

Machbarkeitsstudie

4. Reinigungsstufe

AWV Feldbach – Mittleres Raabtal

ENDBERICHT - LANGFASSUNG



AUFTRAGGEBER

Amt der Steiermärkischen Landesregierung
Abteilung 14 Wasserwirtschaft, Ressourcen und Nachhaltigkeit
Wartingergasse 43
8010 Graz

DATUM

03.08.2022

SEITENANZAHL

Bericht: 122
Anhang: 12

VERFASSER

DI Sandra Breu

PRÜFER

Ing. Bernhard Schilcher



LUGITSCH & PARTNER
ZIVILTECHNIKER GMBH
Mozartweg 11-8330 Feldbach
office@zt.lugitsch.at +43 3152 46 34

Stempel / Unterschrift

Inhalt

1	Einleitung und Allgemeines.....	10
2	Zielsetzung und Aufgabenstellung	11
3	Allgemeiner Hintergrund.....	12
3.1	Die 4. Reinigungsstufe im EU-Raum	12
3.1.1	Strategie und aktueller Stand	12
3.1.2	Leitparameter	16
3.2	Verfügbare Technologien zur Mikroschadstoffelimination	18
3.2.1	Adsorptive Verfahren.....	18
3.2.2	Ozon (Oxidatives Verfahren)	20
3.2.3	Sonstige Verfahren.....	21
3.3	Bewertung der Behandlungsverfahren für den Einsatz auf kommunalen Kläranlagen	24
3.3.1	Verfahrensbewertung	24
3.3.2	Kriterien zur Verfahrenswahl	29
4	Kläranlagen des AWV Feldbach – Mittleres Raabtal	32
4.1	Einzugsgebiet.....	32
4.2	VKA Feldbach-Raabau.....	33
4.3	VKA Fladnitz im Raabtal.....	36
5	Kläranlagen mit bestehender 4. Reinigungsstufe in der EU.....	38
5.1	Anlagen im Bereich um 40.000 EW	38
5.2	Anlagen im Bereich um 12.000 EW	39
6	Bereits durchgeführte Machbarkeitsstudien in Deutschland und der Schweiz	41
6.1	Anlagen im Bereich um 40.000 EW	42
6.2	Anlagen im Bereich um 12.000 EW	45
7	Varianten und Kriterien für die VKA Feldbach-Raabau und VKA Fladnitz im Raabtal	48
7.1	Mögliche Varianten.....	48
7.2	Ausschluss- und Bewertungskriterien	52
8	VKA Feldbach-Raabau	57
8.1	Kostenermittlung: Literatur und Daten aus Deutschland und der Schweiz	57
8.1.1	Investitionskosten.....	57
8.1.2	Betriebskosten.....	58

8.1.3	Jahreskosten	59
8.2	Auslegung und Grobkostenschätzung der ausgewählten Anlagenkonzepte	67
8.2.1	Variante A.1: PAK-Dosierung in Belebungsbecken (KGS als Nachreinigung)	70
8.2.2	Variante B.1: GAK-Filter (KGS als Vorfiltration)	76
8.2.3	Variante C.2: Kombination aus Ozon und GAK-Filter (bzw. BAK)	82
8.3	Vergleich und Bewertung der ausgewählten Anlagenkonzepte	90
8.4	Vorzugsvariante	96
9	VKA Fladnitz im Raabtal	98
9.1	Technisch und wirtschaftlich relevante Anlagenkonzepte	98
9.2	Kostenermittlung: Literatur und Daten aus Deutschland	98
9.2.1	Investitionskosten	100
9.2.2	Betriebskosten	101
9.2.3	Jahreskosten	102
10	Gewässerschutz	110
10.1	Bestand	110
10.2	Handlungsbedarf beim Gewässer	113
10.3	Handlungsbedarf bei den Kläranlagen	114
11	Zusammenfassung und Ausblick	115
12	Literaturverzeichnis	119
13	Anhang	123
	Anhang A Spurenstoffscreening Raab Umweltbundesamt 2017/2018	A
	Anhang B Investitions- und Betriebskosten einer 4. Reinigungsstufe im Bereich um 40.000 EW	A
	Anhang C Investitions- und Betriebskosten einer 4. Reinigungsstufe im Bereich um 12.000 EW	A
	Anhang D Energetische und ökologische Betrachtung von PAK, GAK und Ozonung	A

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Vorgehensweise des Bundeslandes Baden-Württemberg (Deutschland) zur Entscheidung bezüglich einer 4. Reinigungsstufe	14
Abbildung 2	Ausbaugrößen der Kläranlagen mit 4. Reinigungsstufe in Betrieb bzw. Planung/Bau in Deutschland (Stand August 2020).....	15
Abbildung 3	Schema der Kombination aus Membranfiltration und GAK	22
Abbildung 4	Zusammenhang von Ozon- und AOP-Prozessen	22
Abbildung 5	Schema Retentionsbodenfilter	23
Abbildung 6	Verschiedene Varianten zur Spurenstoffentfernung auf kommunalen Kläranlagen mit Vorschlag für Österreich	29
Abbildung 7	Einzugsgebiete der Kläranlagen im Raum um Feldbach.....	32
Abbildung 8	Luftbild der VKA Feldbach-Raabau.....	33
Abbildung 9	Schema der VKA Feldbach-Raabau	34
Abbildung 10	Ergebnis des Arzneimittelscreenings im Oktober 2019 (VKA Feldbach-Raabau).....	35
Abbildung 11	Luftbild der VKA Fladnitz im Raabtal.....	36
Abbildung 12	Schema der VKA Fladnitz im Raabtal	37
Abbildung 13	Verteilung der Technologien zur Spurenstoffentfernung bei Kläranlagen von 30.000 bis 55.000 EW	38
Abbildung 14	Verteilung der Technologien zur Spurenstoffentfernung bei Kläranlagen von 9.000 bis 16.000 EW	40
Abbildung 15	Vorzugsvarianten der Studien in Tabelle 7 bezüglich Verfahren zur 4. Reinigungsstufe (30.000 bis 55.000 EW)	43
Abbildung 16	Vorzugsvarianten der Studien in Tabelle 8 bezüglich Verfahren zur 4. Reinigungsstufe (9.000 bis 16.000 EW)	45
Abbildung 17	Verfahrensschema Variante A.1	48
Abbildung 18	Verfahrensschema Variante A.2	49
Abbildung 19	Verfahrensschema Variante B.1	50
Abbildung 20	Verfahrensschema Variante B.2	50
Abbildung 21	Verfahrensschema Variante C.1	51
Abbildung 22	Verfahrensschema Variante C.2	51
Abbildung 23	Grafische Darstellung der Gewichtung der spezifischen Bewertungskriterien zur Gewichtung der Verfahren (Varianten Betrieb und Gewässerschutz)	53
Abbildung 24	Grafische Darstellung der Investitionskosten um 40.000 EW	58
Abbildung 25	Grafische Darstellung der Betriebskosten um 40.000 EW.....	59
Abbildung 26	Kostenzusammenstellung KOM-M.NRW Stand 2015 (KOM-M.NRW (2015, S. 27) bearbeitet)	60
Abbildung 27	Kostenzusammenstellung KOM-M.NRW Stand 2016 (KOM-M.NRW (2016, S. 59) bearbeitet)	60
Abbildung 28	Kostenzusammenstellung DWA T3/2015 (DWA (2015, S. 37) bearbeitet)	61
Abbildung 29	Vergleich der spezifischen Jahreskosten für eine 4. Reinigungsstufe in Bezug auf die Wassermenge im Zulauf der ARA (im Bereich um 40.000 EW)	62
Abbildung 30	Vergleich der spezifischen Jahreskosten für eine 4. Reinigungsstufe in Bezug auf die in der 4. Reinigungsstufe behandelte Wassermenge (im Bereich um 40.000 EW)	62

Abbildung 31	Abwassermenge der VKA Feldbach-Raabau in den Jahren 2020 und 2021.....	67
Abbildung 32	Grundstücke um die VKA Feldbach-Raabau.....	69
Abbildung 33	Betonbauweise eines kontinuierlich gespülten Sandfilters (Nordic Water Products AB., n.d.).....	70
Abbildung 34	Darstellung eines Flexbed-Filters und des Filtermaterials.....	76
Abbildung 35	Spezifischer Stromverbrauch einer GAK-Stufe in Bezug auf die in der GAK gefilterten Wassermenge (Bolle & Pinnekamp, 2015, S. 9).....	82
Abbildung 36	Spezifischer Strombedarf der Ozonung in Bezug auf die in der Ozonung behandelte Abwassermenge (Bolle & Pinnekamp, 2015, S. 4).....	90
Abbildung 37	Jahreskosten aus der Grobkostenschätzung der Varianten A.1, B.1 und C.2.....	91
Abbildung 38	Spezifische Jahreskosten bezogen auf die in der 4. Reinigungsstufe behandelte Abwassermenge mit den Varianten A.1, B.1 und C.2.....	92
Abbildung 39	Spezifische Jahreskosten bezogen auf die Zulaufmenge der ARA mit den Varianten A.1, B.1 und C.2.....	92
Abbildung 40	Grafische Darstellung der Variantenbewertung für die VKA Feldbach-Raabau (Version Betrieb).....	95
Abbildung 41	Grafische Darstellung der Variantenbewertung für die VKA Feldbach-Raabau (Version Gewässerschutz).....	95
Abbildung 42	Mögliche ungefähre Lage des PAK-Silos.....	97
Abbildung 43	Mögliche ungefähre Lage der Sandfilter.....	97
Abbildung 44	Abwassermenge der VKA Fladnitz im Raabtal in den Jahren 2020 und 2021.....	99
Abbildung 45	Grundstücke um die VKA Fladnitz im Raabtal.....	99
Abbildung 46	Grafische Darstellung der Investitionskosten um 12.000 EW.....	101
Abbildung 47	Grafische Darstellung der Betriebskosten um 12.000 EW.....	102
Abbildung 48	Kostenzusammenstellung KOM-M.NRW Stand 2015 (KOM-M.NRW (2015, S. 27) bearbeitet).....	103
Abbildung 49	Kostenzusammenstellung KOM-M.NRW Stand 2016 (KOM-M.NRW (2016, S. 59) bearbeitet).....	103
Abbildung 50	Kostenzusammenstellung DWA T3/2015 (DWA (2015, S. 37) bearbeitet) ..	104
Abbildung 51	Vergleich der spezifischen Jahreskosten für eine 4. Reinigungsstufe in Bezug auf die Wassermenge im Zulauf der ARA (im Bereich um 12.000 EW)	105
Abbildung 52	Vergleich der spezifischen Jahreskosten für eine 4. Reinigungsstufe in Bezug auf die in der 4. Reinigungsstufe behandelte Wassermenge (im Bereich um 12.000 EW).....	105
Abbildung 53	Anteile der Fracht aus Kläranlagenablauf an der Gesamtfracht in der Raab.....	111
Abbildung 54	Kläranlagen in der Südoststeiermark.....	112
Abbildung 55	Bewertung der Varianten A.1, B.1 und C.2 mit den Bewertungsvarianten "Betrieb" und "Gewässerschutz".....	117

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Gegenüberstellung der Leitparameter	17
Tabelle 2	Vor- und Nachteile der Verfahren zur Spurenstoffentfernung mit PAK, GAK und Ozon	26
Tabelle 3	Bewertung der Nachbehandlungsmethoden Ozonung	28
Tabelle 4	Bewertungsstrategien für die Verfahrenswahl in Machbarkeitsstudien	30
Tabelle 5	Auflistung von Kläranlagen mit 4. Reinigungsstufe (Betrieb, Planung/Bau) im Bereich von 30.000 bis 55.000 EW in Deutschland und der Schweiz, Datenquellen: (VSA, 2019) und (KomS BW, 2021)	38
Tabelle 6	Auflistung von Kläranlagen mit 4. Reinigungsstufe (Betrieb, Planung/Bau) im Bereich von 9.000 bis 16.000 EW in Deutschland, Frankreich und der Schweiz,	40
Tabelle 7	Auflistung von Machbarkeitsstudien im Bereich von 30.000 bis 55.000 EW in Deutschland,	43
Tabelle 8	Auflistung von Machbarkeitsstudien im Bereich von 9.000 bis 16.000 EW in Deutschland,	46
Tabelle 9	Verfahrensbestandteile Variante A.1	48
Tabelle 10	Verfahrensbestandteile Variante A.2	49
Tabelle 11	Verfahrensbestandteile Variante B.1	49
Tabelle 12	Verfahrensbestandteile Variante B.2	50
Tabelle 13	Verfahrensbestandteile Variante C.1	51
Tabelle 14	Verfahrensbestandteile Variante C.2	51
Tabelle 15	Bewertung der Kriterien für die VKA Feldbach-Raabau und VKA Fladnitz im Raabtal	55
Tabelle 16	Investitionskosten für eine 4. Reinigungsstufe im Bereich um 40.000 EW (Baukostenindex basierend auf 2021)	57
Tabelle 17	PAK Anlagen im Bereich um 40.000 EW spezifische Kosten	63
Tabelle 18	GAK Anlagen im Bereich um 40.000 EW spezifische Kosten	64
Tabelle 19	Ozon Anlagen im Bereich um 40.000 EW spezifische Kosten	65
Tabelle 20	Auslegungswassermenge (VKA Feldbach-Raabau)	68
Tabelle 21	Grundlagen für die Betriebskostenschätzung	70
Tabelle 22	Variante A.1: Auslegung PAK, Fäll- und Flockungshilfsmittel	71
Tabelle 23	Variante A.1: Auslegung kontinuierlich gespülter Sandfilter	72
Tabelle 24	Variante A.1: Grobkostenschätzung Investitionskosten	72
Tabelle 25	Variante A.1: Grobkostenschätzung Betriebskosten	74
Tabelle 26	Variante A.1: Grobkostenschätzung Jahreskosten – Betrachtungszeitraum 30 Jahre	75
Tabelle 27	Variante B.1: Auslegung kontinuierlich gespülter GAK- und Sandfilter	77
Tabelle 28	Variante B.1: Grobkostenschätzung Investitionskosten	78
Tabelle 29	Variante B.1: Grobkostenschätzung Betriebskosten	80
Tabelle 30	Variante B.1: Grobkostenschätzung Jahreskosten – Betrachtungszeitraum 30 Jahre	81
Tabelle 31	Variante C.2: Auslegung Ozonung	84
Tabelle 32	Variante C.2: Auslegung kontinuierlich gespülter BAK-Filter	86
Tabelle 33	Variante C.2: Grobkostenschätzung Investitionskosten	86
Tabelle 34	Variante C.2: Grobkostenschätzung Betriebskosten	88

