

Machbarkeitsstudie

zur Elimination von Mikroschadstoffen
aus dem gereinigten Abwasser der Kläranlage
Salzkotten-Verne

Gerichtet an die Stadtwerke Salzkotten, Abwasserwerk

Überarbeitete Version:

Hildesheim, Juni 2015
Prof. Dr.-Ing. Günther Bahre

Inhaltsverzeichnis:

- 1 Einleitung und Veranlassung
- 2 Ausgangslage
 - 2.1 Wasserwirtschaftliche Einordnung
 - 2.2 Belastungsdaten der Kläranlage Salzkotten-Verne
 - 2.3 Verfahrenstechnik und vorhandene Bausubstanz
 - 2.4 Anforderungen an die Einleitung in die Heder
- 3 Untersuchungsergebnisse zu den Mikroschadstoffkonzentrationen im Kläranlagenablauf, Vergleich und Bewertung
- 4 Grundsätzliche verfahrenstechnische Möglichkeiten zur Elimination von Mikroschadstoffen und Vergleich
 - 4.1 Adsorptionsverfahren
 - 4.2 Oxidationsverfahren
 - 4.3 Membranverfahren
 - 4.4 Vergleich der Verfahren
- 5 Empfehlungen zur Auswahl einer Verfahrenskombination
 - 5.1 Eingrenzung der Verfahrensoptionen
 - 5.2 Hebung und Vorbehandlung des mechanisch-biologisch gereinigten Abwassers aus der Nachklärung
 - 5.3 Ozonung
 - 5.4 Aktivkohle-Adsorption
 - 5.4.1 GAK-Adsorption
 - 5.4.2 PAK-Adsorption
 - 5.5 Zusammenfassende Bewertung der vorgeschlagenen Verfahrenskombination
- 6 Grobbemessung der Anlagenkomponenten
 - 6.1 Vorfiltration
 - 6.2 Ozonung
 - 6.3 Aktivkohleadsorption
 - 6.3.1 GAK-Adsorption
 - 6.3.2 PAK-Adsorption

- 7 Kostenbetrachtungen
- 7.1 Kostenschätzung
- 7.2 Mögliche Auswirkungen der Elimination von Mikroschadstoffen auf den Ablauf-CSB und die daraus resultierende Abwasserabgabe

- 8 Zusammenfassung

Literaturverzeichnis

Anlagen

1 Einleitung und Veranlassung

Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union haben im August 2013 die bestehenden Richtlinien in Bezug auf sog. Prioritäre Stoffe fortgeschrieben (Anon, 2013). Dazu gehören die Wasserrahmenrichtlinie vom Oktober 2000 (Anon., 2000) und die Richtlinie über Umweltqualitätsnormen (Anon., 2008), die in der nationalen Umsetzung zur Oberflächengewässerverordnung (OGewV), (Anon., 2011) geführt hat. Die Liste der prioritären Stoffe, zu denen persistente, bioakkumulierbare und toxische Stoffe gehören, ist erweitert worden und die Umweltqualitätsnormen sind angepasst worden. In der weiteren Folge wird die Oberflächengewässerverordnung angepasst werden müssen.

Aus den genannten Normen kann keine unmittelbare Notwendigkeit eines flächendeckenden Ausbaus der Kläranlagen hinsichtlich einer generellen 4. Reinigungsstufe abgeleitet werden. Die Diskussion in Deutschland über die zu ergreifenden Maßnahmen verläuft uneinheitlich bis kontrovers. Das bevölkerungsreichste Bundesland Nordrhein-Westfalen hingegen hält es für angebracht, bereits frühzeitig Strategien und Maßnahmen zu entwickeln, wie die Konzentration von Mikroschadstoffen in den Gewässern minimiert werden kann. Auch die Ableitung justiziabler Anforderungen an die Einleitung von Stoffen in Gewässer auf der Grundlage des allgemeinen Vorsorgeprinzips gehört mit zum Handlungsrahmen der Landesregierung, da, anders als in anderen Bundesländern, der Anteil der Trinkwassergewinnung aus Oberflächenwasser überwiegt und damit der Handlungsdruck sehr groß ist.

Die Analyse und Bewertung von Mikroschadstoffen sowie die Identifikation von geeigneten Behandlungs- und Eliminationsverfahren gehören noch nicht zu den allgemein anerkannten Regeln der Technik, sondern sind eher auf dem Niveau von Wissenschaft und Technik einzuordnen. Es sind mit finanzieller Unterstützung des MKULNV NRW bereits mehrere umfangreiche F&E-Vorhaben durchgeführt worden, in denen im halb- oder großtechnischen Maßstab verschiedene Möglichkeiten zur Elimination von Mikroschadstoffen untersucht wurden. Zudem sind zahlreiche Machbarkeitsstudien über die Integration von weiteren Reinigungsstufen in individuelle Kläranlagen gefördert worden, durch die neben den technischen

Randbedingungen auch die monetären Auswirkungen für die Betreiber näher spezifiziert werden. Insgesamt setzt das Bundesland NRW auf freiwillige Maßnahmen, die die Risiken für die Betreiber durch die monetären Anreize der Förderung limitieren.

Diesem Vorsorgeprinzip folgend wird für das Gruppenklärwerk Salzkotten-Verne eine Machbarkeitsstudie erstellt, die Möglichkeiten zur Integration von technischen Maßnahmen zur Verminderung der Mikroschadstoffeinträge in die Heder sowie die technischen und wirtschaftlichen Folgewirkungen aufzeigen soll. Der Bericht wird hiermit vorgelegt.

2 Ausgangslage

2.1 Wasserwirtschaftliche Einordnung

Das gereinigte Abwasser aus der Kläranlage Verne wird in die Heder eingeleitet, die bei Gewässerstationierung 191,8 km in der Nähe des Ortsteile Schwelle als rechter Seitenzufluss in die Lippe mündet.

Die Heder ist im Gebietsverzeichnis der Gewässer mit der Nummer 278372 eingetragen. Der Fluss entspringt im Ortsteil Upsprunge aus mehreren Quellschüttungen, die im Wesentlichen durch Versickerungen aus der höher gelegenen Alme zwischen Brenken und Niederntudorf durch den karstigen Untergrund des Paderborner Hochlands gespeist werden.



Bild 2-1: Karstgebiet der Paderborner Hochfläche (Feige et al., 2005)

Es gibt ein Pegelbauwerk kurz nach den Hederquellen (bei Stationierung 11,373 km), bei dem von 1960 bis 2009 Abflusswerte aufgenommen wurden. Aktuelle Durchflussmengen liegen dagegen nicht mehr vor. Für dort werden folgende Abflusswerte angegeben:

$$NQ = 0,526 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$MNQ = 1,15 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$MQ = 1,98 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$MHQ = 3,77 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$HQ = 12,7 \text{ m}^3/\text{s}$$

Für die beiden letzten Aufzeichnungsjahre 2008 und 2009 wurden die Abflussdaten aus den Detailinformationen Pegel des ELWAS-WEB ausgewertet; die langjährigen Daten liegen in der Größenordnung dieser selektiven Auswertung.

Außer einigen namenlosen Gewässern und Entwässerungsgräben hat die Heder drei stationierte seitliche Zuflüsse:

den Turbinenbach, von rechts bei Stationierung 10,18 km

den Rothebach, von rechts bei Stationierung 9,02 km

den Wellebach, von links bei Stationierung 8,87 km

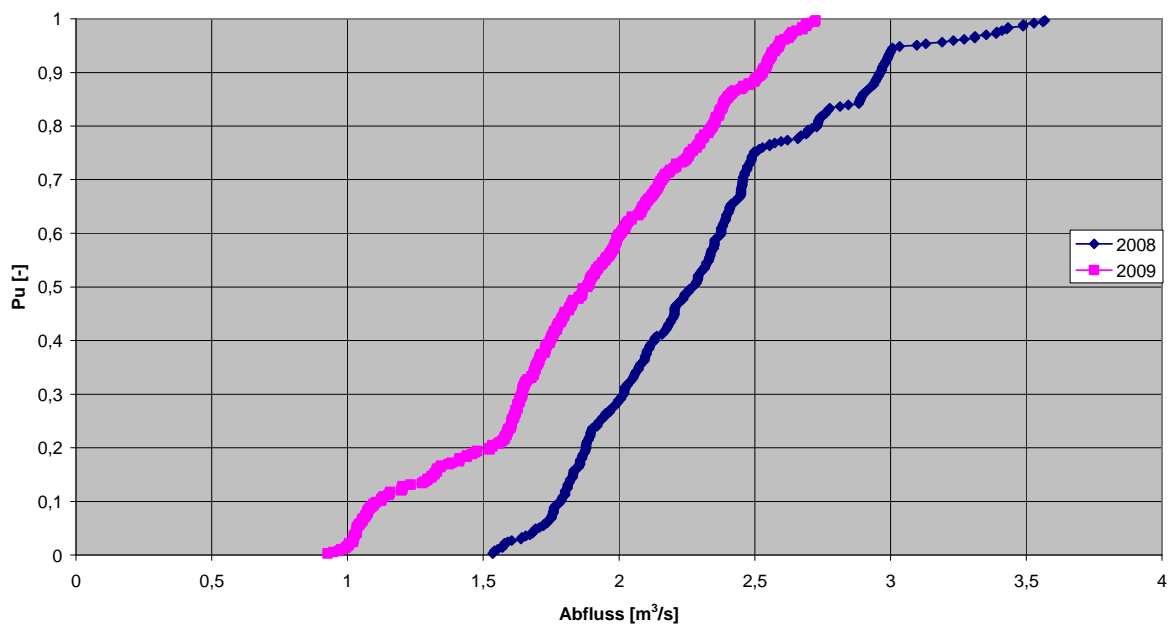


Bild 2.2: Unterschreitungswahrscheinlichkeit der Abflussmengen am Pegel Upsprunge (Daten aufbereitet aus: ELWAS-WEB NRW)

Die Heder fließt in insgesamt nordwestlicher Richtung durch die Kernstadt von Salzkotten, dann in Richtung Verne, um schließlich nach einer Gesamtlängstrecke von 11,8 km in der Nähe von Schwelle bei der Gewässerstationierung 191,8 km in die Lippe zu münden. Der Höhenunterschied liegt bei rd. 18 m, sodass ein mittleres Fließgefälle von 1,5‰ gegeben ist. Das gesamte Einzugsgebiet umfasst eine Fläche von knapp 82,42 km². Der Ablauf der Kläranlage wird bei Gewässerstationierung der Heder bei 4,039 km von rechts bei Rechtswert 3468834 / Hochwert 5728815 eingeleitet. Eine Vorbelastung der Heder durch die Einleitung aus anderen Kläranlagen liegt nicht vor. Es sind jedoch 4 RÜ aus der Mischkanalisation (RÜM) vorhanden:

Lange Brückenstr. (IBN 1975, Einleitung in die Heder bei Stationierung 9,931 km),
Hauptstr. OT Verne (IBN 1962, Einleitung über den Bohmkegraben bei Stationierung 6,431 km),
Asseburgstr. OT Verne (IBN 1988, Einleitung über ein namenloses Gewässer bei Stationierung 5,841 km),
Bohmkestr. OT Verne (IBN 1968, Einleitung in den Bohmke Graben bei Stationierung 6,553 km),

sowie 4 Regenüberlaufbecken:

Verne (IBN 1989), Einleitung in die Heder bei Stationierung 5,454 km

Salzkotten (IBN 1996), Einleitung in die Heder bei Stationierung 8,756 km

(Thüle (IBN 1987), Einleitung in den Erlbach (278362) bei Stationierung 0,956 km)

Upsprünge (IBN 1998), Einleitung in die Heder bei Stationierung 11,358 km.

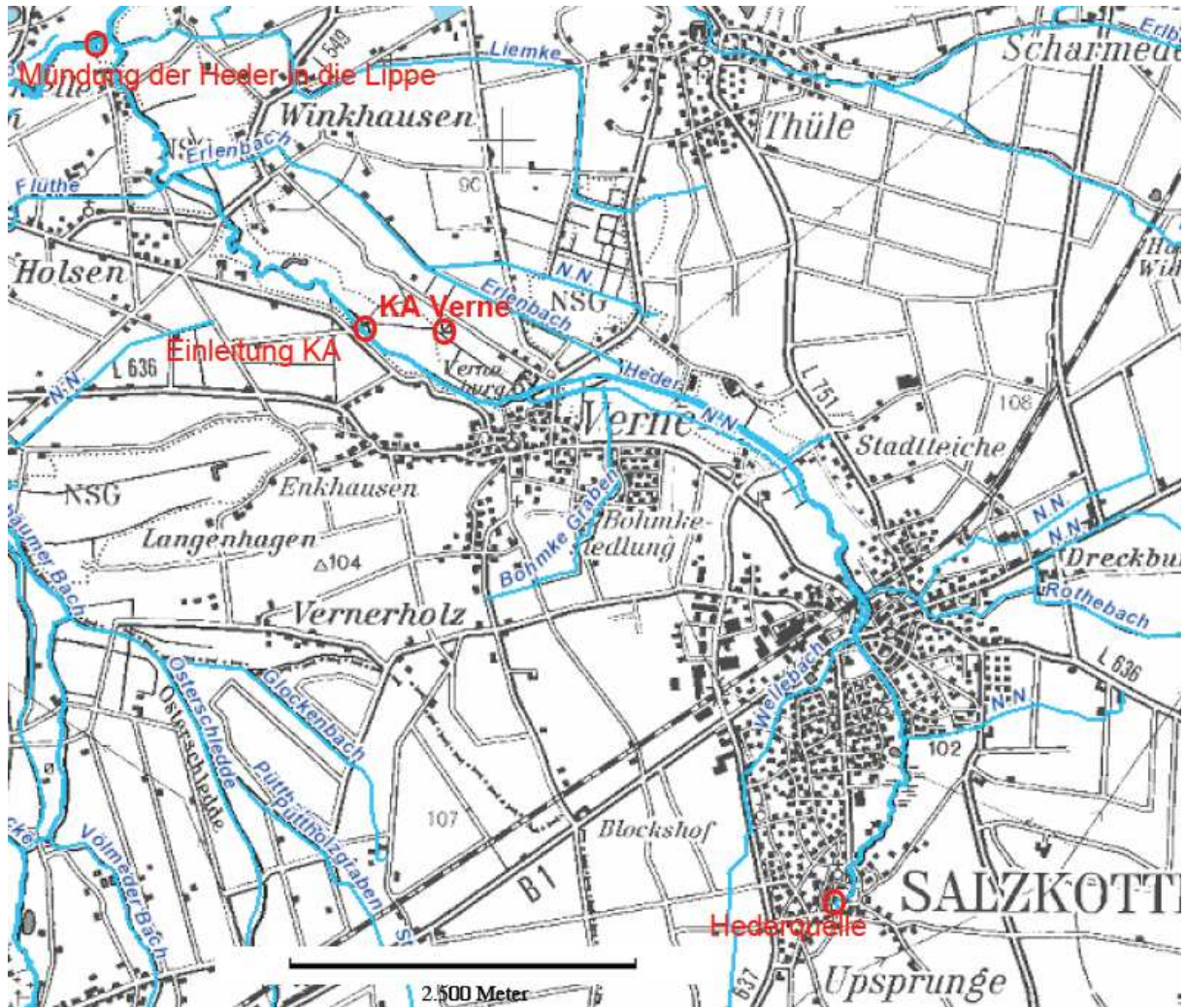


Bild 2.3: Verlauf der Heder von Upsprunge bis Schwelle (Quelle: Elwas NRW)



Bild 2.4: Topografische Karte der Hederaue im Bereich zwischen Kläranlage Verne und Mündung in die Lippe (Quelle: Geobasisdaten der Kommunen und des Landes NRW)

2.2 Belastungsdaten der Kläranlage Salzkotten-Verne

Der Zulauf zur Kläranlage Verne wird aus Salzkotten (Kernstadt) sowie den Ortsteilen Mantinghausen, Schwelle, Verlar, Verne-Enkhausen und Thüle generiert, teilweise durch Trennkanalisation, teilweise durch Mischkanalisation. Das Abwasser ist durch gewerblich-industrielle Einflüsse erheblich geprägt. Die Anschlusswerte (Bemessung) sind:

| | |
|---------------------|------------|
| Einwohner: | 19.700 E |
| Einwohnergilchwert: | 25.300 EGW |
| Einwohnerwert: | 45.000 EW |

Im Einzugsgebiet sind Betriebe der Nahrungsmittelindustrie (z.B. ein Kuchenbackbetrieb, zwei Brotbackbetriebe, ein Geflügelschlachtbetrieb) sowie Betriebe der Metallbe- und -verarbeitung, der Elektronikindustrie sowie der Bauchemikalienherstellung. Die Abwässer aus dem Nahrungsmittelbereich sind zwar z.T. hochkonzentriert, i.d.R. jedoch gut biologisch abbaubar und damit unproblematisch.

Der Betrieb zur Herstellung von Bauchemikalien entsorgt sein Abwasser aus der Produktion durch einen Entsorgungsfachbetrieb. Dennoch ist es in der Vergangenheit offenbar vorgekommen, dass durch unvorhergesehene Einleitung Abwasser aus dem Betrieb in die Kanalisation und damit in den Zulauf zur Kläranlage gelangt ist.

Der Betrieb stellt u.a. folgende Produktgruppen her:

| | |
|--------------------------|---|
| Betonverflüssiger | Wirkstoff Ligninsulfonat |
| Fließmittel | Wirkstoff Naphtalinsulfonat |
| Luftporenbildner | Wirkstoff Tensid |
| Stabilisierer | Wirkstoff Celluloseether |
| Verzögerer | Wirkstoff 'anorganisches Salz' |
| Erstarrungsbeschleuniger | Wirkstoff Calciumnitrat |
| Einpresshilfen | Wirkstoff Aluminiumpulver |
| Mörtelverzögerer | Wirkstoff Saccharose und Ligninsulfonat |
| Nachbehandlungsmittel | Wirkstoff Parrafin und Alkohol |
| Mischerschutz | Wirkstoff modifiziertes Mineralöl |

Die Wirkstoffe Lignin- und Naphtalinsulfonat sowie Tenside sind gut wasserlöslich, jedoch schwer bis nicht biologisch abbaubar. Es spricht vieles dafür, dass diese Stoffe für den temporär erhöhten inerten CSB im Ablauf der KA Verne verantwortlich sein könnten.

Im Einzugsgebiet ist weiterhin ein Krankenhaus der Grund- und Regelversorgung mit rd. 220 Betten gelegen, in dem jährlich ca. 9000 Patienten stationär und 17.000 ambulant versorgt werden. Es verfügt über die üblichen Abteilungen (Medizinische Klinik, Chirurgie, Gynäkologie, Anästhesiologie) und Belegabteilungen für HNO und Ophthalmologie sowie für Radiologie.

Die wesentlichen Auslegungsdaten der Kläranlage Verne aus dem Entwurf 1995 sind:

| | |
|--------------------------------|--------------------------|
| Tägliche TW-Zuflussmenge | 14.236 m ³ /d |
| maßgebender stündl. TW-Zufluss | 888 m ³ /h |
| maßgebender stündl. RW-Zufluss | 1.400 m ³ /h |
| BSB ₅ -Fracht | 2.990 kg/d |
| N _{ges} -Fracht | 412 kg/d |
| P _{ges} -Fracht | 50 kg/d |

In den letzten 5 Jahren wurden folgende Jahresabwassermengen aus den vorliegenden Betriebsdaten ermittelt:

Tab. 2.1: Jahresabwassermengen der letzten 5 Jahre

| Jahr | | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | Mittel |
|------|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| JAM | m ³ /a | 3.026.982 | 3.385.479 | 2.791.575 | 2.817.320 | 3.022.673 | 3.008.806 |

2.3 Verfahrenstechnik und vorhandene Bausubstanz

Die Kläranlage Salzkotten-Verne ist eine mechanisch-biologische Anlage, die zur weitgehenden Stickstoff- und Phosphorelimination ausgelegt ist. Die Klärschlammbehandlung erfolgt getrennt durch anaerob-mesophile Stabilisierung. Der ausgefaulte Klärschlamm wird entwässert und abgefahren, das entstehende Faulgas wird in einer BHKW-Anlage genutzt. Die Entsorgung des Klärschlamms erfolgt aktuell über ein ortsansässiges Entsorgungsunternehmen, das den Schlamm zur (Mono-)Verbrennung in eine Wirbelschichtfeuerungsanlage im Sauerland bringt. In der Vergangenheit wurde der Klärschlamm auch in der Landwirtschaft entsorgt, sowie auch -jedoch nur bei Trocknerbetrieb- als Ersatzbrennstoff in der Zementherstellung eingesetzt.

Die einzelnen Verfahrenskomponenten sind:

Abwasserbehandlung:

Zulaufhebwerk:

2 Schnecken, je 200 l/s

1 Tauchmotorpumpe als Reserve

Rechenanlage:

1 Stufenrechen, $B_{\text{Nutz}} = 1,2 \text{ m}$, $s = 6 \text{ mm}$

1 Rechengutwäscher

1 Notumlaufrechen

1 Fäkalschlammannahmestation

Sand- und Fettfang:

2-straßiger, belüfteter Sandfang, jeweils $B = 2,40 \text{ m}$, $L = 25 \text{ m}$, $T = 3,00 \text{ m}$

Sandwaschklassierer mit Rührwerk, Wasserspülung und Austragsschnecke,

2-straßiger Fettfang: $B = 1,00 \text{ m}$

Zwischenhebewerk:

4+1 trocken aufgestellte Schraubenzentrifugalradpumpen

Vorklärung:

2-straßige Rechteckbecken, jeweils $B = 6 \text{ m}$, $L = 45 \text{ m}$, $T = 2,25 \text{ m}$;

$V_{\text{VK, ges}} = 2 \cdot 608 \text{ m}^3 = 1.216 \text{ m}^3$, $t_{\text{R}} = 1,4 \text{ h}$ bei TW

getrennte Beschickung (1-straßiger Betrieb möglich), mit Bypassmöglichkeit

Verteilerbauwerk:

4 Abgänge zu den Belebungsbecken (+ 2 Reserve); Regelbetrieb mit Ablauf zu den jeweils ersten Belebungsbecken; Vermischung mit dem Rücklaufschlamm (getrennte Fahrweise)

Belebungsanlage:

2-straßige Belebungsanlage mit insgesamt 4 Rundbecken, jeweils $D = 22 \text{ m}$, $T = 3,95$, $V = 1500 \text{ m}^3$, $V_{\text{ges}} = 6.000 \text{ m}^3$; Schlammalter: ca. 11 d für Bemessungstemperatur 10°C ;

die beiden Becken einer Straße werden in Reihe betrieben, als vorgeschaltete Denitrifikation mit interner Rezirkulation; mit zusätzlicher intermittierender Denitrifikation im jeweils 2. Belebungsbecken

alle Belebungsbecken verfügen über getrennte Umwälzung (Horizontalmotorrührwerke) und Belüftung (Druckluft-Membranbelüftung)

Nachklärbecken:

NKB 1: $D = 36 \text{ m}$, $h_{\text{ges}} = 3,45 \text{ m}$

NKB 2: $D = 30 \text{ m}$, $h_{\text{ges}} = 3,50 \text{ m}$

Saugräumer

Rücklaufschlammumpwerk:

1 Tauchmotorpumpe für NKB 1

2 trocken aufgestellte Schraubenzentrifugalradpumpen für NKB 2

Gebälsestation:

4 Drehkolbenverdichter

Fällmittel-Lager- und Dosierstation:

Eisen-III-Lagertank, 20 m^3

Ablauf-Messbauwerk:

Wehrmessung und automatischer Probenehmer

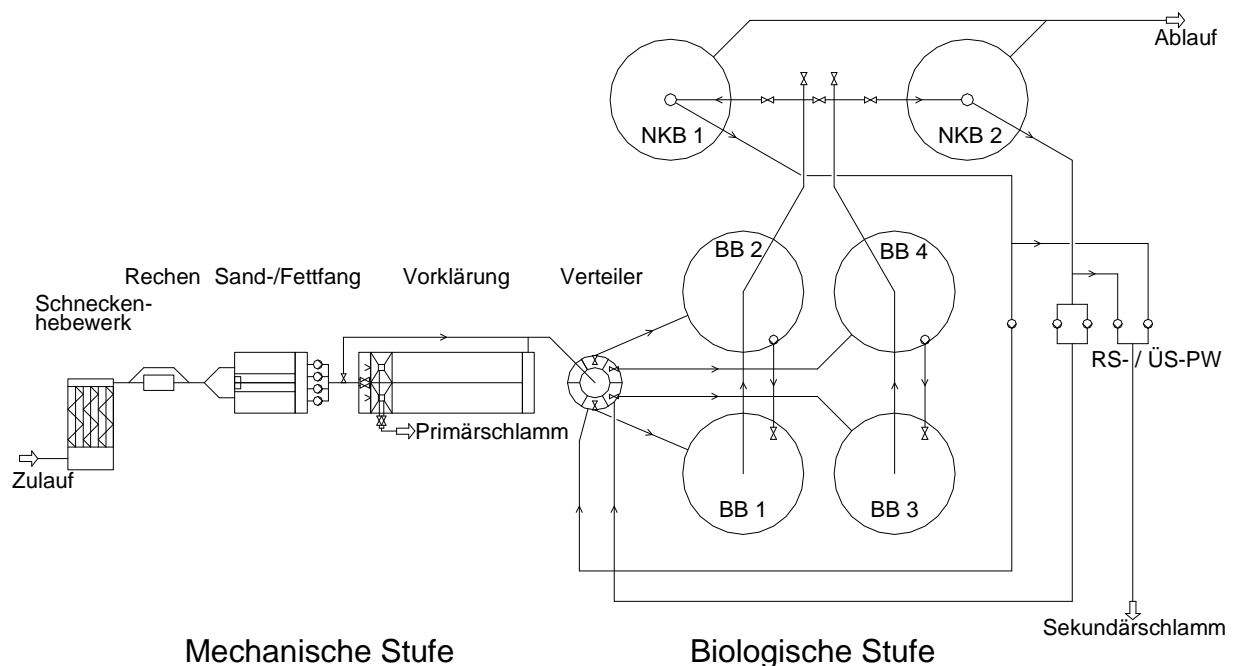


Bild 2.5: Grundverfahrensfließbild Abwasserbehandlung

Schlammbehandlung:

Primärschlammumpwerk mit 1+1 Exzentrerschneckenpumpen, incl. vorgeschaltetem Mazerator; Zugabe in den Mischinjektor ohne weitere Voreindickung

Überschussschlammumpwerk, fördert ÜS zur ÜS-Eindickung

1 ÜS-Scheibeneindicker mit Polymerkonditionierung (als Ersatz für Eindickzentrifuge)

Faulbehälter:

mesophile Stabilisierung bei 37°C; $t_R > 25$ d;

Bauform Kegel-Zylinder-Kegel, $V = 2800 \text{ m}^3$, Umwälzung durch Schraubenschaufler, 1+1 trocken aufgestellte Schraubenzentrifugalradpumpen für den Heizschlammkreislauf, Mischinjektor für die Zumischung des Rohschlammes in den Heizschlammkreislauf, Rohrmantel-Wärmetauscher

Nacheindicker (Vorlagebehälter):

2 Standeindicker, jeweils mit Rührwerk zum Homogenisieren des ausgefaulten Schlammes

Schlammmentwässerung:

1 Dekanter mit Polymerkonditionierung

Trübwasserspeicher:

(ehemaliger Rundsandfang), ca. $V = 250 \text{ m}^3$

Trocknungsanlage (z.Z. stillgelegt):

Pufferbehälter mit Schubbodenaustrag, Hochdruck-Exzentrerschneckenpumpe zur Beschickung eines Pelletierers, Bandtrockner, thermische Energie aus Abgasmassenstrom der BHKW-Anlage mit Unterstützung durch Faulgasbrenner

Gasbehälter:

Niederdruckgasbehälter, $V = 400 \text{ m}^3$, Betriebsdruck 35 mbar

Faulgasverwertung:

2 BHKW-Module mit 8-Zylinder-V-Motoren, elektr. Leistung jeweils 120 kW im Netzparallelbetrieb; Notkühler

zusätzlicher Heizkessel 296 kW für Notbetrieb; Einbindung über hydraulische Weiche

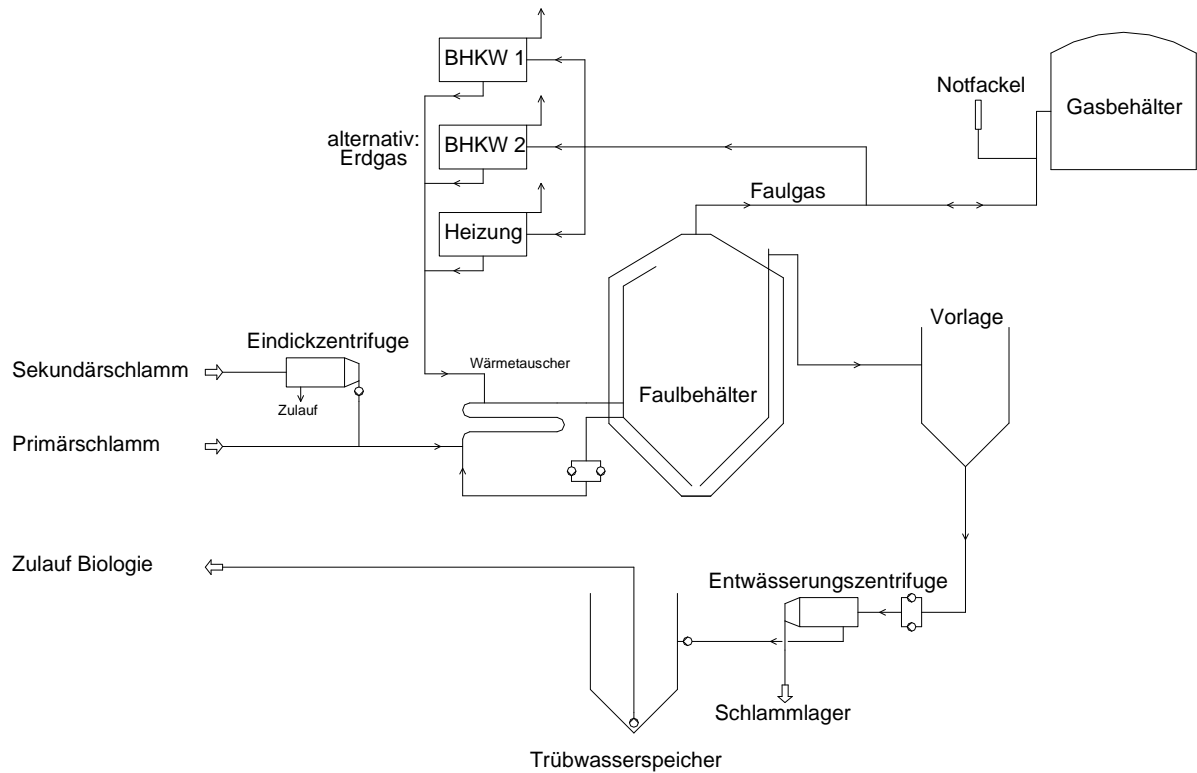


Bild 2.6: Grundverfahrensfließbild Schlammbehandlung



Bild 2.7: Satellitenbild der Kläranlage Salzotten-Verne (Quelle: Geobasisdaten der Kommunen und des Landes NRW)

Auf dem vorhandenen Grundstück sind Erweiterungsflächen nur noch südlich der Vorklärung und der beiden Nachklärbecken vorhanden. Benachbarte Grundstücke stehen nicht zur Verfügung. Die Erweiterungsflächen liegen teilweise innerhalb des festgesetzten Überschwemmungsgebiets der Heder; dies muss bei der Nutzung der Flächen entsprechend berücksichtigt werden.

