfernung	81	km	Beispielhaft: Donau Carbon GmbH, Gwinnerstraße 27-33, 60388 Frankfurt
	Anzahl Lieferungen	4,00	Lieferungen/a	aus Dimensionierung für Variante PAK
	Entfernung pro Jahr (Hin+Rück)	648	km/a	
	CO2-Emissionen	778	kgCO2/a	
Hebewerke	Stromverbrauch Pumpwerk	5.800	kWh/a	aus Dimensionierung für Variante PAK
	CO2-Emissionen	3.404	kgCO2/a	
Rührwerke	Stromverbrauch	7.227	kWh/a	aus Dimensionierung für Variante PAK
	CO2-Emissionen	3.931	kgCO2/a	
Hilfsmittel	CO2-Faktor	1,041	kg CO2/kg FeCl3	Näherungswert für Eisen + Chlor nach https://www.zwabbaduerrenberg.de/download/106/ksi_schlussbericht_aba_bad_duerrenberg.pdf
	Verbrauch	12.855	kg/a	aus Dimensionierung für Variante PAK
	CIO2-Emissions	13.382	kgCO2/a	
PAK-ÜS-Entsorgung	Menge (Annahme 100% Dosiermenge)	10.198	kg/a	
	Tranmsportentfernung (Annahme Frankfurt)	81	km	
	Transport			
CO2 gesamt	PAK-Herstellung + Transport + Hebewerke + Rührwerke + Chemikalien	169.371	kgCO2/a	

D: Ergebnisse LfU-Screening PSM (2016/2017)

(Dargestellt sind Substanzen mit mindestens 1 Probe >NG)

Substanz	Bestimmungs-	Nachweis-	Konzentration			Befunde über Nachweisgrenze (NG) und Bestimmungsgrenze (BG)			
	grenze	grenze	Max.	Mittel	Min.	Anz > NG	Anz > BG	%>NG	%>BG
	BG	NG	ng/L	ng/L	ng/L				
	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L				
Boscalid	20	5	1.566,8	588,6	190,5	17	17	100%	100%
Bentazon	20	5	423,2	161,6	54,6	17	17	100%	100%
DEET	20	5	373,8	153,8	57,1	17	17	100%	100%
Methoxyfenozid	20	5	126,9	67,3	31,7	17	17	100%	100%
Dimethomorph	20	5	2.301,0	385,8	54,2	17	17	100%	100%
Fuopyram	20	5	2.358,1	360,6	47,4	17	17	100%	100%
Myclobutanil	20	5	620,0	198,2	25,8	17	17	100%	100%
Amisulbrom	20	5	239,8	81,2	21,5	17	17	100%	100%
Cyprodinil	20	5	75,7	39,2	14,5	17	16	100%	94%
Fludioxonil	20	5	129,3	65,7	16,2	17	16	100%	94%
Metrafenon	20	5	721,2	200,3	28,5	16	16	94%	94%
Tebuconazol	20	5	1.395,4	240,5	17,7	17	15	100%	88%
Diuron	20	5	176,6	73,1	6,6	16	15	94%	88%
Fenhexamid	20	20	848,8	153,7	29,3	15	15	88%	88%
Glyphosat	100	100	8.772,3	2.933,4	598,2	17	14	100%	82%
MCPA	20	20	7.637,2	877,0	46,1	13	13	76%	76%
Penconazol	20	5	231,8	72,2	8,5	15	12	88%	71%
Carbendazim	20	5	157,5	49,7	10,2	16	11	94%	65%
Imidachloprid	20	20	141,2	48,9	23,7	11	11	65%	65%
Iprovalicarb	20	5	82,6	39,2	6,9	15	10	88%	59%
Mecoprop	20	20	553,5	95,7	25,0	9	9	53%	53%
Metamitron	20	20	368,6	127,0	23,6	8	8	47%	47%
Isoproturon	20	20	288,8	69,5	20,6	7	7	41%	41%
Metribuzin	20	20	58,5	34,9	22,9	7	7	41%	41%
Cyflufenamid	20	5	54,7	24,4	7,0	7	4	41%	24%
Ethofumesat	20	20	208,8	126,9	21,9	4	4	24%	24%
Terbutryn	20	5	58,2	18,7	5,1	17	3	100%	18%
Metalaxyl	20	5	29,4	14,7	5,9	15	3	88%	18%
Prosulfocarb	20	20	85,1	68,5	50,7	3	3	18%	18%
Oxadiazon	20	20	104,4	56,3	24,7	3	3	18%	18%
Lenacil	20	20	51,6	40,4	21,2	3	3	18%	18%
Azoxystrobin	20	5	42,1	14,9	5,7	12	2	71%	12%
Metazachlor	20	5	6.338,8	741,6	5,9	9	2	53%	12%
Difenoconazol	20	5	52,2	19,6	5,3	9	2	53%	12%
Chloridazon	20	20	107,5	86,0	64,6	2	2	12%	12%
Cyproconazol	20	20	43,4	39,5	35,6	2	2	12%	12%
2,4-D	20	20	37,1	35,0	32,9	2	2	12%	12%
Fluoxastrobin	20	20	238,6	198,8	159,0	2	2	12%	12%
Isoxaben	20	20	96,1	84,0	71,9	2	2	12%	12%
Simazin	20	20	75,5	49,6	23,7	2	2	12%	12%
Pyriofenon	20	20	67,0	49,4	31,7	2	2	12%	12%
Dimethoat	20	20	30,0	28,8	27,5	2	2	12%	12%
Triadimenol	20	20	24,3	23,1	21,9	2	2	12%	12%
Thiacloprid	20	20	23,1	23,1	23,1	1	1	6%	6%
Clethodim	20	20	67,9	67,9	67,9	1	1	6%	6%
Tebufofenozid	20	20	63,7	63,7	63,7	1	1	6%	6%
Tebufofenpyrad	20	20	59,0	59,0	59,0	1	1	6%	6%
Pyraclostrobin	20	5	37,5	37,5	37,5	1	1	6%	6%
Pethoxamid	20	20	35,2	35,2	35,2	1	1	6%	6%
Flonicamid	20	5	28,7	28,7	28,7	1	1	6%	6%
Clothianidin	20	20	25,8	25,8	25,8	1	1	6%	6%
Fenpyrazamin	20	20	20,6	20,6	20,6	1	1	6%	6%
Epoxiconazol	20	5	17,7	11,6	5,5	2	0	12%	0%
Cyantraniliprole	20	5	6,2	6,2	6,2	1	0	6%	0%