Tabelle 35 Variante C.2: Grobkostenschätzung Jahreskosten – Betrachtungszeitraum 30 Jahre.....	89
Tabelle 36 Finanzieller Variantenvergleich – Betrachtungszeitraum 30 Jahre	90
Tabelle 37 Bewertung der Varianten für die VKA Feldbach-Raabau.....	93
Tabelle 38 Investitionskosten für eine 4. Reinigungsstufe im Bereich um 12.000 EW (Baukostenindex basierend auf 2021)	100
Tabelle 39 PAK Anlagen im Bereich um 12.000 EW spezifische Kosten	106
Tabelle 40 GAK Anlagen im Bereich um 12.000 EW spezifische Kosten.....	107
Tabelle 41 Ozon Anlagen im Bereich um 12.000 EW spezifische Kosten.....	108
Tabelle 42 Kriterien für Grenzwerte im Sondermessprogramm Arzneimittelwirkstoffe und Hormone in Fließgewässern	110
Tabelle 43 Vergleich der Jahreskosten aus der Literatur und den Berichten zu bestehenden Anlagen und anderen Machbarkeitsstudien	115
Tabelle 44 Jahreskosten als Ergebnis der Grobkostenschätzung für die VKA Feldbach-Raabau	116

Tabellenverzeichnis des Anhangs

Tabelle A 1 Spurenstoffscreening Raab bei Neumarkt Daten 2017/2018	A
Tabelle A 2 Investitions- und Betriebskosten von PAK-Anlagen im Bereich um 40.000 EW.....	A
Tabelle A 3 Investitions- und Betriebskosten von GAK-Anlagen im Bereich um 40.000 EW.....	B
Tabelle A 4 Investitions- und Betriebskosten von Ozon-Anlagen im Bereich um 40.000 EW.....	C
Tabelle A 5 Investitions- und Betriebskosten von PAK-Anlagen im Bereich um 12.000 EW.....	A
Tabelle A 6 Investitions- und Betriebskosten von GAK-Anlagen im Bereich um 12.000 EW.....	B
Tabelle A 7 Investitions- und Betriebskosten von Ozon-Anlagen im Bereich um 12.000 EW.....	B
Tabelle A 8 Zusammenfassung der energetischen Betrachtung von PAK, GAK und Ozonung von Bolle und Pinnekamp (2015, S. 189).....	A
Tabelle A 9 CO ₂ -Emissionen für Ozonung, PAK und GAK von PAK, GAK und Ozonung von Bolle und Pinnekamp (2015, S. 105 ff und 117)	A

Abkürzungen

AFS	Abfiltrierbare Stoffe
AGE	Administration de la gestion de l'eau
AOP	Advanced Oxidation Processes
ARA	Abwasserreinigungsanlage
BAFU	Bundesamt für Umwelt (Schweiz)
BAK	Biologisch aktivierte GAK
BB	Belebungsbecken
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung (Deutschland)
BPI	Baupreisindex
BVT	Durchgesetzte Bettvolumina (Bed Volume Treated)
BW	Baden-Württemberg
BY	Bayern
CO _{2e}	CO ₂ -Äquivalent
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
DOC	Gelöster Organischer Kohlenstoff (Dissolved Organic Carbon)
DEQ	Diuron-Äquivalenzkonzentration
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
EEQ	β-Östradiol-Äquivalentkonzentration
EBCT	Leerbettkontaktzeit eines Filters (Empty Bed Contact Time)
EU	Europäische Union
EW	Einwohnerwert
FAA	Formylamino-antipyrin
FB	Festbett
FHM	Flockungshilfsmittel
FM	Fällmittel
FXB	Flexbed-Filter
GAK	Granulierte Aktivkohle
GOW	gesundheitlicher Orientierungswert des deutschen Umweltbundesamtes
GSchG	Gewässerschutzgesetz (Schweiz)
GSchV	Gewässerschutzverordnung (Schweiz)
GZÜV	Gewässerzustandsüberwachungsverordnung
H ₂ O ₂	Wasserstoffperoxid
JD-UQN	Jahresdurchschnitts-Umweltqualitätsnormen
JK	Jahreskosten
KB	Kontaktbecken
KG	Kontinuierlich gespült
KGS	Kontinuierlich gespülter Sandfilter
KOM-M.NRW	Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe Nordrhein-Westfalen

KomS BW	Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg
LANUV	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
LOX	Flüssigsauerstoff (Liquid Oxygen), der zur Ozonerzeugung verwendet wird
MNQ	Mittel aller Niederwasser im betrachteten Zeitraum
MQ	Mittlerer Abfluss im betrachteten Zeitraum
0,5*MQ	Näherungsweise der Median des Abflusses, wenn das 50 Perzentil nicht bekannt
NH ₄ -N	Ammonium-Stickstoff
NKB	Nachklärbecken
NO ₂ -N	Nitrit-Stickstoff
NO ₃ -N	Nitrat-Stickstoff
NRW	Nordrhein-Westfalen
n.s.	Nicht spezifiziert
O ₃	Ozon
OH-Ionen	Hydroxyl-Ionen
OH-Radikale	Hydroxyl-Radikale
PAK	Pulverisierte Aktivkohle
P _{ges}	Gesamtposphor
PNEC	Predicted No Effect Concentration
PO ₄ -P	Ortho-Phosphat-Phosphor
PSA	Pressure Swing Adsorption
QK-chron	Chronisches Qualitätskriterium
QZV	Qualitätszielverordnung
RBF	Retentionsbodenfilter
RSSCT	Kleinfilterschnelltest (Rapid Small-Scale Column Test)
SB	Sedimentationsbecken
ST	Schönungsteich
T	Temperatur in °C
TF	Tuchfilter
TiO ₂	Titandioxid
T bzw. TS	Teilstrom
TSS	Feststoff
TW	Trockenwetter
TW-TW	Toleranzwerte für Säuglinge in Trinkwasser
UBA	Umweltbundesamt
UV	Ultraviolettstrahlung
UVEK	Eidgenössischen Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (Schweiz)
VKA	Verbandskläranlage
V bzw. VS	Vollstrom
VS	Vollstrom
VSA	Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute

1 Einleitung und Allgemeines

Neue Entwicklungen und Erkenntnisse zu den Spurenstoffen im Wasserkreislauf - Mikroschadstoffe, hormonaktive Substanzen, Medikamente, Keime, Bakterien, Mikroplastik etc. - können eine weitergehende Abwasserreinigung zur Folge haben. Bei der Herstellung, Verwendung und Entsorgung von Chemikalien gelangen Teile davon durch verschiedene Eintragspfade auch in die Gewässer. Sie werden Spurenstoffe oder auch Mikroverunreinigungen genannt, da sie nur in sehr geringen Mengen in den Gewässern vorkommen.

Ein Eintragspfad dieser Stoffe sind kommunale Kläranlagen, da viele der Chemikalien durch die üblichen physikalischen, chemischen und biologischen Reinigungsstufen nicht oder kaum entfernt werden können. Die sogenannte 4. Reinigungsstufe beschäftigt sich mit der Elimination der anthropogenen Spurenstoffe. Es gibt verschiedene Technologien, die zur Spurenstoffentfernung genutzt werden können, die am weitesten verbreiteten Methoden beruhen auf pulverisierter Aktivkohle (PAK), granulierter Aktivkohle (GAK) und Ozon.

In Deutschland und der Schweiz wurden in den vergangenen Jahren die Anforderungen an Kläranlagen hinsichtlich der Spurenstoffentfernung verschärft. In Zukunft wird der Spurenstoffeintrag in die Gewässer daher vermutlich auch in Österreich gesetzlich geregelt werden. Derzeit ist allerdings für Österreich noch kein Konzept bezüglich Leitparameter und deren Grenzwerte vorliegend.

Der Abwasserverband Feldbach – Mittleres Raabtal umfasst zwei Verbandskläranlagen (VKA) eine in Fladnitz im Raabtal mit einer Ausbaugröße von 12.000 EW (bei Flusskilometer 255) und die VKA Feldbach-Raabau (40.000 EW) (bei Flusskilometer 244). Die Raab als Vorfluter für die Einleitung der gereinigten Abwässer des AWW Feldbach - Mittleres Raabtal hat eine mittlere Wasserführung von rund 5 m³/s und ist im Zusammenhang mit den vielfältigen Nutzungen durch Wasserkraftanlagen, Landwirtschaft, Industrie etc. sowie den diesbezüglichen Abstimmungen mit dem Nachbarland Ungarn ein Gewässer mit besonderen Anforderungen.

In der 2019 gestarteten Raabenquete werden sowohl die Vergangenheit und der Ist-Zustand als auch die Zukunft der Raab betrachtet. Im Zuge der Zukunftsenquete ist auch diese Studie zur 4. Reinigungsstufe für den Abwasserverband Feldbach – Mittleres Raabtal angesiedelt, die im Auftrag des Amtes der Steiermärkischen Landesregierung, Abteilung 14 von der Fa. Lugitsch und Partner ZT GmbH durchgeführt wurde.

2 Zielsetzung und Aufgabenstellung

Das Ziel dieser Machbarkeitsstudie ist auszuarbeiten, welche Methoden der Spurenstoffentfernung für die VKA Feldbach-Raabau und die VKA Fladnitz im Raabtal am besten geeignet sind.

Der Fokus der Recherche liegt auf bereits bestehenden Anlagen und anderen Machbarkeitsstudien zur 4. Reinigungsstufe auf kommunalen Kläranlagen mit einer ähnlichen Ausbaugröße, vor allem in Deutschland und der Schweiz.

Aus dieser Datengrundlage sollen unterschiedliche Möglichkeiten für eine 4. Reinigungsstufe auf der VKA Feldbach-Raabau abgeleitet werden. Dabei steht vor allem die technische und wirtschaftliche Umsetzbarkeit im Vordergrund. Daraus werden drei Varianten ausgewählt, um dafür eine Grobkostenschätzung zu erstellen. Anhand einiger Bewertungskriterien, die unter anderem auch den Grobkostenschätzwert enthalten, sollen die Varianten mit zwei unterschiedlichen Schwerpunkten bewertet werden. Für die ermittelte Vorzugsvariante wird eine mögliche ungefähre Lage auf dem Betriebsgelände der VKA Feldbach-Raabau ausgewiesen.

Im Zuge dieser Arbeit sollen ebenfalls Informationen zu Nähr- und Spurenstoffen in der Raab ausgewertet werden, um darzustellen, welche in der Raab in besonders hohen Konzentrationen vorliegen.

Grundsätzlich sollte bei der Diskussion um die Kosten einer Spurenstoffentfernung auch auf mögliche Folgekosten für den Vorfluter eingegangen werden. Diese können sich zum Beispiel durch Effekte der Mikroschadstoffe auf das Ökosystem oder das Grundwasser ergeben. Dies wird im Rahmen dieser Studie nur sehr eingeschränkt betrachtet.

3 Allgemeiner Hintergrund

Ein Teil der Spurenstoffe kann bereits durch den heutigen Stand der Technik auf kommunalen Kläranlagen entfernt werden. Dies geschieht durch Strippung in der Belebung, biologischem Abbau oder Adsorption an die Schlammmatrix. Zu den großteils entfernbaren Bestandteilen zählt zum Beispiel das Schmerzmittel Ibuprofen. Genaueres dazu ist im DWA-Themenband T3/2015 (DWA, 2015) nachzulesen.

Für eine weitergehende Entfernung von Spurenstoffen gibt es unterschiedliche Technologien. Davon haben sich bisher vor allem die Ozonung und der Einsatz von Aktivkohle in granulierter oder pulverisierter Form auf einigen Anlagen als praktikabel erwiesen.

3.1 Die 4. Reinigungsstufe im EU-Raum

3.1.1 Strategie und aktueller Stand

Die Strategie der Europäischen Union (EU) zum Thema Spurenstoffe wurde im März 2019 veröffentlicht ([Strategie EU](#)). Dies lässt darauf schließen, dass in den kommenden Jahren auch in Österreich zumindest für bestimmte Kläranlagen eine 4. Reinigungsstufe verpflichtend werden kann. Bei der Überarbeitung der „Kommunalen Abwasserrichtlinie“ (91/271/EWG) liegt der Fokus unter anderem auch auf der Spurenstoffentfernung ([Factsheet](#)). Dabei wird eine der drei folgenden Strategien gewählt werden (Übersetzung von Müller-Rechberger (2022)):

- Strategie „National“: Leitfaden der EU-Kommission zur Spurenstoffentfernung. Mitgliedstaaten wenden einen risikobasierten Ansatz zur Verringerung der Verschmutzung durch Spurenstoffe an.
- Strategie „Mittelweg“: Mitgliedstaaten stellen sicher, dass ARAs > 100.000 EW und ARAs, die in Gewässer mit Risiko einleiten, über eine 4. Reinigungsstufe verfügen, die auf EU-Ebene festgelegte Standards erfüllt. Betreiber anderer ARAs müssen die Toxizität des Abwassers überwachen und gegebenenfalls behandeln.
- Strategie „Zentral“: Mitgliedstaaten stellen sicher, dass ARAs > 10.000 EW Spurenstoffe überwachen und über eine 4. Reinigungsstufe verfügen, die auf EU-Ebene festgelegte Standards erfüllt.