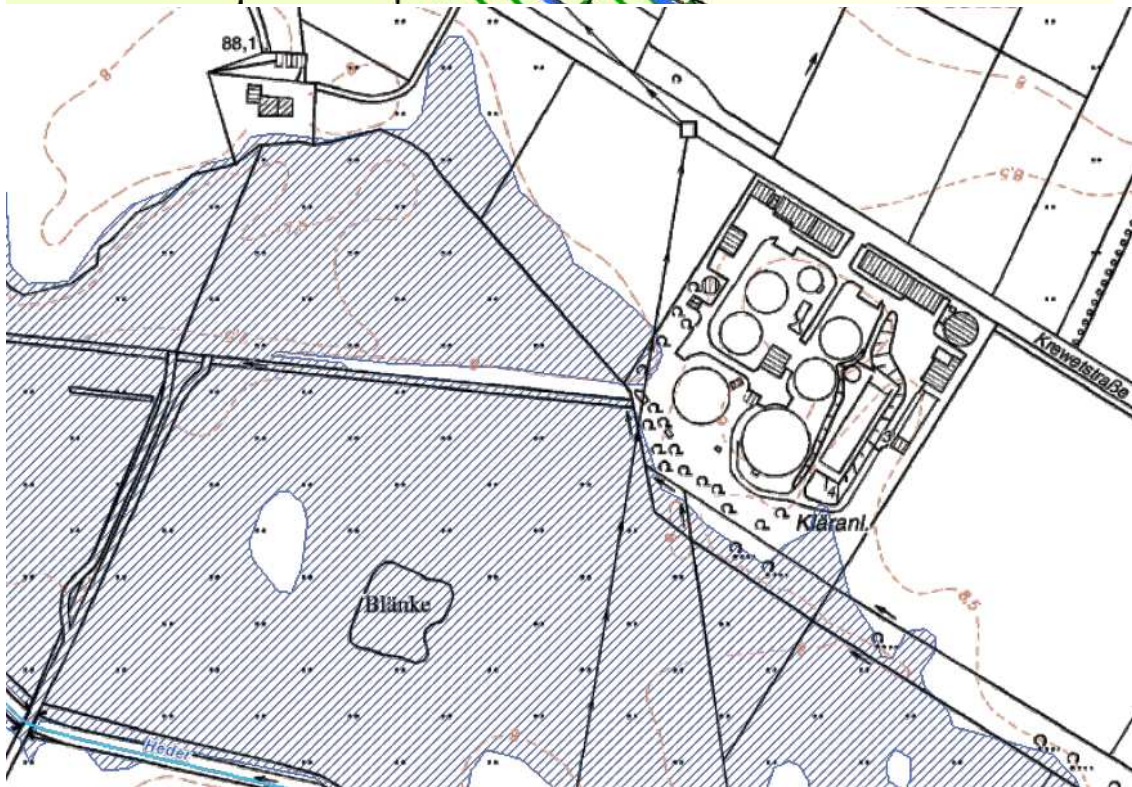
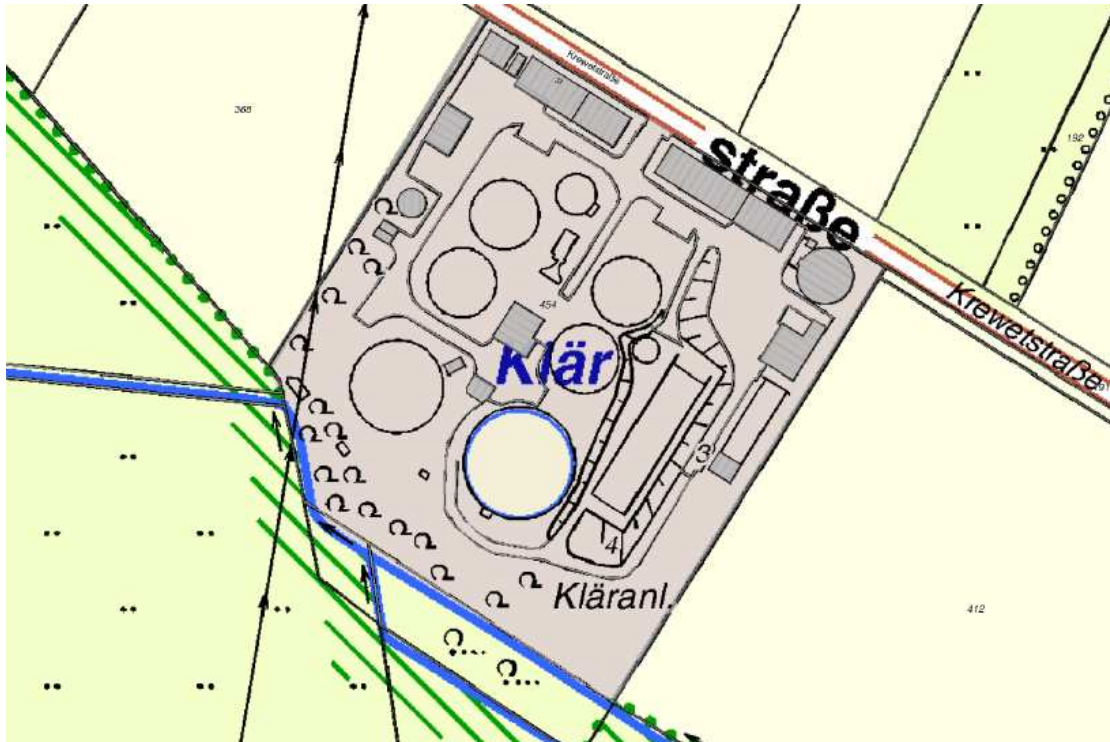


Bild 2.8: Festgesetzte Überschwemmungsgebiete der Heder (Quelle: Geobasisdaten der Kommunen und des Landes NRW)

2.4 Anforderungen an die Einleitung in die Heder

Die Kläranlage Verne ist der Größenklasse 4 nach der Abwasserverordnung zuzuordnen. Danach sind als Mindestanforderungen an die Konzentrationswerte im Ablauf vorgesehen:

| | | | |
|-------------------------|------|----|---|
| BSB ₅ | mg/l | 20 | |
| CSB | mg/l | 90 | |
| N _{ges,anorg.} | mg/l | 18 | bei T > 12°C im Ablauf des biol. Reaktors |
| NH ₄ -N | mg/l | 10 | bei T > 12°C im Ablauf des biol. Reaktors |
| P _{ges} | mg/l | 2 | |

Die aktuellen Überwachungswerte entsprechen den Mindestanforderungen, jedoch wurde die Kläranlage seinerzeit für höhere Anforderungen bemessen, speziell für die Stickstoffablaufkonzentrationen. Dies wird verdeutlicht, wenn die Ergebnisse der behördlichen Überwachung aus den letzten Jahren berücksichtigt werden.

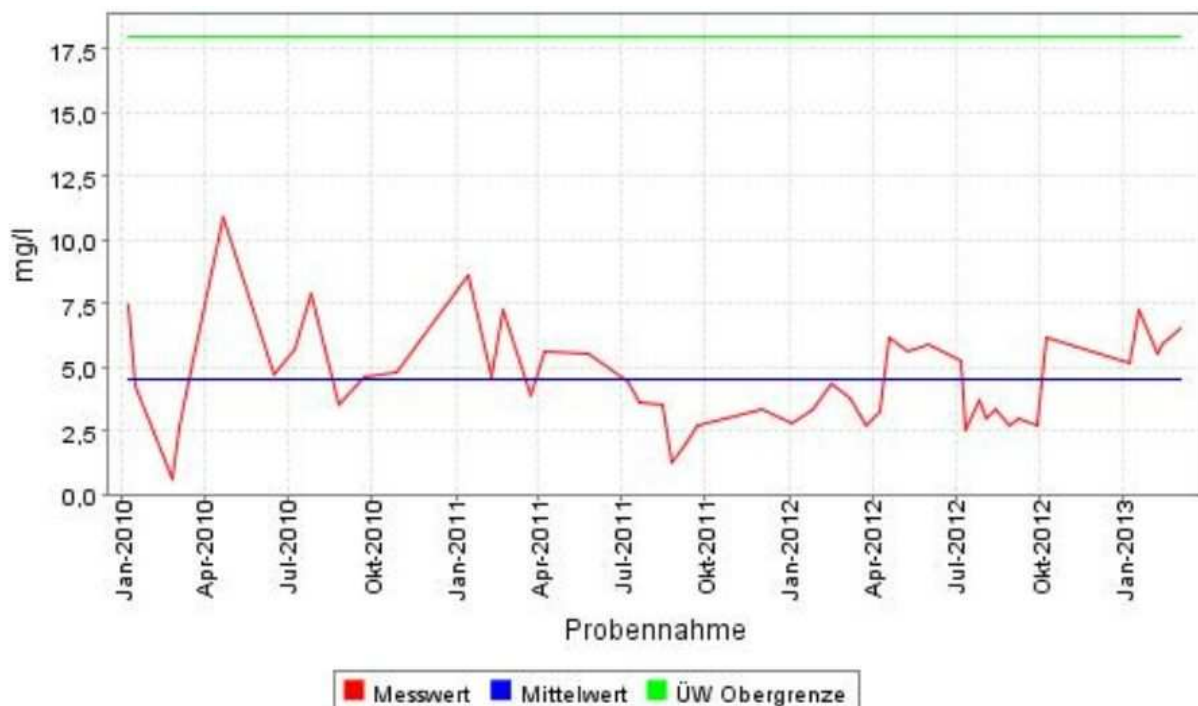


Bild 2.9: Ergebnisse der behördlichen Überwachung für den Parameter N_{ges,anorg}

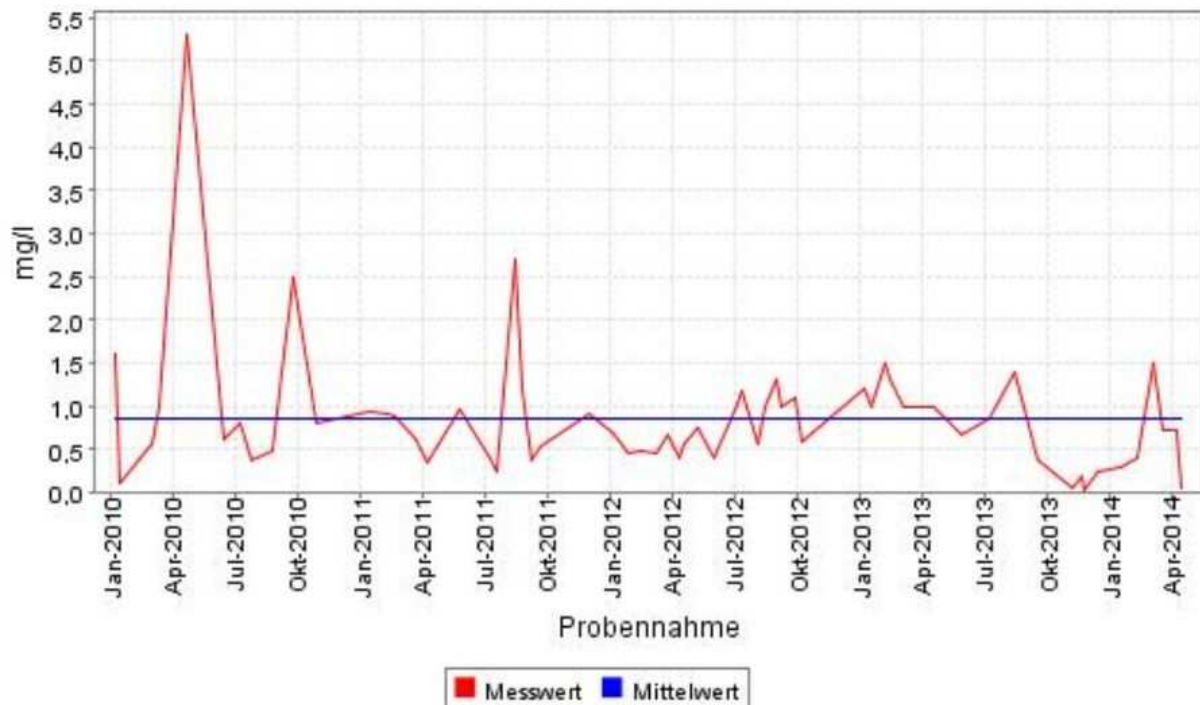


Bild 2.10: Ergebnisse der behördlichen Überwachung für den Parameter $\text{NH}_4\text{-N}$

Die Belastungen durch gewerblich-industrielle Abwässer mit deren temporären Spitzen wird hingegen deutlich, wenn man die Ablaufkonzentrationen des CSB betrachtet. Bei einem Überwachungswert von 90 mg/l sind in dem betrachteten Zeitraum von gut 4 Jahren vereinzelt Überschreitungen zu erkennen, die nur durch die fallweise Einleitung persistenter Stoffe erklärbar sind. Immerhin wirken diese persistenten Abwasserinhaltsstoffe jedoch nicht hemmend, weil die Stickstoffkonzentrationen in die entsprechenden Proben die sonst üblich niedrigen Werte aufweisen, also weder die Nitrifikation, noch die Denitrifikation gestört sind. Die gleichzeitig festgestellten TOC-Werte korrespondieren im Übrigen weitgehend mit den CSB-Werten, wobei die Häufigkeit der TOC-Bestimmungen mittlerweile höher ist.

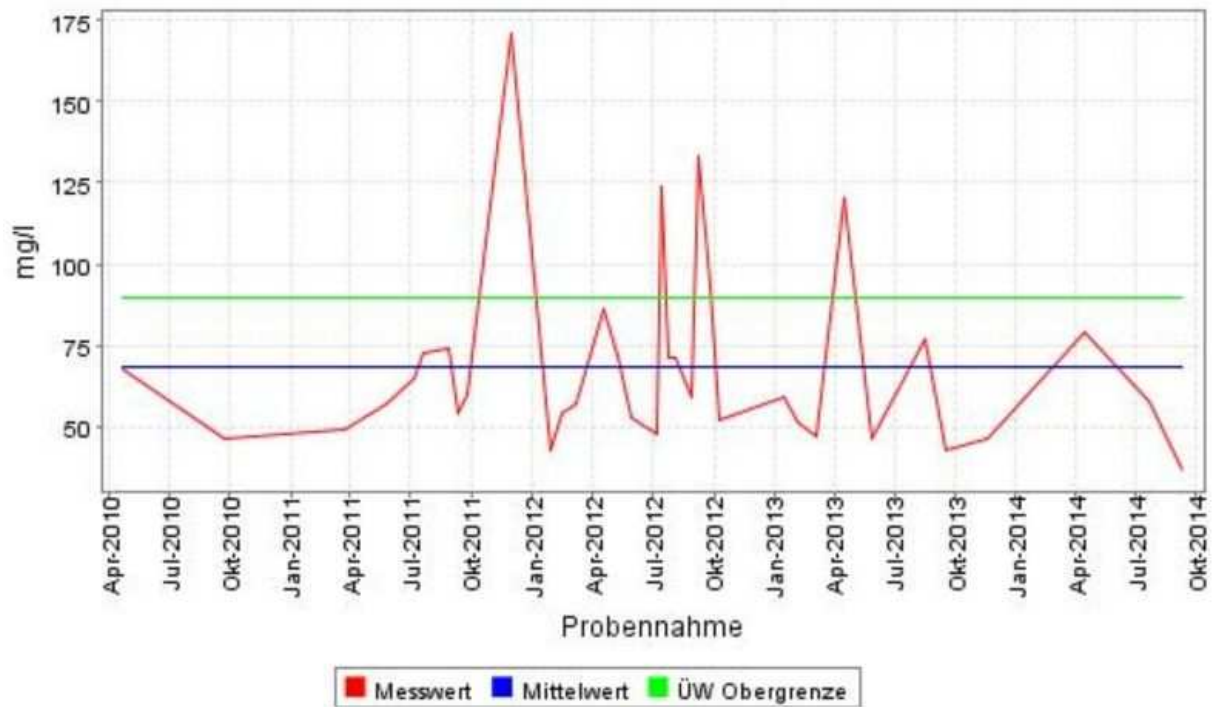


Bild 2.11: Ergebnisse der behördlichen Überwachung für den Parameter CSB

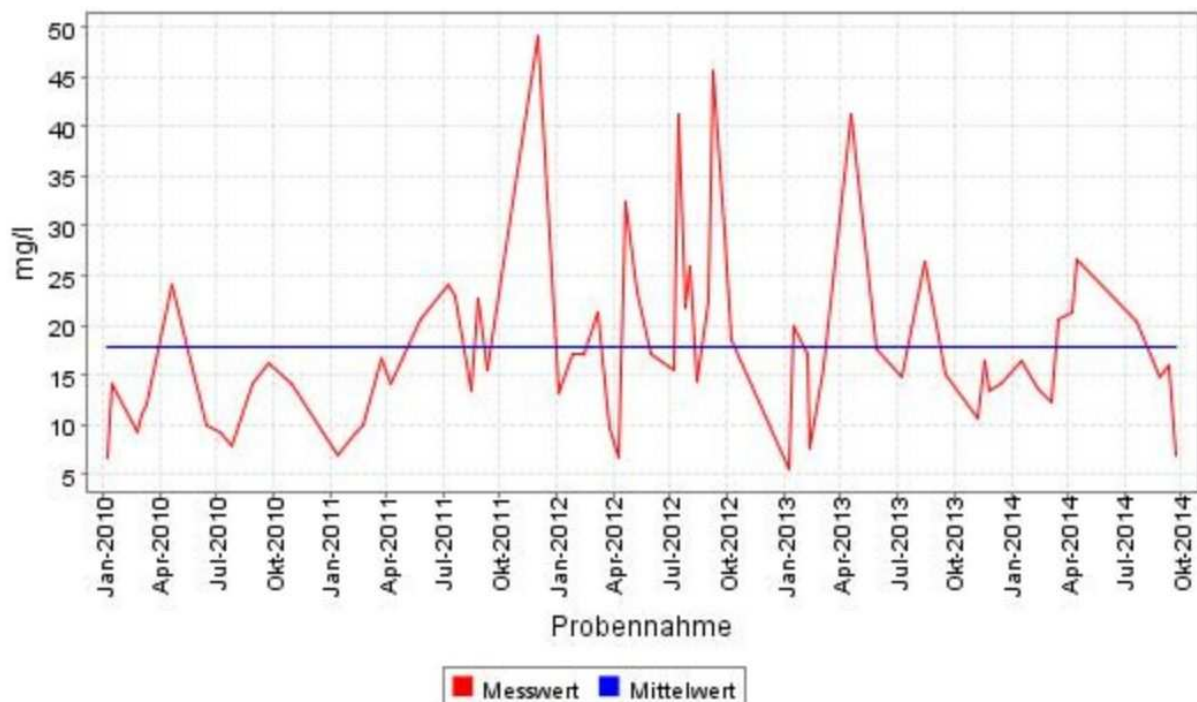


Bild 2.12: Ergebnisse der behördlichen Überwachung für den Parameter TOC

Weitergehende Anforderungen, die insbesondere Konzentrationswerte von Mikroschadstoffen im Ablauf der Kläranlage definieren, gibt es derzeit noch nicht.

Mit der Richtlinie 2013/39/EU vom 12. August 2013 über prioritäre Stoffe werden die Wasserrahmenrichtlinie und die Richtlinie 2008/105/EG vom 16. Dezember 2008

über Umweltqualitätsnormen fortgeschrieben; die Liste der prioritären Stoffe und deren Umweltqualitätsnormen wird auf 45 Stoffe erweitert. Diese werden in der nachstehenden Tabelle zusammengestellt, die jedoch nur die hier relevanten UQN-Werte für Binnenoberflächengewässer im Jahresdurchschnitt und in der Höchstkonzentration aufführt. Die EU-Richtlinie muss bis zum 14. September 2015 in nationales Recht überführt werden. Dazu wird die Oberflächengewässerverordnung (OGewV, Anon., 2011a) angepasst werden müssen.

Tab. 2.2: Zusammenstellung der UQN prioritärer Stoffe als Jahresdurchschnitts- und zulässige Höchstkonzentration (nach Anon., 2013, gekürzt, nur für Binnenoberflächengewässer)

| Nr. | Stoffname | UQN, Jahresdurchschnitt Binnenoberflächengewässer µg/l | UQN, zuläss. Höchstkonz. Binnenoberflächengewässer µg/l |
|------|---|---|--|
| (1) | Alachlor | 0,3 | 0,7 |
| (2) | Anthracen | 0,1 | 0,1 |
| (3) | Atrazin | 0,6 | 2,0 |
| (4) | Benzol | 10 | 50 |
| (5) | Bromierte Diphenylether | | 0,14 |
| (6) | Cadmium und Cadmiumverbindungen (je nach Wasserhärteklasse) | ≤ 0,08 (Klasse 1) 0,08 (Klasse 2) 0,09 (Klasse 3) 0,15 (Klasse 4) 0,25 (Klasse 5) | ≤ 0,45 (Klasse 1) 0,45 (Klasse 2) 0,6 (Klasse 3) 0,9 (Klasse 4) 1,5 (Klasse 5) |
| (6a) | Tetrachlorkohlenstoff | 12 | nicht anwendbar |
| (7) | C ₁₀₋₁₃ - Chloralkane | 0,4 | 1,4 |
| (8) | Chlor-fenvinphos | 0,1 | 0,3 |
| (9) | Chlorpyrifos (Chlorpyrifos-Ethyl) | 0,03 | 0,1 |
| (9a) | Cyclodien Pestizide: Aldrin Dieldrin Endrin Isodrin | Σ = 0,01 | nicht anwendbar |
| (9b) | DDT insgesamt | 0,025 | nicht anwendbar |
| | Para-para-DDT | 0,01 | nicht anwendbar |
| (10) | 1,2-Dichlorethan | 10 | nicht anwendbar |
| (11) | Dichlormethan | 20 | nicht anwendbar |
| (12) | Bis(2ethyl-hexyl)phthalat (DEHP) | 1,3 | nicht anwendbar |
| (13) | Diuron | 0,2 | 1,8 |
| (14) | Endosulfan | 0,005 | 0,01 |
| (15) | Fluoranthren | 0,0063 | 0,12 |
| (16) | Hexachlorbenzol | | 0,05 |
| (17) | Hexachlorbutadien | | 0,6 |
| (18) | Hexachlorcyclohexan | 0,02 | 0,04 |
| (19) | Isoproturon | 0,3 | 1,0 |
| (20) | Blei und Bleiverbindungen | 1,2 | 14 |
| (21) | Quecksilber und Quecksilberverbindungen | | 0,07 |

| Nr. | Stoffname | UQN, Jahresdurchschnitt Binnenoberflächengewässer µg/l | UQN, zuläss. Höchstkonz. Binnenoberflächengewässer µg/l |
|-------|--|--|---|
| (22) | Naphthalin | 2 | 130 |
| (23) | Nickel und Nickelverbindungen | 4 | 34 |
| (24) | Nonylphenole (4- Nonylphenol) | 0,3 | 2,0 |
| (25) | Octylphenole ((4-(1,1,3,3- Tetramethylbutyl)-phenol)) | 0,1 | nicht anwendbar |
| (26) | Pentachlorbenzol | 0,007 | nicht anwendbar |
| (27) | Pentachlorphenol | 0,4 | 1 |
| (28) | Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) | nicht anwendbar | nicht anwendbar |
| | Benzo(a)pyren | $1,7 \cdot 10^{-4}$ | 0,27 |
| | Benzo(b)fluoranthen | siehe Fußnote 11 | 0,017 |
| | Benzo(k)fluoranthen | siehe Fußnote 11 | 0,017 |
| | Benzo(g,h,i)-perylene | siehe Fußnote 11 | $8,2 \cdot 10^{-3}$ |
| | Indeno(1,2,3-cd)-pyren | siehe Fußnote 11 | nicht anwendbar |
| (29) | Simazin | 1 | 4 |
| (29a) | Tetrachlorethylen | 10 | nicht anwendbar |
| (29b) | Trichlorethylen | 10 | nicht anwendbar |
| (30) | Tributylzinnverbindungen (Tributylzinn- Kation) | 0,0002 | 0,0015 |
| (31) | Trichlorbenzole | 0,4 | nicht anwendbar |
| (32) | Trichlormethan | 2,5 | nicht anwendbar |
| (33) | Trifluralin | 0,03 | nicht anwendbar |
| (34) | Dicofol | $1,3 \cdot 10^{-3}$ | nicht anwendbar 10 |
| (35) | Perfluoroktansulfonsäure und ihre Derivate (PFOS) | $6,5 \cdot 10^{-4}$ | 36 |
| (36) | Quinoxifen | 0,15 | 2,7 |
| (37) | Dioxine und dioxinähnliche Verbindungen | | nicht anwendbar |
| (38) | Aclonifen | 0,12 | 0,12 |
| (39) | Bifenox | 0,012 | 0,04 |
| (40) | Cybutryn | 0,0025 | 0,016 |
| (41) | Cypermethrin | $8 \cdot 10^{-5}$ | 6×10^{-4} |
| (42) | Dichlorvos | $6 \cdot 10^{-4}$ | 7×10^{-4} |
| (43) | Hexabromcyclododecan (HBCDD) | 0,0016 | 0,5 |
| (44) | Heptachlor und Heptachlorepoxyd | $2 \cdot 10^{-7}$ | 3×10^{-4} |
| (45) | Terbutryn | 0,065 | 0,34 |

In der EU-Richtlinie 2013/39/EU wird erstmals eine sog. "Beobachtungsliste" definiert, die zur zukünftigen Fortschreibung der Liste prioritärer Stoffe geschaffen wird. In die erste Liste werden drei weitere Stoffe aufgenommen, und zwar
 Diclofenac (CAS 15307-79-6),
 17-beta-Östradiol (E2) (CAS 50-28-2) und
 17-alpha-Ethinylöstradiol (EE2) (CAS 57-63-6)

Die derzeit gültige Oberflächengewässerverordnung (OGewV, 2011) listet in der dortigen Anlage 7, Tabelle 1 nur 33 prioritäre Stoffe und deren Umweltqualitätsnormen für oberirdische Gewässer auf, dazu in den Tabellen 2 und 3 weitere sechs Stoffe bzw. Stoffgruppen von bestimmten anderen Schadstoffen. Als Grundlage zur Beurteilung des ökologischen Zustands und des ökologischen Potenzials werden in Anlage 5 der OGewV insgesamt 162 Stoffe aufgeführt.

In Deutschland haben die maßgebenden Verbände (DVGW, ARW, ATT, AWBR, AWE und AWWR) ein "Oberflächenwasser-Memorandum" erarbeitet, das den politischen Entscheidungsträgern in Deutschland und Europa als Arbeitshilfe dienen soll. Es werden Zielwerte vorgeschlagen, die im Sinne der WRRL eine Erhaltung bzw. eine Erreichung des guten ökologischen Zustandes der Fließgewässer gewährleisten sollen und zugleich die Belange der Trinkwasserversorgung berücksichtigen. Die Zielwerte sind als Maximalkonzentrationen im Oberflächengewässer zu verstehen. Sie sind gedacht für Oberflächenwasserressourcen, die für die Trinkwasseraufbereitung (einschließlich Uferfiltrat und künstliche Grundwasseranreicherung) genutzt werden. In der nachstehenden Tabelle sind die organischen Schadstoffgruppen und ihre Zielwerte zusammengestellt, jedoch ohne Einzelsubstanzen wie z.B. in der D4-Liste (s.u.) zu benennen:

Tab. 2.3: Zielwerte für die Beschaffenheit von Fließgewässern (Ausschnitt für organische Inhaltsstoffe), Anon. (2011)

| B Organische Inhaltsstoffe | | | |
|--|--|------|-----|
| <u>Summenparameter</u> | | | |
| B.1 | Adsorbierbare organische Halogenverbindungen (AOX) | µg/l | 25 |
| B.2 | Adsorbierbare organische Schwefelverbindungen (AOS) | µg/l | 80 |
| <u>Einzelsubstanzen</u> | | | |
| <u>Anthropogene naturfremde Stoffe⁵</u> | | | |
| B.3 | Pestizide, Biozide und Metabolite je Einzelstoff | µg/l | 0,1 |
| B.4 | Endokrin wirksame Substanzen je Einzelstoff | µg/l | 0,1 |
| B.4 | Arzneimittelrückstände je Einzelstoff | µg/l | 0,1 |
| B.5 | PFT und übrige organische Halogenverbindungen je Einzelstoff | µg/l | 0,1 |
| B.6 | Mikrobiell schwer abbaubare Stoffe je Einzelstoff | µg/l | 1,0 |
| B.7 | Synthetische Komplexbildner je Einzelstoff | µg/l | 5,0 |

Der Konzentrationswert für synthetische organische Schadstoffe von $\leq 0,1 \mu\text{g/l}$ pro Einzelstoff wird in Nordrhein-Westfalen generell als allgemeiner Vorsorgewert (VW) für Oberflächengewässer diskutiert, aus denen direkt oder indirekt Trinkwasser gewonnen wird oder gewonnen werden soll (MKULNV, 2014).

Im Rahmen des zweiten Monitoringprogramms zur Aufstellung der Bewirtschaftungspläne und Maßnahmenprogramme für den zweiten Zyklus 2016 -2021 und folgende nach der WRRL hat das MUNLV 2009 einen *Leitfaden Monitoring Oberflächengewässer*, Teile A, B, C sowie Teil D mit 22 Anhängen und Tabellen vorgestellt. Besondere Bedeutung hat dabei der Anhang D4 mit den Bewertungsgrundlagen für die in Oberflächengewässern untersuchten Parameter. Die aktuelle Anlage D4 von April 2014 unterscheidet dabei in:

- Liste mit Umweltqualitätsnormen für die gesetzlich verbindlich geregelten Stoffe aus den Anlage 5 und 7 der OGewV; diese Liste enthält 256 UQN-Werte für die im Jahresmittel einzuhaltenden Konzentrationen von Stoffen im Wasser, in Sedimenten und in Biota sowie 30 Stoffe, für die ein Jahreshöchstwert als UQN einzuhalten ist.
- Liste mit Orientierungswerten und Präventiven Vorsorgewerten für die gesetzlich nicht verbindlich geregelten Stoffe; diese Liste enthält 384 Werte von Parametern, die entweder als *Orientierungswert* (= fachlich abgeleiteter Beurteilungswert, der nicht die gesetzliche Verbindlichkeit z.B. einer Umweltqualitätsnorm aufweist) oder als *Präventiver Vorsorgewert* (= beruht auf einer Konvention und ist fachlich nicht abgeleitet).

Die Tabellen können wegen ihres Umfangs hier nicht wiedergegeben werden; sie sind jedoch aktuell unter

www.flussgebiete.nrw.de/index.php/Leitfaden_Monitoring_Oberflächengewässer_Teil_D/_/Anlage_4 einzusehen. Die UQN-JMW bzw. die OW/PV, für die im Rahmen dieser Studie Konzentrationswerte ermittelt wurden, sind in der Tabelle 3.2 (s.u.) aufgeführt.

Es ist derzeit festzuhalten, dass weder die EU-Richtlinie aus 2013 über prioritäre Stoffe, noch die OGewV aus 2011 und wohl auch nicht deren vorhersehbare Novelle eine unmittelbare Handlungsdirektive zur Errichtung weiterer Reinigungsstufen in (kommunalen) Kläranlagen mit sich bringen. Aus der immer noch unsicheren Gesamtdatenlage können unmittelbar noch keine justiziablen Anforderungen an die

Ablaufkonzentrationen bestimmter Schadstoffe abgeleitet werden. Insbesondere haben die 16 Bundesländer derzeit keine einheitlichen Positionen dazu.

Dennoch sind die Erhaltung bzw. Wiederherstellung eines mindestens guten Zustands der aquatischen Umwelt sowie die Sicherstellung einer qualitativ hochwertigen Trinkwasserversorgung generelle, generationenübergreifende Aufgaben. Das allgemeine Vorsorgeprinzip kann zur langfristigen Handlungsleitlinie werden. Ob dabei der Schwerpunkt der Maßnahmen auf der Bekämpfung der Ursachen am Anfallort der Schadstoffe oder auf einer 'end-of-pipe'-Technologie liegt, hängt im Einzelfall von den jeweiligen Stoffe, ihrer Anwendung und ihrer Verteilung ab. So sind sicher kritische Industriechemikalien, die bei der Herstellung, der Be- oder Verarbeitung von Stoffen entstehen, am Ort des Anfalls zu eliminieren, während insbesondere Arzneimittel, Körperpflegeprodukte oder sonstige ubiquitäre organische Schadstoffe (PAK, PCB), die großflächig im Einzugsgebiet anfallen, nur in zentralen Anlagen eliminiert werden können.