In Österreich gibt es bislang keine großtechnische 4. Reinigungsstufe auf einer kommunalen Kläranlage. In anderen europäischen Ländern sind bereits einige kommunale Kläranlagen mit einer Spurenstoffentfernung ausgerüstet. Daher wird im Rahmen dieses Kapitels ein Blick auf diese Länder geworfen. Der Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute (VSA) hat eine interaktive Karte mit europaweiten Projekten zur 4. Reinigungsstufe (Stand 2019) erstellt. Diese umfasst Anlagen im Betrieb, Anlagen in Planung/Bau und Forschungsprojekte mit den Verfahren Ozonung, PAK, GAK, Ferrat und Verfahrenskombinationen. Die Karte ist entweder über [ARA Ausbau - VSA Micropoll](#) oder direkt über [Übersichtskarte Spurenstoffelimination auf ARA – Google My Maps](#) erreichbar.

Launay und Hildebrand (2021) betonen, dass sowohl in Deutschland als auch der Schweiz der Fokus nicht nur auf der Eliminierung der Spurenstoffe aus dem Abwasser liegt. Sondern vor allem auch auf der Vermeidung an der Quelle.

Die Beweggründe, Strategien und der aktuelle Stand im EU-Raum stellen sich wie folgt dar.

DEUTSCHLAND

- Bislang gibt es in Deutschland keine einheitliche Vorgehensweise oder Vorgaben zur Implementierung der Spurenstoffentfernung auf kommunalen Kläranlagen. Die DWA empfiehlt den Aufsichtsbehörden mindestens eine einheitliche Festlegung folgender Punkte (DWA-M 285-2, 2021):
 - Voll-/Teilstrombehandlung
 - Leitsubstanzen
 - Mindestwirkungsgrad und gegebenenfalls max. Ablaufkonzentrationen
 - Festlegung von Probenahmestellen, -dauer, -häufigkeit und Abhängigkeit der Probenahme mit der Witterung
- Dennoch lässt die im Jahre 2012 übermittelte [Stellungnahme der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Dorothea Steiner, Nicole Maisch, Birgitt Bender, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN](#) andeuten, dass eine Spurenstoffentfernung auf kommunalen Kläranlagen früher oder später in umgesetzt werden soll.
- Im Gegensatz zu Österreich wird in einigen deutschen Bundesländern Trinkwasser überwiegend aus Oberflächenwasser gewonnen, dazu gehören Nordrhein-Westfalen, Thüringen und Sachsen (Freitag-Ziegler, Kötter, & Stommel, 2019).
- Es haben sich vor allem die beiden Bundesländer Nordrhein-Westfalen und Baden-Württemberg hervorgetan, die Gewässerqualitäten hinsichtlich der Spurenstoffbelastung zu verbessern. Dies wird zum Beispiel mit Projekten und Programmen umgesetzt.
 - „Reine Ruhr“ (2008) der Landesregierung NRW
 - „Schussenaktiv“, „Schussenaktivplus“ und „Schussenaktivplus+“ der Landesregierung BW und des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF)
 - einer gezielten Förderung für Kläranlagen, die in den Bodensee einleiten
- In Deutschland sind dazu vor allem das Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg (KomS BW) und das Kompetenzzentrum Spurenstoffe Nordrhein-Westfalen (KOM-M.NRW) aktiv. Auch auf der Homepage des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) findet sich eine Sammlung an Projektberichten und Machbarkeitsstudien zur weitergehenden Abwasserreinigung ([Projektberichte](#), [Machbarkeitsstudien](#)). Das KomS BW hat unter anderem eine [Projektmappe 2020](#) mit vielen Berichten und Kläranlagensteckbriefen zum Thema zusammengestellt. In Berlin wurden die Projekte [ASKURIS](#) und [IST4R](#) umgesetzt.
- Im Gegensatz zur Ozonbehandlung wird beim Einsatz von Aktivkohle auch CSB entfernt. Dies ist für Kläranlagenbetreiber in Deutschland ein Vorteil, da sich dadurch die Abwasserabgabe verringern lässt (Schaar & Kreuzinger, 2017).

- Im [Arbeitspapier Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen](#) (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 2018) wurde der Diskussionsstand von der EU, Deutschland und Baden-Württemberg genauer beschrieben.
- Die Strategie bzw. die Empfehlung für Baden-Württemberg wurde vom KomS BW wie in Abbildung 1 dargestellt zusammengefasst. Sie wird auch im wwt Modernisierungsreport 2021/22 (Launay, Spurenstoffelimination in Baden-Württemberg - Strategie des Landes, 2020/21) betrachtet.
- Bislang sind in Baden-Württemberg 22 kommunale Kläranlagen mit einer 4. Reinigungsstufe ausgerüstet und 24 weitere in Planung/Bau (Stand Mai 2021) (KomS BW, 2021). Mit Stand 2018 waren in Nordrhein-Westfalen bereits 11 Spurenstoffentfernungen in Betrieb und 19 weitere in Planung (KOM-M.NRW, 2018).
- In Abbildung 2 sind die in Deutschland bereits umgesetzten Spurenstoffentfernungen auf kommunalen Kläranlagen (laut Stand 2020) dargestellt. Daraus kann entnommen werden, dass in den Kategorien für Feldbach-Raabau (20.000 bis 50.000 EW) und Fladnitz im Raabtal (10.000 bis 20.000 EW) bereits 11 bzw. 2 Anlagen in Betrieb sind und weitere 19 bzw. 7 Anlagen sich in Planung oder Bau befinden.

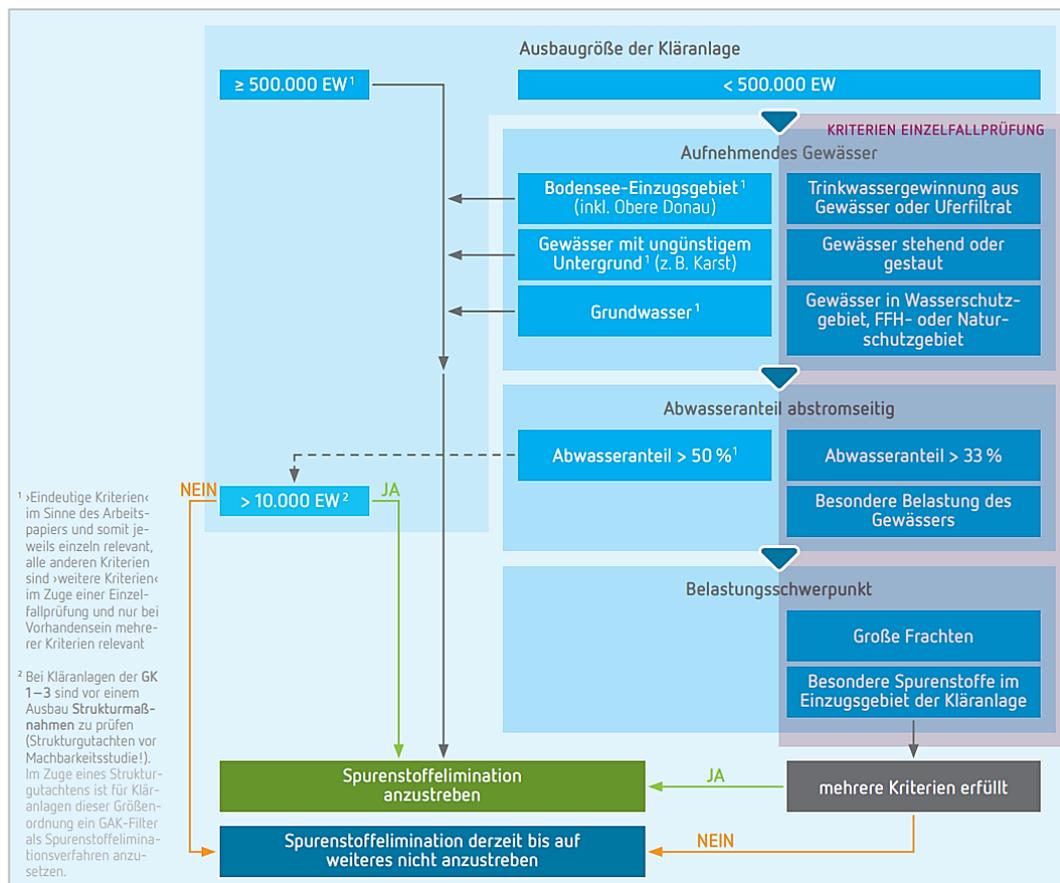


Abbildung 1 Vorgehensweise des Bundeslandes Baden-Württemberg (Deutschland) zur Entscheidung bezüglich einer 4. Reinigungsstufe (KomS BW, 2020)

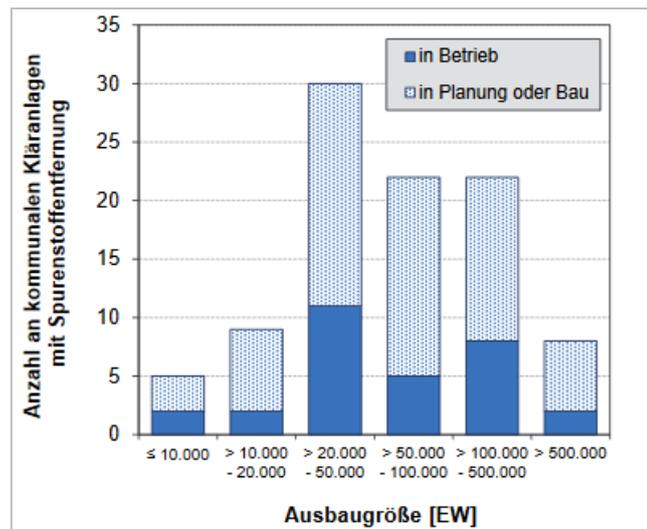


Abbildung 2 Ausbaugrößen der Kläranlagen mit 4. Reinigungsstufe in Betrieb bzw. Planung/Bau in Deutschland (Stand August 2020) (Metzger, Barjenbruch, Beier, Miehe, & Nafo, 2020)

SCHWEIZ

- In der Schweiz befasst sich vor allem der VSA mit dem Thema Spurenstoffentfernung.
- Die Strategie des Landes zu Kläranlagen, auf denen eine 4. Reinigungsstufe erforderlich ist, lässt sich folgendermaßen zusammenfassen (VSA, 2018).
 - Ziel: Schutz der aquatischen Ökosysteme: ARA > 8.000 EW in Fließgewässerabschnitten mit einem hohen Abwasseranteil (>10%)
 - Ziel: Schutz der Trinkwasserressourcen: ARA > 24.000 EW in See - Einzugsgebieten und ARA > 8.000 EW in Karstgebieten
 - Ziel: Oberliegerverantwortung/Frachtreduktion: ARA > 80.000 EW
- Es gelten folgende gesetzliche Grundlagen:
 - [Gewässerschutzgesetz \(GSchG\)](#)
 - [Gewässerschutzverordnung \(GSchV\)](#)
 - [Verordnung des Eidgenössischen Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation \(UVEK\) zur Überprüfung des Reinigungseffekts von Massnahmen zur Elimination von organischen Spurenstoffen bei Abwasserreinigungsanlagen](#)
- Damit legt das Schweizer Gewässerschutzgesetz fest, dass bis 2040 etwa 100 der mehr als 700 Schweizer Kläranlagen mit einer Spurenstoffentfernung ausgerüstet werden sollen. Anfang des Jahres 2020 sind in der Schweiz bereits 10 Kläranlagen mit 4. Reinigungsstufe in Betrieb und 29 weitere in Bau/Planung. (KomS BW, 2020)
- Bislang (Stand 2021) sind in der Schweiz 14 kommunale Kläranlagen mit einer 4. Reinigungsstufe ausgestattet worden und 4 weitere in Planung/Bau (VSA, 2021).

WEITERE EU-LÄNDER (LUXEMBURG, ITALIEN UND FRANKREICH)

- Auch in Luxemburg gibt es bislang keine Pflicht zur Spurenstoffentfernung. Es wird von der Administration de la gestion de l'eau (AGE) lediglich gefordert, eine Fläche auf den Kläranlagen zur Nachrüstung einer 4. Reinigungsstufe freizuhalten.
- Zusätzlich fördert das Luxemburger Umweltministerium Forschungsprojekte zu Aktivkohle-, Ozon- und Kombinationsverfahren.
- Da ein Großteil Luxemburgs im Einzugsgebiet der Sauer liegt, ist Luxemburg Teil des länderübergreifenden „EmiSûre“ Projekts. Da davon auch viele kleine und mittelgroße Kläranlagen bis zu 20.000 EW betroffen sind, werden auch alternative Methoden mit Bodenfiltern erprobt. (Hansen & Andritschke, 2019)
- In Italien gibt es nach Angaben von Abegglen und Siegrist (2012) bereits mehrere kommunale Kläranlagen mit Ozonung.
- Auch in Frankreich sind nach Stand 2019 bereits fünf Anlagen mit Spurenstoffentfernung in Betrieb (VSA, 2019).

3.1.2 Leitparameter

Auch in Hinblick auf jene Spurenstoffe, auf die bei der 4. Reinigungsstufe die Priorität gelegt wird, herrscht keine Einigkeit. Dies liegt unter anderem auch an den individuellen Bedürfnissen der Gewässer und der unterschiedlichen Bedeutung der Spurenstoffe (durch Industrie etc.) in bestimmten Regionen. Bei der Definition von allgemeinen Leitparametern wird oft auch ein Fokus auf folgende Aspekte gelegt (Quellen: Barjenbruch et al. (2020, S. 759) und Rongen und Schösser (2022)):

- Persistent und führen daher zu Bioakkumulation im Gewässer
- Gut entfernbar sowohl mit Aktivkohle als auch mit Ozonung
- Regelmäßig ins Abwasser eingetragen
- Nicht/kaum durch die herkömmliche Abwasserbehandlung entfernbar
- Konzentration der Stoffe im Zulauf der ARA bzw. Zulauf 4. Reinigungsstufe mindestens fünfmal höher als die Bestimmungsgrenze
- Möglichst viele der Stoffe mit einer Methode gleichzeitig erfassen können (Kostenreduktion)

In Baden-Württemberg wird auf das Konzept gesetzt für alle Kläranlagen mit 4. Reinigungsstufe 8 bis 9 typische Parameter als Leitsubstanzen zu wählen. Unterdessen setzt Nordrhein-Westfalen auf 8 bis 9 speziell für den Standort gewählte Parameter (Rongen & Schösser, 2022). Tabelle 1 enthält eine Gegenüberstellung der Leitparameter von verschiedenen Ländern und Arbeitsgruppen.

Tabelle 1 Gegenüberstellung der Leitparameter

STOFF-GRUPPE	STOFF	SCHWEIZ ①	NRW (D) ②	BW (D) ③	BERLIN (D) ④	REFORM DES ABWAG (D) ⑤	STAKEHOLDER-DIALOG ⑥
Arzneimittel-wirkstoffe und Transformations-produkte von Arzneimittel-wirkstoffen	Amisulprid	x					
	Carbamazepin	x	x	x	x	x	
	Candesartan	x			x		
	Chlorothiozid				x		
	Citalopram	x					
	Clarithromycin	x	x		x	x	
	Diclofenac	x	x	x	x	x	x
	Formylamino-antipyrin (FAA)				x		
	Gabapentin				x		
	Hydrochloro-thiazid	x		x	x	x	
	Ibresartan	x		x		x	
	Metoprolol	x	x	x	x	x	
	Olmesartan				x		
	Oxipurinol				x		
	Sulametho-xazol		x			x	
	Tramadol				x		
	Tramadol-N-oxid				x		
	Valsartan				x		
Valsartan-säure				x			
Venlafaxin	x						
Korrosions-schutz-mittel	Benzotriazol	x	x	x	x	x	x
	Σ 4+5-Methyl-benzotriazol	x		x		x	x
Röntgen-kontrast-mittel	Iopamidol						x
Flamm-schutz-mittel	De-cabromdiphe-nylether						x
Fungizid	Tebuconazol						x
Insektizid	Thiacloprid						x

Begründungen und Quellen zu den gewählten Leitparametern (die Ziffern beziehen sich auf die Tabelle 1):

① Quelle: (UVEK, 2016)

② Quelle: (KOM-M.NRW, 2016) Bei ARAs mit relevantem industriellem Einfluss muss die Liste ggf. erweitert werden. Stoffe mit geringer Ausgangskonzentration sind sinnvoll zu ersetzen.

③ Quelle: (Umweltministerium BW, 2018)

④ Quelle: (Barjenbruch, et al., 2020) aus Entwurf Arbeitsgruppe Spurenstoffe Berlin: Die Stoffe können alle mit einem Verfahren nach DIN 38407 F47-2017-07 direkt bestimmt werden. Die Substanzen sind so gewählt, dass eine Aussage über die Entfernung zu einem Verfahren einer weitergehenden Abwasserreinigung (Oxidation mit biologischer Nachreinigung oder Sorption mit Aktivkohle) getroffen werden kann.

⑤ Quelle: (Gawel, et al., 2021)

⑥ Quelle: (BMU Expertengremium zur Bewertung der Relevanz von Spurenstoffen, 2019) und (BMU Expertengremium zur Bewertung der Relevanz von Spurenstoffen, 2020)

- Diclofenac: Ökotoxizität (Überschreitung des UQN-Vorschlages)
- 1H-Benzotriazol + Methyl-Derivate: verbreitet, Persistenz, hohe Mobilität
- Iopamidol: Persistenz, Mobilität; Bildung toxischer Desinfektionsnebenprodukte (bei Chlorung) (Relevanz für Trinkwasser)
- Decabromdiphenylether: hohe Persistenz
- Tebuconazol: sehr hohe Persistenz, ökotoxikologische Eigenschaften, verbreitet, reproduktionstoxisch Kategorie 2, Verdacht auf endokrin schädigende Eigenschaften
- Thiacloprid: Mobilität, Ökotoxizität (Überschreitung der RAK und UQN-V), verbreitet

Rogner und Schösser (2022) empfehlen für eine Machbarkeitsstudie in Österreich, wo derzeit noch keine Leitparameter festgelegt sind, ein Screening mit 40 bis 50 umweltrelevanten Stoffen. Daraus können dann zwischen 5 und 10 kritische Parameter gewählt werden, die mit einer Jahresabbauleistung von mind. 80% entfernt werden.

Informationen zum Thema der Analytik und Monitoring der Spurenstoffe auf Kläranlagen können den folgenden Quellen entnommen werden:

- Arbeitsbericht des DWA-Fachausschusses KA-8 (Barjenbruch, et al., 2020)
- [Faktenblatt](#) „Konzepte zur Überwachung der Reinigungsleistung von weitergehenden Verfahren zur Spurenstoffelimination“ (Rensch, et al., 2017)

3.2 Verfügbare Technologien zur Mikroschadstoffelimination

Kreuzinger und Schaar (2016) betonen, dass unabhängig vom gewählten Verfahren eine „(Sehr) gute konventionelle biologische Reinigung mit Schwachlastanlagen (Nitrifikation & Denitrifikation)“ essenziell für ein eine 4. Reinigungsstufe sei.

Im Folgenden werden verschiedene Möglichkeiten zur Spurenstoffentfernung kurz erläutert. Dabei liegt der Fokus auf den bisher am weitesten verbreiteten Methoden zur Entfernung mit Aktivkohle bzw. Ozon.

3.2.1 Adsorptive Verfahren

Bei der Adsorption lagern sich die Mikroschadstoffe an der sehr großen spezifischen Oberfläche der Aktivkohle an (Abegglen & Siegrist, 2012). Ist die Aktivkohle voll beladen, muss sie

ausgetauscht werden. Auf kommunalen Kläranlagen werden als 4. Reinigungsstufe granuliert oder pulverisierte Aktivkohle eingesetzt.

Weitere Informationen bezüglich Aktivkohle zur Spurenstoffentfernung können unter anderem folgenden Quellen entnommen werden:

- Merkblatt DWA-M 285-2 „Spurenstoffentfernung auf kommunalen Kläranlagen – Teil 2: Einsatz von Aktivkohle – Verfahrensgrundsätze und Bemessung“ (DWA-M 285-2, 2021)
- Publikation „Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser - Verfahren zur weitestgehenden Elimination auf Kläranlagen“ des Schweizer Bundesamt für Umwelt (BAFU) (Abegglen & Siegrist, 2012)
- Ein Beitrag zu „Langzeiterfahrungen zum Einsatz von GAK-Filtern bei der Spurenstoffelimination“ von Taudien et al. (2020) ist in der Fachzeitschrift Korrespondenz Abwasser 2020 (67) Nr. 11 erschienen.

3.2.1.1PAK (Pulveraktivkohle)

PAK ist Aktivkohle in der Größenordnung von einigen Mikrometern, die ins Abwasser eingemischt und anschließend wieder abgetrennt wird. Derzeit ist eine Aufbereitung der beladenen PAK nicht wirtschaftlich umsetzbar (Abegglen & Siegrist, 2012).

Die PAK kann entweder direkt in die Belebung dosiert werden oder in ein eigenes Kontaktbecken nach der Nachklärung. Bei der Dosierung im Kontaktbecken gibt es die Möglichkeit, einen Teil der Kohle wieder in den Reaktor rückzuführen. Unabhängig vom Dosierungsort wird eine Abscheidestufe benötigt. (DWA-M 285-2, 2021)

NACHBEHANDLUNG BEI PAK-DOSIERUNG

Es können verschiedene Arten von Filtern verwendet werden, um die Aktivkohle wieder aus dem Wasser zu entfernen. Dazu gehören Einschichtfilter (Sandfilter), Zwei-/Mehrschichtfilter (Sand + z.B. Anthrazit), Flexbed-Filter, Tuchfilter. Teilweise werden zur besseren Abscheidung Fäll- und Flockungshilfsmittel eingesetzt, nach Harmjanßen und Rummler (2017) jedoch umstritten.

Diese [Methoden zur Nachbehandlung bei PAK-Dosierung](#) werden von Harmjanßen und Rummler (2017) genauer beschrieben.

3.2.1.2GAK (Granulierte Aktivkohle)

Die GAK Methode kann als Festbettschüttung, Schweb- und Wirbelbett realisiert werden, wobei Ersteres bislang am weitesten verbreitet ist. Bei der Spurenstoffentfernung mit GAK ist kein weiterer Abtrennprozess nötig. Die Filter können als kontinuierliche oder diskontinuierliche Ausführungen betrieben werden, genaueres dazu in DWA-M 285-2 (2021).

Weitere Informationen zum Einsatz von GAK sind im Fachbeitrag von Taudien et al. (2020) in Korrespondenz Abwasser 2020 (67) Nr. 11 und von Lifa (2020) in wwt Wasserwirtschaft Wassertechnik 2020 Nr. 6 zu finden.

VORBEHANDLUNG BEI GAK-DOSIERUNG

Zum Teil ist es auch üblich, das Abwasser vor der Adsorptionsstufe über einen Filter zu leiten, damit dort noch ein Teil der AFS zurückgehalten werden kann und der GAK-Filter dadurch nicht so schnell verschlammt.

3.2.2 Ozon (Oxidatives Verfahren)

Ozon (O₃) reagiert auf zwei Arten, der direkten und der indirekten Oxidation (Abegglen & Siegrist, 2012):

- Bei der direkten Oxidation werden nur bestimmte chemische Verbindungen angegriffen. Daher werden bei der direkten Oxidation auch nur bestimmte Substanzen zerstört.
- Wenn das O₃ im Wasser in Hydroxyd-Ionen (OH-Ionen) und Hydroxyd-Radikale (OH-Radikale) zerfällt, die dann andere Substanzen angreifen, wird dies indirekte Oxidation genannt. Diese Reaktionen laufen sehr schnell und unspezifisch ab, d.h. die OH-Ionen und -Radikale reagieren mit vielen unterschiedlichen Substanzen.

Neben den gewollten Reaktionen mit z.B. Medikamentenrückständen reagieren die OH-Radikale auch mit gelöstem organischem Material (DOC) und Nitrit, was die Effektivität der Spurenstoffentfernung reduziert. Daher ist es sinnvoll, mit einem möglichst geringen DOC in die Ozonung zu gehen. Zusätzlich wird die Reaktion von Ozon durch die Ozondosis, den pH-Wert, die Alkalität und die Temperatur beeinflusst. (Abegglen & Siegrist, 2012)

Zur Desinfektion und Entfernung von Geruchs- und Geschmacksstoffen wird bereits seit vielen Jahren Ozon in der Trinkwasseraufbereitung eingesetzt (Abegglen & Siegrist, 2012).

NACHBEHANDLUNG BEI OZON-DOSIERUNG

Um gegebenenfalls die durch die Ozonung neu entstandenen toxischen Stoffe aus dem Abwasser zu entfernen, ist eine biologische Nachbehandlung notwendig. Dafür können unter anderem folgende Technologien eingesetzt werden (Quellen: Rongen und Schösser (2022), KOM-M.NRW (2016), Abegglen und Siegrist (2012)):

- Sandfilter (sinnvoll, wenn bereits auf der ARA vorhanden)
- Wirbelbett (bestehen aus Aufwuchskörpern, die durch Lufteintrag in Schwebelage gehalten werden; kostengünstige Methode, falls kein Sandfilter vorhanden)
- Festbett mit inerten Materialien z.B. Ton (bestehen aus einer festen Schüttung, im Gegenstrom oder freien Gefälle betreibbar)
- Festbett mit biologisch aktivierter GAK (=BAK) (Vorteil: weniger Ozondosis notwendig)
- Schönungsteich/Abwasserteich (geringer technischer Aufwand, aber großer Flächenbedarf)

- Retentionsbodenfilter (Wirkweise: Sedimentation, biologischer Abbau und zum Teil Zerfall durch Sonnenbestrahlung)

Im Rahmen des ReTREAT Projektes (2017) des Schweizer Oekotoxizentrums wurde eine Studie zur Nachbehandlung nach der Ozonung durchgeführt. Dabei wurden Sandfilter, Wirbelbett und Festbett, sowie neue und vorbelastete GAK verglichen. Bereits nach der Ozonung konnte eine nur geringe Toxizität des Abwassers festgestellt werden. Die Biotests bei Nachbehandlung mit Sandfilter, Wirbelbett und Festbett zeigten keine zusätzliche Verbesserung der Wasserqualität. Die besten Erfolge konnten mit neuer Aktivkohle erzielt werden, da eine zusätzliche Entfernung von Mikroverunreinigungen durch Adsorption stattfindet. Der bereits vorbelastete GAK Filter verbesserte die Toxizität geringfügig. (Kienle, et al., 2017)

Weitere Informationen zur Ozonung können unter anderem folgenden Quellen entnommen werden:

- Projektbericht zum Projekt KomOzon (Kreuzinger, et al., 2011)
- Publikation „Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser - Verfahren zur weitestgehenden Elimination auf Kläranlagen“ des Schweizer BAFU (Abegglen & Siegrist, 2012)
- Dissertation Schaar zum Thema „Ozonung von Kläranlagenablauf zur Weitergehenden Abwasserreinigung“ (Schaar, 2015)
- Projektbericht des ReTREAT Projektes (Kienle, et al., 2017)
- Nachbehandlung: Bericht des Schweizer BAFU (Abegglen & Siegrist, 2012)

3.2.3 Sonstige Verfahren

3.2.3.1 Membranverfahren

Membranverfahren zählen zu den physikalisch-chemischen Verfahren. Dabei werden Wasser und kleinste Moleküle mit hohem Druck durch eine semi-permeable Membran gepresst, während die meisten Stoffe zurückgehalten werden und sich im Konzentrat sammeln, (Schütte, Wu, Schäpers, & Kasper, 2018). Im Gegensatz zu Nanofiltration und Umkehrosmose (dichte Membrane) findet bei Mikro- und Ultrafiltrationsverfahren (poröse Membrane) der Rückhalt der Stoffe lediglich durch Filtration anstatt durch Diffusion statt (Abegglen & Siegrist, 2012). Dabei können keine gelösten Stoffe zurückgehalten werden.