3 Untersuchungsergebnisse zu den Mikroschadstoffkonzentrationen im Kläranlagenablauf, Vergleich und Bewertung

Im Ablauf der Kläranlage Verne wurden insgesamt 2 mehrtägige (72-stündige) Probenahmen durchgeführt. Damit die Konzentrationswerte nicht durch Verdünnung beeinflusst werden, wurden die Tage aufgrund der jeweiligen Wetterprognosen für Trockenwetter ausgewählt. Die Probenahme erfolgte mengenproportional, sodass die Sammelproben ein repräsentatives Bild der Frachtverhältnisse über den Probenahmezeitraum widerspiegeln. Der automatische Probenehmer ermöglichte die Kühlung der Proben auf 4°C, um Veränderungen durch biochemischen Umsatz während der Probenahme auszuschließen.

Die Untersuchungen wurden bei der OWL Umweltanalytik GmbH in Leopoldshöhe in Auftrag gegeben; die Laboranalytik wurde von der Agrolab Labor GmbH in Bruckberg durchgeführt.

Folgende Einzelstoffe, die zum überwiegenden Teil von der ARGE Spurenstoffe NRW (Arge 2014) in Abstimmung mit dem MKULNV als Leitparameter für die relevanten Stoffgruppen in Kläranlagenabläufen ausgewählt wurden, wurden analysiert:

Tab. 3.1: Zusammenstellung der untersuchten Stoffe und der zugehörigen Analysemethoden

| Gruppe | Stoffbezeichnung | Analysenmethode |
|------------------------------|------------------|-----------------|
| <u>Arzneimittel</u> | | |
| Lipidsenker | Bezafibrat | HM LC/MS/MS |
| Analgetikum, Antirheumatikum | Diclofenac | HM LC/MS/MS |
| Analgetikum | Naproxen | HM LC/MS/MS |
| Analgetikum | Phenazon | HM LC/MS/MS |
| Antiepileptikum | Carbamazipin | HM LC/MS/MS |
| Beta-Blocker | Atenolol | HM LC/MS/MS |
| Beta-Blocker | Bisoprolol | HM LC/MS/MS |
| Beta-Blocker | Metoprolol | HM LC/MS/MS |
| Beta-Blocker | Sotalol | HM LC/MS/MS |

| | | |
|---|--------------------------------|------------------------|
| Antibiotikum | Clarithromycin | HM LC/MS/MS |
| Antibiotikum | Sulfamethoxazol | HM LC/MS/MS |
| Psychopharmakum | Oxazepam | HM LC/MS/MS |
| Steroidhormon | 17- α -Ethinylestradiol | HM GC/MS |
| Steroidhormon | 17- β -Estradiol | HM LC/GC/MS |
| Steroidhormon | Estron | HM GC/MS |
| Röntgenkontrastmittel, ionisch | Amidotrizoesäure | HM LC/MS/MS |
| Röntgenkontrastmittel, nicht-ion. | Iomeprol | HM LC/MS/MS |
| Röntgenkontrastmittel, nicht-ion. | Iopamidol | HM LC/MS/MS |
| Röntgenkontrastmittel, nicht-ion. | Iopromid | HM LC/MS/MS |
| Breitbandherbizid | Diuron | DIN EN ISO 11369 (F12) |
| Herbizid | Isoproturon | DIN EN ISO 11369 (F12) |
| Algizid | Terbutryn | HM GC/MS |
| Korrosionsschutzmittel, Komplexbildner | Benzotriazol | EN ISO 11369 (mod.) |

Bezafibrat (Summenformel $C_{19}H_{20}ClNO_4$) ist ein Medikament zur Senkung der Blutfettwerte und senkt die Triglycerid- und die Cholesterolkonzentration im Blut.

Der Wirkstoff **Diclofenac** ist ein weit verbreitetes Arzneimittel, das fiebersenkend, entzündungshemmend, antirheumatisch und schmerzstillend wirkt. Das Medikament ist rezeptpflichtig. Unter dem ursprünglichen Namen Voltaren wird es zudem in geringen Konzentrationen für die äußere Behandlung rezeptfrei angeboten. Die insgesamt verwendeten Mengen sind relevant: in Deutschland werden fast 90 Mg/a des Wirkstoffs eingesetzt, wobei man annimmt, dass ca. 70% davon durch Ausscheidungen in das Schmutzwasser gelangen (Meißner, 2008). Man rechnet mit einer mittleren einwohnerspezifischen Emission von 0,3 - 0,5 mg/(E·d) (LANUV, 2013). Der Wirkstoff wird in Kläranlagen nicht bzw. nur geringfügig abgebaut.

Carbamazepin ist ein Antiepileptikum und mindert die Erregbarkeit von Nervenzellen sowie die Ausbreitung von Reizen im Gehirn. Dadurch können epileptische Anfälle vorgebeugt werden.

Patienten mit hohem Blutdruck verwenden den Wirkstoff **Metoprolol** (Summenformel $C_{15}H_{25}NO_3$), der auch bei Herzrhythmusstörungen und zur Akutbehandlung von Herzinfarkten eingesetzt wird. Metoprolol ist der am häufigsten eingesetzte Betablocker in Deutschland.

Sulfamethoxazol (Summenformel $C_{10}H_{11}N_3O_3S$) ist ein Antibiotikum, welches u.a. bei Harnwegsinfektionen und bei Lungenentzündungen eingesetzt wird.

Die auf die Beobachtungsliste gesetzten Hormonstoffe wurden ebenfalls untersucht, um eine Abschätzung für die Relevanz zu ermöglichen.

Weitere persistente Stoffe aus der medizinischen Anwendung sind Röntgenkontrastmittel, die i.d.R. Jod enthalten, das Röntgenstrahlung absorbiert. Die **Amidotrizoesäure** ist ein ionisches Jod-haltiges Kontrastmittel (Summenformel $C_{11}H_9I_3N_2O_4$), das zur Untersuchung von Körperhöhlen und des Magen-Darm-Trakts eingesetzt wurde. Dieses Mittel darf nicht mehr in Blut- und Lymphgefäße eingebracht werden; dafür werden heute wegen der geringeren Nebenwirkungen vorzugsweise nichtionische Kontrastmittel verwendet. Dazu gehören **lomeprol**, **lopamidol** und **lopromid**.

Wegen der vermuteten Geringfügigkeit wurden endokrin wirksame Substanzen (z.B. Bisphenol A), Moschusduftstoffe (Galaxolid), Flammschutzmittel (z.B. TCPP), perfluorierte Tenside (z.B. Perfluorooctansäure PFOA) hier nicht untersucht. Dagegen wurden Diuron (Verwendung als Totalherbizid auf Flächen und in Anstrichmitteln), Isoproturon (Verwendung als Herbizid im Getreideanbau) und Terbutryn (Verwendung als Algizid in Dispersions-/Fassadenfarben) ebenso in den Untersuchungsumfang aufgenommen wie **Benzotriazol**, das als Korrosionsschutzmittel im Haushalt (in Geschirrspülmitteln) und in der Industrie (in Kühlschmiermitteln, Frostschutz- und Enteisungsmitteln) eingesetzt wird..

Die Ergebnisse der Beprobung sind in nachstehender Tabelle zusammengefasst, in die die Umweltqualitätsnormen aus der OGeV sowie *Orientierungswerte* (OW) und *Präventive Vorsorgewerte* (PV) aus dem Anhang D4 zum Leitfaden Monitoring Oberflächengewässer mit eingetragen sind:

Tab. 3.2: Analysenergebnisse der Mikroschadstoffkonzentrationen im Ablauf Kläranlage Verne im Vergleich zu UQN-JMW und OW/PV-Werten im Gewässer

| Stoff | Dim. | UQN-JMW | OW / PV | Probe vom | Probe vom | Mittel |
|----------------------------|-------------------|---------|--------------------|-------------|---------------|--------|
| | | | | 29.9.-2.10. | 27.10.-30.10. | |
| Benzafibrat | µg/l | | 0,1 | 0,15 | 0,36 | 0,26 |
| Diclofenac | µg/l | | 0,1 | 1,6 | 3,1 | 2,35 |
| Naproxen | µg/l | | 0,1 | 0,12 | 0,16 | 0,14 |
| Phenazon | µg/l | | 1,1 | 0,063 | 0,11 | 0,09 |
| Carbamazipin | µg/l | | 0,5 | 0,33 | 0,45 | 0,39 |
| Atenolol | µg/l | | 0,1 | 0,022 | 0,061 | 0,042 |
| Bisoprolol | µg/l | | 0,1 | 0,37 | 0,57 | 0,47 |
| Metoprolol | µg/l | | 7,3 | 1,1 | 0,43 | 0,77 |
| Sotalol | µg/l | | 0,1 | 0,37 | 0,45 | 0,41 |
| Clarithromycin | µg/l | | 0,02 | 0,11 | 0,15 | 0,13 |
| Sulfamethoxazol | µg/l | | 0,15 | 1,0 | 0,53 | 0,77 |
| Oxazepam | µg/l | | 0,1 | 0,17 | 0,22 | 0,20 |
| 17-α-Ethinylestradiol | µg/l | | 4·10 ⁻⁵ | <0,01 | <0,005 | <0,01 |
| 17-β-Estradiol | µg/l | | 0,0004 | <0,01 | >0,005 | <0,01 |
| Estron | µg/l | | | <0,01 | <0,005 | <0,01 |
| Amidotrizoesäure | µg/l | | 0,1 | 9,1 | 8,5 | 8,8 |
| Iomeprol | µg/l | | 0,1 | 0,27 | <0,05 | 0,16 |
| Iopamidol | µg/l | | 0,1 | 0,22 | 3,0 | 1,61 |
| Iopromid | µg/l | | 0,1 | 11,0 | 5,6 | 8,3 |
| Diuron | µg/l | 0,2 | | <0,05 | <0,05 | <0,05 |
| Isoproturon | µg/l | 0,3 | | <0,1 | 0,55 | 0,32 |
| Terbutryn | µg/l | | 0,065 | <0,5 | <0,05 | <0,5 |
| Benzotriazol | µg/l | | 10 | 6,2 | 4,6 | 5,4 |
| | | | | | | |
| mittl. Durchflussmenge / d | m ³ /d | | | 5883 | 6432 | 6158 |

Zur Einordnung der erhaltenen Ergebnisse werden die Werte mit anderen Literaturangaben verglichen.

Tab. 3.3: Vergleich der Messergebnisse im Ablauf der Kläranlage Verne mit Literaturangaben (Auswahl)

| KA | Quelle | Benza- fibrat | Diclo- fenac | Metopro- lol | Sulfame- thoxazol | Amidotri- zoesäure | Iopromid | Ter- butryn | Benzo- triazol |
|--------------------------------------|---------------------------------|------------------|-----------------|-----------------------------|----------------------|-----------------------|---------------------------|----------------|-------------------|
| | | µg/l | µg/l | µg/l | µg/l | µg/l | µg/l | µg/l | µg/l |
| Salzkotten- Verne | - | 0,26 | 2,35 | 0,77 | 0,77 | 8,8 | 8,3 | <0,5 | 5,4 |
| div. CH | Abegglen, Siegrist (2012) | 0,24 ±0,25 | 1,34 ±0,5 | 0,92 ±0,38 (Atenolol) | 0,42 ±0,18 | | <0,2 - >4,0 | | |
| Hattingen | Tacke et al. (2008) | | 1,23 (i.M.) | | | 0,8 | 3,34 (i.M.f. Iopromid) | | |
| BO-Ölbachtal | Tacke et al. (2008) | | 1,46 (i.M.) | | | 3,21 | 2,32 (i.M.f. Iopromid) | | |
| Essen Rellinghausen bzw. E-Süd | Tacke et al. (2008) | | 2,45 (i.M.) | | | 3,53 | 8,81 (i.M.f. Iopromid) | | |
| div. | LANUV 2007 | >1 | >1 | >1 | >1 | | | | |
| Köln- Stammheim | Uni Dortmund (2003) | 0,29 | 1,6 (i.M.) | 1,03 | 1,3 | | | | |
| Obere Lutter | IWW (2011) | 0,4 - 1,0 | 1,3 - 2,9 | 1,0 - 3,9 | | 0,7 - 5,7 | | | 2,6 - 6,0 |
| Neuss-Ost | Herbst et al. (2012) | <0,02 | 1,05 (i.M.) | 0,16 (i.M.) | 0,7 (i.M.) | 10 (i.M.) | 0,35 (i.M.) | <0,02 | 4,1 (i.M.) |
| Schwerte | Arge (2014) | 0,047 | 3,0 | 1,0 | 1,0 | 8,8 (i.M.) | | | 2,6 |
| Bad Sassendorf | Arge (2014) | <0,01 | 2,4 (i.M.) | 0,54 | 0,71 | 0,45 (i.M.) | | | 2,1 |
| DU-Vierlinden | Arge (2014) | <0,01 | 1,3 | 0,57 | 0,65 | 0,8 (i.M.) | | | 1,7 |
| GT-Putzhagen | Merten, M. (2011) | 0,14 | 3,7 | 1,8 | 0,55 | 0,89 | <0,05 | | |
| Düren-Merken | Borneman n et al. (2012) | | 3,0 (i.M.) | 2,0 (i.M.) | 0,3 (i.M.) | 5,94 - 19,83 | 18 (i.M.f. Iopromid) | | 7 (i.M.) |
| W-Buchenhofen | Borneman n et al. (2012) | | 1,35 | 1,57 | 0,69 | 3,53 | | | 7,59 |

Im Vergleich fällt auf, dass die Arzneimittelwirkstoffe im mittleren Bereich der an anderen Stellen gemessenen Werte liegt; die Röntgenkontrastmittel sind eher an der oberen Grenze angesiedelt, ebenso wie der Wert für den Korrosionsinhibitor Benzotriazol. Dabei liegt der einwohnerspezifische Wert für Diclofenac mit (gerundet)

$$c(\text{Diclofenac}) = 6158 \text{ m}^3/\text{d} \cdot 2,35 \text{ mg}/\text{m}^3 / 20000 \text{ E} = 0,724 \text{ mg}/(\text{E} \cdot \text{d})$$

über dem Bereich der Emissionen, wie sie vom LANUV (2013) angegeben wurden (einwohnerspezifischer Lastwert für Diclofenac: 0,3 - 0,5 mg/(E·d)).

Für die Stoffe Carbamazepin und Metoprolol gilt:

$$c(\text{Carbamazepin}) = 6158 \text{ m}^3/\text{d} \cdot 0,39 \text{ mg}/\text{m}^3 / 20000 \text{ E} = 0,120 \text{ mg}/(\text{E} \cdot \text{d})$$

$$<0,25\text{-}0,3 \text{ µg}/(\text{E} \cdot \text{d})$$

$$c(\text{Metoprolol}) = 6158 \text{ m}^3/\text{d} \cdot 0,77 \text{ mg}/\text{m}^3 / 20000 \text{ E} = 0,237 \text{ mg}/(\text{E} \cdot \text{d})$$

<ca. 0,6 $\mu\text{g}/(\text{E} \cdot \text{d})$

Die relativ hohen Werte für die Röntgenkontrastmittel lassen sich vermutlich auf den Einfluss der Krankenhausabwässer zurückführen und sind nicht zwangsläufig einwohnerspezifisch (vgl. Götz et al., 2012).

4 Grundsätzliche verfahrenstechnische Möglichkeiten zur Elimination von Mikroschadstoffen und Vergleich

4.1 Adsorptionsverfahren

Die Adsorption ist ein rein physikalischer Vorgang, bei dem Stoffe aus einer Flüssigkeit (oder einem Gas) an der ggf. rauen oder zerklüfteten Oberfläche eines geeigneten Feststoffs angelagert und angereichert werden. Es entstehen keine chemischen Bindungen, sondern die wirkenden Kräfte (van der Waals) sind nur vergleichsweise schwach und dabei stark abnehmend mit zunehmender Entfernung von der Oberfläche. Die Beladung des Adsorbens nimmt mit der Zeit zu, wobei die umgebende Restkonzentration an Adsorbat ansteigt. Es stellt sich ein schließlich Gleichgewichtszustand zwischen Adsorbens und Adsorbat in Abhängigkeit von der Temperatur ein; dies dauert i.d.R. mehrere Stunden.

Die mathematische Formulierung erfolgt für verschiedene Stoffe in wässriger Lösung und kleiner Konzentration nach der sog. Freundlich'schen Isothermengleichung:

$$Q = k \cdot c^n$$

mit:

Q: Beladung des Adsorbens, z.B. [mg/g], [Gew.-%]

c: Restkonzentration des Adsorbats in der Lösung, z.B. [mg/l], [ml/l]

k: Konstante, Beladung bei der Restkonzentration 1

n: Konstante, Steigung der Geraden

Die Gleichgewichtsbeladungen werden für verschiedene Konzentrationen experimentell ermittelt und in ein doppelt-logarithmisches Koordinatensystem eingetragen. Sofern die experimentell ermittelten Werte eine Gerade ergeben, ist der Ansatz der v.g. Exponentialfunktion korrekt.

Die Adsorption wird für organische und anorganische Verbindungen mit hohem Molekulargewicht eingesetzt. Die Adsorbierbarkeit steigt (Fa. Chemviron Carbon)

- mit zunehmender relativer Molmasse,
- mit steigender Anzahl funktioneller Gruppen,

- mit steigender Polarisierbarkeit der Moleküle,
- mit zunehmend hydrophoben Eigenschaften.

Die Wirkungsweise der Aktivkohle ist in ihrer Oberflächenstruktur begründet. Sie bietet bezogen auf ihr Volumen bzw. auf die Masse eine extrem große spezifische Oberfläche von 500 bis 1.500 m²/g an. Die Porosität an der Oberfläche ist jedoch nicht gleichmäßig. Es sind oberflächennah größere Poren (Makroporen, $\varnothing >25$ nm) vorhanden, in die sowohl das Lösungsmittel, als auch größere Moleküle der zu adsorbierenden Stoffe eindringen können. Mit zunehmender Entfernung von der Oberfläche nach innen wird der Porenradius kleiner, sodass hierher ggf. nur noch kleinere Moleküle vordringen können (Mesoporen ($\varnothing 1...25$ nm)). In die Mikroporen ($\varnothing < 1$ nm) schließlich kann nur noch das Lösungsmittel selbst vordringen.



Bild 4.1: Schematische Darstellung oberflächennaher Schichten der A-Kohle und REM-Aufnahme der Oberfläche (Firmenschriften Norit und Donau Carbon)

Aktivkohle wird in drei verschiedenen Varianten auf dem Markt angeboten:

- granuliert, kornförmige A-Kohle, Korngröße 0,2 bis 5 mm
- pulverförmige A-Kohle, Korngröße 0,01 bis 0,18 mm
- pelletierte bzw. stranggepresste A-Kohle, Korngröße 0,8 bis 5 mm

Die Einsatzgebiete sind aufgrund der Materialeigenschaften sehr unterschiedlich:

- Granulierte A-Kohle wird in Festbettfilteranlagen eingesetzt, ggf. in fluidisierten Filtern. Nach Belegung kann das Granulat in vielen Fällen (thermisch) regeneriert und damit wieder in den wirtschaftlichen Kreislauf eingeschleust werden. Wenn

eine Regeneration technisch nicht möglich ist oder aus sonstigen Gründen nicht infrage kommt, muss eine thermische Verwertung stattfinden.

- Pulverförmige A-Kohle wird in die wässrige Phase eingerührt und abschließend sedimentiert. Aufgrund der Feinkörnigkeit kann die PAC nicht regeneriert werden; sie muss stattdessen entwässert und thermisch verwertet werden.
- Pelletierte A-Kohle wird ebenfalls in Festbettfiltern verwendet; auch sie kann regeneriert werden, sodass nach der Beladung außer der thermischen Verwertung die funktionale Wiederverwendung in Betracht kommt.

Eine Regeneration von granulierter bzw. pelletierter A-Kohle ist in vielen Fällen möglich und sinnvoll. Dazu muss das Adsorptionsmaterial aus dem Reaktionsbehälter entnommen und möglichst wasserfrei zur Wiederaufbereitungsanlage transportiert werden. Dort wird die beladene A-Kohle in einem Drehrohrofen kontinuierlich auf bis zu 1200°C erhitzt, wobei die adsorbierten Stoffe gelöst und verbrannt werden. Anschließend wird die A-Kohle i.d.R. durch Wasserdampf reaktiviert. Der Betrieb läuft chargenweise, sodass die Betreiber jeweils die eigene A-Kohle nach Aufbereitung wieder zurück erhalten könnten. Tatsächlich ist dies nicht der Fall.

Sofern eine Desorption nicht möglich ist, muss die A-Kohle mit ihrer Beladung sicher verbrannt werden, wofür sehr hohe Temperaturen von bis zu 2000°C erforderlich sind.

Tab. 4.1: Einige Hersteller von Aktivkohle

| Name | Produktionsort | Ausgangsmaterial | Sorten | Aufbereitung |
|------------------|--|--|-------------------|-------------------------------|
| Cabot Norit | USA, Kanada, Mexiko, Brasilien, Holland, Großbritannien, Italien | dampfaktivierte Steinkohle, dampfaktivierte Kokosnussschalen | GAC, PAC | Italien, Großbritannien |
| CarboTech | Essen, Zulieferer aus Südostasien | Steinkohle, Kokosnussschalen | GAC, PAC, Pellets | in Essen |
| Chemviron Carbon | USA, Südostasien | dampfaktivierte Steinkohle, Kokosnussschalen | GAC, PAC, Pellets | in Belgien |
| Donau Carbon | Frankfurt, Pischelsdorf | Steinkohle, Kokosnussschalen | GAC, PAC | |
| Jacobi | Frankreich, Italien, Südostasien | Kokosnussschalen | GAC, PAC, Pellets | Premnitz (D), Frankreich, USA |

Typische Anwendungen der Aktivkohle sind nach der Nachklärung:

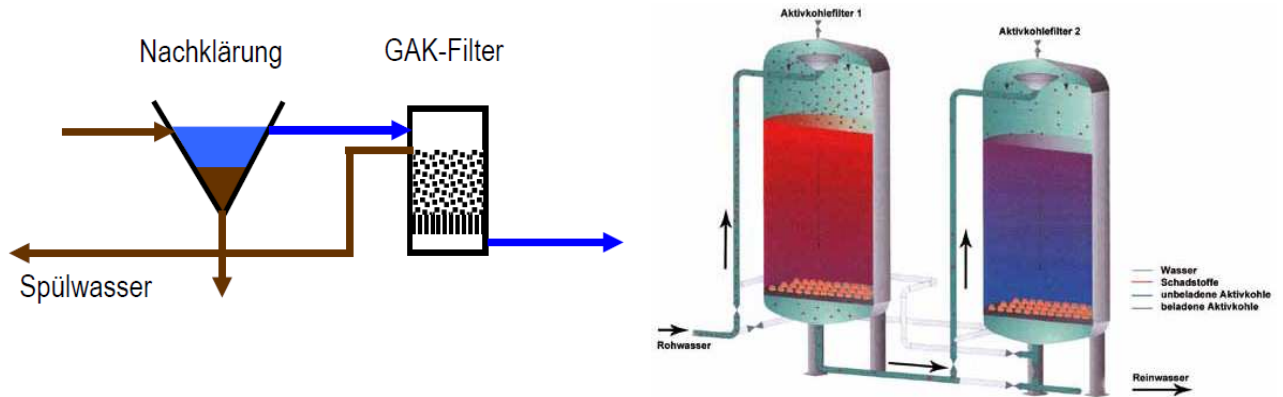


Bild 4.2: Einsatz granulierter A-Kohle in offenen oder geschlossenen Filtereinheiten (Abegglen, Siegrist, (2012) und Firmenschrift Donau-Carbon)

Besonders geschlossene, hohe GAK-Einheiten bieten sich bei beengten Platzverhältnissen an. Da im Ablauf der Nachklärung immer noch ein Anteil von ca. 5 - 20 mg/l an abfiltrierbaren Stoffen enthalten ist, muss das Filterbett gegen Verschlämung gesichert werden. Ideal, aber aufwändig, wäre eine vorherige Sandfiltration (Flockungsfiltration), wie sie bei einigen Kläranlagen in NRW zum besonderen Schutz der Vorfluter bereits vorhanden ist. Alternativ kann auch eine Mikrofiltration (Tuchfiltration) vorgesehen werden, die bei etwas geringerer Leistung deutlich weniger Platz erfordert. Trotz einer mechanischen Vorbehandlung sollte in den GAK-Kolonnen zudem die Möglichkeit einer Rückspülung des Filterbetts vorgesehen werden, um eine potentielle Verschlämung beseitigen zu können.

Die Vorteile der GAK liegen insbesondere in der Wiederverwendbarkeit der Kohle sowie im relativ geringen Platzbedarf, vor allem bei geschlossenen Filtereinheiten. Als Nachteil der GAK-Adsorption muss die diskontinuierliche Leistung angesehen werden, weil durch die zunehmende Beladung der Wirkungsgrad im Laufe der Zeit geringer wird und sogar ein 'Filterdurchbruch' zu erwarten ist, der nicht einfach zu diagnostizieren ist.

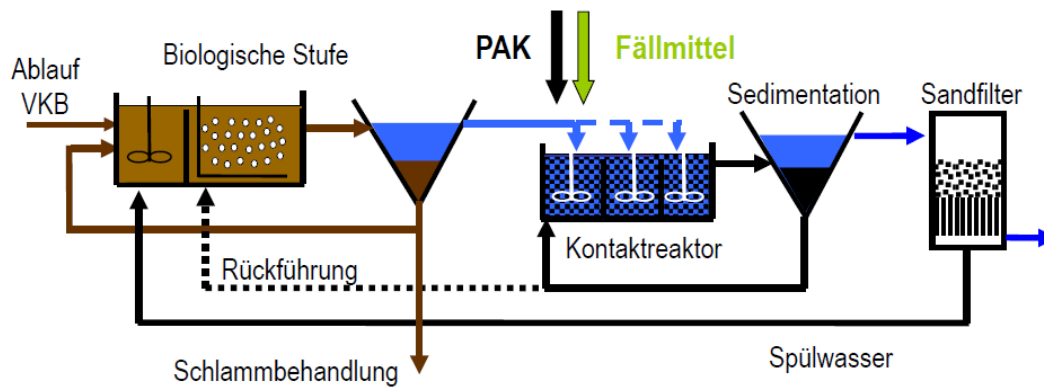


Bild 4.3: Einsatz pulverförmiger A-Kohle in nachgeschalteten Einheiten (Abegglen, Siegrist, 2012)

Pulverförmige Aktivkohle (PAK) wurde bereits vor Jahrzehnten z.B. bei der Behandlung von Industrieabwasser eingesetzt. Es ist grundsätzlich möglich, auch zur Eliminierung von Mikroschadstoffen PAK in der Belebtschlammanlage zuzusetzen. Es mag dabei durch die unspezifisch adsorptive Wirkung auch zu einem Rückhalt von fraglichen Substanzen kommen, jedoch verbleiben die Schadstoffe sodann konzentriert im Klärschlamm. Vor dem Hintergrund einer landwirtschaftlichen oder auch thermischen Verwertung erscheint dieses Verfahren nur bedingt sinnvoll.

Der übliche Einsatz von PAK erfolgt heute in speziellen Adsorptionsreaktoren, mit anschließender mechanischer Abtrennung einschließlich der Rückführung von PAK. Das Verfahren ist im mechanischen Prinzip vergleichbar mit den Schlammkontaktanlagen, die in der Trinkwasseraufbereitung aus Oberflächenwasser eingesetzt werden. Die weitestgehende Abtrennung der teilweise sehr feinen Aktivkohle erfordert den Einsatz von Flockungs(hilfs)mitteln, ggf. ist die Nachschaltung einer Sandfiltration bzw. von Ersatzanlagen angezeigt. Der Platzbedarf für diese Verfahrenskombination ist groß, z.B. Klärwerk Ulm-Steinhäule (Hiller, 2011). Der alternative Einsatz einer Ultrafiltration zur Abtrennung der PAK liefert ggf. Vorteile hinsichtlich des Platzbedarfs, nicht jedoch bei den Gesamtkosten.

Eine Alternative zur Errichtung großer Sedimentationsbecken ist der Betrieb von Adsorptionsreaktoren im Rezirkulationsbetrieb unter Einbeziehung der Nachklärung bzw. der Belebungsanlage, so wie in der großtechnischen Versuchsanlage des Ruhrverbands in Schwerte realisiert. Dabei wird Abwasser aus der Nachklärung -ggf. nach vorheriger Ozonung- mit PAK versetzt und in die Adsorptionsreaktoren gegeben.

Deren Ablauf wird entweder in den Zulauf der Nachklärung oder in die Belebungsanlage zurückgeführt. Damit ist die hydraulische Beaufschlagung der Nachklärung immer im Bereich der maximalen Beschickung mit Q_M . Durch die Rückführung der PAK erhöht sich der zugehörige Feststoffanteil im Belebtschlamm entsprechend der Zugabemenge. Bei gleichem erforderlichen Schlammalter muss daher die Feststoffkonzentration höher sein; dies ist möglich, weil durch die PAK-Zugabe der Schlammindex sinkt und eine höhere TS-Konzentration im Rücklaufschlamm erreicht werden kann. Insgesamt kommt es zu einer Erhöhung des Überschussschlammanfalls, der nunmehr auch adsorbierten Mikroschadstoffe enthält.