Als Membranverfahren werden daher zur Spurenstoffentfernung in der Trinkwasseraufbereitung hauptsächlich Nanofiltration und Umkehrosmose eingesetzt (KomS BW, kein Datum).

Lehmann, Ogier und Lipnizki (Lehmann, Ogier, & Lipnizki, 2018) berichten von Erfahrungen mit Umkehrosmose. Weitere Informationen zu Membranverfahren sind auch im Paper von Gehrke et al. (2021) enthalten.

Die TU Wien forscht derzeit auch an der Ultrafiltration als Rückhalt nach einer PAK-Stufe. Dies bietet im Gegensatz zu Sand- oder Tuchfiltern den zusätzlichen Vorteil einer Entkeimung des

Abwassers. Möglicherweise wird die Ultrafiltration in Kombination mit einer PAK-Dosierung in den kommenden Jahren wirtschaftlich umsetzbar.

Forschung wird auch von Mach und Partner ZT-GmbH und SPIN TEC GmbH (2022) zu einer Kombination aus Mikrofiltrations- bzw. Ultrafiltrationsmembran mit GAK betrieben. Dabei soll in einem Modul innen die Membran liegen und außen die GAK (siehe Abbildung 3).

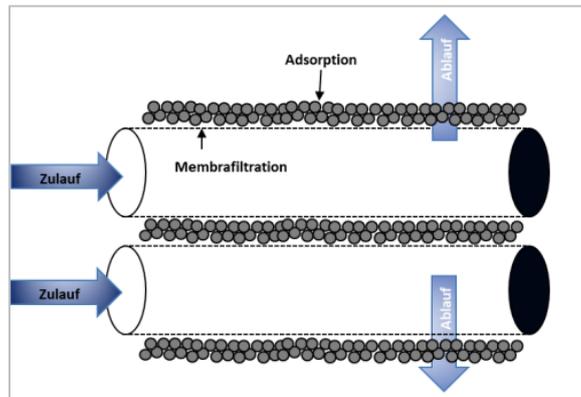


Abbildung 3 Schema der Kombination aus Membranfiltration und GAK (Mach und Partner ZT-GmbH und SPIN TEC GmbH, 2022)

3.2.3.2 Advanced Oxidation Processes (AOP)

Wie auch Ozonung zählt AOP zu den oxidativen Verfahren. Bei der AOP Technologie wird die Bildung von Hydroxyl-Radikalen (OH-Radikalen) angeregt. Diese Radikale werden mithilfe einer der folgenden Kombination erzeugt (Abegglen & Siegrist, 2012).

- Ozon und Wasserstoffperoxid (H_2O_2)
- Ozon und Ultraviolett-Strahlung (UV-Strahlung)
- H_2O_2 und UV-Strahlung
- H_2O_2 und Eisen (Fe^{2+}) -> *Fenton's Reagenz*
- Titandioxid (TiO_2) und H_2O_2
- H_2O_2 , Fe^{2+} und UV-Strahlung -> *Photo-Fenton*

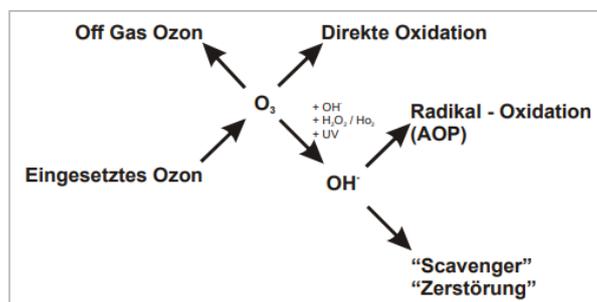


Abbildung 4 Zusammenhang von Ozon- und AOP-Prozessen (Kreuzinger, et al., 2011, S. 9 nach www.lenntech.com)

Die OH-Radikale reagieren mit fast allen Bindungstypen, das bringt den Vorteil, dass sie auch Verbindungen oxidieren können, bei denen Ozon das nicht kann. Gleichzeitig werden die OH-Radikale dadurch auch von anderen Stoffen „verbraucht“ („Scavenger“).

Dieser Prozess wird neben der Trinkwasseraufbereitung auch für die Industrieabwasserreinigung verwendet (Schaar, 2015).

3.2.3.3 Photolyse

Auch die Photolyse gehört zu den oxidativen Verfahren. Dabei wird das Abwasser nur mit natürlichem oder künstlichem UV-Licht bestrahlt. Diese Methode wird hauptsächlich zur Desinfektion von Trink- oder Abwasser eingesetzt. (Abegglen & Siegrist, 2012)

3.2.3.4 Ultraschall

Die Beschallung mit Ultraschall führt im Wasser zu sehr kleinen, kurzlebigen Blasen, die lokal große Energien freisetzen können. Dies löst Prozesse wie Pyrolyse oder die Bildung von Radikalen aus, welche eine oxidierende Wirkung auf die Spurenstoffe haben. Das Ultraschallverfahren befindet sich derzeit noch im Forschungsstand. (Abegglen & Siegrist, 2012)

3.2.3.5 Retentionsbodenfilter (RBF)

Das Konzept der Retentionsbodenfilter ist eine naturnahe Möglichkeit des Rückhalts von Abwasserinhaltsstoffen. Die Bepflanzung mit Schilf dient der Belüftung, der Vermeidung von Kolmation und als Lebensraum für Bakterien (Brunsch, et al., 2020).

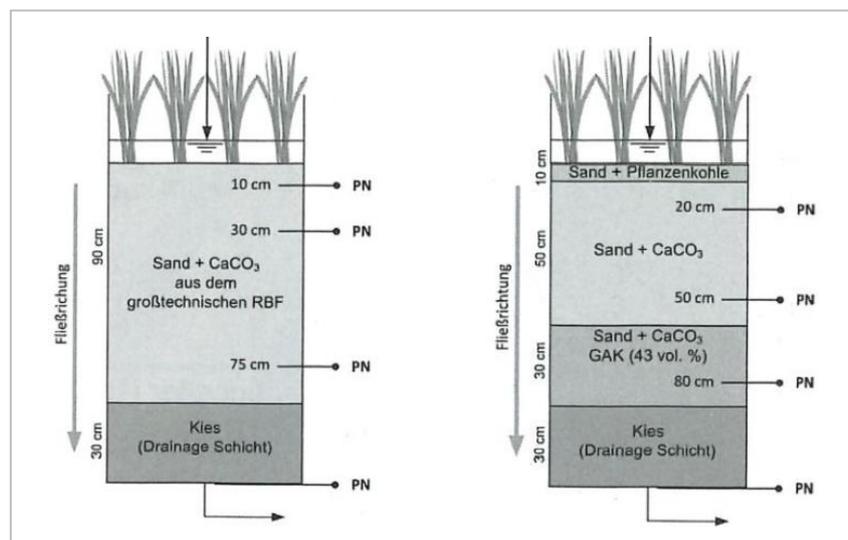


Abbildung 5 Schema Retentionsbodenfilter (Brunsch, et al., 2020, S. 781, bearbeiteter Ausschnitt)

Derzeit werden Retentionsbodenfilter primär zur Reduktion der hydraulischen Belastung, sowie Nähr- und Schadstoffbelastung wie Schwermetallen nach Misch- und Regenwasserentlastungen eingesetzt (Brunsch, et al., 2020). Diese sind normalerweise wie auf der linken Seite

in Abbildung 5 gestaltet. Das Schema auf der rechten Seite stellt das Verfahren mit zusätzlichem GAK im Filterbett dar, welches eine größere Eignung für den Rückhalt von Spurenstoffen darstellt.

3.3 Bewertung der Behandlungsverfahren für den Einsatz auf kommunalen Kläranlagen

3.3.1 Verfahrensbewertung

MEMBRANVERFAHREN

Laut Panglich (2021) ist der alleinige Einsatz von Membrantechnik als 4. Reinigungsstufe zwar technisch möglich, allerdings derzeit deutlich teurer als andere Verfahren. Trotzdem sind die Membranverfahren eine vielversprechende Methode für die Kombination mit PAK oder Ozon, vor allem auf Kläranlagen mit wenig freier Fläche.

Das KomS BW (kein Datum) weist darauf hin, dass Membranverfahren in der kommunalen Abwasserreinigung bislang wenig gut geeignet sind. Dies liegt an unzureichender Betriebserfahrung, Problemen bei der Konzentratentsorgung und hohem Energiebedarf des Verfahrens.

Abegglen und Siegrist (2012) sehen für den Einsatz im Abwasser eine Vorfiltration als unerlässlich, da für eine Nanofiltration oder Umkehrosmose keine Feststoffe enthalten sein sollen, um Ablagerungen zu vermeiden. Ein Kläranlagenablauf enthält im Schnitt zwischen 5 und 15 mg/l an Feststoffen (TSS).

AOP

Schaar (2015) erklärt: „Aufgrund des hohen OH-Radikalbildungspotentials entspricht die Ozonung von Kläranlagenablauf einem AOP-Prozess. Dies stellt den wesentlichen Unterschied zur Ozonung in der Trinkwasseraufbereitung dar. Daher führt die Zugabe von Wasserstoffperoxid zu keiner maßgeblichen Verbesserung der Spurenstoffentfernung. Bei bromidhaltigem Kläranlagenablauf kann die Dosierung zu einer geringfügigen Verringerung der Bromatbildung führen.“ Eine zusätzliche Dosierung von Wasserstoffperoxid oder UV-Strahlung muss im Einzelfall betrachtet werden (Kreuzinger, et al., 2011).

Nach Abegglen und Siegrist (2012) ist ein Verfahren mit UV und H₂O₂ drei-mal so teuer ist als die Ozonung, dies liegt vor allem am hohen Energieverbrauch und den Kosten für das Wasserstoffperoxid. Abegglen und Siegrist vermuten diese hohen Kosten auch für andere AOP-Verfahren. Daher wird im Zuge dieser Studie nicht weiter auf eine Ozonung in Kombination mit Dosierung zusätzlicher Radikalbildner eingegangen.

PHOTOLYSE

Abegglen und Siegrist (2012) fassen zusammen, dass die Bestrahlung mit UV nur relativ wenige Spurenstoffe angreifen kann. Demnach ist dieses Verfahren nicht für die Spurenstoffelimination in kommunalem Abwasser geeignet.

ULTRASCHALL

Bei Laborversuchen konnte nach (Naddeo, Meric, Kassinos, Belgiorno, & Guida, 2009) nur geringe Entfernungswirkungsgrade erreicht werden, deswegen wird dieses Verfahren im Zuge dieser Studie nicht weiter betrachtet.

RETENTIONSBODENFILTER

Nach Brunsch et al. (2020) sind die Gesamtkosten eines RBFs mit GAK im Filterbett die Kosten gegenüber einer Anlage mit Aktivkohle oder Ozon geringer sind (Investitionskosten höher, aber 40% geringere Betriebskosten). Beyerle, Brepols und Wachendorf (2018) stellen fest, dass eine deutlich messbare Reduzierung von Mikroschadstoffen vorhanden ist, allerdings bleiben die Wirkungsgrade hinter derer von adsorptiven oder oxidativen Verfahren zurück.

Daher wird die alleinige Installation eines RBF für die Spurenstoffentfernung auf kommunalen Kläranlagen im Rahmen des Projektes nicht weiter betrachtet.

OZON UND AKTIVKOHLE

Margot et al. (2013) fassen die Spurenstoffentfernung mit Aktivkohle und Ozon folgendermaßen zusammen.

- Beide Technologien entfernen Spurenstoffe effektiv und reduzieren die Toxizität des Kläranlagenablaufs.
- Einige Substanzen werden von Ozon effizienter entfernt. Aktivkohle hingegen kann ein größeres Spektrum an Substanzen entfernen.
- Beide Technologien eignen sich für den Einsatz auf kommunalen Kläranlagen.

Genauere Daten und Darstellungen dazu sind in Margot et al. (2013) und Metzger et al. (2020) zu finden.

Neben der Verfahrenswahl anhand der in Tabelle 2 dargestellten Vor- und Nachteile der Behandlung mit Ozon, GAK und PAK sind noch weitere Faktoren zu beachten.

- Ozonung ist nicht für jede Abwasserzusammensetzung geeignet, da sich unter Umständen toxische und/oder kanzerogene Stoffe wie Bromat, Nitrosamine oder Chrom(VI) bilden können. Die VSA beschreiben in Ihrer [Empfehlung "Abklärungen Verfahrenseignung Ozonung"](#) folgende Schritte (Wunderlin & Grelot, 2021):
 - (1) Betrachtungen zum Einzugsgebiet
-> problematische Indirekteinleiter vorhanden etc.
 - (2) Messungen im Zulauf zur geplanten Ozonung
-> neben CSB, DOC, Nitrit auch Bromid, Bromat, Nitrosamine und vereinzelt Chrom
 - (3) Abklärungen im Labor
-> Ozon- und OH-Radikal-Exposition, Abbaugrad von bestimmten Spurenstoffen, Bromat- und Nitrosamin-Bildung
 - (4) Biotests
-> zur Abklärung der Summenwirkung möglicher unbekannter Nebenprodukte

Informationen zu Industrie, Prozessen und Produkten im Einzugsgebiet, die problematisch hinsichtlich Bromid, Nitrosamin-Vorläufersubstanzen und Chrom sind, werden von der VSA gesammelt und laufend aktualisiert ([Zusammenstellung VSA Brom Nitrosamin Chrom](#)).