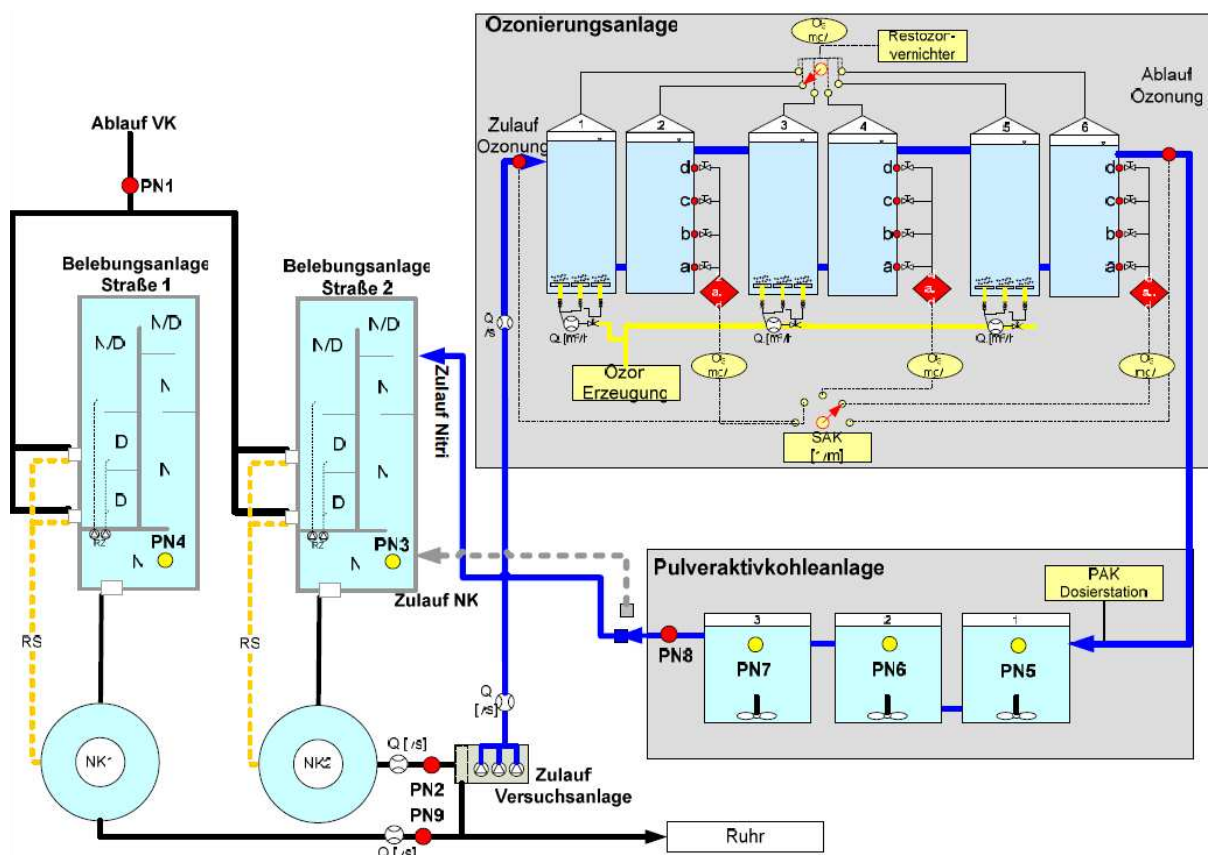


Bild 4.4: Fließschema der großtechnischen Versuchsanlage des Ruhrverbands in Schwerte (ARGE Spurenstoffe NRW, 2011)

Eine weitere Variante für die mögliche Zugabestelle von PAK ist in der Kläranlage Buchenhofen des Wupperverbands untersucht worden (ARGE Spurenstoffe NRW, Mikroflocc, 2012). Die Anlage verfügt über eine 2-Schicht-Filtration mit Aufstauspülung (System Sulzer), wobei die PAK-Dosierung in den Zulauf zur Filterkammer erfolgt. Zur Unterstützung der Adsorption wurde ein Rührwerk im Bereich des Filterüberstaus eingebaut. Der Rückhalt bzw. die Entnahme der PAK

erfolgt über die Raumfiltrationswirkung und den Austrag über den Filterschlamm, der seinerseits in den Zulauf der mechanischen Stufe gegeben wird. Der Schlamm wird ausgefault, entwässert und anschließend verbrannt. Es ist mit einer signifikanten Erhöhung der Schlammfracht zu rechnen, jedoch verbessert der Anteil der PAK im ausgefaulten Schlamm seine Entwässerbarkeit; dazu kommt eine Erhöhung des Brennwertes.

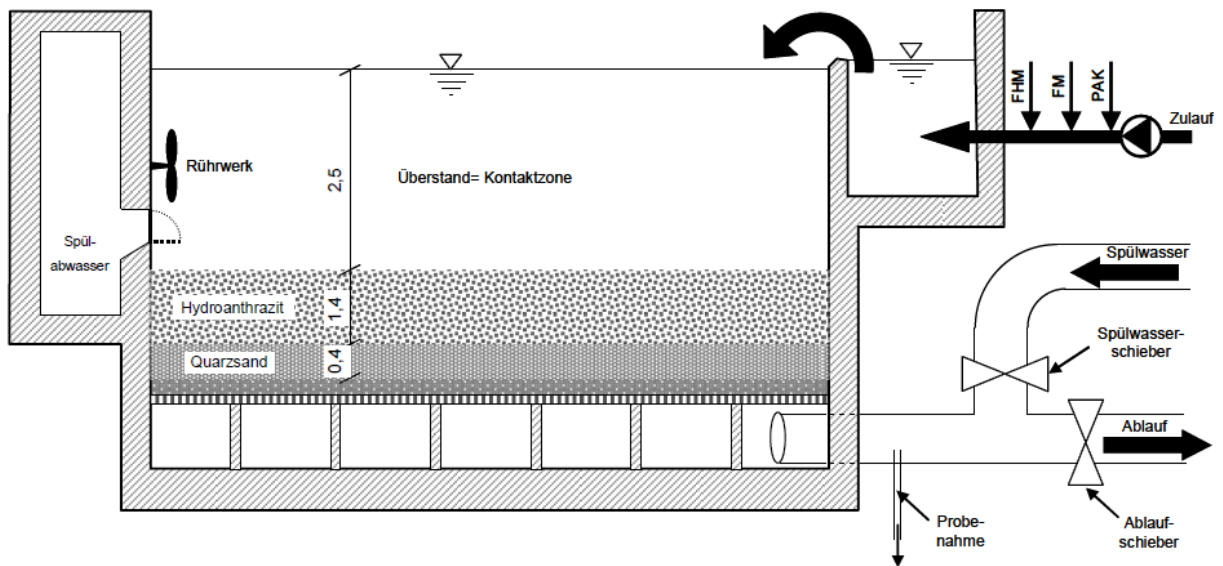
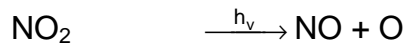


Bild 4.5: PAK-Zugabe in eine Zweischiicht-Filteranlage der Kläranlage Wuppertal-Buchenhofen (ARGE Spurenstoffe NRW, TP 5, 2012)

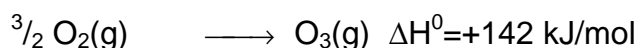
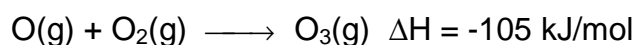
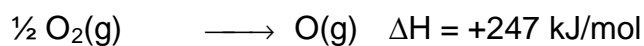
4.2 Oxidationsverfahren

Bei der Oxidation wird die chemische Struktur der Stoffe verändert. Im chemischen Sinne ist die Oxidation die Abgabe von Elektronen. Ein Stoff, der oxidiert wird, gibt ein oder mehrere Elektronen ab an einen Stoff, der diese aufnimmt. Der aufnehmende Stoff wird Reduktionsmittel genannt. Bei den hier relevanten Oxidationsprozessen handelt es sich um weitergehende Verfahren, die nicht mit Elementen der 7. Hauptgruppe (i.d.R. gute Oxidationsmittel, aber Bildung von AOX), sondern mit Ozon und Wasserstoffperoxid arbeiten. Seit Kurzem wird der Einsatz von sechswertigem Eisen (z.B. K_2FeO_4 , Kaliumferrat) als starkes Oxidationsmittel untersucht. Bei weiterführenden Reaktionen von Wasserstoffperoxid oder Ozon, die mit Einsatz von UV-Licht arbeiten, entstehen Hydroxyl-Radikale; man spricht dann von *Advanced Oxidation Processes* (AOP).

Ozon wird auf natürliche Weise in den oberen Schichten der Atmosphäre aus dem Zerfall des Stickstoffdioxids zu Stickstoffmonoxid und elementarem Sauerstoff gebildet, wobei der elementare Sauerstoff mit dem molekularen weiterreagiert und schließlich Ozon bildet. Die erforderliche Energie wird durch die Sonneneinstrahlung geliefert:



In technischen Systemen wird Ozon aus technischem Sauerstoff oder aus dem Luftsauerstoff nach dem Prinzip der stillen elektrischen Entladung gebildet, also durch Zufuhr von Energie durch Anlegen einer Hochspannung zwischen zwei Elektroden:



Ozon ist ein giftiges Gas, das in Wasser eine geringfügig bessere Löslichkeit als Sauerstoff hat. Es wirkt jedoch deutlich stärker oxidierend als molekularer Sauerstoff und reagiert bereits mit vielen Kohlenwasserstoffverbindungen.

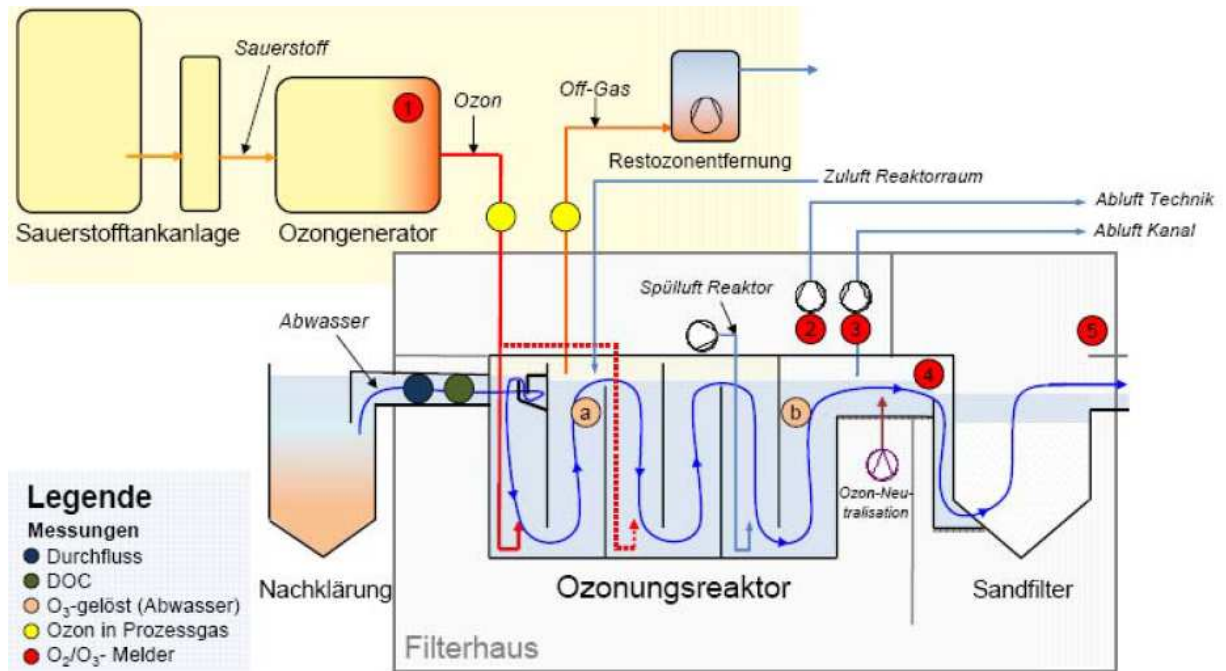
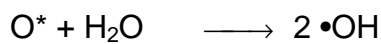
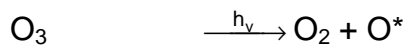
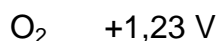
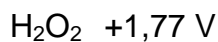
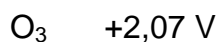
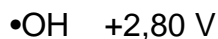
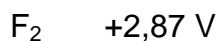


Bild 4.6: Ozonungsanlage am Beispiel der KA Regensdorf (CH), EAWAG 2009

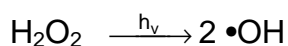
Durch Zufuhr von Strahlungsenergie reagiert Ozon weiter zu Hydroxyl-Radikalen, die ein sehr hohes Oxidationspotential aufweisen:



Das Oxidationspotential von Hydroxyl-Radikalen ist fast so hoch, wie das von Fluor $\text{F}_2(\text{g})$ als Element der 7. HG mit dem höchsten Oxidationspotential. Die Hydroxyl-Radikale reagieren sehr intensiv und sehr schnell mit Kohlenwasserstoffen weiter. Zum Vergleich die Normalpotenziale einiger Oxidationsmittel (je positiver das Potenzial, desto stärker die Oxidationswirkung) (aus Mortimer et al., 2007):



Neben Ozon kann auch Wasserstoffperoxid, ebenfalls ein gut wirksames Oxidationsmittel, durch Photolyse in Hydroxyl-Radikale umgewandelt werden:



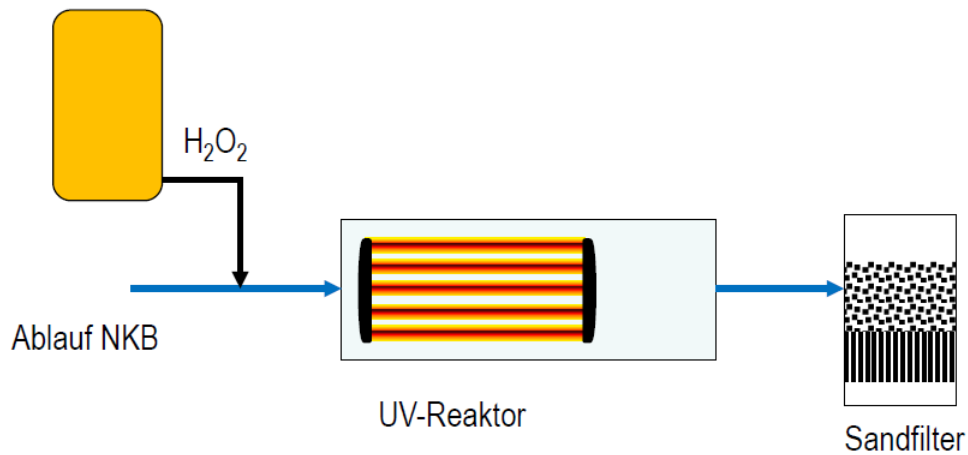


Bild 4.7: Prinzipschema zur Kombination von H_2O_2 und UV-Bestrahlung (Abegglen, Siegrist, 2012)

4.3 Membranverfahren

Bei den Membran(filtrations)verfahren unterscheidet man je nach der Durchlässigkeit der Membran in:

Tab. 4.2: Einteilung der Membranverfahren

| | Trenngrenze | Betriebsdruckdifferenz | Rückhalt von |
|-----------------|-----------------------|------------------------|--|
| Mikrofiltration | > 0,1 μm | 0,1...3 bar | Suspensa allgemein, Bakterien |
| Ultrafiltration | ~ 0,01 μm | 0,5...10 bar | Viren, Kolloide, Makromoleküle |
| Nanofiltration | ~ 0,001 μm | 2...40 bar | zweiwert. Ionen, organische Verbindungen |
| Umkehrosmose | rel. Molmasse >200 | 5...100 bar | einwertige Ionen |

Membranverfahren zur Abwasserbehandlung sind seit einiger Zeit erfolgreich im großtechnischen Einsatz. Dabei liegt derzeit der Schwerpunkt der Anwendungen auf dem vollständigen Rückhalt der Biomasse in Belebungsanlagen und Abzug des weitestgehend keimfreien Permeats (z.B. KA Nordkanal des Erftverbands).

Es ist grundsätzlich möglich, die Leistungsfähigkeit von Membranbioreaktoren mit der Zielsetzung des Rückhalts von Mikroschadstoffen zu steigern. Dazu trägt in erster Linie die Möglichkeit bei, die Feststoffkonzentration im Belebungsbecken zu erhöhen. Wenn dies bei entsprechender Bemessung zu einer Erhöhung des

Schlammalters führt, dann darf mit einem verbesserten Abbau auch schwerer abbaubarer Stoffe gerechnet werden. Gesicherte, reproduzierbare Ergebnisse zur Eliminierung von Mikroschadstoffen dürften jedoch kaum zu erzielen sein.

Denkbar wäre es weiterhin, den Ablauf der Nachklärung mit einer speziellen Form der Aktivkohlebehandlung zu verbessern, indem pulverförmige A-Kohle in einem Rührkesselreaktor mit dem biologisch gereinigten Abwasser vermischt wird, die Schadstoffe dadurch adsorbiert werden, und schließlich die PAC durch Ultrafiltration abgetrennt wird. Ein Beispiel wäre das für die Aufbereitung von Oberflächenwasser zu Trinkwasser entwickelte Cristal[®]-Verfahren von Degrémont:

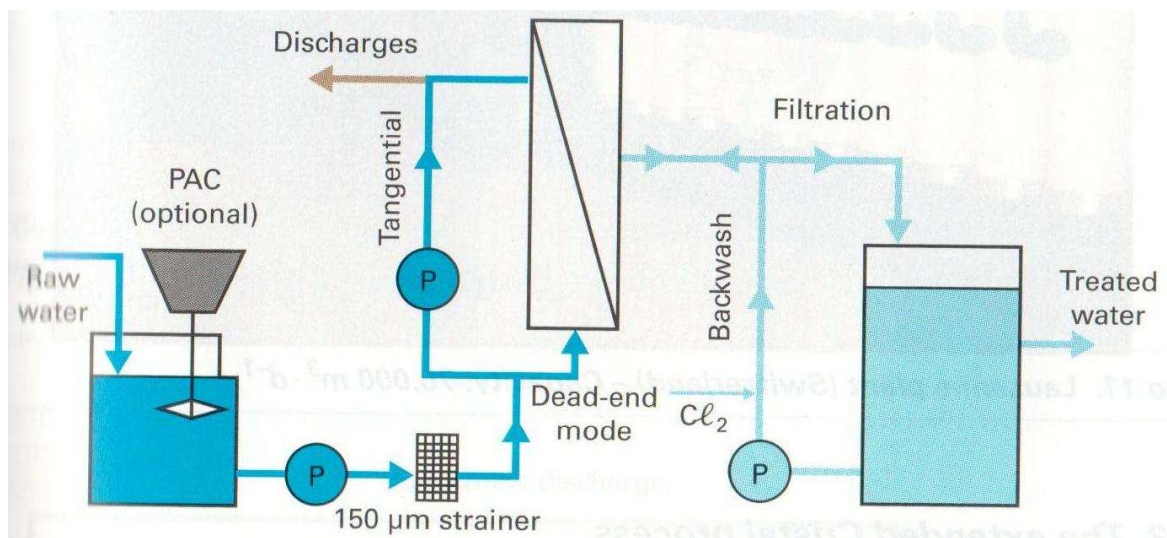


Bild 4.8: Cristal[®]-Verfahren (Degrémont-Suez, 2007)

Im großtechnischen Einsatz zeigte sich jedoch die Notwendigkeit der Abwesenheit partikulärer Substanz, sodass das Verfahren um eine vorgeschaltete Feststoffabtrennung erweitert werden muss:

Eine direkte Nanofiltration mit hinreichenden Ergebnissen für viele Mikroschadstoffe wurde bereits im Labormaßstab untersucht (Yüce, Herr, 2012), jedoch reicht selbst eine Vorbehandlung durch Sandfiltration nicht aus.

4.4 Vergleich der Verfahren

Die bisher untersuchten Verfahren zur Elimination von Mikroschadstoffen weisen signifikante Unterschiede auf. So können die Oxidationsverfahren die Stoffe chemisch umsetzen, jedoch besteht die Möglichkeit zur Bildung unerwünschter Metaboliten. Oxidationsverfahren wirken günstig im Hinblick auf die Verminderung der Anzahl von Bakterien und Viren, insbesondere in Kombination mit einer UV-Bestrahlung. Die Verfahren mit Einsatz Aktivkohle erfordern einen relativ hohen baulichen Aufwand und haben (speziell bei konventioneller PAK-Anwendung) einen hohen Platzbedarf. In der nachfolgenden Tabelle werden einige der wichtigsten Bewertungskriterien miteinander verglichen:

Tab. 4.3: Allgemeine Bewertung der Verfahren zur Spurenstoffelimination

| | GAK | GAK mit Vorbehandlung | PAK-Zugabe BB | PAK mit Sedimentation | PAK mit Sedimentation und Filtration | direkte PAK-Zugabe vor Filtration | Ozon (mit Nachbehandlung) | Ozon + UV | Ozon + GAK | Ozon * PAK | Nanofiltration |
|--|-----|-----------------------|---------------|-----------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|-----------|------------|------------|----------------|
| Chemische Umwandlung der Schadstoffe | -- | -- | - | -- | - | - | + | ++ | + | + | -- |
| Mögliche Metabolitenbildung | ++ | ++ | ++ | ++ | ++ | ++ | - | - | o | o | ++ |
| Verbleib von Mikroschadstoffen im Klärschlamm | + | ++ | -- | - | - | -- | ++ | ++ | + | - | - |
| Platzbedarf | + | o | ++ | - | -- | ++ | o | o | o | -- | |
| baulicher Aufwand | o | - | ++ | -- | -- | - | o | - | - | -- | + |
| Entstehen von problematischen Reststoffen | ++ | ++ | o | - | - | - | ++ | ++ | ++ | o | -- |
| CSB-/DOC-Verminderung | + | ++ | + | + | ++ | + | + | + | ++ | ++ | ++ |
| Selektivität für Mikroschadstoffe | - | + | -- | - | - | - | o | - | - | - | -- |
| Breitbandwirkung für Mikroschadstoffe | + | + | o | + | + | + | + | + | ++ | ++ | + |
| Steuer- und Regelbarkeit des Verfahrensablaufs | - | - | o | + | + | + | + | + | + | + | - |
| möglicher Durchbruch | -- | -- | + | + | + | + | + | + | o | + | + |
| Wiederverwendbarkeit Ads.-Mittel | ++ | ++ | -- | -- | -- | -- | n.a. | n.a. | ++ | -- | n.a. |
| Wirkung auf Bakterien | - | - | - | - | + | + | + | ++ | + | + | ++ |
| Wirkung auf Viren | - | - | - | - | - | - | + | ++ | + | + | ++ |
| Betriebssicherheit des Verfahrens | + | ++ | ++ | + | ++ | + | + | + | + | + | -- |
| Arbeitssicherheit | ++ | ++ | ++ | ++ | ++ | ++ | - | - | - | - | + |
| vorliegende Erfahrungen aus halb-/großtechnischen Untersuchungen | + | + | o | + | ++ | + | + | + | + | o | -- |
| relative Kosten | | | | | | | | | | | -- |

++ sehr gut + gut o neutral - schlecht -- sehr schlecht

Die Wirkungsgrade der beschriebenen Verfahren zur Mikroschadstoffelimination sind stoffspezifisch unterschiedlich. Es liegen bisher nur einige Informationen darüber vor, die nachstehend zusammengestellt werden:

Tab. 4.4: Zusammenstellung von Literaturdaten zu den Eliminationsleistungen oxidativer und adsorptiver Verfahren zur Mikroschadstoffelimination

| Stoff | Ozon | Quelle | PAK | Quelle | GAK | Quelle |
|------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|------------------|------------------------|
| Benzafibrat | 65-90% | A (2012) | | | 100% | IWW (2011) |
| Diclofenac | 98-100% 70-88% | A (2012) AS (2014) | 10-99% 60-92% | A (2012) AS (2014) | 70-99% 100% | B (2013) IWW (2011) |
| Naproxen | | | 28-98% | A (2012) | 100% | IWW (2011) |
| Phenazon | | | | | | |
| Carbamazepin | >99% 70-92 | A (2012) AS (2014) | 10-96% 60-88% | A (2012) AS (2014) | 70-99% 100% | B (2013) IWW (2011) |
| Atenolol | 59-99% | A (2012) | 33-100% | A (2012) | 90-100% | B (2013) |
| Bisoprolol | | | | | | |
| Metoprolol | 62-98% 25-88% | A (2012) AS (2014) | 65-92 | AS (2014) | 80-98% | B (2013) |
| Sotalol | | | | | | |
| Clarithromycin | 95-99% | A (2012) | 70-99% | A (2012) | | |
| Sulfamethoxazol | 85-99% 60-92% | A (2012) AS (2014) | 5-88% 40-88% | A (2012) AS (2014) | 40-80% | B (2013) |
| Oxazepam | | | 7-93% | A (2012) | | |
| Amidotrizoesäure | 5% | AS (2014) | 25-32% | AS (2014) | 95% 40-60% | IWW (2011) B (2013) |
| Iomeprol | | | | | 100% | IWW (2011) |
| Iopamidol | | | 40-78% | AS (2014) | 100% | IWW (2011) |
| Iopromid | 25-50% | A (2012) | 12-55% | A (2012) | <10-85% | B (2013) |
| Diuron | | | | | | |
| Isoproturon | | | | | | |
| Terbutryn | | | | | | |
| Benzotriazol | 37-98% 25-68% | A (2012) AS (2014) | 66-100% 50-88% | A (2012) | 50-65% 98-99% | A (2012) B (2013) |

A (2012) = Abegglen, Christian; Siegrist, Hansruedi (2012)

AS (2014) = ARGE Spurenstoffe NRW (2014)

B (2013) = Böhler, M. et al. (2013)

Es wird erkennbar, dass viele Arzneimittelrückstände wie Diclofenac, Carbamazepin, Metoprolol, Clarithromycin und Sulfamethoxazol mit Ozonung gut, schnell und bis auf geringe Restkonzentrationen abgebaut werden können, während die Röntgenkontrastmittel nur gering bis mäßig durch Ozonbehandlung eliminierbar sind. Für die RKM hingegen ist eine Adsorption an A-Kohle ein probates Mittel, wobei viele Medikamentenrückstände ebenfalls an A-Kohle adsorbierbar sind. Über das Eliminationsverhalten der Herbizide/Algizide ist bisher wenig bekannt, während der Korrosionsinhibitor Benzotriazol ebenfalls gut durch Ozonung und Adsorption entfernt ist.

Für eine Breitbandwirkung zur Eliminierung der Mikroschadstoffkonzentrationen kann auch eine Kombination aus der Oxidation mit Ozon mit anschließender Adsorption vorgenommen werden. In dieser Reihenfolge eingesetzt können etwaige schädlichere Intermediärprodukte, über deren Entstehung bei der Ozonung gemutmaßt wird, durch die nachfolgende Adsorptionsstufe eliminiert werden. Ein Beispiel für ausgeführte großtechnische Untersuchungen dieser Kombination ist im Bericht der ARGE Spurenstoffe NRW (2014) beschrieben worden, wobei pulverförmige A-Kohle in dynamischer Rezirkulation über Adsorptionsreaktoren geführt und schließlich mit in den Belebt- bzw. Überschussschlamm übergeht.

4.5 Zusammenstellung von Bemessungsempfehlungen

Nachstehend werden Bemessungsempfehlungen aus der Literatur zusammengestellt und die Verfahren im folgenden Kapitel qualitativ bewertet.

Tab. 4-5: Zusammenstellung von Bemessungswerten

| Verfahren | Bemessungswerte | Quelle |
|---|---|---|
| Vorbehandlung (des Ablaufs aus dem NKB) | vorgeschaltete Tuchfiltration mit: $q_A < 10 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ | Mecana Umwelttechnik (Firmenschrift Tuchfiltration) |
| Granulierte A-Kohle | Kontaktzeit: 5 - 30 Min Filtergeschwindigkeit: 5 - 15 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ bei BVT >1200 mit abnehmendem Wirkungsgrad Diclofenac Bemerkungen: Vorfiltration erforderlich; mgl. geringe DOC-Hintergrundkonzentration | Abegglen et al. (2012) Böhler et al. (2013) |
| Pulverförmige A-Kohle | Dosierung PAK: 5 - 20 mg/l Kontaktzeit: 40...75 Min. Kontaktzeit: >30 Min. Flockmitteleinsatz: 0,2 mg Al/mg PAK $q_{A,\text{Sed.}}: 0,9...1,7 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ $q_{A,\text{Sed.}}: 2,0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ $t_{R,\text{Sed.}}: 2,3...4,4 \text{ h}$ mittl. Schlamm-(Kohle-)alter bei Rückführung: 1...2 d FHM-Einsatz: 0,2 mg/l nochmalige PAK-Dosierung vor Filter: 5 - 20 mg/l nochmaliger Fällmitteleinsatz: 0,2 mg Al/mg PAK nachgeschalt. 2-Schicht-Filter: 0,75 m Hydroanthrazit 1,4...2,5 mm 0,75 m Sand 0,71...1,25 mm $v_F: 5,6...1,6 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ | Metzger et al. (2007) Hiller (2010) zit. in KOM-M.NRW (2015) nach KOM-M.NRW (2015) Abegglen et al. (2012) |

| Verfahren | Bemessungswerte | Quelle |
|-----------|--|---------------------------------------|
| Ozonung | Ozondosis: (2 -) 5 - 10 mg/l Kontaktzeit: ≥ 10 - 20 Min. Höhe Blasensäule: ≥ 5 m Bemerkungen: Restozonvernichtung erforderlich; schlechte Wirkungsgrade bei RKM und PFT | ARGE (2011) Abegglen et al. (2012) |

5 Empfehlungen zur Auswahl einer Verfahrenskombination

5.1 Eingrenzung der Verfahrensoptionen

Das Ergebnis des Schadstoff-Screenings zeigt kein überraschendes Bild: die Konzentrationen der häufig verwendeten Arzneimittel, z.B.

- Diclofenac (Anti-Schmerz- /-Entzündungs- /-Rheumamittel)
- Carbamazepin (Antiepileptikum)
- Metoprolol (β -Blocker)

können -über die einwohnerspezifischen Frachten umgerechnet- nachvollzogen werden. Das Vorhandensein eines Krankenhauses der Grundversorgung spiegelt sich durch die höheren Konzentrationswerte bei den Röntgenkontrastmittel wider. Hinzu kommt der deutliche gewerblich-industrielle Anteil aus der Metallbe- und -verarbeitung, der über die Konzentration des Korrosionsinhibitors Benzotriazol verdeutlicht wird.

Nicht gänzlich außer Acht lassen kann man die im Laufe der Jahre immer wieder auftretenden unzulässigen Einleitungen persistenter Stoffe, die in einer hohen CSB-Sockelkonzentration bis hin in den Gesamtablauf der Anlage durchschlagen. Natürlich wird in jedem Einzelfall nach den Verursachern gesucht, i.d.R. mit Erfolg. Es liegt aber in der Natur eines gewerblich/industriell mitgeprägten Einzugsgebiets, dass derartige Vorkommnisse nicht vollständig sicher auszuschließen sind, auch nicht durch eine verstärkte Überwachung der zuständigen Unteren Wasserbehörde.

Die Leistungsfähigkeit der beiden Nachklärbecken ist nach den vorliegenden Betriebserfahrungen in der Regel gut. Einen wesentlichen Beitrag dazu leisten die Werte für den Feststoffgehalt im Belebungsbecken und der Schlammindex, der jahreszeitenabhängig etwa zwischen 120 und 160 ml/g liegt. Dennoch ist nicht auszuschließen, dass durch Einflüsse aus dem Einzugsgebiet temporär begrenzt erhöhte Konzentrationen partikulärer Substanz mit in den Ablauf gelangen. Dabei geht es weniger um die flockenbildenden Stoffe, als um die sog. 'pin-point-flocs', über die Jenkins (1986) bereits vor 30 Jahren berichtet hat. Diese kleinen und damit nicht absetzbaren Stoffe können sich gerade dann ergeben, wenn die Belebtschlamm-biozönose kurzfristig (z.B. durch oberflächenaktive Substanzen) belastet wird, die

Flockenstruktur klein und schwach wird und gleichzeitig keine fadenförmigen Blähschlammorganismen vorhanden sind. Die dadurch bedingte Erhöhung des CSB ist in den meisten Fällen im Hinblick auf den gegebenen Überwachungswert i.H.v. 90 mg/l nicht kritisch. Auch die Belastung von Folgestufen (Ozonung, PAK, mit Einschränkung GAK) ist zumeist nicht erheblich. Wenn als Reinigungsziel jedoch angestrebt wird, den CSB dauerhaft sicher unter 20 mg/l zu halten, dann ist eine jederzeitige Kontrolle auch geringer Konzentrationen X_{TS} im Gesamtablauf erforderlich.

Die Vermischung im aufnehmenden Vorfluter Heder kann nicht eindeutig beschrieben werden, weil es in dem Bereich keinen Pegel mit Abflussmessungen gibt. Hier können als Ausgangspunkt nur die Werte herangezogen werden, die früher am Pegel Upsprunge, festgestellt wurden. Dort wurde ein MNQ von rd. 1,15 m³/s ermittelt, das im Bereich der Einleitungsstelle durch die wenigen kleinen Seitenzuflüsse etwas höher liegen dürfte. Wenn ein täglicher Trockenwetterabfluss des Abwassers in Höhe von 14.250 m³/d, entsprechend 0,16 m³/s zugrunde gelegt wird, dann kann die Größenordnung des Mischungsverhältnisses Abwasserdurchfluss : Vorfluterabfluss mit etwa 1 : 8 bis 1 : 10 abgeschätzt werden. Dies führt überschlägig zu Einzelstoffkonzentrationen >0,1 µg/l im Gewässer, wenn das Abwasser an der Einleitungsstelle einen Einzelkonzentrationswert von > 1 µg/l aufweist.