Zusätzlich sind hohe Nitritkonzentrationen für die Ozonung auch nachteilig, da das Nitrit durch die Ozonung zu Nitrat oxidiert wird und damit unnötig Ozon verbraucht (KOM-M.NRW, 2016, S. 15). Daher empfiehlt das KOM-M.NRW mithilfe von Batch-Tests das Ozonzehrverhalten des Abwassers zu analysieren.

- Für Aktivkohleverfahren kann eine hohe Feststoffkonzentration zu Problemen führen. Zur Auslegung der Aktivkohle ist das Adsorptionsverhalten verschiedener Aktivkohlesorten in Bezug auf relevante Spurenstoffe und CSB (wenn möglich, auch DOC) zu erörtern. Dazu können für PAK Batch-Tests (Schüttelversuch) und für GAK Säulenversuche oder Kleinfilterschnelltests (RSSCT) verwendet werden. (KOM-M.NRW, 2016, S. 15)
- Bei PAK-Dosierung (oder Rückführung) in die Belebung muss beachtet werden, dass dadurch auch das Schlammalter verringert wird und mehr Klärschlamm anfällt (DWA-M 285-2, 2021). Zusätzlich kann der Klärschlamm dann nicht mehr landwirtschaftlich verwertet werden, sondern muss verbrannt werden. Unter Umständen kann der mit PAK angereicherte Klärschlamm aber besser verbrannt werden. In manchen ARAs kann eine Verbesserung des Schlammvolumenindex beobachtet werden (DWA-M 285-2, 2021).
Derzeit liegt ein Fachentwurf zur Vorbegutachtung der Abfallverbrennungsverordnung 2022 – AVV 2022) vor. Darin steht in Abschnitt 4 §20 (1) „Klärschlamm aus kommunalen Abwasserreinigungsanlagen mit einem Bemessungswert ab 20.000 EW₆₀ ist ab 1. Jänner 2030 einer Verbrennung zuzuführen.“, falls keine Phosphorrückgewinnung auf der ARA betrieben wird. Alternativ zur verpflichtenden Verbrennung wird in Fachkreisen über die Option der Pyrolyse diskutiert. Bei Einführung einer verpflichtenden Verbrennung ist der Nachteil des Verbots zur landwirtschaftlichen Aufbringung der PAK nicht mehr ausschlaggebend.

Tabelle 2 Vor- und Nachteile der Verfahren zur Spurenstoffentfernung mit PAK, GAK und Ozon (Harmjanßen & Rummler, 2017, S. 41 f, leicht verändert)

PAK - VORTEILE	GAK - VORTEILE	OZON - VORTEILE
<ul style="list-style-type: none"> • Keine Metabolitenbildung • Deutlich weniger Kohlemengen als bei GAK-Adsorption nötig • Energieverbrauch ist gering • Phosphatelimination und Breitbandwirkung • Zusätzliche AFS-Reduktion • Zusätzliche CSB-Reduktion • Zusätzliche DOC-Reduktion • Entfernung der Mikroschadstoffe aus dem Abwasserstrom 	<ul style="list-style-type: none"> • Kaum Metabolitenbildung (einzig durch Abbauprodukte der Biologie) • Geringer Platzbedarf • Phosphatelimination und Breitbandwirkung • Zusätzliche AFS-Reduktion • Zusätzliche CSB-Reduktion • Zusätzliche DOC-Reduktion • Entfernung der Mikroschadstoffe aus dem Abwasserstrom 	<ul style="list-style-type: none"> • Breitbandwirkung und gute Eliminationsleistung bei bestimmten Mikroschadstoffen • Desinfektionswirkung (auch bzgl. multiresistenter Keime) • Vergleichsweise geringe Betriebskosten, sofern kein kostenintensives Verfahren nachgeschaltet ist • Steigerung des BSB₅ bei gleichbleibendem CSB

<ul style="list-style-type: none"> • Verbesserung der hygienischen Beschaffenheit des Kläranlagenablaufes • Förderliche Wirkung der Überschussschicht hinsichtlich der Schlammbehandlung und Schlammwässerung • Positive Wirkung auf den Heizwert des Klärschlammes • Verringerung des Schlammvolumenindex • PAK kann vorgehalten und gezielt in Abhängigkeit der Schmutzfracht dem Abwasser zudosiert werden • Dosierung lässt sich leicht bis zur maximalen Dosieranlagenleistung anpassen • Keine besonderen Materialanforderungen an die maschinelle Ausrüstung • Einfache Anlagentechnik 	<ul style="list-style-type: none"> • Verbesserung der hygienischen Beschaffenheit des Kläranlagenablaufes • Zusätzliche Reinigung durch Biologie im Filterbett • Vorhandene Sandfilterbecken können zur GAK-Adsorption umfunktioniert werden • Regeneration der GAK möglich • Keine nachgeschalteten Verfahren nötig • Einfache Anlagentechnik 	<ul style="list-style-type: none"> • Geschwindigkeit der Reaktion und Anteil der Oxidation eines Mikroschadstoffes über Ozon und Hydroxylradikale ist bekannt • Unkompliziertes Verfahren • Eine Ozonungsstufe kann einfach in bestehende Anlagen integriert werden • Dosierung lässt sich leicht bis zur maximalen Dosieranlagenleistung anpassen
PAK - NACHTEILE	GAK - NACHTEILE	OZON - NACHTEILE
<ul style="list-style-type: none"> • Hoher DOC führt zur verminderten Adsorption von Mikroschadstoffen -> Mehr Kohle wird benötigt • Keine landwirtschaftliche Nutzung des ÜSS mehr möglich • Meist zusätzliche Bauwerke erforderlich • Rücklösung des unveränderten Mikroschadstoffes und Rückbelastung der Kläranlage über Aktivkohleschlamm möglich • Adsorptionsprozess ist langsamer im Vergleich zur Ozonung • Größere Klärschlammengen • Teilweise großer bautechnischer Aufwand und umfangreiche maschinentechnische Ausrüstung • Nachgeschaltete Filtration erforderlich • Nasse AK kann zum Teil korrosiv und abrasiv auf Anlagenbestandteile wirken • Hohe Betriebsmittelkosten 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher DOC führt zur verminderten Adsorption von Mikroschadstoffen -> Mehr Kohle wird benötigt • Deutlich mehr Kohlemengen als bei der PAK-Adsorption nötig • Rücklösung und Auswaschung des unveränderten Mikroschadstoffes möglich • Sehr hohe Betriebsmittelkosten möglich • Falls keine bestehende Sandfiltration vorhanden -> Zusätzliche Bauwerke erforderlich • Adsorptionsprozess ist langsamer im Vergleich zur Ozonung • Reinigungsleistung bestimmter Stoffe und Stoffgruppen sinkt sehr stark schon nach wenigen Bettvolumina 	<ul style="list-style-type: none"> • Metabolitenbildung • Reaktionsprodukte und -mechanismen Großteils unbekannt (Toxizität) • Die sich ständig verändernde Zusammensetzung der Stoffe im Abwasser führt zu anderen Reaktionsprodukten -> Künftige Reaktionsprodukte können unvorhersehbare Auswirkungen im Ablauf haben • Hoher Energieverbrauch und hohe Sicherheitsanforderungen bezüglich Arbeitsschutz • Hohe Betriebskosten • Kaum CSB-Reduktion, sofern keine Verfahren nachgeschaltet sind • Kaum DOC-Reduktion, sofern keine Verfahren nachgeschaltet sind • Hoher DOC führt zu höheren Ozonverbrauch • Hohe Anforderungen an die eingesetzten Materialien

<ul style="list-style-type: none"> • Regeneration der PAK derzeit nicht möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • Wartung der Anlagen benötigt spezialisiertes Personal oder Fremdfirmen • Bei bestimmten Inhaltsstoffen im belasteten Abwasser (z.B. Bromid) wird von der Anwendung der Ozonung abgeraten • Zusätzliche biologisch aktive Stufe wird angeraten, um Oxidationsprodukte abzubauen • Teilweise großer bautechnischer Aufwand und umfangreiche maschinentechnische Ausrüstung
--	---

Eine große Sammlung zur Effektivität der Spurenstoffentfernung mittels PAK und Ozon ist in DWA T3/2015 in Anhang 4 (2015, S. 53 ff) zu finden. Darin sind eine Vielzahl an Entfernungspotentialen anthropogener Spurenstoffe in Bezug auf verschiedene Verfahrensschemen der Kläranlagen aufgelistet.

Die Nachbehandlung bei Ozon wird von Benström und Nern wie folgt (vgl. Tabelle 3) bewertet. Bei den Investkosten schneidet das Wirbelbett am besten ab, was auch Rongen und Schösser (2022) bestätigen.

Tabelle 3 Bewertung der Nachbehandlungsmethoden Ozonung (Benström & Nern, 2021)

KRITERIEN	SANDFILTER	WIRBELBETT	BODENFILTER/- TEICH	BAK
Treibhausgasemissionen	o	o	o	o
Spurenstoff-Elimination	+	+	+	++
Feststoff-Elimination	+	o	o	+
Flächenbedarf	o	o	-	o
P-Elimination (durch FM)	o	-	-	o
CSB/DOC-Elimination	o	o	o	o
Transformationsprodukte	-	-	-	o
Aktivkohleschlupf	+	+	+	+
Investkosten (ohne Bestand)	-	o	-	-
Betriebskosten	o	+	+	?

VERFAHRENSKOMBINATION

Nach Kreuzinger und Schaar (2016) können „Weder Ozonung noch AK-Adsorption alleine [...] weitergehende Entfernung diskutierter Spurenstoffe (wegen derer unterschiedlicher chemischer Eigenschaften) gewährleisten“. Die von Schaar und Kreuzinger vorgeschlagene Variante der Verfahrenskombination für österreichische Kläranlagen (vgl. Abbildung 6) vereint die Vorteile der beiden Verfahren. Allerdings bringt diese Kombination auch höhere Kosten mit sich.

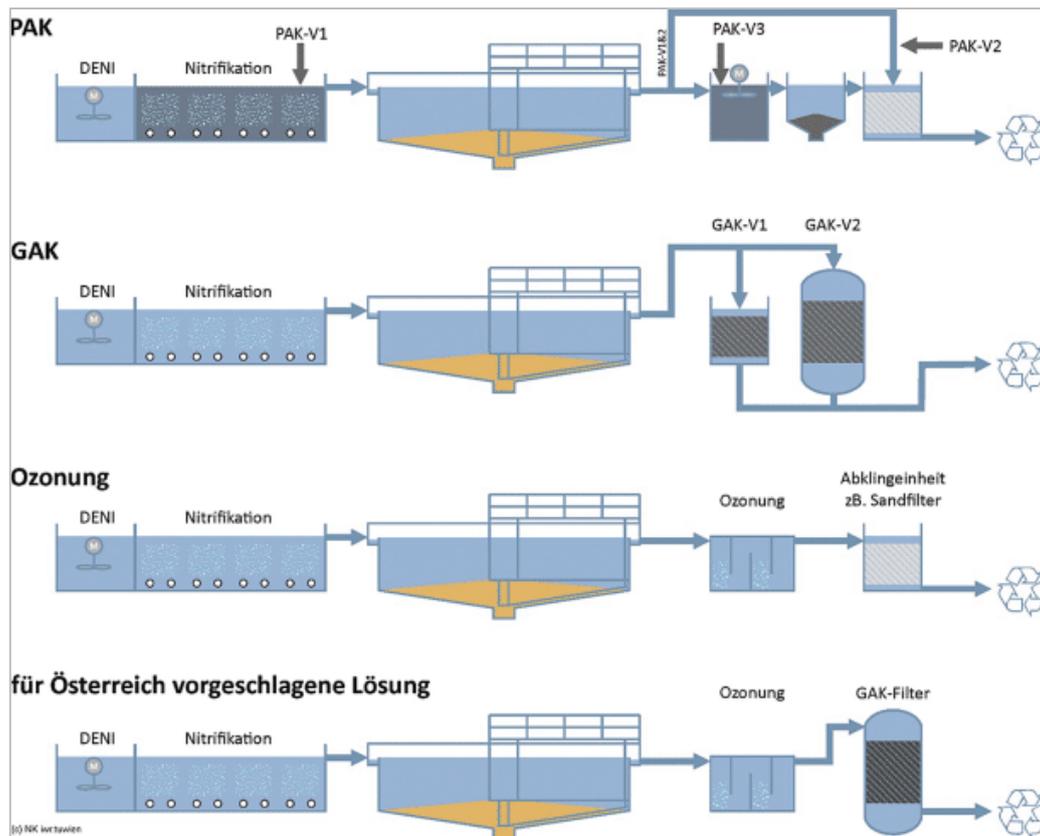


Abbildung 6 Verschiedene Varianten zur Spurenstoffentfernung auf kommunalen Kläranlagen mit Vorschlag für Österreich (Schaar & Kreuzinger, 2017)

3.3.2 Kriterien zur Verfahrenswahl

Die Kosten der Spurenstoffentfernung sind ein essenzieller Entscheidungspunkt für oder auch gegen ein technisch mögliches Verfahren. Kostenbetrachtungen mit Vergleich zu den bereits bestehenden Anlagen und anderer Machbarkeitsstudien sind in den Kapiteln 8.1 und 9.2 zu finden. Die Kosten werden einzeln betrachtet, da sich diese mit der Ausbaugröße der Kläranlage und anderen Besonderheiten der Anlage ändern.

Daneben gibt es noch eine Vielzahl anderer Aspekte, die die Entscheidung beeinflussen. Da es für jeden Kläranlagenstandort andere bauliche Voraussetzungen, Belastungen des empfangenden Gewässers, Platzverhältnisse etc. gibt kann nicht pauschal eine Technologie als „beste Variante“ ausgesprochen werden. Zur Ermittlung der Vorzugsvariante für eine bestimmte Kläranlage gibt es eine Vielzahl von Kriterien.