Nach den Screeningergebnissen ist dieser Wert für die Einzelstoffe Diclofenac, die RKM Amidotrizoesäure, Iopamidol und Iopromid sowie für Benzotriazol als Haushalts- und Industriechemikalie überschritten. Die Konzentration der Einzelstoffe Metoprolol (jedoch OW = 7,3 µg/l) und Sulfamethoxazol (OW = 0,15 µg/l) reichen jeweils an diese Grenze heran.

Eine Ozonung als alleinige Maßnahme sollte wegen des geringeren Wirkungsgrades bei den RKM nicht eingesetzt werden, eine GAK-Adsorption allein sollte wegen der frühzeitig nachlassenden Wirkungsgrade für Diclofenac mit zunehmender BVT-Zahl (BVT = bed volumes treated) ebenfalls nicht in Erwägung gezogen werden. Der Einsatz von pulverförmiger Aktivkohle (PAK) in separaten Adsorptionsreaktoren wird restriktiv gesehen, da die beiden Möglichkeiten zur Abtrennung der PAK problematisch sind:

- entweder ist der erforderliche Platzbedarf für die Abscheidung durch Sedimentation (wie in Ulm-Steinhäule, Hiller (2011)) mit der Möglichkeit zur selektiven Entsorgung kaum realisierbar oder
- die Einbringung in den Belebt- bzw. Überschussschlamm (wie in Schwerte, ARGE Spurenstoffe NRW (2014)) soll vermieden werden, damit die nachfolgende Schlammbehandlung nicht beeinträchtigt wird und alle Optionen für die spätere Entsorgung einschließlich der Rückgewinnung von Wertstoffen (z.B. P) erhalten bleiben.

Verfahren der Membranfiltration werden wegen der derzeit immer noch hohen Energiekosten nicht betrachtet.

Ein sehr wichtiger Aspekt bei der konkreten Verfahrensauswahl ist das limitierte Platzangebot. Bauliche und anlagentechnische Erweiterungen zur Spurenstoffentnahme müssen in dem Bereich südlich der NKB 1 und 2 und dem Ablauf-Messbauwerk untergebracht werden. Teile dieser Fläche sind derzeit als potenzielle Überflutungsfläche ausgewiesen.

Unter diesen Prämissen werden folgende zwei Verfahrensketten -in jedem Fall- mit Kombination der Ozonung und der A-Kohle-Adsorption untersucht:

Variante A:

Die 'hochwertigen' und (betriebs-)kostenaufwändigen Verfahren zur Elimination von Mikroschadstoffen sollen spezifisch für die Gruppe der gelösten Stoffe angewendet werden, weil zur Elimination von partikulärer Substanz auch andere, preisgünstige Verfahren infrage kommen:

1. Schritt: Elimination der partikulären Stoffe aus dem Ablauf der Nachklärung.

Viele Medikamentenrückstände (insbes. Diclofenac) lassen sich spontan mit hoher Stoffumsatzgeschwindigkeit und bei geringen Ozondosierungen eliminieren. Ozon ist weiterhin ein geeigneter Stoff um aromatische Verbindungen aufzubrechen, Doppelbindungen oder Aminogruppen anzugreifen.

2. Schritt: Aufbrechen und Oxidation von organischen Stoffen und Minimierung der organischen Fracht.

Die Eliminationsleistung und die Einsatzdauer einer Filterfüllung mit GAK hängt von der Gesamthöhe der Beschickung mit organischen Stoffen ab. Je geringer die Schadstoffkonzentration im Zulauf einer GAK-Anlage, desto länger ist deren mögliche Standzeit; einige Stoffe (insbesondere RKM) lassen sich in relevanten Eliminationsraten nur mit A-Kohle eliminieren.

3. Schritt: Adsorption der verbleibenden organischen Fracht an granuliert Aktivkohle.

Variante B:

Die Elimination von gut und schnell oxidierbaren Substanzen erfolgt bei geringer Ozondosierung in einem

1. Schritt: Aufbrechen und Oxidation von organischen Stoffen und Minimierung der organischen Fracht.

Die Elimination von verbleibenden schwerer oxidierbaren Stoffen (insbesondere Röntgenkontrastmitteln), eventuell auch von durch die vorherige Ozonung gebildeten Metaboliten erfolgt in einem

2. Schritt: Adsorption an pulverförmige A-Kohle, Sedimentation der A-Kohle und Rückführung des Sediments in die Kontaktreaktoren.

Da die pulverförmige A-Kohle sehr feine Konfraktionen enthält, die nur schwer Sedimentierbar sind, wird eine mechanische Nachbehandlung zur Abtrennung von Partikeln, auch aus der Nachklärung, vorgesehen:

3. Schritt: Flächenfiltration über Tuchfilter.

Die Variante B ist also eine Modifikation der Verfahrenskette aus Variante A mit Einsatz von PAK anstelle von GAK, die die Umstellung der Flächenfiltration von Vor- auf Nachbehandlung erfordert.

Die Behandlung muss nicht auf die maximale Bemessungswassermenge der Kläranlage bei Regenwetterzufluss abgestellt werden. Für die Erfassung eines Großteils der Schadstofffracht erscheint es ausreichend, wenn maximal die maßgebende Trockenwettermenge $Q_{T,2h} = 245 \text{ l/s} \approx 880 \text{ m}^3/\text{h}$ verarbeitet wird. Für

die Vorbehandlung, d.h. die Abtrennung der partikulären Stoffe, soll jedoch die gesamte Abwassermenge bei $Q_M = 390 \text{ l/s} \approx 1.400 \text{ m}^3/\text{h}$ zugrunde gelegt werden. Das Gleiche gilt sinngemäß für die Variante mit nachgeschalteter Flächenfiltration, für die ein Bypass um die Oxidation/Adsorption vorgesehen werden muss. Da nicht die Verhinderung von Spitzenablaufkonzentrationen im Vordergrund steht, sondern die Minimierung der langfristig wirkenden, persistenten und bioakkumulierbaren Stoffe, kann auf eine redundante Bau- und Betriebsweise verzichtet werden, wenn innerhalb der Behandlungsstufen entsprechende Bypass-Möglichkeiten vorhanden sind.

Im Falle einer konkreten Planung zur Umsetzung von Maßnahmen müssen in jedem Fall neue Untersuchungen der Zulaufverhältnisse und eine aktualisierte Ermittlung von maßgebenden Bemessungsparametern nach dem DWA-Arbeitsblatt A 198 erfolgen. Seit der letzten Planung in den 90er Jahren hat der Betreiber erhebliche Anstrengungen zur Verminderung des Fremdwasseranteils unternommen, die sich mit größter Wahrscheinlichkeit auf die Abwassermengen und deren jeweilige Anteile auswirken. Zudem sind zwischenzeitliche Veränderungen durch neue Baugebiete eingetreten.

Die zuständige Aufsichtsbehörde hat die Verringerung der Abwasserdurchflussmengen dokumentiert. Nach vorliegenden Auswertungen wird die bisherige tägliche Bemessungs-Trockenwetterzuflussmenge (früher: $Q_{d,85}$) i.H.v. $14.238 \text{ m}^3/\text{d}$ vergleichsweise selten überschritten; etwa 90% der Zuflüsse liegen im Mittel der Jahre unter diesem Wert, wobei der Trend in den letzten Jahren eher zu 95% geht. Damit würde eine Anlagenerweiterung um eine 4. Stufe mit Ansatz der bisherigen Daten das Abwasser in der gleichen Größenordnung erfassen.

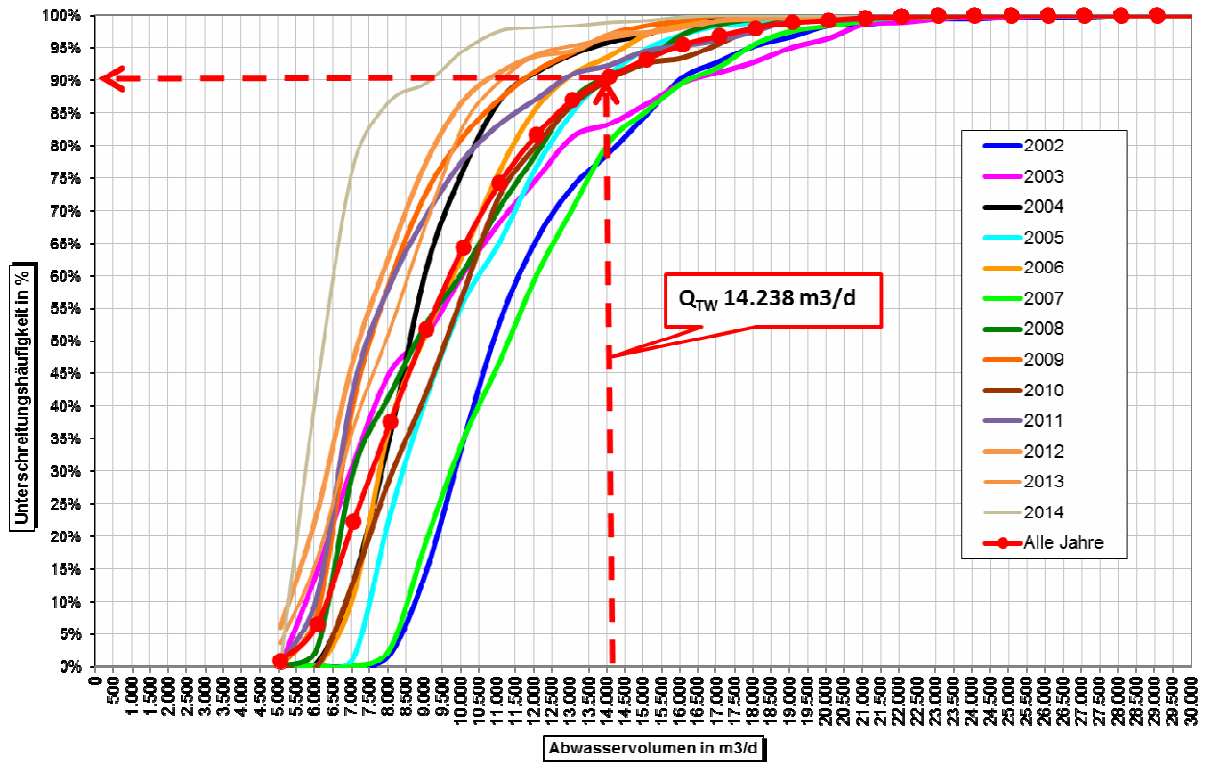


Bild 5.1: Gemessene Abwasserdurchflussmengen im Vergleich zum bisherigen Bemessung-Trockenwetterzufluss (Quelle: BR Detmold)

Unter Berücksichtigung der genannten Prämissen und Restriktionen werden schließlich folgende Teil-Verfahren näher untersucht:

- Flächenfiltration
- Ozonung
- GAK-Adsorption oder alternativ
- PAK-Adsorption

Daraus ergibt sich die Untersuchung der beiden genannten Verfahrensketten für die 4. Reinigungsstufe:

- Flächenfiltration - Ozonung - GAK-Adsorption
- Ozonung - PAK-Adsorption - Flächenfiltration

in jedem Fall durch Kombination von Oxidation und Adsorption mit mechanischer Feststoffabtrennung.

5.2 Hebung und Vorbehandlung des mechanisch-biologisch gereinigten Abwassers aus der Nachklärung

Die Hebung des mechanisch-biologisch gereinigten Abwassers ist in jedem Fall erforderlich, weil die Einrichtungen zur Filtration, zur Ozonung und zur GAK-Adsorption so gegründet werden sollen, dass sie auch im entleerten Zustand auftriebssicher sind. Dazu sollen in den beiden Ablaufschächten der Nachklärbecken Tauchmotorpumpen eingesetzt werden, deren Förderleistung jeweils auf max. $Q_M = 390/2 = 195$ l/s ausgelegt wird. Da die aktuellen Durchflussmengen z.T. deutlich niedriger liegen, wird jeweils eine Durchflussmengenanpassung auf der Grundlage eines konstanten Höhenstands in den Ablaufschächten realisiert. Die Fördermengenanpassung erfolgt durch den Einsatz von Frequenzumrichtern. Alternativ kann auch ein neuer, gemeinsamer Pumpenschacht für die Aufstellung von 2 oder 3 Tauchmotorpumpen errichtet werden, die sodann in hydraulisch und energetisch optimierter Betriebsweise gefahren werden können. Für den Fall, dass eine Pumpe ausfällt oder ein folgender Anlagenteil nicht oder nur teilweise zur Verfügung steht, wird die nicht förderbare Abwassermenge auf dem bisherigen Weg direkt dem Ablauf-Messbauwerk zugeführt. Eine besondere Maßnahme zur Regelung/Steuerung ist dafür nicht erforderlich.

Die Entnahme von Restsuspensa aus dem Ablauf der Nachklärung ist bei allen Verfahren zur Oxidation und Adsorption mindestens sinnvoll, meistens erforderlich. Dadurch wird die Selektivität der eingesetzten Verfahren zur Elimination gelöster organischer Stoffe erhöht.

Die üblichen Verfahren dazu sind Aufstrom- oder Abstrom-Filtration im gesättigten oder ungesättigten Kornmassenbett. Eine Vielzahl derartiger Filteranlagen wurden speziell in NRW in vorfluterschwachen Gegenden errichtet, meistens vor dem Hintergrund einer weitestgehenden P-Elimination (durch Flockungsfiltration) bzw. einer weitgehenden Suspensaentnahme. Die baulichen und maschinentechnischen Einrichtungen dazu sind erheblich, unabhängig davon, ob 1- oder 2-Schicht-Filter oder Moving-Bed-Filter eingesetzt werden.

Daher wird im vorliegenden Fall der Kläranlage Salzkotten-Verne der Einsatz einer flächigen Filtration über Polstoff vorgeschlagen. Damit lassen sich Suspensionskonzentrationen i.d.R. deutlich von weniger als 5 mg/l, bei richtiger Wahl des Polstoffs von weniger als 2 mg/l, realisieren, was für die Folgeeinrichtungen völlig ausreichend ist, weil nicht die P-Elimination im Vordergrund steht.

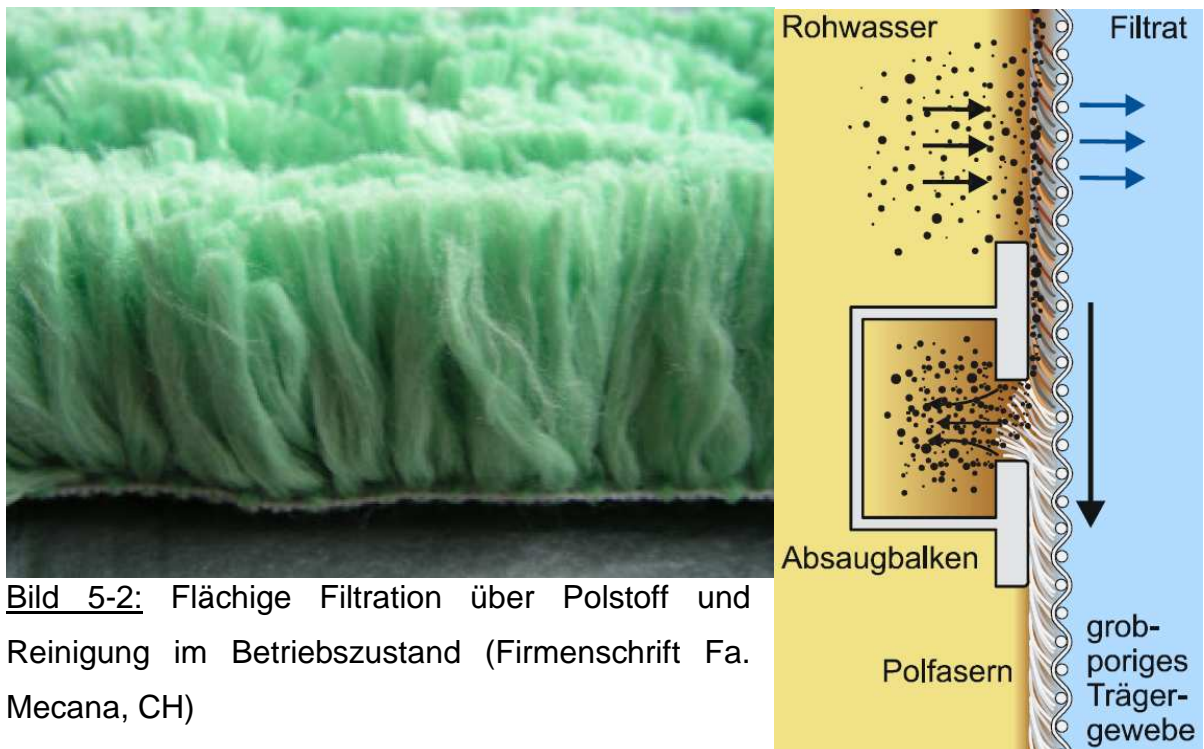


Bild 5-2: Flächige Filtration über Polstoff und Reinigung im Betriebszustand (Firmenschrift Fa. Mecana, CH)

Mit einer flächigen Vorfiltration wurden bereits gute Erfahrungen gesammelt, z.B. bei der Nachbehandlung des Ablaufs aus der Nachklärung in der Kläranlage Oldenburg. Im vorliegenden Fall werden 3 parallele Filtrationseinheiten vorgeschlagen, die auch jeweils einzeln betreibbar sind. Damit wird es möglich, den gesamten Abwasserdurchfluss auch bei Regenwetterzufluss mechanisch nachzubehandeln.

5.3 Ozonung

Die Ozonanlage kann in unmittelbarer Nähe der Tuchfiltration errichtet werden. Sie besteht aus einem abgedeckten Ozonreaktor in 2-straßiger Kaskadenbauweise, dem Ozonerzeuger mit Kühlsystem, zwei Diffusor-Eintragseinrichtungen, einem Restozonvernichter, sowie dem Reinsauerstofftank mit Verdampferstation. Verbindende Rohrleitungen werden aus hochvergütetem Stahl hergestellt. Die zugehörige Energieversorgung wird als Kompakt-Schaltschrankeinheit vorgesehen. Die MSR-Technik besteht aus Ozon-Konzentrationsmessungen in jeweils zwei Reaktorteilen sowie im Abgas. Eine Ozon-Warneinrichtung zur Überwachung der Arbeitsbereiche gehört ebenfalls mit dazu.

Die rechnerische Aufenthaltszeit im Ozonreaktor wird wegen der spontanen Reaktion mit den Medikamentenrückständen auf 5 Minuten begrenzt. Die spezifische Ozondosierung wird auf 5 mg/l für einen maßgebenden Zufluss bei Trockenwetter von $Q_{T,2h} = 245 \text{ l/s}$, aufgeteilt auf 2 Straßen, ausgelegt. Die Einblastiefe liegt zur weitgehenden Ausnutzung des Ozons bei 5,30 m.

Der Reaktor wird aus Beton errichtet und direkt an die Vorfiltration angepasst; die Sohlplatten sollen auf einem Niveau gegründet werden. Dadurch werden der Erdaushub minimiert und die Schalungs- und Betonierarbeiten vereinfacht.

Es wird trotz der kurzen Kontakt- und Reaktionszeit ein Wirkungsgrad für viele Pharmazeutika und Industriechemikalien von über 90% erwartet. Die eingesetzte Ozonmenge hat über den Verbrauch an Sauerstoff und elektrischer Energie einen entscheidenden Einfluss auf die Betriebskosten. Daher muss eine in weiten Bereichen variable Ozonerzeugung realisiert werden, um unnötige Überdosierungen zu vermeiden. Die MSR-Technik ist darauf abzustimmen.

Der Ozonungsreaktor wird direkt aus der Vorfiltration beschickt. Es wird jedoch eine Bypassleitung mit Armaturensatz zur teilweisen oder vollständigen Umfahrung der Ozonung eingerichtet. Diese Bypassleitung bindet sowohl in den vorhandenen Ablauf als auch in den Zulauf der folgenden GAK-Adsorption ein.

Für die Unterbringung der Einheiten zur Ozonerzeugung und die örtliche Niederspannungsunterverteilung (die zugleich für die GAK-Adsorption eingerichtet wird) wird ein einfaches Betriebsgebäude errichtet.

1 Generator und Stromversorgungseinheit sind einzelne Einheiten und können optional auch getrennt aufgestellt werden. Die Anlage lässt sich einfach transportieren und montieren, da sie von allen Seiten mit einem Gabelstapler aufgenommen werden kann.

2 Der Ozonerzeuger lässt sich je nach den Anforderungen vor Ort vertikal oder horizontal aufstellen.

3 Die geflanschte Verrohrung besteht vollständig aus Edelstahl und ist mit Armaturen zu Überwachung und optional Konzentrationsmessung ausgestattet.

4 Dank der optimalen Anordnung von Ozonerzeuger, Generator, Verrohrung Schaltschränken ist der Platzbedarf um bis zu 20% reduziert.

5 Die Stromversorgungseinheit ist mit modernster Halbleitertechnologie (IGBTs) für eine optimierte Systemsteuerung ausgestattet.

6 Die Klimatisierung trennt die elektrischen Bauteile von der Umgebungsluft und führt zu einer Schutzart IP 54. Damit ist ein Betrieb unter Umgebungsbedingungen mit hohen Temperaturen (bis zu 35°C), hoher Luftfeuchtigkeit (bis zu 90%) und schmutziger oder staubiger Umgebung möglich.



6

Bild 5-3: Ozongenerator, Stromversorgungseinheit und Verrohrung als Kompakteinheit (Firmenschrift Fa. Wedeco/Xylem)

5.4 Aktivkohle-Adsorption

5.4.1 GAK-Adsorption

Aufgrund der beengten Platzverhältnisse zwischen der südlichen Grundstücksgrenze und den beiden Nachklärbecken muss eine GAK-Adsorption separat von der Vorfiltration und der Ozonung errichtet werden. Für die Verbindung werden erdverlegte Rohrleitungen vorgesehen. Die in Ansätzen bereits vorhandenen Verkehrswege müssen ausgebaut und angepasst werden, sodass auch Schwerlastverkehr (Sattelzüge) alle neuen Einrichtungen erreichen können.

Die GAK-Adsorption soll für die maßgebende Trockenwettermenge von $Q_{T,2h} = 245$ ℓ/s und mit einer Filtergeschwindigkeit zwischen 5 und max. 15 m/h betrieben werden. Es werden 4 Filterzellen vorgesehen, die separat betrieben werden können. Die Filterbetthöhe des A-Kohle-Granulats beträgt 3 m, aufgelagert auf einer Stüttschicht aus Grobsand mit einer Schichtstärke von 20 cm. Die Korngröße des A-Kohle-Granulats soll etwa 1 - 3 mm betragen, der Sand etwa 1,5 - 2,5 mm.

Die GAK-Filtration wird im Überstau mit Fließrichtung von oben nach unten betrieben. Das Wasser wird einseitig über eine Überfallkante eingeleitet, die über die gesamte Beckenbreite gleichmäßig verteilt. Der mit einer Höhenstandsmessung erfasste Wasserspiegel wird konstant gehalten, indem der Ablaufschieber, der mit einer Stellungsmessung ausgestattet ist, als Regelschieber ausgeführt wird und somit über die Erzeugung definierter Druckverluste die Druckhöhe im und über dem Filterbett konstant halten kann. Das Signal der Stellungserfassung kann benutzt werden, um den Rückspülvorgang auszulösen, der erst dann tatsächlich durchgeführt wird, wenn anzunehmen ist, dass die Belastung minimal ist.

Die GAK-Filtration wird zwar in 4-straßiger Fahrweise, jedoch insgesamt ohne Redundanz für $Q_{T,2h}$ betrieben. In den Zeiträumen der Rückspülprozesse, deren Häufigkeit nicht sicher prognostiziert werden kann (geschätzt: 1 - 2 Mal pro Woche), muss nötigenfalls ein Teil-Bypassbetrieb gefahren werden. Angesichts der grundsätzlichen Funktion der GAK-Adsorption erscheint diese Vorgehensweise

vertretbar, da nur ein kurzfristiger Ausfall (ca. 20 Minuten) der Adsorption nicht zu einer signifikanten Belastungserhöhung im Gewässer führen würde.

Trotz der mechanischen Vorbehandlung soll eine Rückspüloption der GAK-Adsorber vorgesehen werden, um eine etwaige mechanisch-hydraulische Verblockung beseitigen zu können, aber vor allem, um die Einsatzzeit einer A-Kohle-Charge zu verlängern. Ggf. kann auch -bei entsprechender Sauerstoffzufuhr- eine biologische (Teil-)Regeneration der A-Kohle in Betracht gezogen werden, so wie sie bereits in den 80er Jahren des letzten Jahrhunderts diskutiert wurde. Zumindest sollten die technischen Voraussetzungen dafür geschaffen werden.

Die gemeinsamen Rückspülpumpen für alle Filtereinheiten werden mit im Rohrkeller untergebracht, der die komplette Verrohrung einschließlich der zugehörigen Armaturen enthält. Ein eigenes Rückspülgebläse ist nicht erforderlich, da die Gebläsestation für die Versorgung der Belebungsbecken in erreichbarer Nähe ist. Es kann eine Verbindungsleitung verlegt und an den vorhandenen Blindflansch der Druckluftsammeleleitung in der Gebläsestation angeschlossen werden.

Das automatisierte Rückspülprogramm wird in Anlehnung an die Filteranlagen zur Schwebstoffelimination und gemäß der Empfehlung von Böhler et al. (2013) gewählt:

- Absenken
- Auflockerung mit Luft (100 m/h): 1 Minute
- Luft- und Wasserspülung (Luft 100 m/h, Wasser: 35 m/h): 1,5 Minuten
- Wasserspülung (35 m/h): 1 Minute
- Spülpause: 1 Minute, danach Wiederholung der letzten 4 Phasen
- Zwischenzeitliches Absenken
- Intensivspülung mit Wasser (55 m/h): 4 Min.
- Sedimentation: 3 Min.
- Absenken
- Wiederinbetriebnahme

Spülprogramm gesamt: ca. 20 Minuten

Die GAK-Adsorptionsstufe wird als Folgestufe zur Ozonoxidation eingesetzt. Damit wird die Beladung mit organischen Stoffen verringert, und die für eine GAK-Filtration

schädlichen, weil verschlammend wirkenden suspendierten Stoffe sind bereits durch die Flächenfiltration minimiert worden. Die Adsorption kann aber auch unter teilweiser oder gänzlicher Umgehung der Ozonung betrieben werden, nur mit der Flächenfiltration als Vorbehandlung. Für die Spurenstoffelimination bietet sie eine relativ große Bandbreite von Stoffen, die mit gutem Wirkungsgrad adsorbiert werden können. Dazu gehören viele Industriechemikalien und vor allem die Röntgenkontrastmittel. Auch Medikamentenrückstände können zurückgehalten werden, jedoch ist der Wirkungsgrad mit zunehmender BVT-Zahl begrenzt. Die Regenerationsintervalle für die granulierten A-Kohle können im Übrigen ohne technische Vorversuche nicht zuverlässig abgeschätzt werden. Eine realistische Kostenschätzung wird dadurch erschwert, sodass die Bewertungsbasis ohne detailliertere Untersuchungen etwas unsicher bleiben muss.

An dieser Stelle wird im Fall einer Konkretisierung von Maßnahmen empfohlen, Adsorptionsversuche mit A-Kohle-Säulen und verschiedenen A-Kohlen durchzuführen, die in den Parametern Schütthöhe, Beschickung / Filtergeschwindigkeit und Rückspülung mit der vorgesehenen großtechnischen Anlage identisch ist. Dadurch lassen sich nicht nur Wirkungsgrade hinsichtlich der relevanten Spurenstoffe ermitteln, sondern auch Informationen über die Standzeit bis zur notwendigen externen Regeneration der granulierten Aktivkohle gewinnen. Diese Vorgehensweise erscheint vor dem Hintergrund von vorliegenden Informationen über eine limitierte Zahl von ausgetauschten Leerbettvolumina (BVT) für den Parameter Diclofenac sinnvoll (Böhler et al., 2013).

5.4.2 PAK-Adsorption

Die Anwendung der Adsorption mit pulverförmiger Aktivkohle erfordert eine Umstellung innerhalb der Verfahrenskette der 4. Reinigungsstufe, weil die Filtration (ebenfalls als Flächenfiltration) an den Schluss gestellt werden muss, um potenzielle Defizite der PAK-Sedimentation abzufangen.

Die Adsorption an pulverförmige Aktivkohle soll in Adsorptionsreaktoren mit nachgeschalteter Sedimentation erfolgen. Die Untervarianten mit Einbringung der

PAK in den Primär-/Sekundärschlamm werden nicht verfolgt, um kein verfrühtes Präjudiz für die abschließende Behandlung und Entsorgung des ausgefaulten und entwässerten Klärschlammes zu schaffen.

Die Auslegung erfolgt für die (derzeitige) maßgebende Trockenwetterzuflussmenge $Q_{T,2h} = 245$ l/s, mit der auch die vorgelagerte Ozonung beaufschlagt wird. Es werden 3 Kontakt-Reaktoren in Reihenschaltung mit je einer rechnerischen Kontaktzeit von 15 Minuten vorgesehen. Die Reaktoren werden jeweils einzeln mit einer Bypass-Möglichkeit versehen. Die PAK-Zugabe erfolgt zusammen mit der FM-Zugabe in der Zulaufkammer zum ersten Reaktor. Die Reaktoren werden jeweils mit Rührwerken mit langer Welle umgewälzt, die zu Erzielung eines unter Betriebsbedingungen ermittelten günstigen G-Werts mit Frequenzumrichtern drehzahlregelbar ausgeführt werden.

Die Sedimentationsstufe zur Abtrennung der PAK soll zweistraßig als Rundbeckenanlage ausgeführt werden, in Analogie zu den bestehenden Nachklärbecken. Für die Oberflächenbeschickung wird ein Wert von $1,3 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ angesetzt. Die Sedimentationszeit (= rechnerische Durchflusszeit) soll 3 Stunden betragen.

Damit der Gesamtablauf der Kläranlage gesichert -auch unter Regenwetterbedingungen- unter 2 mg/l an abfiltrierbaren Stoffen bleibt, wird als letzte Verfahrensstufe eine Flächenfiltration vorgesehen (wie oben geschildert). Diese wird auch in der Kombination Ozon - PAK - Flächenfiltration mit Q_M beschickt, wobei der Bypass für Durchflussmengen > 245 l/s, der an der Ozonung und PAK-Anlage vorbeigeführt wird, mit verarbeitet wird.

5.5 Zusammenfassende Bewertung der vorgeschlagenen Verfahrenskombination

Durch zahlreiche Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die Ozonung und die AK-Adsorption jeweils spezifische Wirkungsgrade auf die relevanten Mikroschadstoffgruppen haben. Grundsätzlich ist es möglich, eines dieser Verfahren allein einzusetzen, jedoch muss dann zur Erreichung einer ausreichenden Breitbandwirkung ggf. die Dimensionierung und der Betrieb auf ungünstige Konstellationen (lange Aufenthaltszeiten, hohe Dosierungen, geringe BVT etc.) abgestellt werden. Kommt dann hinzu, dass auch Platzverhältnisse limitiert sein können, dann liegt der Schluss nahe, beide Verfahren miteinander zu kombinieren, um unter Ausnutzung der selektiven Wirkungsgradvorteile bezüglich einzelner Schadstoffgruppen bei jeweils minimierten Reaktionsvolumina / Kontaktzeiten pp. die infrage kommenden Spurenstoffe hinreichend zurückhalten zu können.

Derartige Überlegungen werden derzeit auch an anderer Stelle verfolgt und bereits in Planungen für gezielte Untersuchungen im technischen Maßstab umgesetzt, so für die Kläranlage Sande (Paderborn) und Detmold.

Die vollständige Verfahrenskombination mit Ozonung und A-Kohle-Adsorption (GAK oder PAK) mit Vor- bzw. Nachbehandlung über Tuchfiltration verfügt über folgende Vorteile:

- Es wird sichergestellt, dass die Konzentration abfiltrierbarer Stoffe im Gesamtablauf ständig <5 mg/l bleibt; etwaige Leistungsdefizite der Nachklärung durch temporäres Abtreiben von Belebtschlamm können sicher abgefangen werden.
- Allein durch diese Maßnahme können BSB₅- und CSB-Konzentrationsspitzen (auch für P_{ges}), die auf Suspensaabtrieb zurückzuführen sind, sicher vermieden werden.
- Dies allein kann schon dazu führen, dass geringere Überwachungswerte erklärt werden können, die zu einer Minimierung der Abwasserabgabe führen.
- Kein Eingriff in die bestehende Abwasser- und Klärschlammbehandlung.
- Keine Einschränkungen bei der Klärschlamm Entsorgung.

- Die Ozonung kann nach vorliegenden Untersuchungen viele Medikamentenrückstände innerhalb kurzer Kontakt-/Reaktionszeit mit hohen Wirkungsgraden eliminieren. Der Ozonreaktor kann daher klein bemessen werden, sodass sich die Anlage auf dem vorhandenen Grundstück unterbringen lässt.
- Die Ozonung bewirkt eine echte chemische Umwandlung von Mikroschadstoffen durch Oxidation. Damit wird der CSB im Ablauf geringer.
- Die Bildung von Metaboliten mit schädlicher Wirkung ist nach vorliegenden Untersuchungen eher unwahrscheinlich und muss nur bei bestimmten Stoffen in Betracht gezogen werden.
- Durch die Ozonung wird die Anzahl von Keimen und Viren im Ablauf deutlich verringert, ohne dass eine sichere Desinfektion erreicht werden kann.
- Sollte zu einem späteren Zeitpunkt eine Keimzahlreduzierung, z.B. für die formale Ausweisung eines Badegewässers, relevant werden, so kann die Ozonung vorteilhaft durch eine UV-Bestrahlung ergänzt werden, was im wässrigen Medium gleichzeitig zur Bildung von Hydroxylradikalen führt, die als besonders starke Oxidationsmittel gelten.
- Die Regelung auf eine bestimmte Rest-Ozonkonzentration ist möglich und minimiert die Betriebskosten; bedarfsweise kann eine Straße der Ozonung außer Betrieb genommen werden.
- Durch die folgende GAK- bzw. PAK-Adsorption wird der schlechte Wirkungsgrad der Ozonung hinsichtlich Röntgenkontrastmittel und PFT ausgeglichen.
- Die Anzahl durchgesetzter Leerbettvolumina (und damit die Betriebsdauer bis zur Regeneration) bei Einsatz von GAK kann durch die vorherige Elimination von organischen Stoffen in der Oxidationsstufe signifikant verlängert werden.
- Durch die Kombination von Ozonung und Adsorption wird eine besonders große Breitbandwirkung bei zusätzlicher teilweiser Entkeimung erzielt.
- Durch Rückspülung kann die Standzeit der GAK Adsorption verlängert werden.
- Beladene Kohle kann entnommen und regeneriert werden.
- Eine biologische 'In-situ-Regeneration' von GAK erscheint möglich (Fischer, Bardtke, 1981)
- Durch Bypass-Schaltungen kann eine hohe Gesamt-Betriebssicherheit auch bei Ausfall einer Komponente erreicht werden.
- Alternativ können wirtschaftliche Optimierungen durch partielle / temporäre Außerbetriebnahmen durchgeführt werden.

- Die Gewässergüte in der Heder kann durch die Maßnahme verbessert werden.

Die Nachteile lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Hohe Investitionskosten für die Kombination von Ozonung und AK-Adsorption, insbesondere aber bei der Variante mit PAK-Adsorption.
- Die Variante PAK-Adsorption passt nicht auf das vorhandene Grundstück im Ablaufbereich, oder die Sedimentationsbecken müssen nach Süd-Osten verschoben werden, was längere Rohrleitungswege verursacht; darüber hinaus liegen die Sedimentationsbecken dann z.T. im festgesetzten Überschwemmungsgebiet. In jedem Fall hoher Flächenverbrauch.
- Hohe Betriebskosten, insbesondere durch den zusätzlichen Strom- und Sauerstoffbedarf sowie die A-Kohle-Regeneration.
- Bei Anwendung von PAK und ggf. beabsichtigter landwirtschaftlicher Klärschlammverwertung muss eine separate Abtrennung und Entwässerung der beladenen PAK erfolgen.
- Hohe Stromspitzenlast bei Rückspülung des GAK-Adsorbers; Eingriff in die BHKW-Steuerung zum Abfangen der Spitzenlast erforderlich.
- Deutlich höhere Komplexität des Verfahrens.
- Deutlich höherer Betreuungsaufwand insbesondere durch die umfangreiche Messtechnik.
- Größeres Gefährdungspotential durch den Umgang mit Ozon.

6 Grobbemessung der Anlagenkomponenten

6.1 Vorfiltration

| | |
|--|---|
| maßgebende Beschickungsmenge TW: | $Q_{T,2h} = 245 \text{ l/s}$ entspr. $882 \text{ m}^3/\text{h}$ |
| maßgebende Beschickungsmenge RW: | $Q_{M,2h} = 390 \text{ l/s}$ entspr. $1404 \text{ m}^3/\text{h}$ |
| max. zulässige Feststoffflächenbelastung: | $B_A = 400 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ |
| max. zulässige Filtergeschwindigkeit: | $v_F = 10 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) = 10 \text{ m/h}$ |
| max. zu erwartende Feststoffkonzentration: | $TS_{\text{Abl.NK}} = 20 \text{ mg/l}$ |

erforderliche Filterfläche:

aus Feststoffflächenbelastung:

$$A_{\text{erf.}} = 1404 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 0,02 \text{ kg/m}^3 / 0,4 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) = 70,2 \text{ m}^2$$

aus Filtergeschwindigkeit:

$$A_{\text{erf.}} = 1404 \text{ m}^3/\text{h} / 10 \text{ m/h} = 140 \text{ m}^2$$

gewählt:

3 Scheibenfiltereinheiten mit jeweils 12 Scheibenfiltern auf einer Welle

| | |
|-------------------------|--------------------------------|
| vorh. Filterfläche: | $3 \cdot 60 = 180 \text{ m}^2$ |
| gew. Breite der Becken: | 2,50 m (jeweils) |
| gew. Länge der Becken: | 6,00 m (jeweils) |
| gew. Tiefe der Becken: | 3,00 m + 1,00 m Freibord |

vorh. Filtergeschwindigkeit bei Regenwetterzufluss:

$$v_F = 1404 / 180 = 7,8 \text{ m/h} < 10 \text{ m/h}$$

vorh. max. Feststoffflächenbelastung bei Regenwetterzufluss:

$$B_A = 1404 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 0,02 \text{ kg/m}^3 / 180 \text{ m}^2 = 0,156 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) = 156 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) < 400 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$$

vorh. Filtergeschwindigkeit bei Trockenwetterzufluss:

$$v_F = 882 / 180 = 4,9 \text{ m/h} < 10 \text{ m/h}$$

vorh. max. Feststoffflächenbelastung bei Trockenwetterzufluss:

$$B_A = 882 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 0,02 \text{ kg}/\text{m}^3 / 180 \text{ m}^2 = 0,098 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) = 98 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) < 400 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$$

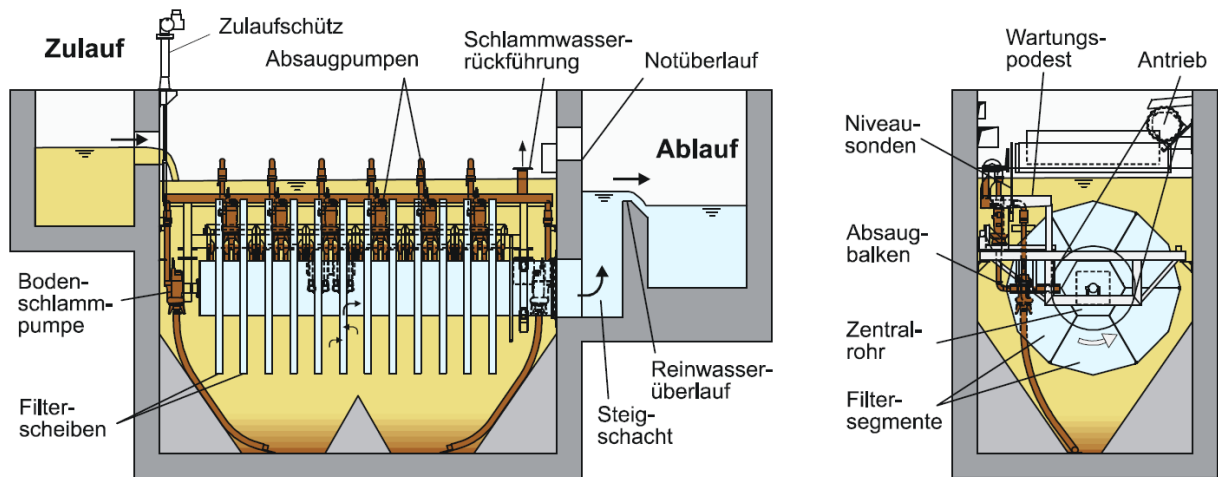


Bild 6-1: Längs- und Querschnitt durch Scheibenfilter (Firmenschrift Mecana)



Bild 6-2: Tuchfiltrationseinheit im Klärwerk Oldenburg



Bild 6-3: Montage eines Scheibenfilters mit 60 m^2 (12 Scheiben à 5 m^2) (Firmenschrift Mecana)

6.2 Ozonung

| | |
|-------------------------------|---|
| maßgebende Beschickungsmenge: | $Q_{T,2h} = 245 \text{ l/s}$ entspr. $882 \text{ m}^3/\text{h}$ |
| gewählte Ozondosis: | 5 mg/l |
| gewählte Kontaktzeit: | $t_R = 10 \text{ Min.}$ |
| Wassertiefe: | $H = 5,50 \text{ m}$ |
| Einblastiefe: | $H_E = 5,30 \text{ m}$ |

Erf. Reaktorvolumen:

$$V_{\text{erf.}} = 882 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 1/6 \text{ h} = 147 \text{ m}^3$$

erf. Grundfläche:

$$A_{\text{erf.}} = 147 \text{ m}^3 / 5,5 \text{ m} = 27 \text{ m}^2$$

gew.: 2 Reaktoren mit jeweils $B = 2,5 \text{ m}$, $L = 5,50 \text{ m}$

$$V_{\text{vorh.}} = 2 \cdot 2,5 \cdot 5,5 \cdot 5,5 = 151 \text{ m}^3$$

$$A_{\text{vorh.}} = 2 \cdot 2,5 \cdot 5,5 = 27,5 \text{ m}^2$$

Erf. Ozongabe:

$$882 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 0,005 \text{ kg/m}^3 = 4,41 \text{ kg/h}$$

z.B. durch Kompakteinheit SMOevo (Fa. Wedeco), regelbar von 1% bis 100% in 1%-Schritten

Angaben zu Verbrauchsdaten:

spez. Stromverbrauch: $10 \text{ kWh} / \text{kg O}_3$

spez. Sauerstoffverbrauch: $7 \text{ m}^3 \text{ i.N.} / \text{kg O}_3$

bzw. mit Dichte $1,429 \text{ kg/m}^3 \text{ i.N. (0}^\circ\text{C)}$ $10 \text{ kg O}_2 / \text{kg O}_3$

Dichte von Flüssigsauerstoff: $1,141 \text{ kg/l}$

benötigte Sauerstoffmenge (Bemessung): $4,41 \cdot 7 = 30,9 \text{ m}^3 \text{ i.N./h}$

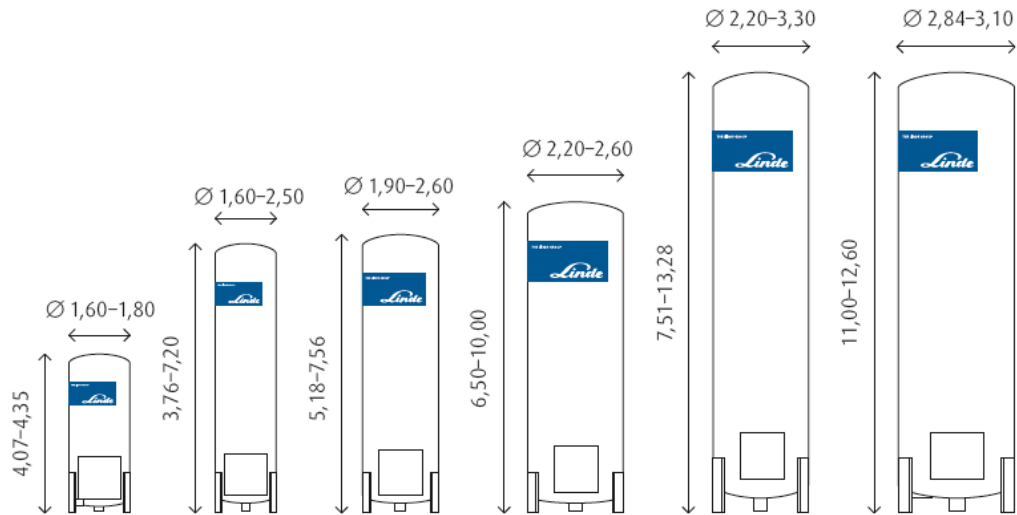
benötigte Sauerstoffmasse (Bemessung): $4,41 \cdot 10 = 44,1 \text{ kg/h}$

Volumen eines Flüssigsauerstofftanks: 30 m³

z.B. Fa. Linde, Typ T18 V300-F2

Enthaltene Sauerstoffmasse: 46.907 - 14.130 = 32.777 kg

Entleerungszeit bei Vollast: 743 h bzw. ~ 31 d



| | | | | | | |
|------------------|-------------|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Gruppe: | 3.000 Liter | 6.000 Liter | 12.000 Liter | 20.000 Liter | 30.000 Liter | 49.000 Liter |
| Inhalt in Liter: | 3.000-4.700 | 5.000-7.900 | 11.000-16.000 | 17.500-23.000 | 25.000-37.000 | 40.500-53.000 |

| Tanktyp* | T18/36 V30-F2 | T18/36 V60-F2 | T18/36 V110-F2 | T18/36 V200-F2 | T18/36 V300-F2 | T18/36 V490-F2 |
|---|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| max. Betriebsüberdruck | | | | | | |
| Standard-Tank (bar) | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 |
| Hochdruck-Tank (bar) | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| geometr. Volumen (Liter) | 3.160 | 6.365 | 11.535 | 20.355 | 30.205 | 49.020 |
| Inhalt (m ³ bei 1 bar, 15 °C) | | | | | | |
| Sauerstoff (m ³) | 2.560 | 5.170 | 9.365 | 16.520 | 24.515 | 39.775 |
| Stickstoff (m ³) | 2.075 | 4.180 | 7.570 | 13.360 | 19.825 | 32.170 |
| Argon (m ³) | 2.505 | 5.055 | 9.160 | 16.160 | 23.980 | 38.915 |
| Durchmesser (mm) | 1.600 | 1.600 | 2.000 | 2.400 | 2.400 | 3.000 |
| Tiefe über Armaturen (mm) | 2.142 | 2.252 | 2.655 | 2.966 | 2.966 | 3.567 |
| Höhe (mm) | 4.110 | 7.010 | 7.375 | 8.330 | 11.509 | 11.510 |
| Fundamentgröße auf Anfrage (abhängig von örtlichen Gegebenheiten) | | | | | | |
| Leergewicht (Standard-Tank) (kg) | 2.510 | 4.910 | 5.910 | 10.130 | 14.130 | 19.770 |
| Gewicht gefüllt | | | | | | |
| mit Sauerstoff (kg) | 5.933 | 11.822 | 18.431 | 32.217 | 46.907 | 72.949 |

Bild 6-4: Tankgrößen und -inhalte (Firmenschrift Fa. Linde AG)

6.3 Aktivkohle-Adsorption

6.3.1 GAK-Adsorption

| | |
|-------------------------------|---|
| maßgebende Beschickungsmenge: | $Q_{T,2h} = 245 \text{ l/s}$ entspr. $882 \text{ m}^3/\text{h}$ |
| min. Kontaktzeit: | $t_R = 5 \text{ Min.}$ |
| Betttiefe: | $H = 3,00 \text{ m}$ |
| Überstauhöhe: | $h_{\ddot{u}} = 1,0 \text{ m}$ |
| Filtergeschwindigkeit: | $v_F = 5 \text{ bis } 15 \text{ m/h}$ |

erf. Filterfläche für $v_F = 5 \text{ m/h}$:

$$A_{\text{erf.}} = 882 \text{ m}^3/\text{h} / 5 \text{ m/h} = 176 \text{ m}^2$$

mit Betttiefe 3,00 m:

$$V_{\text{erf.}} = 176 \cdot 3 = 528 \text{ m}^3$$

Kontaktzeit damit: $t_R = 528 \text{ m}^3 / 882 \text{ m}^3/\text{h} = 0,6 \text{ h} = 36 \text{ Min.}$, bezogen auf Leerbettvolumen

erf. Filterfläche für $v_F = 15 \text{ m/h}$:

$$A_{\text{erf.}} = 882 \text{ m}^3/\text{h} / 15 \text{ m/h} = 59 \text{ m}^2$$

mit Betttiefe 3,00 m:

$$V_{\text{erf.}} = 59 \cdot 3 = 177 \text{ m}^3$$

Kontaktzeit damit: $t_R = 177 \text{ m}^3 / 882 \text{ m}^3/\text{h} = 0,20 \text{ h} = 12 \text{ Min.}$, bezogen auf Leerbettvolumen

gewählt:

4 Filterzellen mit jeweils

$$\text{Filterfläche: } B \cdot L = 4,0 \cdot 5,0 = 20,0 \text{ m}^2$$

Betthöhe: 3,00 m

$$\text{Filterbettvolumen: } V = 20,0 \cdot 3 = 60 \text{ m}^3$$

Filtergeschwindigkeit:

$$v_F = 882/4 / 20 = 11,0 \text{ m/h}$$

Kontaktzeit damit: $t_R = 4 \cdot 60 \text{ m}^3 / 882 \text{ m}^3/\text{h} = 0,27 \text{ h} = 16 \text{ Min.}$, bezogen auf Leerbettvolumen

Füllung mit Kornkohle ca. 1 - 2,5 mm

Stützschrift (20 cm) aus Grobsand

Spülung mit Luft: 100 m/h

Spülung mit Wasser: 35 m/h bzw. 55 m/h

erf. Spülluftmenge: $Q_L = 100 \cdot 20 = 2000 \text{ m}^3/\text{h} = 33 \text{ m}^3/\text{Min.}$

(kann von den für die biologische Stufe vorhandenen 3 Drehkolbengebläsen Typ GM 60 S mit jeweils $P_{\text{mot}} = 75 \text{ kW}$ problemlos geliefert werden)

erf. Spülwassermenge: $Q_{\text{SpW}} = 35 \cdot 20 = 700 \text{ m}^3/\text{h} = 194 \text{ l/s}$

bzw. $Q_{\text{SpW}} = 55 \cdot 20 = 1100 \text{ m}^3/\text{h} = 306 \text{ l/s}$

mit 2 Spülwasserpumpen à ~180 l/s bei $H_{\text{man}} = 5,0 \text{ m}$

(z.B. Sewabloc 200-315 o.ä., D-Rad $\varnothing 300$, $n = 1450 \text{ min}^{-1}$, $P_{\text{mot}} = 18 \text{ kW}$)

6.3.2 PAK-Adsorption

maßgebende Beschickungsmenge: $Q_{\text{T,2h}} = 245 \text{ l/s}$ entspr. $882 \text{ m}^3/\text{h}$

Adsorptionsreaktoren:

min. Kontaktzeit: $t_R = 45 \text{ Min.}$

erforderliches Volumen: $V_{\text{erf}} = 882 \cdot 45/60 = 662 \text{ m}^3$

gewählt:

3 Reaktoren à 225 m^3

Wassertiefe: $H = 5,00 \text{ m}$

Oberfläche: $A_{\text{erf}} = 225 / 5 = 45 \text{ m}^2$

Breite (in Anpassung an Ozonung): $B = 5,30 \text{ m}$

Länge: $L = 8,50 \text{ m}$

spezifische PAK-Dosierung: 10 mg/l

erf. PAK-Zugabe f. $Q_{\text{d,85}} = 14.228 \text{ m}^3/\text{d}$: $14.228 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 142,3 \text{ kg/d}$

spezifische FM-Dosierung: $0,2 \text{ mg}_{\text{Wirksubstanz}} / \text{mg}_{\text{PAK}}$

erf. FM-Zugabe: $142,3 \cdot 0,2 = 28,5 \text{ kg}_{\text{Wirksubstanz}} / \text{d}$

Sedimentationsbecken, rund:

gewählte Oberflächenbeschickung: $q_A = 1,3 \text{ m/h}$

gewählte Sedimentationszeit: $t_R = 3 \text{ h}$

erf. Oberfläche: $A_{\text{erf}} = 882 / 1,3 = 678,5 \text{ m}^2$

aufgeteilt auf 2 Becken: $A_{\text{erf}} = 2 \cdot 678 / 2 \approx 2 \cdot 340 \text{ m}^2$

Radius: $r = \sqrt{\frac{340}{\pi}} = 10,40 \text{ m}$

gewählt: $D = 22 \text{ m}$

$A_{\text{vorh}} = (11^2 - 2,5^2) \cdot \pi = 360 \text{ m}^2 \approx A_{\text{erf}}$

erforderliches Gesamt-Volumen: $V_{\text{ges}} = 3 \cdot 882 = 2646 \text{ m}^3 = 2 \cdot 1323 \text{ m}^3$

Tiefe: $H = 1323 / 360 = 3,68 \text{ m}$

evtl. FHM-Einsatz, spezifisch: $0,2 \text{ mg}_{\text{Wirksubstanz}} / \text{l}$

erf. FHM-Einsatzmenge: $0,2 \cdot 10^{-3} \cdot 14288 = 2,86 \text{ kg/d}$

7 Kostenbetrachtungen

7.1 Kostenschätzung

Die Anlagenkomponenten werden separat betrachtet, um die Konstellationen (a) Vorfiltration - Ozonung, (b) Vorfiltration - GAK-Adsorber und (c) Vorfiltration - Ozonung - GAK-Adsorber abbilden zu können.

Zur Berechnung der Jahreskosten aus Investition wurde eine Abschreibungsdauer von 30 Jahren für Bauwerke, 15 Jahre für die maschinentechnische Ausrüstung und 10 Jahre für die EMSR-technische Ausrüstung angesetzt. Der mittlere Zinssatz wurde zu 3% gewählt. Die Annuität für nachschüssige Tilgung ist dann

$$\alpha_n = q^n \cdot \frac{q-1}{q^n-1} \quad \text{mit } q^n = \left(1 + \frac{p}{100}\right)^n \quad \text{mit } p = \text{Zinssatz und } n = \text{Jahre}$$

Die Ansätze für die Betriebskosten ergeben sich aus den Anlagen.

Für die einzelnen Verfahrenselemente ergeben sich in der Zusammenfassung die folgenden Werte; dabei wurde eine Jahresabwassermenge von 3,0 Mio m³ und eine Zahl tatsächlich angeschlossener Einwohnerwerte i.H.v. 35.000 E+EG zugrunde gelegt. Bezugsmaßstab ist mithin der Kubikmeter Abwasser, nicht der Frischwasserbezug.

Tab. 7-1: Zusammenfassung der Jahres-Gesamtkosten und der spezifischen Kosten

| Verfahrenselement | Jahreskosten Invest €/a | Jahreskosten Betrieb €/a | Jahreskosten gesamt €/a | Kosten pro m ³ €/m ³ | Kosten pro EW €/EW |
|--------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|---|-----------------------|
| Vorfiltration | 86.439 | 45.223 | 131.662 | 0,044 | 3,76 |
| Ozonung | 71.986 | 86.046 | 158.032 | 0,053 | 4,52 |
| GAK-Adsorption | 78.533 | 121.393 | 199.926 | 0,067 | 5,71 |
| VF + Ozonung + GAK-Adsorption | 236.958 | 252.662 | 489.620 | 0,163 | 13,99 |
| Ozonung + PAK-Adsorption + NF | 329.944 | 244.211 | 642.418 | 0,214 | 18,35 |

Die Kombination Vorfiltration mit Ozonung allein verursacht einen Kostenanteil von $4,4 + 5,3 \approx 10 \text{ €Cent/m}^3$. Die umfassendere Kombination unter zusätzlichem Einschluss der GAK-Adsorption ergibt einen Kostenanteil von $4,4 + 5,3 + 6,7 \approx 16 \text{ €Cent/m}^3$. Umgerechnet auf 35.000 Einwohnerwerte (rd. 25.000 E und 10.000 EG) ergibt sich eine Jahresbelastung i.H.v. € 14 pro Einwohnerwert. Dabei verbleibt derzeit schwer einschätzbar, wie häufig die A-Kohle unter Betriebsbedingungen tatsächlich regeneriert werden muss; für die Kostenbetrachtung wurde von einem Tauschintervall von 1 a^{-1} ausgegangen. Die Kosten für die Regeneration beeinflussen weitgehend die Betriebskosten der GAK-Adsorption. Die Kombination mit PAK führt zu deutlich höheren Gesamtkosten, weil der Investitionsanteil deutlich höher ist. Der Anteil der Betriebskosten ist dabei im Vergleich zum GAK-Einsatz etwa gleich.

Bei der Kostenbetrachtung wurde zunächst nicht einbezogen:

- ein Investitionskostenzuschuss des Landes NRW
- eine geringere Abwasserabgabe durch Verminderung der CSB-Konzentration (sowie ggf. durch Verminderung der P-Konzentration)

Auf der anderen Seite ist die Anwendung von hochinnovativen Verfahren mit einem schwer zu kalkulierenden Risiko verbunden. Daher scheint es zunächst gerechtfertigt, die möglichen Kostenentlastungen zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht anzusetzen.

7.2 Mögliche Auswirkungen der Elimination von Mikroschadstoffen auf den Ablauf-CSB und die daraus resultierende Abwasserabgabe

Für die Ermittlung der Abwasserabgabe werden vor allem die Konzentrationsparameter CSB, Gesamt-Phosphor und Gesamt-Stickstoff (anorganisch) entsprechend der Anzahl der Schadeinheiten herangezogen. Eine Schadeinheit wird nach dem Abwasserabgabengesetz mit derzeit € 35,79 bewertet. Die Abwasserabgabe wird halbiert, wenn die Überwachungswerte unterschritten werden oder als eingehalten gelten ("4-aus-5-Regel"). Dies ist für die Kläranlage Salzkotten-Verne in aller Regel der Fall, wobei der CSB-Überwachungswert in der wasserrechtlichen Erlaubnis mit 90 mg/l angegeben ist. Wenn jedoch -wie in der Vergangenheit-

unkontrollierte und unzulässige (Indirekt-)Einleitungen erfolgen, dann wurde der ÜW speziell für den Parameter CSB überschritten.

Der Schwellenwert nach AbwAG liegt für den Parameter CSB bei 20 mg/l, d.h. es bestünde nach §3 (1) AbwAG Abgabefreiheit für den betreffenden Parameter, wenn der tatsächliche Ablaufwert unter 20 mg/l an CSB ist.

Das Erreichen bzw. Unterschreiten dieses Zielwerts ist nicht unproblematisch und mit konventionellen Abwasserreinigungsverfahren nicht dauerhaft sicher zu gewährleisten. Dabei ist die tatsächliche Zusammensetzung des Summenparameters CSB mitentscheidend. Der CSB setzt sich grundsätzlich zusammen aus partikulären und gelösten Anteilen. Beide Anteile werden differenziert nach biologisch nicht abbaubaren (inerten / persistenten) und biologisch abbaubaren Komponenten. Letztere können weiterhin in 'leicht abbaubar' und 'schwerer abbaubar' charakterisiert werden. In Bild 7-1 wird schematisch die Veränderung des CSB im Verlauf der mechanisch-biologischen Abwasserbehandlung dargestellt.

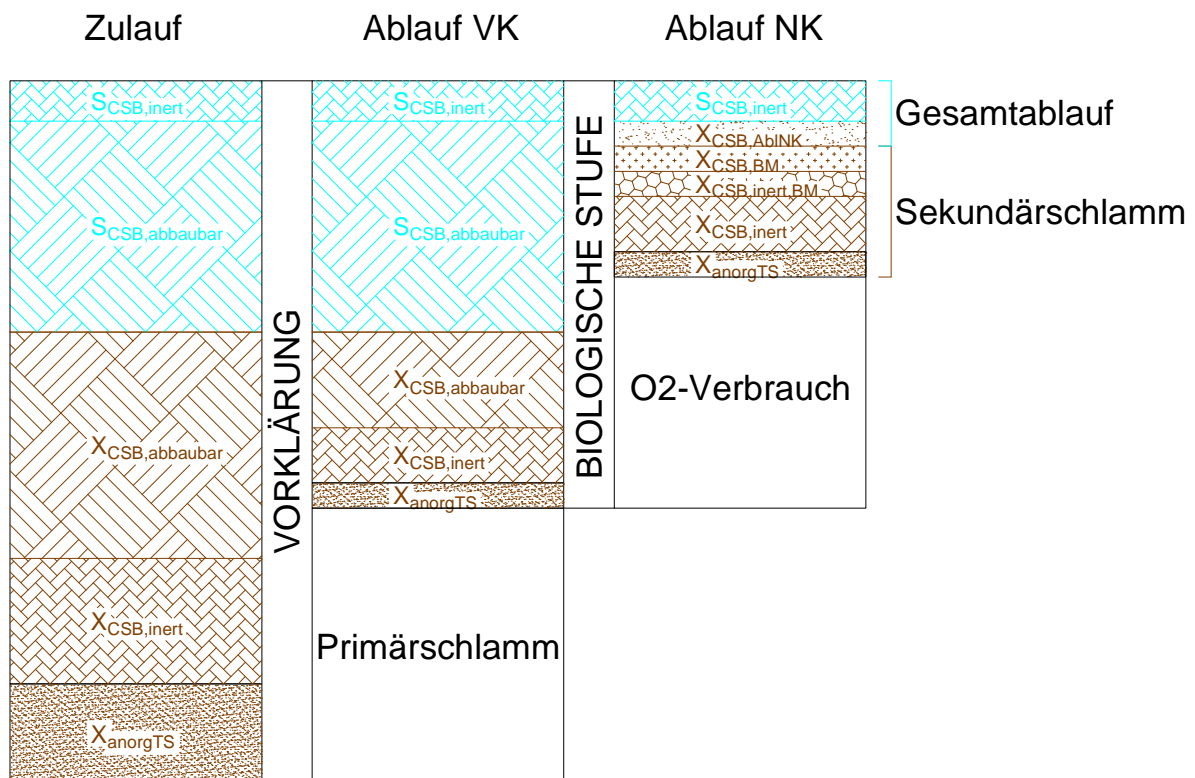


Bild 7-1: Veränderung des CSB im Verlauf der Abwasserbehandlung

Es wird deutlich, dass ein großer Teil des partikulären CSB ($X_{CSB,...}$) bereits durch die mechanische Behandlung in der Vorklärung aus dem Abwasserstrom entzogen wird

und in den Primärschlamm übergeht. Der gelöste CSB geht mit den feinen, nichtabsetzbaren CSB-Anteilen in die biologische Stufe über. Dort erfolgt die weitgehende Oxidation des gelösten abbaubaren CSB sowie ein weiterer biologischer Abbau bzw. ein Einbau von partikulärem CSB (abbaubar und nicht abbaubar) in den Sekundärschlamm.

Am Ende verbleibt im Ablauf der Nachklärung ein Anteil an gelöstem CSB, der im Wesentlichen demjenigen Anteil an gelöstem inerten CSB entspricht, der bereits im Zulauf der Kläranlage enthalten war. Es ist aber auch ein Anteil an partikulärem CSB (anorganisch / inert / abgestorbene bzw. noch aktive Biomasse) nicht zu vermeiden, der als Feinmaterial im Gesamtablauf der Nachklärung verbleibt. Das ATV-DVGW-Arbeitsblatt A 131 gibt dafür einen Wert von maximal 20 mg/l an, der in der Praxis jedoch vielfach weit unterschritten wird. Häufig werden Konzentrationen von abfiltrierbaren Stoffen im Ablauf angetroffen, die bei Trockenwetterabfluss im Bereich von 5 mg/l und weniger liegen, jedoch bei Regenwetterabfluss wieder deutlich ansteigen können.