Die von KOM-M.NRW (2016, S. 14) vorgeschlagenen Kriterien sind:

- Eliminationsgrade der Verfahren hinsichtlich relevanter Mikroschadstoffe
- Vorhandene nutzbare Verfahrens- und Bautechnik, wie z.B. Filtrationsanlage oder freie Beckenkapazität
- Platzbedarf und Flächenverfügbarkeit

- Bromatbildungspotenzial des Abwassers bei Berücksichtigung eines Ozonungsverfahrens (wenn eine oberflächengewässergestützte Trinkwassergewinnungsstelle in der Nähe liegt und zusätzlich die Vorbelastung des Vorfluters mit Bromat gegeben ist)
- Klärschlamm Entsorgungswege
- Verbesserung der Reinigungsleistung der Kläranlage z. B. für CSB, AFS, P_{ges} oder Entkeimung
- Ganzheitliche energetische Betrachtung, d.h., dass bei der Aktivkohle auch die Aufwendungen für die Herstellung oder Reaktivierung sowie Aufwendungen bei der Reinsauerstofferzeugung oder Sauerstoffanreicherung mittels einer PSA (Pressure Swing Adsorption) -Anlage und die unterschiedlichen Transportwege in die Betrachtungen mit einfließen
- Zusätzlicher Bedarf an Personal

Bei vielen Machbarkeitsstudien wurde eine ähnliche Bewertungsstrategie in unterschiedlichem Detaillierungsgrad gewählt. Tabelle 4 zeigt sechs unterschiedliche Bewertungsbögen und deren Gewichtung als Beispiel für die Vielfalt an Kriterien. Weitere Bewertungsmöglichkeiten können den Links in Tabelle 7 und Tabelle 8 entnommen werden.

Tabelle 4 Bewertungsstrategien für die Verfahrenswahl in Machbarkeitsstudien

Benstöm und Nern (2021, S. 80 f) – ARA Wegberg		Schütte, Wu, Schäpers und Kasper (2018, S. 108 ff) – ARA Münster-Hiltrup	
• Projektkostenbarwert	0,50	• Eliminationsleistung / Breitbandwirkung	2,00
• Zugänglichkeit / Wartungsfreundlichkeit	0,03	• Eliminationsleistung spezifisch (eigene Kläranlage)	2,00
• Arbeitssicherheit	0,02	• Eliminationseffizienz	1,00
• Störanfälligkeit	0,03	• Platzbedarf	1,00
• Betriebliche Flexibilität	0,02	• Einfluss auf Anlage z.B. Schlamm Entsorgung	1,00
• Elimination Mikroschadstoffe	0,01	• Betriebs- und Wartungsaufwand	1,00
• Elimination Feststoffe	0,01	• Transformationsprodukte	1,00
• Entstehung von Transformationsprodukten	0,02	• Bromatbildung	1,00
• Abhängigkeit vom internationalen Rohstoffmarkt	0,01	• CO ₂ -Footprint	1,00
• Aktivkohleschlupf	0,02	• Gefahrenstoffe auf KA	1,00
• Zusätzliche P-Elimination	0,01	• Reaktivierung AK	1,00
• Reduktion CSB	0,01	• Flexibilität Änderung Ausbaugröße	1,00
• Reduktion DOC	0,01	• Flexibilität neue Anforderungen Mikroschadstoffe	1,00
• Planungssicherheit / Referenzen	0,0334	• P-Elimination in FF	1,00
• Komplexität der Realisierung	0,0333	• Mikroplastik-elimination in FF	1,00
• Auswirkungen Bauablauf auf sonstigen Betrieb	0,0333	• vorhandene Betriebserfahrung	1,00
• CO ₂ -Emissionen / Energieeffizienz	0,15		
• Platzbedarf	0,05		

Harmjanßen und Rummler (2017, S. 79 f) – ARA Osterwick		Weiß und Biebersdorf (2019, S. 43 ff) – ARA Nordwalde	
• Investitionskosten	0,15	• Jahreskosten	0,40
• Kapitalkosten	0,15	• Reinigungsleistung P_{ges}/CSB	0,10
• Betriebskosten	0,20	• Bildung Nebenprodukte	0,05
• Energiebedarf	0,15	• Erfahrungen/Referenzen	0,05
• Sensitivität Betriebskostenschwankungen	0,10	• Betriebs- und Wartungsaufwand	0,05
• Betriebs- und Wartungsaufwand	0,10	• Betriebssicherheit	0,05
• Betriebssicherheit	0,10	• Sensitivität Kostensteigerung	0,05
• Flächenbedarf	0,05	• Schlammproduktion	0,20
		• CO ₂ -Bilanz	0,05
Rohlfing und Müller-Schaper (2019, S. 60 ff) – ARA Horn-Bad Meinberg		Waermer, Radeck, Finkemeyer, & Nagel (2018, S. 93 ff) – ARA Bad Wünnenberg	
• Ökonomie	0,50	• Betriebssicherheit	0,20
• Betriebliche Aspekte	0,30	• Investitionskosten	0,40
• Ökologie	0,20	• Betriebs- und Jahreskosten	1,00
		• Eliminierungsgrad für Mikroschadstoffe	0,20
		• CO ₂ -Emissionen	0,60
		• Teilstrom-/Vollstrombehandlung	1,00

4 Kläranlagen des AWW Feldbach – Mittleres Raabtal

Der AWW Feldbach – Mittleres Raabtal umfasst zwei Verbandskläranlagen. Diese werden mit ihrem derzeitigen Ausbaustand hier vorgestellt.

4.1 Einzugsgebiet

Die VKA Feldbach-Raabau ist in Abbildung 7 mit grün eingefärbtem Einzugsgebiet dargestellt und das Einzugsgebiet der VKA Fladnitz im Raabtal ist türkis/mint dargestellt.

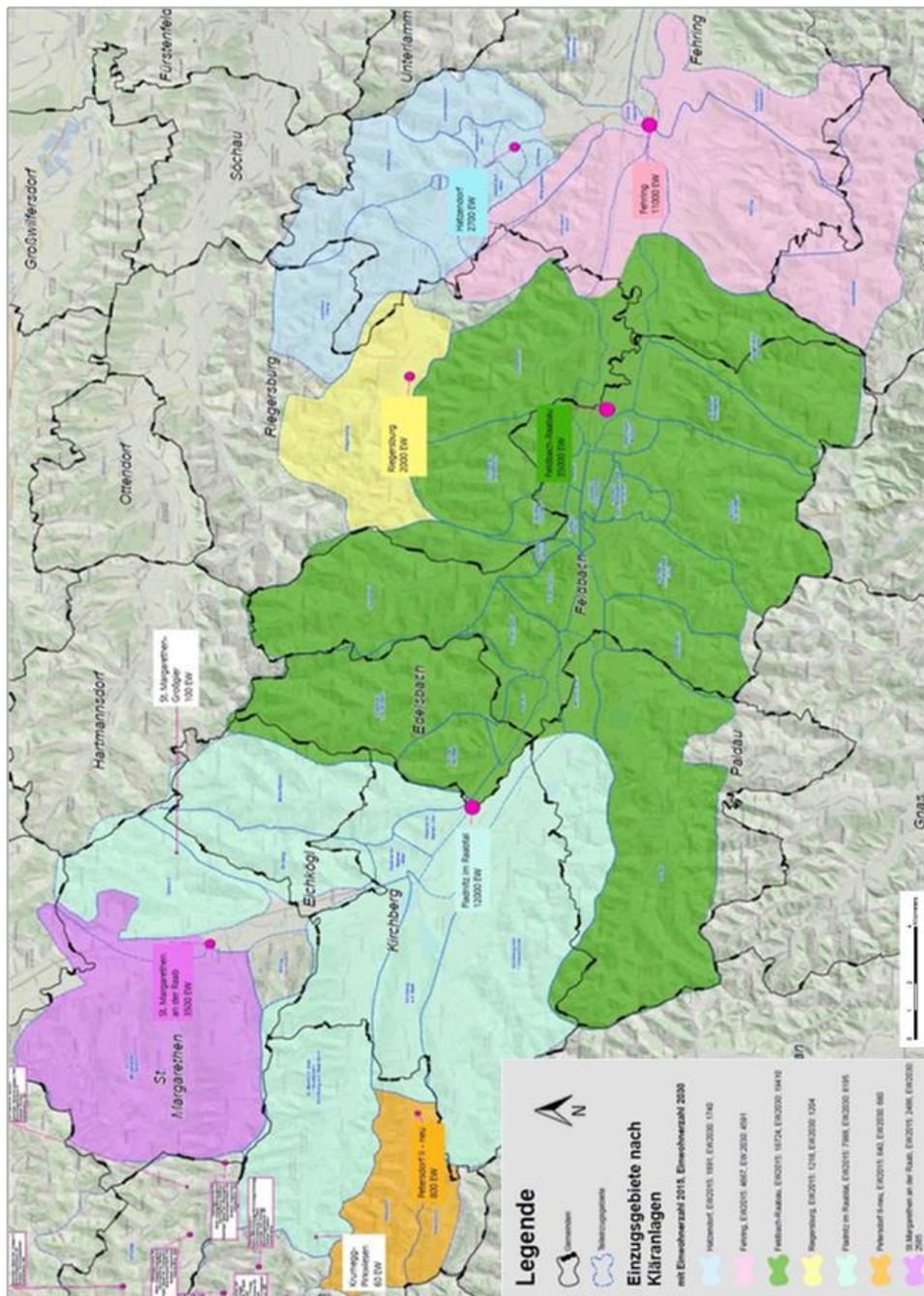


Abbildung 7 Einzugsgebiete der Kläranlagen im Raum um Feldbach (TDC ZT-GmbH & Lugitsch & Partner ZT GmbH, 2018) Einlage 03 Plan 02 bearbeiteter Ausschnitt

Als Indirekteinleiter zur VKA Feldbach-Raabau befindet sich Angaben des AWW Feldbach – Mittleres Raabtal neben dem Krankenhaus lediglich ein Betrieb zur Kren-Verarbeitung. Im Einzugsgebiet der VKA Fladnitz im Raabtal sind keine relevanten Indirekteinleiter ansässig. Daher ist für den direkten Einfluss auf die Spurenstoffe im Abwasser abgesehen vom Krankenhaus keine relevante Industrie (als Indirekteinleiter) vorhanden.

4.2 VKA Feldbach-Raabau

Die VKA Feldbach-Raabau wurde 1988 mit einer Ausbaugröße von 30.000 EW in Betrieb genommen. Mit dem Ausbau in den Jahren 2002 und 2003 wurde die Kapazität auf 35 000 EW erhöht. Im Jahre 2018 wurde die Erhöhung des Konsenses der Anlage ohne weiteren Umbau auf 40 000 EW bewilligt. Das gereinigte Abwasser wird bei Flusskilometer 244 in die Raab eingeleitet.



Abbildung 8 Luftbild der VKA Feldbach-Raabau(Land Steiermark // GIS-Steiermark, 2022)

Die Anlage VKA Feldbach-Raabau ist nach dem Belebtschlammverfahren gestaltet und verfügt über die in Abbildung 9 dargestellten Komponenten. Besonders an der VKA Feldbach Raabau ist, dass nur der Primärschlamm und die Schwimmstoffe aus dem Fettfang, nicht aber der Überschussschlamm in den Faulturm geleitet wird. Zudem empfängt die VKA Feldbach-Raabau den Überschussschlamm der VKA Fladnitz im Raabtal, welcher über das Kanalnetz in den Zulauf der Kläranlage gelangt. Der Klärschlamm der VKA Feldbach-Raabau wird derzeit landwirtschaftlich verwertet.

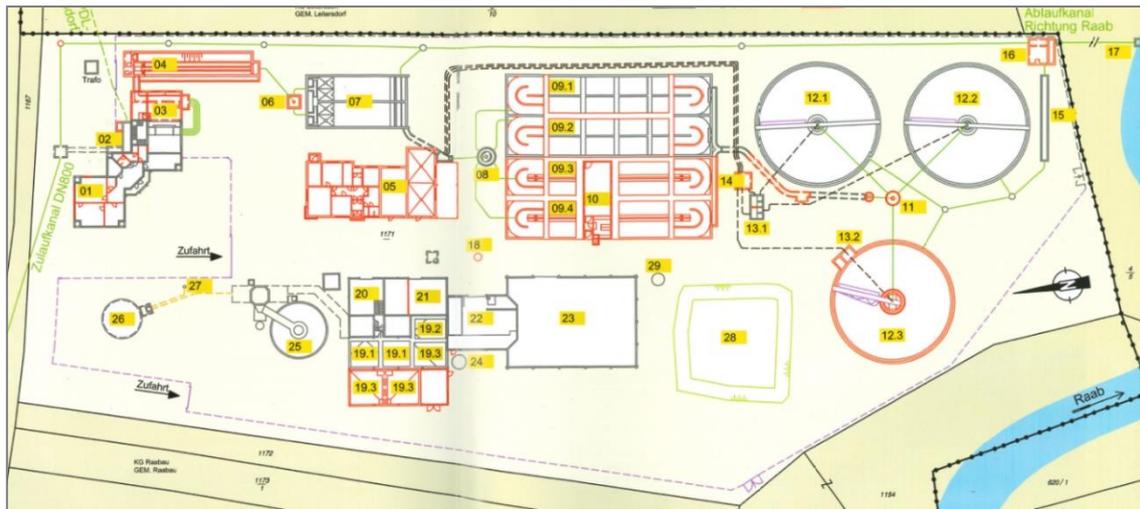


Abbildung 9 Schema der VKA Feldbach-Raabau (Abwasserverband Feldbach - Mittleres Raabtal, o.D., S. 14 f.) Ausschnitt

Die folgenden Ziffern beziehen sich auf die Bauwerke in Abbildung 9. Nicht im Plan verzeichnet sind die Fällmitteldosierung und die Blockheizkraftwerke.