Die weitere Entwicklung durch die diskutierten Verfahrensschritte der Spurenstoffelimination und der Verbleib des CSB aus dem Ablauf der Nachklärung wird in Bild 7-2 schematisch dargestellt.

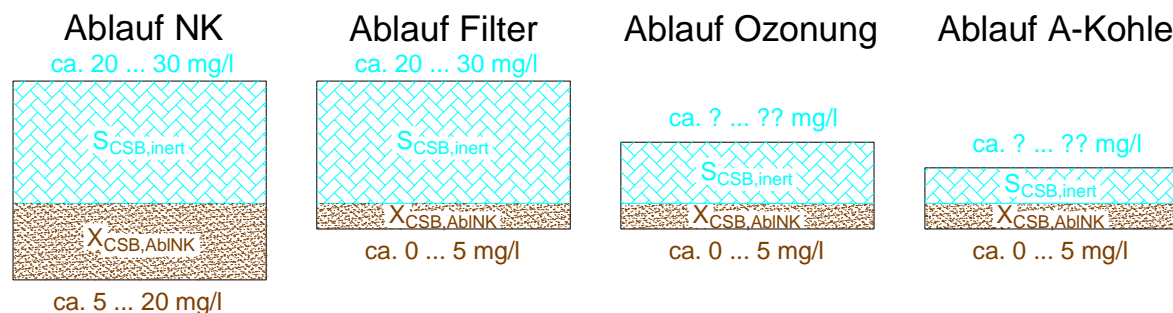


Bild 7-2: Entwicklung der CSB-Konzentration durch die einzelnen Verfahrensschritte der Nachbehandlung

Es ist klar, dass die Filtration, die überwiegend zum Schutz der Oxidations- und Adsorptionsstufe vorgesehen ist, nur die ungelösten CSB-Anteile zurückhalten kann. Diese werden jedoch mit gutem Wirkungsgrad sehr weitgehend eliminiert. Der inerte gelöste CSB durchläuft die Filtration und wird erst in der Ozonung durch die dort stattfindenden Oxidationsvorgänge quantitativ vermindert. Eine weitere quantitative

Abnahme der Konzentration wird durch die Adsorption erzielt. Eine Voraussage der tatsächlichen Restkonzentrationen an gelöstem CSB ist jedoch nicht exakt möglich, sondern erfordert die Durchführung von Voruntersuchungen mindestens im halbtechnischen Maßstab.

Die Auswirkungen, die eine dauerhafte Schwellenwertunterschreitung für den Parameter CSB zur Folge hätte, können wie folgt abgeschätzt werden:

Die Jahresabwassermenge lag in den vergangenen Jahren etwa bei 3,0 Mio. m³/a, die Jahresschmutzwassermenge hingegen bei ca. 2,0 Mio. m³/a. Der Überwachungswert für den Parameter CSB ist 90 mg/l entsprechend 0,09 kg/m³. Damit ergibt sich eine rechnerische Jahresfracht von

$$B_{\text{CSB},a} = 2.000.000 \cdot 0,09 = 180.000 \text{ kg/a}$$

1 Schadeinheit entspricht 50 kg Sauerstoff

$$SE_{\text{CSB},a} = 180.000 / 50 = 3.600 \text{ SE/a}$$

1 SE wird mit € 35,79 bewertet; damit

$$\text{AbwAbgabe}_{\text{CSB},a} = 3.600 \cdot 35,79 = 128.844 \text{ €/a}$$

Die ÜWW werden eingehalten, daher Halbierung:

$$\text{AbwAbgabe}_{\text{CSB},a} = 128.844 / 2 = 64.422 \text{ €/a}$$

Das Einsparpotenzial bei der Abwasserabgabe liegt damit bei ca. 64 T€/a, bezogen auf den Parameter CSB. Dabei ist ein nicht zu vernachlässigendes Risiko aufgrund des relativ starken Anteils an Abwässern aus Gewerbe und Industrie gegeben. Eine gute Nutzerdisziplin ist zwingende Voraussetzung für den Erfolg der Maßnahme. In dem Zusammenhang ist zu empfehlen, dass mit den infrage kommenden Betrieben intensive Beratungsgespräche geführt werden.

Eine Prognose für den Parameter P_{gesamt} kann derzeit nicht getroffen werden, weil nicht bekannt ist, ob und inwieweit die P-Ablaufkonzentration auf partikulär gebundenen Phosphor zurückzuführen ist. Es ist jedoch möglich, dass die Verminderung auch des Parameters P_{gesamt} über 20% erreicht, sodass nach § 10 (3) AbwAG eine Verrechnung mit der Abwasserabgabe in den drei Folgejahren durchgeführt werden kann.

Weitere finanzielle Anreize, die als Beitrag zur Risikobegrenzung bzw. als Nachteilsausgleich durch das Land Nordrhein-Westfalen gewährt werden, sind die Zuschüsse zu den Investitionskosten. Das Land fördert besonders die ressourceneffiziente Abwasserbeseitigung (MKULNV, 2012) und bietet auf Antrag eine Anteilsfinanzierung für

"Maßnahmen zur Aus- oder Umrüstung von öffentlichen Abwasserbehandlungsanlagen mit innovativen Reinigungsverfahren, wie z.B. Membrantechnologie, Ozonolyse, UV-Verfahren oder andere innovative Technologien mit gleichartiger Reinigungsleistung und dem Ziel der

- a) Hygienisierung des Abwassers oder
- b) Elimination von gefährlichen Stoffen und Mikroschadstoffen wie z.B. Industriechemikalien (PFC, Tosu, Sulfolan, Weichmacher u.a.), Arzneimittelrückstände, Personal Care Produkte, etc.."

Der Förderanteil beträgt derzeit und voraussichtlich bis Ende 2016 noch 70% der förderfähigen Investitionskosten einschließlich der Nebenkosten und wird ohne Rechtsanspruch im Rahmen der verfügbaren Haushaltsmittel gewährt. Die dauerhaft entstehenden Betriebskosten werden hingegen nicht gefördert. Dafür ist eine dauerhafte Kompensation mit der Verringerung der Abwasserabgabe (s.o.) möglich.

Werden die vorstehend genannten Aspekte in die Gesamt-Kostenbetrachtung einbezogen, dann ergibt sich folgende Zusammenstellung:

Tab. 7-2: Zusammenfassung der Jahres-Gesamtkosten und der spezifischen Kosten incl. Förderbeitrag und Verminderung durch Einsparung von Abwasserabgabe

| Verfahrenselement | Jahreskosten Invest, mit 70% Zuschuss | Jahreskosten Betrieb | Jahreskosten gesamt | Kosten pro m ³ | Jahreskosten pro EW |
|--|---------------------------------------|----------------------|---------------------|---------------------------|---------------------|
| | €/a | €/a | €/a | €/m ³ | €/EW |
| Vorfiltration, 3-straßig | 25.932 | 45.223 | 71.154 | 0,024 | 2,03 |
| Ozonung | 21.596 | 86.046 | 107.642 | 0,036 | 3,08 |
| GAK-Adsorption | 23.560 | 121.393 | 144.953 | 0,048 | 4,14 |
| VF + Ozonung + GAK-Adsorption | 71.087 | 252.662 | 323.749 | 0,108 | 9,25 |
| Ozonung + PAK-Adsorption + NF | 98.983 | 244.211 | 343.194 | 0,114 | 9,81 |
| Abzug Abw-Abgabe | | -64.422 | | -0,021 | -1,84 |
| Gesamt (Filtration+Ozonung+GAK-Adsorption) | | | | 0,087 | 7,41 |
| Gesamt (Filtration+Ozonung+GAK-Adsorption) | | | | 0,093 | 7,97 |

8 Zusammenfassung

Die Kläranlage Salzkotten-Verne erfüllt nach ihrem Ausbau in der zweiten Hälfte der 1990er Jahre Anforderungen, die z.T. deutlich über die Mindestanforderungen nach der Abwasserverordnung hinausgehen. Auf der Basis der vorhandenen Verfahrenstechnik und unter Auswertung zweier Mehrtages-Mischproben hinsichtlich der Konzentration von 23 Mikroschadstoffen, die auch als Leitsubstanzen für weitere Stoffe und Stoffgruppen herangezogen werden können, wurden Möglichkeiten untersucht, wie die Konzentration von Spurenstoffen im Ablauf der Kläranlage signifikant vermindert werden können. Dabei war zu berücksichtigen, dass Erweiterungsflächen nur in begrenztem Umfang am südlichen Rand des Grundstücks, jedoch günstigerweise in unmittelbarer Nähe zu den beiden Nachklärbecken zur Verfügung stehen.

Die Auswertung der unter Trockenwetterbedingungen durchgeführten Beprobung zeigte, dass die Konzentrationen der Arzneimittelwirkstoffe einschließlich der Röntgenkontrastmittel im Vergleich mit anderen Untersuchungen im mittleren bis oberen Wertebereich liegen. Angesichts der Tatsache, dass ein Krankenhaus der medizinischen Grundversorgung zum Einzugsgebiet gehört, ist das nicht ungewöhnlich. Auch die Konzentration des ubiquitär eingesetzten Korrosionsinhibitors Benzotriazol liegt im mittleren bis oberen Bereich.

Unter Berücksichtigung der Wasserführung in der Heder kann das Mischungsverhältnis zwischen Abwassereinleitung und MNQ etwa bei 1 : 10 liegen. Dann führen Einzelstoffkonzentrationen von >1 mg/l zu Konzentrationen nach Durchmischung von >0,1 mg/l. Dies kann für die Einzelstoffe Diclofenac, die Röntgenkontrastmittel Amidotrizoesäure, Iopamidol und Iopromid sowie für Benzotriazol akut werden. Der Ausbau der Kläranlage für eine 4. Reinigungsstufe ist daher eine Maßnahme, die dem vorsorgenden Schutz der natürlichen Ressource Oberflächenwasser dient.

Unter den genannten Prämissen sind alle Verfahren mit größerem Grundflächenbedarf, z.B. die Adsorption an pulverförmige Aktivkohle in entsprechenden Reaktionsbehältern mit anschließenden Sedimentationsbecken, mit großer

Zurückhaltung zu betrachten. Im vorliegenden Fall wird entweder ein Fremdgrundstück benötigt oder die Bauwerke müssen alternativ derart verschoben werden, dass Rohrleitungswege ungünstig werden; zudem führen die festgestellten Überflutungsflächen zu extrem einengenden, ungünstigen Verhältnissen. Deutlich kompaktere Bauformen lassen sich mit Anlagen zur Ozonung sowie mit Adsorbern mit granulierter Aktivkohle realisieren. In jedem Fall ist die Hebung des mechanisch-biologisch gereinigten Abwassers erforderlich, und zwar mindestens bis zu einer Durchflussmenge, die dem maßgebenden Trockenwetterabfluss $Q_{T,2h}$ entspricht. Dies gilt für die eigentliche Elimination der Mikroschadstoffe. Zum Schutz dieser Anlagen vor partikulärer Substanz sollte eine mechanische Behandlung durch Tuchfiltration vor- bzw. nachgeschaltet werden, die zweckmäßig für die gesamte aufzunehmende Mischwassermenge auszulegen wäre. Zur Hebung des Abwassers aus der Nachklärung sollen Tauchmotorpumpen dienen, die in die Ablaufschächte der beiden Nachklärbecken eingesetzt werden.

Für die als Variante A beschriebene Verfahrenskette wurde als erste hochwirksame Behandlungsstufe eine 2-straßig angelegte Ozonung mit relativ kurzer Aufenthaltszeit bei vergleichsweise niedrigen Ozondosierungen vorgeschlagen; dies erscheint angemessen, weil sich viele Medikamentenrückstände spontan durch die Einwirkung von Ozon oxidieren lassen.

Die Eliminationsleistung einer Ozonung im Hinblick auf Röntgenkontrastmittel ist eher gering; daher wird als Folgestufe eine Adsorption an granuliert Aktivkohle vorgeschlagen, die gute Rückhalteleistungen für diese Stoffgruppe aufweisen kann. Die Anlage soll mit 4 Abstromfilterzellen ausgestattet werden.

Insgesamt wird durch die Reihenschaltung zweier unterschiedlich wirksamer Verfahrensschritte eine sehr gute Breitbandwirkung bei der Elimination von bekannten (und bisher unbekannt) Mikroschadstoffen erwartet.

Die Verfahrenskette der Variante B -mit Einsatz von PAK und zugehöriger Sedimentation- wird hingegen nicht empfohlen. Die Gesamtleistung ist zwar als gleichwertig anzusehen, jedoch führt der wesentlich höhere Flächenbedarf zu ungünstigen Anordnungen auf dem zur Verfügung stehenden Grundstücksteil.

Außerdem sind die Investitionskosten signifikant höher, als bei der Kombination mit GAK.

Die entstehenden Kosten sind für die Nutzer spürbar, jedoch sollten sie kein Ausschlusskriterium darstellen. Ohne Berücksichtigung kostenmindernder Faktoren wird für die ausgewählte Variante mit einem Zuschlag von rd. 16 €Cent/m³ bezogen auf den Abwassermaßstab gerechnet. Wenn der Frischwasserbezug zugrunde gelegt wird, ist der spezifische Kubikmeterpreis entsprechend höher, etwa um Faktor 2. Die zusätzliche Jahresbelastung pro Einwohnerwert beläuft sich auf rd. 14 €/(EW·a).

Werden hingegen kostenmindernde Faktoren, wie die derzeit noch erhebliche Bezuschussung der Investitionskosten durch das Land Nordrhein-Westfalen sowie eine Minderung der Abwasserabgabe eingerechnet, dann liegt die zusätzliche Belastung des spezifischen Abwasserpreises bei 9 €Cent/m³ und die zusätzliche Jahresbelastung bei rd. 7,5 €/(EW·a). Die Minimierung der Abwasserabgabe setzt allerdings eine durchgängige Unterschreitung des Schwellenwerts von 20 mg/l CSB voraus. Mit der vorgeschlagenen Verfahrenskombination ist dieser Wert nach entsprechender Einfahr- und Optimierungsphase realistisch. Würden sich die in der Vergangenheit sporadisch aufgetretenen Stoßbelastungen durch unerlaubte Indirekteinleitungen jedoch nicht dauerhaft sicher unterbinden lassen, dann ließen sich die hohen Konzentrationen persistenter Stoffe zwar abmindern, ein Durchschlagen ist jedoch nicht gänzlich auszuschließen. Eine Quantifizierung ist ggf. nur im Rahmen halbtechnischer Untersuchungen mit den infrage kommenden Substanzen möglich.

Die vorgeschlagenen Maßnahmen sind mit den heutigen technischen Mitteln umsetzbar, und die spätere Integration weiterer Einzelmaßnahmen ist nicht ausgeschlossen. Die Heder würde jedenfalls signifikant entlastet.

Literaturverzeichnis:

Abegglen, Christian; Siegrist, Hansruedi (2012): Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser, Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen, Hrsg.: Bundesamt für Umwelt, Bern (CH), Umweltwissen Nr. 1214, www.bafu.admin.ch/uw-1214-d

Anon. (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik, ABI. L 327 vom 22.12.2000, S. 1

Anon. (2008): Richtlinie 2008/105/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über Umweltqualitätsnormen im Bereich der Wasserpolitik und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien des Rates 82/176/EWG, 83/513/EWG, 84/156/EWG, 84/491/EWG und 86/280/EWG sowie zur Änderung der Richtlinie 2000/60/EG, ABI. L 348/84 vom 24.12.2008

Anon. (2011a): Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (Oberflächengewässerverordnung - OGewV), BGBl. I S. 1429

Anon. (2011b): Memorandum 'Forderungen zum Schutz von Fließgewässern und Talsperren zur Sicherung der Trinkwasserversorgung', von DVGW, ARW, ATT, ABWR, AWE und AWWR, 20. Januar 2011

Anon. (2013): Richtlinie 2013/39/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. August 2013 zur Änderung der Richtlinien 2000/60/EG und 2008/105/EG in Bezug auf prioritäre Stoffe im Bereich der Wasserpolitik, ABI, 226/1 vom 24.08.2013

ARGE (2011): Elimination von Arzneimitteln und organischen Spurenstoffen: Entwicklung von Konzeptionen und innovativen, kostengünstigen Reinigungsverfahren, Schlussbericht Phase 1 „Elimination von Arzneimittelrückständen in kommunalen Kläranlagen“, Schlussbericht an das MKULNV NRW

ARGE Spurenstoffe NRW (2012): Elimination von Arzneimitteln und organischen Spurenstoffen: Entwicklung von Konzeptionen und innovativen, kostengünstigen

Reinigungsverfahren, Abschlussbericht Projekt Nr. 5 „Ertüchtigung kommunaler Kläranlagen, insbesondere kommunaler Flockungsfiltrationsanlagen durch den Einsatz von Aktivkohle“, Schlussbericht an das MKULNV NRW

ARGE Spurenstoffe NRW (2014): Elimination von Arzneimitteln und organischen Spurenstoffen: Entwicklung von Konzeptionen und innovativen, kostengünstigen Reinigungsverfahren, Abschlussbericht zur Phase 2 „Elimination von Arzneimittelrückständen in kommunalen Kläranlagen“, Schlussbericht an das MKULNV NRW

Böhler, M. et al. (2013): Berichterstattung - Ergänzende Untersuchungen zur Elimination von Mikroverunreinigungen auf der Ara Neugut, Bafu, Bern

Bornemann, C. et al. (2012): Projekt Nr. 5: Ertüchtigung kommunaler Kläranlagen, insbesondere kommunaler Flockungsfiltrationsanlagen durch den Einsatz von Aktivkohle (MIKROFlock), Schlussbericht an das MKULNV NRW

EAWAG (2009): Ozonung von gereinigtem Abwasser, Schlussbericht Pilotversuch Regensdorf, Studie der Eawag im Auftrag des Bundesamts für Umwelt BAFU und des AWEL Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich

Feige, W.; Otto, K-H. (2005): Quellschwemmkegel - eine wenig bekannte Quellart und Oberflächenform im Karstgebiet der Paderborner Hochfläche. In: Decheniana, Heft 158. Bonn, S.145-164

Fischer, K.; Bardtke, D. (1981): Auswirkungen der biologischen Besiedlung auf die Adsorption von Aktivkohle und auf deren Anwendung in der weitergehenden Abwasserbehandlung, gwf, 1981, H. 2, S. 58-64

Götz, Christian et al. (2012): Mikroschadstoffe aus kommunalem Abwasser - Stoffflussmodellierung, Situationsanalyse und Reduktionspotenziale für Nordrhein-Westfalen. Studie im Auftrag des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, MKULNV

Herbst, Heinrich; Hilbig, Ralf (2012): Einbindung einer Anlage zur Spurenstoffelimination mittels Aktivkohle in die Abwasserfiltration der Kläranlage Neuss Ost, Abschlussbericht an das MKULNV NRW

Hiller, Georg (2011): Einsatz von Pulveraktivkohle auf der Kläranlage Steinhäule, Schriftenreihe Gewässerschutz-Wasser-Abwasser, Aachen, Bd. 223, S. 27/1-27/10

IWW (2011): CSB- und Spurenstoffadsorption am Aktivkohlefestbett - Abschlussbericht an das MKULNV NRW

Jenkins, David; Richard, Michael G.; Daiger, Glenn T. (1986): Manual on the Causes and Control of Activated Sludge Bulking and Foaming, 1st Ed., Hrsg.: WRC (SA)

Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe (KOM-M.) NRW (2015): Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination

LANUV (2013): Einträge und Reduktionsmöglichkeiten von Mikroschadstoffen in Fließgewässern, in: Jahresbericht 2012, S. 103-109

Merten, M. (2011): Spurenstoffelimination mittels Aktivkornkohle im Ablauf des Klärwerks Gütersloh-Putzhagen, Konzeptstudie

MUNLV (2009): Leitfaden Monitoring Oberflächengewässer, Teile A, B und C, Stand 08/2009, sowie Teil D mit Anhängen und Tabellen 1 bis 22 (lfd. aktualisiert)

MKULNV (2012): Ressourceneffiziente Abwasserbeseitigung in NRW - Richtlinien über die Gewährung von Zuwendungen, RdErl. d. Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz – IV-7-025 088 0010 – v. 01.01.2012, geändert v. 17.09.2012

MKULNV (2014): Programm Reine Ruhr, zur Strategie einer nachhaltigen Verbesserung der Gewässer- und Trinkwasserqualität in Nordrhein-Westfalen, Bericht 2014, www.umwelt.nrw.de

Tacke et al. (2008): Senkung des Anteils organischer Spurenstoffe in der Ruhr durch zusätzliche Behandlungsstufen auf kommunalen Kläranlagen - Gütebetrachtungen und Kostenbetrachtungen, Abschlussbericht an das MUNLV NRW

Uni Dortmund (2003): Untersuchungen zum Eintrag und zur Elimination von gefährlichen Stoffen in kommunalen Kläranlagen (Teil 1), Abschlussbericht, FB Chemietechnik, Lehrstuhl für Umwelttechnik

Anhang:

- tabellarische Kostenermittlung
- Lageplan

| Vorfiltration als Tuchfilteranlage | | | | | |
|---|------------------------|-------------|--|-----------|-----------|
| Pos. | Anz./ Menge | Dim. | Bezeichnung | EP | GP |
| 1 | | | Bautechnik | | |
| 1.1 | | | Rohrleitungen | | |
| 1.1.1 | 120 | m | PE 100, da = 400 mm | 400 | 48.000 |
| 1.1.2 | 6 | Stck. | Formstücke PE 100, da 400 mm | 600 | 3.600 |
| 1.1.3 | 4 | Stck. | Rohrdurchführungen für PE 100, da 400 mm | 1.500 | 6.000 |
| 1.1.4 | 40 | m | PE 100, da = 600 mm | 800 | 32.000 |
| 1.1.5 | 5 | Sck. | Formstücke PE 100, da 600 mm | 1.000 | 5.000 |
| 1.1.6 | 4 | Stck. | Rohrdurchführungen für PE 100, da 600 mm | 3.000 | 12.000 |
| | | | Zwischensumme Rohrleitungen | | 106.600 |
| 1.2 | | | Bauwerke | | |
| 1.2.1 | 2 | Stck | Kernbohrungen DN 450 mit Link-Seal Dichtung | 1.000 | 2.000 |
| 1.2.2 | 2 | Stck. | Überfallkonstruktionen 1.4571, psch. | 1.000 | 2.000 |
| 1.2.3 | 2 | Stck. | Armaturenschächte mit Abdeckung, psch. | 2.500 | 5.000 |
| 1.2.4 | 525 | m3 | Betonbehälter für Tuchfiltrationseinheit | 400 | 210.000 |
| 1.2.5 | 60 | m3 | Raum für NSUV, Anteil Filtration | 250 | 15.000 |
| | | | Zwischensumme Bauwerke | | 234.000 |
| 2 | | | Maschinentechnische Ausrüstung | | |
| 2.1 | 2 | Stck. | Abwassertauchmotorpumpen, Q = 200 l/s, H = 5 m | 12.000 | 24.000 |
| 2.2 | 2 | Stck. | Absperrschieber DN 400 | 1.500 | 3.000 |
| 2.3 | 2 | Stck. | Rückschlagklappen DN 400 | 2.000 | 4.000 |
| 2.4 | 3 | Stck. | Filtereinheit, je 60 m2, kompl. mit Absaugpumpen | 150.000 | 450.000 |
| | | | Zwischensumme Maschinentechn. Ausrüstung | | 481.000 |
| 3 | | | EMSR-Technik | | |
| 3.1 | 2 | Stck. | Höhenstandsmessungen, Einbau in NK-Ablauf | 3.000 | 6.000 |
| 3.2 | 6 | Stck. | Höhenstandsmessungen, Differenzhöhe Filter | 3.000 | 18.000 |
| 3.3 | 2 | Stck. | FU 18 kW, für TMP | 10.000 | 20.000 |
| 3.4 | 1 | Stck. | NSUV, psch. | 50.000 | 50.000 |
| 3.5 | 1 | Stck. | SPS mit An- und Einbindung an PLS | 25.000 | 25.000 |
| | | | Zwischensumme EMSR | | 119.000 |
| 4 | | | Baunebenkosten | | |
| 4.1 | 1 | Stck. | psch. | 20.000 | 20.000 |
| | | | Gesamtkosten | | |
| 1 | | | Bautechnik | | 340.600 |
| 2 | | | Maschinentechnische Ausrüstung | | 481.000 |
| 3 | | | EMSR-Technik | | 119.000 |
| 4 | | | Baunebenkosten | | 20.000 |

| | | | | | |
|--|----------|---------------------|--------------------------------|--|----------------------------|
| | | | | | |
| | | | Summe, netto | | 960.600 |
| | | | zzgl. MWSt. | | 182.514 |
| | | | Summe, brutto | | 1.143.114 |
| Berechnung der Jahreskosten aus Investition | | | | | |
| Abschreibungs- dauer | Zinssatz | Tilgungs- faktor | | | Jahreskosten aus Invest |
| a | % | | | | |
| 30 | 3 | 0,05102 | Bautechnik | | 17.377 |
| 15 | 3 | 0,08377 | Maschinentechnische Ausrüstung | | 40.293 |
| 10 | 3 | 0,1172 | EMSR-Technik | | 13.947 |
| 30 | 3 | 0,05102 | Baunebenkosten | | 1.020 |
| | | | Summe, netto | | 72.638 |
| | | | zzgl. MWSt. | | 13.801 |
| | | | Summe, brutto | | 86.439 |

| Betriebskosten Vorbehandlung | | | | | |
|---|--|-------|---------------|------------|-------------|
| | | | | | |
| Jährlich behandelte Abwassermenge | | | 3.000.000 | m3 | entspr. JAM |
| angeschlossene EW | | | 35.000 | | |
| spez. Strompreis | | | 15 | ct/kWh | |
| | | | | | |
| Stromkosten | | | | | |
| erf. el. Arbeit für Pumpen | | | 80.000 | kWh/a | |
| erf. el. Arbeit für Absaugpumpen | | | 6.000 | kWh/a | |
| erf. el. Arbeit für Wellenantrieb | | | 15.000 | kWh/a | |
| | | | | | |
| Elektrische Arbeit | | | 101.000 | kWh/a | |
| spez. Strompreis | | | 15 | ct/kWh | |
| | | | | | |
| Summe Stromkosten | | | 15.150 | €/a | |
| | | | | | |
| sonst. Verbrauchsstoffe | | | 0 | €/a | |
| | | | | | |
| Wartung und Instandhaltung | | | | | |
| Bautechnik | | 1% | 3.406 | €/a | |
| Maschinen- und E-Technik | | 4% | 24.000 | €/a | |
| | | | | | |
| Summe Wartung und Instandhaltung | | | 27.406 | €/a | |
| | | | | | |
| Personalkosten | | | | | |
| erf. Aufwand | | 8 | h/Monat | | |
| h/(P*a) | | 1800 | h/a | | |
| anteilige Personen | | 0,05 | P | | |
| spez. Personalkosten | | 50000 | €/a | | |
| | | | | | |
| Summe Personalkosten | | | 2.667 | €/a | |
| | | | | | |
| Zusammenfassung: | | | | | |
| Stromkosten | | | 15.150 | €/a | |
| sonst. Verbrauchsstoffe | | | 0 | €/a | |
| Wartung und Instandhaltung | | | 27.406 | €/a | |
| Personalkosten | | | 2.667 | €/a | |
| | | | | | |
| Summe Betriebskosten | | | 45.223 | €/a | |

| Ozonung | | | | | |
|----------------|------------------------|-------------|---|-----------|-----------|
| Pos. | Anz./ Menge | Dim. | Bezeichnung | EP | GP |
| 1 | | | Bautechnik | | |
| 1.1 | | | Rohrleitungen | | |
| 1.1.1 | 12 | m | Bypassltg., VA, DN 600 | 600 | 7.200 |
| 1.1.2 | 4 | Stck. | Formstücke VA, DN 600 | 900 | 3.600 |
| 1.1.3 | 2 | Stck. | Rohrdurchführungen für DN 600 | 1.800 | 3.600 |
| | | | Zwischensumme Rohrleitungen | | 14.400 |
| 1.2 | | | Bauwerke | | |
| 1.2.1 | 1 | Stck | Betonfundament für Sauerstofftank, psch | 5.000 | 5.000 |
| 1.2.2 | 1 | Stck. | Betonfundament für Kompakt-Ozonanlage, psch | 6.000 | 6.000 |
| 1.2.3 | 300 | m3 | Betonbehälter für Ozon-Reaktor, geschlossen | 450 | 135.000 |
| 1.2.4 | 4 | Stck. | Gasdichte Schachtabdeckungen | 2.000 | 8.000 |
| 1.2.5 | 140 | m3 | Raum für Kompakt-Ozonung | 250 | 35.000 |
| | | | Zwischensumme Bauwerke | | 189.000 |
| 2 | | | Maschinentechnische Ausrüstung | | |
| 2.1 | 1 | Stck. | Zwischenflanssschieber m. E-Antrieb DN 600 | 5.000 | 5.000 |
| 2.2 | 2 | Stck. | Begasungssystem 1. Kassette | 10.000 | 20.000 |
| 2.3 | 2 | Stck. | Begasungssystem 3. Kassette | 8.000 | 16.000 |
| 2.4 | 2 | Stck. | Rührwerke (2. und 4. Kass.) | 4.000 | 8.000 |
| 2.5 | 1 | Stck. | Kompakt-Ozonanlage für max. 4,4 kg/h | 300.000 | 300.000 |
| 2.6 | 1 | Stck. | Kühlsystem, psch. | 15.000 | 15.000 |
| 2.7 | 1 | Stck. | Restozon-Vernichter | 20.000 | 20.000 |
| 2.8 | 1 | Stck. | Sauerstofftank (v. Lieferanten gestellt) | 0 | 0 |
| | | | Zwischensumme Maschinentechn. Ausrüstung | | 379.000 |
| 3 | | | EMSR-Technik | | |
| 3.1 | 4 | Stck. | Ozonnmessungen | 5.000 | 20.000 |
| 3.2 | 1 | Stck. | Ozonwarnung | 3.000 | 3.000 |
| 3.3 | 1 | Stck. | NSUV, psch. | 100.000 | 100.000 |
| 3.4 | 1 | Stck. | SPS mit An- und Einbindung an PLS | 25.000 | 25.000 |
| | | | Zwischensumme EMSR | | 148.000 |
| 4 | | | Baunebenkosten | | |
| 4.1 | 1 | Stck. | psch. | 20.000 | 20.000 |
| | | | Gesamtkosten | | |
| 1 | | | Bautechnik | | 203.400 |
| 2 | | | Maschinentechnische Ausrüstung | | 379.000 |
| 3 | | | EMSR-Technik | | 148.000 |
| 4 | | | Baunebenkosten | | 20.000 |

| | | | | | |
|--|----------|---------------------|--------------------------------|--|---------------------------------|
| | | | | | |
| | | | Summe, netto | | 750.400 |
| | | | zzgl. MWSt. | | 142.576 |
| | | | Summe, brutto | | 892.976 |
| Berechnung der Jahreskosten aus Investition | | | | | |
| Abschreibungs- dauer | Zinssatz | Tilgungs- faktor | | | Jahres- kosten aus Invest |
| a | % | | | | |
| 30 | 3 | 0,05102 | Bautechnik | | 10.377 |
| 15 | 3 | 0,08377 | Maschinentechnische Ausrüstung | | 31.749 |
| 10 | 3 | 0,1172 | EMSR-Technik | | 17.346 |
| 30 | 3 | 0,05102 | Baunebenkosten | | 1.020 |
| | | | Summe, netto | | 60.492 |
| | | | zzgl. MWSt. | | 11.494 |
| | | | Summe, brutto | | 71.986 |

| Betriebskosten Ozonung | | | | | |
|-----------------------------------|--|-------|---------------|------------|-------------|
| Jährlich behandelte Abwassermenge | | | 3.000.000 | m3 | entspr. JAM |
| angeschlossene EW | | | 35.000 | | |
| spez. Strompreis | | | 15 | ct/kWh | |
| zu erzeugende Ozonmasse | | | 15.000 | kg/a | |
| | | | | | |
| Stromkosten | | | | | |
| erf. el. Arbeit für Ozonerzeugung | | | 150.000 | kWh/a | |
| erf. el. Arbeit für Rührwerke | | | 17.520 | kWh/a | |
| erf. el. Arbeit für Kühlung | | | 13.140 | kWh/a | |
| | | | | | |
| Elektrische Arbeit | | | 180.660 | kWh/a | |
| spez. Strompreis | | | 15 | ct/kWh | |
| | | | | | |
| Summe Stromkosten | | | 27.099 | €/a | |
| | | | | | |
| sonst. Verbrauchsstoffe | | | | | |
| Sauerstoff | | 10 | kg/kg | | |
| spez. Kosten O2 | | 150 | €/t | | |
| Kosten Sauerstoff | | | 22.500 | €/a | |
| | | | | | |
| Wartung und Instandhaltung | | | | | |
| Bautechnik | | | 1% | 2.034 | €/a |
| Maschinen- und E-Technik | | | 4% | 21.080 | €/a |
| | | | | | |
| Summe Wartung und Instandhaltung | | | 23.114 | €/a | |
| | | | | | |
| Personalkosten | | | | | |
| erf. Aufwand | | 40 | h/Monat | | |
| h/(P*a) | | 1800 | h/a | | |
| anteilige Personen | | 0,27 | P | | |
| spez. Personalkosten | | 50000 | €/a | | |
| | | | | | |
| Summe Personalkosten | | | 13.333 | €/a | |
| | | | | | |
| Zusammenfassung: | | | | | |
| Stromkosten | | | 27.099 | €/a | |
| sonst. Verbrauchsstoffe | | | 22.500 | €/a | |
| Wartung und Instandhaltung | | | 23.114 | €/a | |
| Personalkosten | | | 13.333 | €/a | |
| | | | | | |
| Summe Betriebskosten | | | 86.046 | €/a | |

| GAK-Adsorption | | | | | |
|-----------------------|------------------------|-------------|--|-----------|-----------|
| Pos. | Anz./ Menge | Dim. | Bezeichnung | EP | GP |
| 1 | | | Bautechnik | | |
| 1.1 | | | Rohrleitungen | | |
| 1.1.1 | 12 | m | GGG-ZM DN 600 | 600 | 7.200 |
| 1.1.2 | 2 Stck. | | Formstücke GG-ZM DN 600 | 1.000 | 2.000 |
| 1.1.3 | 2 Stck. | | Rohrdurchführungen DN 600 | 1.200 | 2.400 |
| 1.1.4 | 20 | m | GGG-ZM DN 800 | 800 | 16.000 |
| 1.1.5 | 0 Stck. | | Fertigteilschacht | 0 | 0 |
| 1.1.6 | 0 | m | B DN 500 | 0 | 0 |
| 1.1.7 | 250 | m2 | Zuwegung | 150 | 37.500 |
| | | | Zwischensumme Rohrleitungen | | 65.100 |
| 1.2 | | | Bauwerke | | |
| 1.2.1 | 2 Stck. | | Armaturenschächte mit Abdeckung, psch. | 500 | 1.000 |
| 1.2.2 | 900 | m3 | Betonbehälter für Filtrationsbecken incl. Keller | 400 | 360.000 |
| 1.2.3 | 80 | m2 | Filterboden mit Düsen | 1.000 | 80.000 |
| 1.2.4 | 100 | m3 | Filtratspeicher | 400 | 40.000 |
| 1.2.5 | 40 | m3 | Raum für NSUV, Anteil GAK-Filtration | 400 | 16.000 |
| 1.2.6 | 240 | m3 | Erstfüllung GAK | 1.000 | 240.000 |
| 1.2.7 | 16 | m3 | Erstfüllung Filtersand Stützschiicht | 200 | 3.200 |
| | | | Zwischensumme Bauwerke | | 740.200 |
| 2 | | | Maschinentechnische Ausrüstung | | |
| 2.1 | 2 Stck. | | Spülwasserpumpen, Q = 180 l/s, H = 5 m | 10.000 | 20.000 |
| 2.2 | 0 Stck. | | Spülluftgebläse | 15.000 | 0 |
| 2.3 | 2 Stck. | | Absperrschieber DN 200 | 800 | 1.600 |
| 2.4 | 2 Stck. | | Rückschlagklappen DN 200 | 1.000 | 2.000 |
| 2.5 | 4 Stck. | | Regelschieber DN 400 | 5.000 | 20.000 |
| 2.6 | 1 Stck. | | Verrohrung des Filterkellers, psch. | 100.000 | 100.000 |
| | | | Zwischensumme Maschinentechn. Ausrüstung | | 143.600 |
| 3 | | | EMSR-Technik | | |
| 3.1 | 4 Stck. | | Höhenstandsmessung | 3.000 | 12.000 |
| 3.2 | 4 Stck. | | Druckmessung | 3.000 | 12.000 |
| 3.3 | 0 Stck. | | FU 35 kW, für Spülluftgebläse | 15.000 | 0 |
| 3.4 | 1 Stck. | | NSUV, psch. | 50.000 | 50.000 |
| 3.5 | 1 Stck. | | SPS mit An- und Einbindung an PLS | 25.000 | 25.000 |
| | | | Zwischensumme EMSR | | 99.000 |
| 4 | | | Baunebenkosten | | |
| 4.1 | 1 Stck. | | psch. | 25.000 | 25.000 |

| Gesamtkosten | | | | | |
|--|----------|-----------------|--------------------------------|--|--------------------------|
| 1 | | | Bautechnik | | 805.300 |
| 2 | | | Maschinentechnische Ausrüstung | | 143.600 |
| 3 | | | EMSR-Technik | | 99.000 |
| 4 | | | Baunebenkosten | | 25.000 |
| | | | Summe, netto | | 1.072.900 |
| | | | zzgl. MWSt. | | 203.851 |
| | | | Summe, brutto | | 1.276.751 |
| Berechnung der Jahreskosten aus Investition | | | | | |
| Abschreibungs-dauer | Zinssatz | Tilgungs-faktor | | | Jahres-kosten aus Invest |
| a | % | | | | |
| 30 | 3 | 0,05102 | Bautechnik | | 41.086 |
| 15 | 3 | 0,08377 | Maschinentechnische Ausrüstung | | 12.029 |
| 10 | 3 | 0,1172 | EMSR-Technik | | 11.603 |
| 30 | 3 | 0,05102 | Baunebenkosten | | 1.276 |
| | | | Summe, netto | | 65.994 |
| | | | zzgl. MWSt. | | 12.539 |
| | | | Summe, brutto | | 78.533 |

| Betriebskosten GAK | | | | | |
|---|-------|---------|----------------|------------|-------------|
| | | | | | |
| Jährlich behandelte Abwassermenge | | | 3.000.000 | m3 | entspr. JAM |
| angeschlossene EW | | | 35.000 | | |
| spez. Strompreis | | | 15 | ct/kWh | |
| | | | | | |
| Stromkosten | | | | | |
| erf. el. Arbeit für Rückspülung | | | 2.080 | kWh/a | |
| erf. el. Arbeit für sonst. Antriebe | | | 4.380 | kWh/a | |
| | | | | | |
| Elektrische Arbeit | | | 6.460 | kWh/a | |
| spez. Strompreis | | | 15 | ct/kWh | |
| | | | | | |
| Summe Stromkosten | | | 969 | €/a | |
| | | | | | |
| sonst. Verbrauchsstoffe | | | | | |
| Ersatz A-Kohle (10%/a) | 24 | m3/a | 24.000 | €/a | |
| Regeneration A-Kohle (1 a ⁻¹) | 240 | m3/a | 72.000 | €/a | |
| | | | | | |
| Wartung und Instandhaltung | | | | | |
| Bautechnik | | 1% | 8.053 | €/a | |
| Maschinen- und E-Technik | | 4% | 9.704 | €/a | |
| | | | | | |
| Summe Wartung und Instandhaltung | | | 17.757 | €/a | |
| | | | | | |
| Personalkosten | | | | | |
| erf. Aufwand | 20 | h/Monat | | | |
| h/(P*a) | 1800 | h/a | | | |
| anteilige Personen | 0,13 | P | | | |
| spez. Personalkosten | 50000 | €/a | | | |
| | | | | | |
| Summe Personalkosten | | | 6.667 | €/a | |
| | | | | | |
| Zusammenfassung: | | | | | |
| Stromkosten | | | 969 | €/a | |
| sonst. Verbrauchsstoffe | | | 96.000 | €/a | |
| Wartung und Instandhaltung | | | 17.757 | €/a | |
| Personalkosten | | | 6.667 | €/a | |
| | | | | | |
| Summe Betriebskosten | | | 121.393 | €/a | |

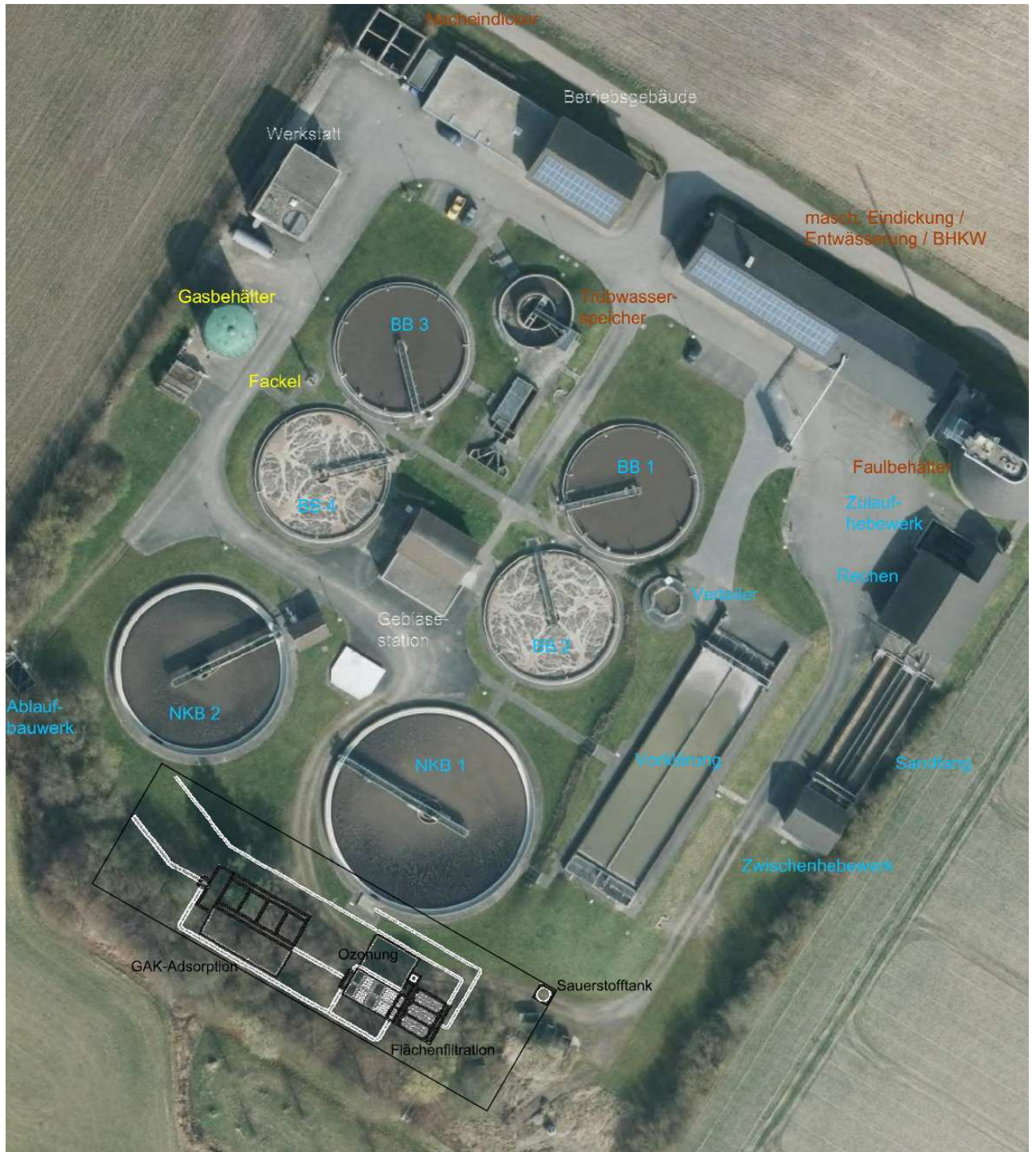
| PAK-Adsorption | | | | | |
|-----------------------|------------------------|-------------|---|-----------|-----------|
| Pos. | Anz./ Menge | Dim. | Bezeichnung | EP | GP |
| 1 | | | Bautechnik | | |
| 1.1 | | | Rohrleitungen | | |
| 1.1.1 | 12 | m | GGG-ZM DN 600 | 600 | 7.200 |
| 1.1.2 | 2 | Stck. | Formstücke GG-ZM DN 600 | 1.000 | 2.000 |
| 1.1.3 | 2 | Stck. | Rohrdurchführungen DN 600 | 1.200 | 2.400 |
| 1.1.4 | 32 | m | GGG-ZM DN 300 | 300 | 9.600 |
| 1.1.5 | 60 | m | PE100, da 630, incl. Formstücke | 500 | 30.000 |
| 1.1.6 | 90 | m | PE100, da 400, incl. Formstücke | 350 | 31.500 |
| 1.1.7 | 500 | m2 | Zuwegung | 150 | 75.000 |
| | | | Zwischensumme Rohrleitungen | | 157.700 |
| 1.2 | | | Bauwerke | | |
| 1.2.1 | 1 | Stck. | Verteilerschacht, psch. | 10.000 | 10.000 |
| 1.2.2 | 750 | m3 | Betonbehälter für Kontaktreaktoren | 400 | 300.000 |
| 1.2.3 | 500 | m3 | zus. Bauwerksanteil Unterbringung Ma.-technik | 600 | 300.000 |
| 1.2.4 | 3000 | m3 | Absetzbecken | 400 | 1.200.000 |
| 1.2.5 | 40 | m3 | Raum für NSUV, Anteil PAK-Filtration | 400 | 16.000 |
| 1.2.6 | 30 | m3 | Silo für PAK | 1.000 | 30.000 |
| 1.2.7 | 1 | Stck. | FM-Lager- und Dosierstation | 35.000 | 35.000 |
| | | | Zwischensumme Bauwerke | | 1.891.000 |
| 2 | | | Maschinentechnische Ausrüstung | | |
| 2.1 | 3 | Stck. | Rührwerke | 10.000 | 30.000 |
| 2.2 | 2 | Stck. | PAK-Dosierschnecken | 5.000 | 10.000 |
| 2.3 | 2 | Stck. | Räumerbrücken | 75.000 | 150.000 |
| 2.4 | 3 | Stck. | Rückförpumpen | 10.000 | 30.000 |
| 2.5 | 5 | Stck. | Gerinneschieber DN 500 | 5.000 | 25.000 |
| 2.6 | 1 | Stck. | Rohre + Armat. Pumpwerk Rückführkohle, psch. | 35.000 | 35.000 |
| 2.7 | 1 | Stck. | FHM-Station | 30.000 | 30.000 |
| | | | Zwischensumme Maschinentechn. Ausrüstung | | 310.000 |
| 3 | | | EMSR-Technik | | |
| 3.1 | 1 | Stck. | Höhenstandsmessung für PAK-Silo | 3.000 | 3.000 |
| 3.2 | 2 | Stck. | MID, DN 300 | 6.000 | 12.000 |
| 3.3 | 3 | Stck. | FU 3 kW, für Rührwerke | 3.500 | 10.500 |
| 3.4 | 2 | Stck. | FU 4 kW, für Rückförpumpen | 5.000 | 10.000 |
| 3.5 | 1 | Stck. | NSUV, psch. | 50.000 | 50.000 |
| 3.6 | 1 | Stck. | SPS-Anteil mit An- und Einbindung an PLS | 20.000 | 20.000 |
| | | | Zwischensumme EMSR | | 105.500 |
| 4 | | | Baunebenkosten | | |
| 4.1 | 1 | Stck. | psch. | 25.000 | 25.000 |

| | | | | | |
|--|----------|-----------------|--------------------------------|--|--------------------------|
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | Gesamtkosten | | |
| 1 | | | Bautechnik | | 2.048.700 |
| 2 | | | Maschinentechnische Ausrüstung | | 310.000 |
| 3 | | | EMSR-Technik | | 105.500 |
| 4 | | | Baunebenkosten | | 25.000 |
| | | | | | |
| | | | Summe, netto | | 2.489.200 |
| | | | | | |
| | | | zzgl. MWSt. | | 472.948 |
| | | | | | |
| | | | Summe, brutto | | 2.962.148 |
| | | | | | |
| | | | | | |
| Berechnung der Jahreskosten aus Investition | | | | | |
| | | | | | |
| Abschreibungs-dauer | Zinssatz | Tilgungs-faktor | | | Jahres-kosten aus Invest |
| a | % | | | | |
| 30 | 3 | 0,05102 | Bautechnik | | 104.525 |
| 15 | 3 | 0,08377 | Maschinentechnische Ausrüstung | | 25.969 |
| 10 | 3 | 0,1172 | EMSR-Technik | | 12.365 |
| 30 | 3 | 0,05102 | Baunebenkosten | | 1.276 |
| | | | | | |
| | | | Summe, netto | | 144.133 |
| | | | | | |
| | | | zzgl. MWSt. | | 27.385 |
| | | | | | |
| | | | Summe, brutto | | 171.519 |

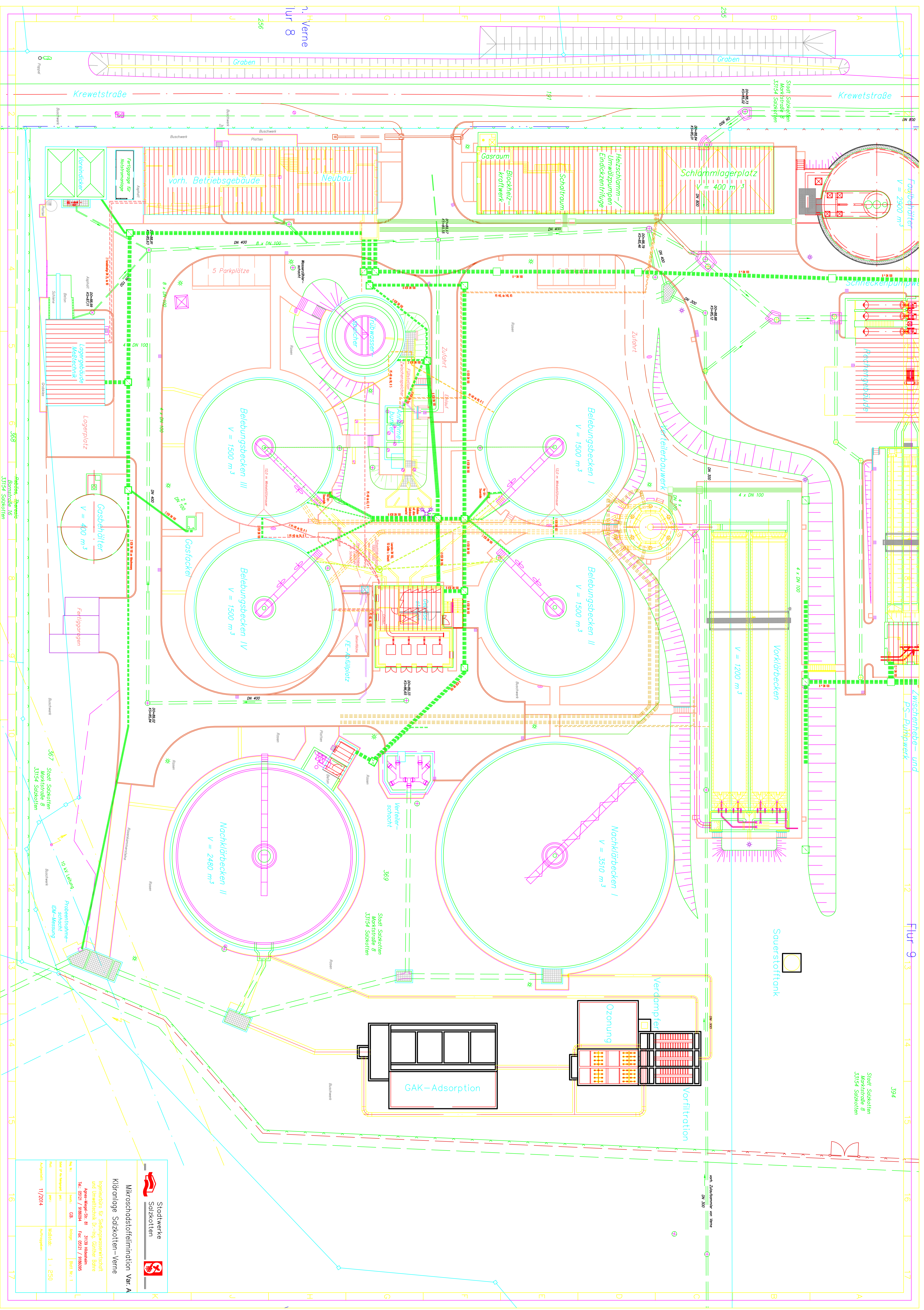
| Betriebskosten PAK | | | | | | |
|--|--|-------|---------|----------------|------------|-------------|
| Jährlich behandelte Abwassermenge | | | | 3.000.000 | m3 | entspr. JAM |
| angeschlossene EW | | | | 35.000 | | |
| spez. Strompreis | | | | 15 | ct/kWh | |
| Stromkosten | | | | | | |
| erf. el. Arbeit für Rührwerke | | | | 52.560 | kWh/a | |
| erf. el. Arbeit für Pumpen Rückführkohle | | | | 52.560 | kWh/a | |
| Elektrische Arbeit | | | | 105.120 | kWh/a | |
| spez. Strompreis | | | | 15 | ct/kWh | |
| Summe Stromkosten | | | | 15.768 | €/a | |
| Verbrauchsstoffe | | | | | | |
| PA-Kohle | | 30000 | kg/a | 45.000 | €/a | |
| FM | | 6000 | kgWS/a | 3.750 | €/a | |
| FHM | | 600 | kgWS/a | 9.000 | €/a | |
| Entsorgung PAK | | 30 | to/a | 15.000 | €/a | |
| Wartung und Instandhaltung | | | | | | |
| Bautechnik | | | 1% | 8.053 | €/a | |
| Maschinen- und E-Technik | | | 4% | 9.704 | €/a | |
| Summe Wartung und Instandhaltung | | | | 17.757 | €/a | |
| Personalkosten | | | | | | |
| erf. Aufwand | | 20 | h/Monat | | | |
| h/(P*a) | | 1800 | h/a | | | |
| anteilige Personen | | 0,13 | P | | | |
| spez. Personalkosten | | 50000 | €/a | | | |
| Summe Personalkosten | | | | 6.667 | €/a | |
| Zusammenfassung: | | | | | | |
| Stromkosten | | | | 15.768 | €/a | |
| Verbrauchsstoffe | | | | 72.750 | €/a | |
| Wartung und Instandhaltung | | | | 17.757 | €/a | |
| Personalkosten | | | | 6.667 | €/a | |
| Summe Betriebskosten | | | | 112.942 | €/a | |

| Zusammenfassung (ohne Zuschuss) | | | | | |
|---|----------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Verfahrenselement | Jahreskosten Invest €/a | Jahreskosten Betrieb €/a | Jahreskosten gesamt €/a | Kosten pro m3 €/m3 | Kosten pro EW €/EW |
| Vorfiltration | 86.439 | 45.223 | 131.662 | 0,044 | 3,76 |
| Ozonung | 71.986 | 86.046 | 158.032 | 0,053 | 4,52 |
| GAK-Adsorption | 78.533 | 121.393 | 199.926 | 0,067 | 5,71 |
| PAK-Adsorption | 171.519 | 112.942 | 284.461 | 0,097 | 8,28 |
| Gesamt (Filtration+Ozonung+ GAK-Adsorption) | 236.958 | 252.662 | 489.620 | 0,163 | 13,99 |
| Gesamt (Ozonung+ PAK-Adsorption + Nachfiltration) | 329.944 | 244.211 | 642.418 | 0,214 | 18,35 |
| Variante Vorfiltration, Ozonung, GAK | | | Variante Ozonung, PAK, Nachfiltration | | |
| Bautechnik | 1.349.300 | | 2.592.700 | | |
| Maschinentechnik | 1.003.600 | | 1.170.000 | | |
| EMSR-Technik | 366.000 | | 372.500 | | |
| Nebenkosten | 65.000 | | 65.000 | | |
| Gesamtkosten | 2.783.900 | | 4.200.200 | | |
| Energie | 43.218 | | 58.017 | | |
| Personal | 22.667 | | 22.667 | | |
| Wartung/Instandhaltung | 68.277 | | 68.277 | | |
| Sauerstoff | 22.500 | | 22.500 | | |
| GAK | 96.000 | | | | |
| PAK+FM+FHM | | | 72.750 | | |
| Einsparungen AbwAG | 64.422 | | 64.422 | | |

| Zusammenfassung (mit 70% Zuschuss) | | | | | |
|---|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Verfahrenselement | Jahreskosten Invest €/a | Jahreskosten Betrieb €/a | Jahreskosten gesamt €/a | Kosten pro m3 €/m3 | Kosten pro EW €/EW |
| Vorfiltration | 25.932 | 45.223 | 71.154 | 0,024 | 2,03 |
| Ozonung | 21.596 | 86.046 | 107.642 | 0,036 | 3,08 |
| GAK-Adsorption | 23.560 | 121.393 | 144.953 | 0,048 | 4,14 |
| PAK-Adsorption | 51.456 | 112.942 | 164.397 | 0,055 | 4,70 |
| Gesamt (Filtration+Ozonung+ GAK-Adsorption) | 71.087 | 252.662 | 323.749 | 0,108 | 9,25 |
| Gesamt (Filtration+Ozonung+ GAK-Adsorption) | 98.983 | 244.211 | 343.194 | 0,114 | 9,81 |



Ortho-Bild mit einmontierter Skizze zur Kombination Vorfiltration / Ozonung / GAK



Stadwerke
Salzkotten

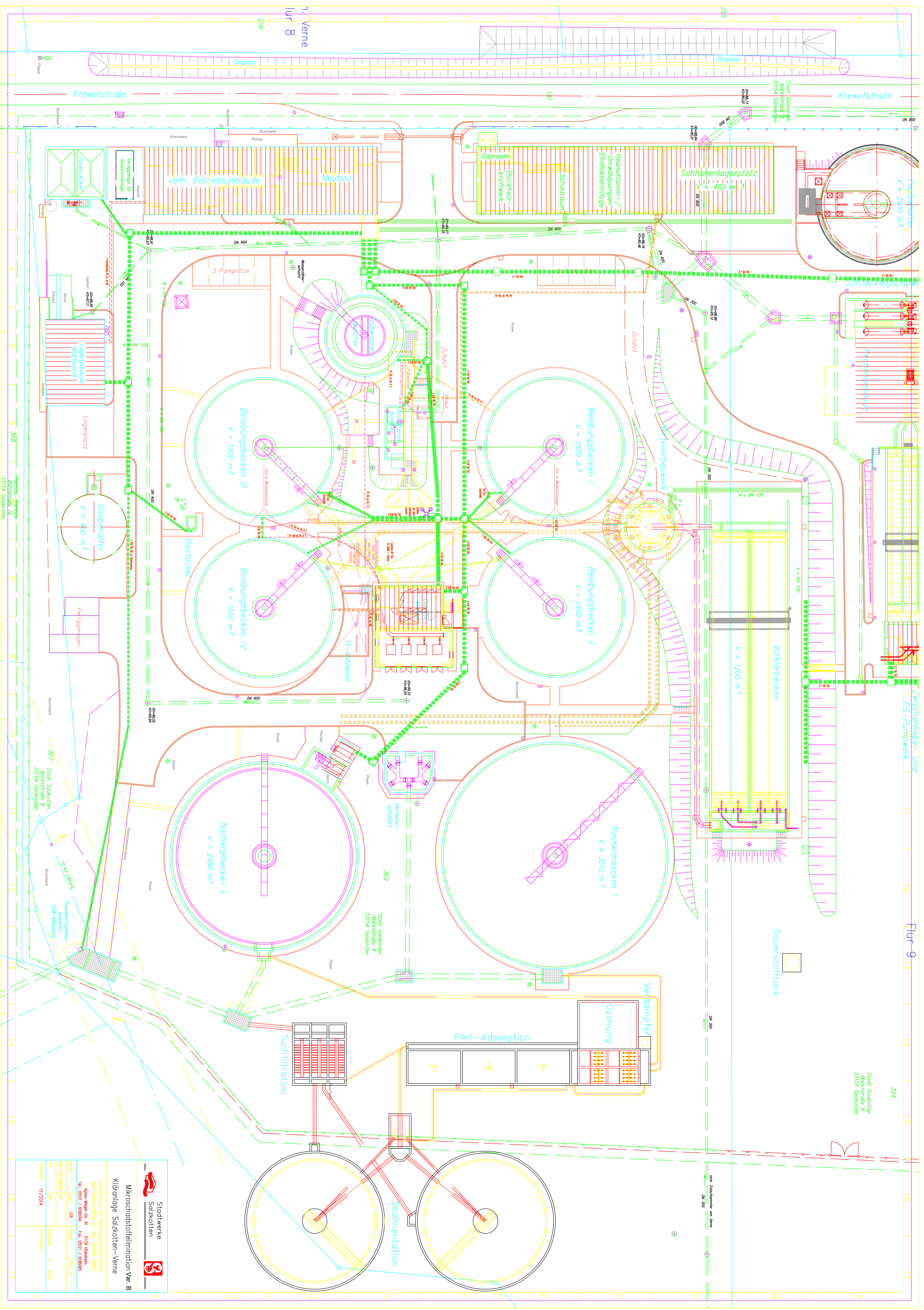
Mikroschadstoffelimination Var. A
Kläranlage Salzkotten-Verne

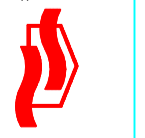
Projektbüro für Sanierungsmaßnahmen
und Investitionen Dr.-Ing. Günter Böhr
Amers-Wege 81 31793 Mühlen
Tel. 05121 / 918934 Fax 05121 / 918935

Objekt: **GS** Menge: Blatt No.: 1
Datei: **GS** Menge: Blatt No.: 1

Ausgabedatum: **11/2014** Maßstab: **1 : 250**
Kartographie:

11/2014




Stadtwerte Salzkotten
 Ingenieurbüro für Sanitär- und Umwelttechnik
 Am Markt 10, 71710 Salzkotten
 Tel. 07141 / 918934 Fax 07141 / 918935
 E-Mail: info@stadtwerte.de

Mikroschadstoffelimination Var. B
 Kläranlage Salzkotten-Verne
 Auftraggeber: 11/2014
 Maßstab: 1 : 250
 Ausgabedatum: 11/2014

| Objekt | Objekt-Nr. | Objekt-Nr. | Objekt-Nr. | Objekt-Nr. |
|--------|------------|------------|------------|------------|
| Objekt | Objekt-Nr. | Objekt-Nr. | Objekt-Nr. | Objekt-Nr. |
| Objekt | Objekt-Nr. | Objekt-Nr. | Objekt-Nr. | Objekt-Nr. |
| Objekt | Objekt-Nr. | Objekt-Nr. | Objekt-Nr. | Objekt-Nr. |
| Objekt | Objekt-Nr. | Objekt-Nr. | Objekt-Nr. | Objekt-Nr. |

Stadt Salzkotten
 Marktstraße 8
 33154 Salzkotten