01	Verwaltungsgebäude	15	Ablaufmengenmessung
02	Zulaufpumpwerk	16	Hochwasserpumpwerk
03	Rechenanlage	17	Auslaufbauwerk Raab
04	Sand- und Fettfang	18	Trübwasserpumpwerk
05	Betriebsgebäude mit Werkstatt	19.1 – 19.3	Eindicker
06	Verteilerbauwerk Vorklärbecken	20	Technikraum
07	Vorklärbecken	21	MÜSE
08	Verteilerbauwerk	22	Kammerfilterpresse
09.1-09.4	Belebungsbecken	23	Schlammagerhalle
10	Gebläsehaus	24	Kalksilo
11	Verteilerbauwerk Nachklärbecken	25	Faulturm
12.1 -12.3	Nachklärbecken	26	Gasspeicher
13.1 & 13.2	Rücklauf- und Überschussschlammumpwerk	27	Gasfackel
14	Rücklaufschlammengenmessung	28	Zwischendeponie Kanalräumgut
		29	Brunnen

Mit den Abflussdaten¹ der Raab an den jeweiligen Einleitstellen der Kläranlagen liegt der Abwasseranteil² am mittleren Niedrigwasserabfluss (MNQ) der Raab bei der VKA Feldbach-Raabau bei derzeitiger Auslastung bei etwa 3,02% (bei Ausbaugrenze nach derzeitigem Bescheid etwa 4,47%). Und der Abwasseranteil am Median des Abflusses (näherungsweise als 0,5*MQ) liegt derzeit bei etwa 1,69% (bei Ausbaugrenze etwa 2,50%).

ARZNEIMITTELSCREENING

Für die VKA Feldbach-Raabau wurde im Jahre 2019 ein Spurenstoffscreening mit dem Fokus

¹ Statistisch ermittelte Abflussdaten, am 08.04.2022 übermittelt vom Amt der Steiermärkischen Landesregierung Abteilung 14 Wasserwirtschaft, Ressourcen und Nachhaltigkeit

² Berechnung nach MILNV NRW (2020)

auf Arzneimittelrückstände durchgeführt. Die Ergebnisse daraus sind in Abbildung 10 dargestellt.

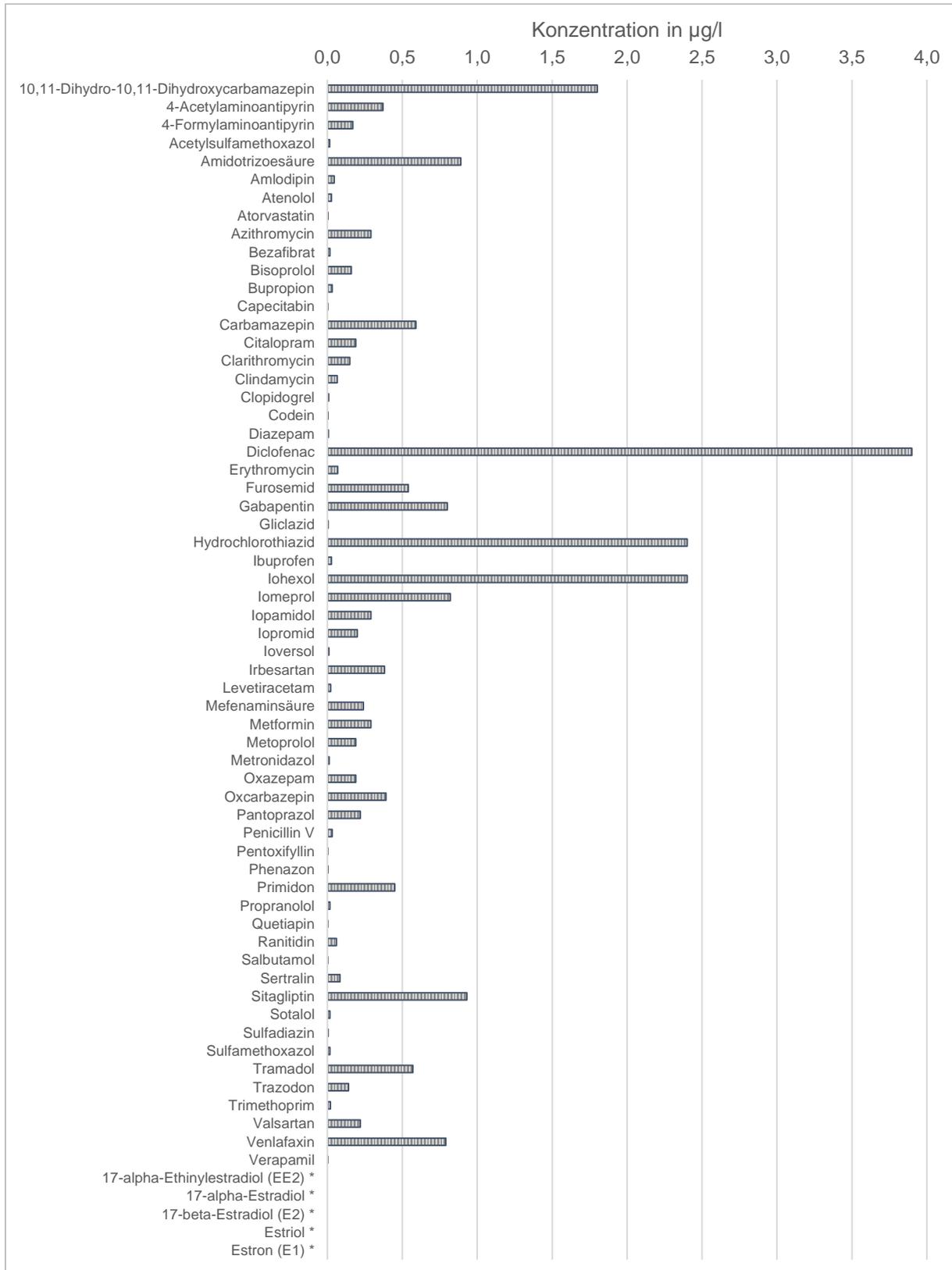


Abbildung 10 Ergebnis des Arzneimittelscreenings im Oktober 2019 (VKA Feldbach-Raabau)

* Nicht nachgewiesen (Nachweisgrenze bei 0,00050 µg/l)

4.3 VKA Fladnitz im Raabtal

Die Inbetriebnahme der VKA Fladnitz im Raabtal erfolgte im Jahr 1990 mit einer Ausbaugröße von 6.500 EW (ABWASSERVERBAND FELDBACH - MITTLERES RAABTAL, 2005). Der derzeitige Ausbaustand mit einer Kapazität von 12.000 EW ist in Abbildung 11 abgebildet. Die Kläranlage in Fladnitz leitet bei Flusskilometer 255 in die Raab ein.



Abbildung 11 Luftbild der VKA Fladnitz im Raabtal (LAND STEIERMARK// GIS-STEIERMARK, 2021)

Auch die VKA Fladnitz im Raabtal für das Belebtschlammverfahren konzipiert. Auffällig ist, dass die VKA Fladnitz im Raabtal keine Vorklärung besitzt. Der Grund dafür ist, dass die VKA Fladnitz im Raabtal keine Schlammfäulung besitzt, sondern mit aerober Schlammstabilisierung betrieben wird.

Wie bereits in Kapitel 4.2 erwähnt, wird der Überschussschlamm der Anlage über das Kanalnetz in den Zulauf der VKA Feldbach-Raabau abgeleitet. Dies erfolgt über das herkömmliche Kanalnetz im Trennsystem. Daher muss die Option der PAK Dosierung in der Belebung für die VKA Fladnitz im Raabtal speziell geprüft werden.

Die Anlage besteht aus den folgenden in Abbildung 12 dargestellten Teilen:

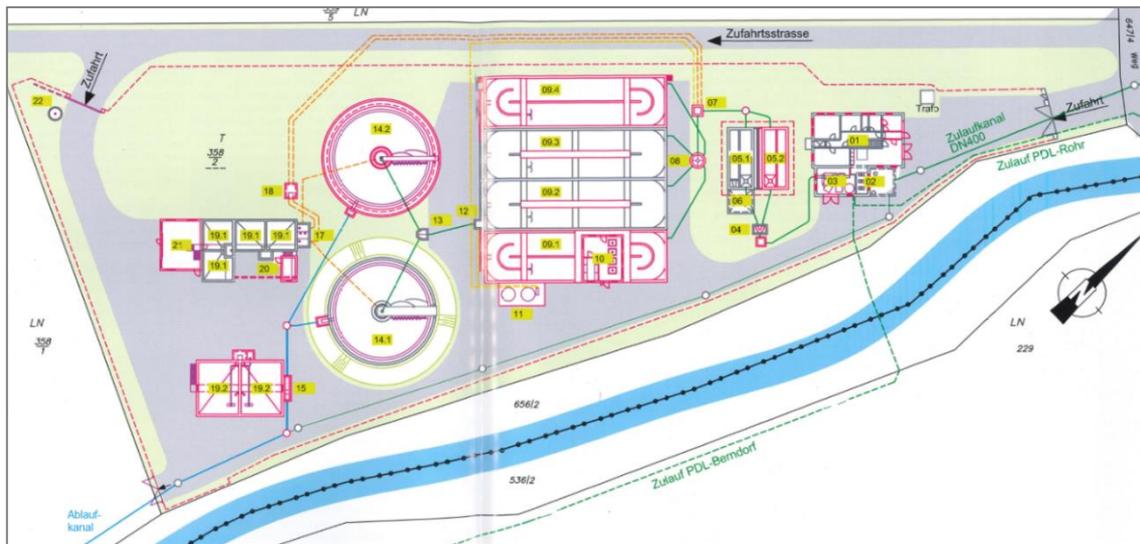


Abbildung 12 Schema der VKA Fladnitz im Raabtal (ABWASSERVERBAND FELDBACH - MITTLERES RAABTAL, 2005, 12 f) bearbeiteter Ausschnitt

Legende der Nummern von Bauwerken in Abbildung 12:

- | | | | |
|-------------|------------------------------------|-------------|--|
| 01 | Verwaltungsgebäude | 13 | Verteilerbauwerk NKB |
| 02 | Zulaufpumpwerk | 14.1 & 14.2 | Nachklärbecken |
| 03 | Rechenanlage | 15 | Ablaufmengenmessung |
| 04 | Verteilerbauwerk Sand-/Fettfang | 16 | Auslaufbauwerk Raab (nicht in Abbildung 12 zu sehen) |
| 05.1 & 05.2 | Sand- und Fettfang | 17 | Rücklauf- & Überschuss-schlamm-pumpwerk |
| 06 | Fettspeicher | 18 | Rücklaufschlamm-mengenmessung |
| 07 | Einlaufschacht Verteilerbauwerk BB | 19.1 & 19.2 | Eindicker |
| 08 | Verteilerbauwerk BB | 20 | E-Raum |
| 09.1-09.4 | Belebungsbecken | 21 | Werkstätte |
| 10 | Gebälsehaus | 22 | Brauchwasserbrunnen |
| 11 | Fällmittelstation | | |
| 12 | Ablaufgerinne BB | | |

Mit den Abflussdaten³ der Raab an den jeweiligen Einleitstellen der Kläranlagen liegt der Abwasseranteil⁴ am mittleren Niedrigwasserabfluss (MNQ) der Raab bei der VKA Fladnitz im Raabtal bei der Ausbaugrenze bei etwa 1,32%. Und der Abwasseranteil am Median des Abflusses (näherungsweise als 0,5*MQ) liegt bei der Ausbaugrenze bei etwa 0,80%.

Von der VKA Fladnitz im Raabtal liegt derzeit kein Screening zu Spurenstoffen vor.

³ Statistisch ermittelte Abflussdaten, am 08.04.2022 übermittelt vom Amt der Steiermärkischen Landesregierung Abteilung 14 Wasserwirtschaft, Ressourcen und Nachhaltigkeit

⁴ Berechnung nach MILNV NRW (2020)

5 Kläranlagen mit bestehender 4. Reinigungsstufe in der EU

5.1 Anlagen im Bereich um 40.000 EW

Für die Ausbaugröße von 30.000 bis 55.000 EW konnten 20 Kläranlagen mit 4. Reinigungsstufe gefunden werden, die derzeit im Betrieb, Planung oder Bau sind. Diese sind in Tabelle 5 aufgelistet, es wurde nach Möglichkeit ein Link zum Steckbrief oder Projektbericht der jeweiligen Kläranlage mit angefügt. In Abbildung 13 sind die verwendeten Technologien dargestellt.

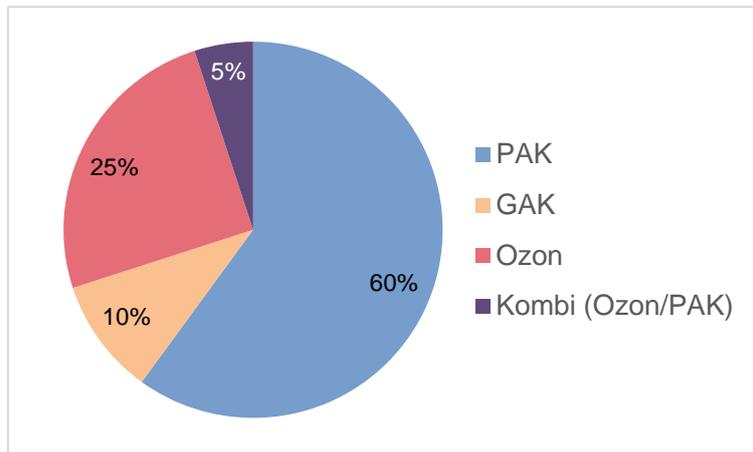


Abbildung 13 Verteilung der Technologien zur Spurenstoffentfernung bei Kläranlagen von 30.000 bis 55.000 EW

Dabei ist auffällig, dass die meisten Kläranlagen im Bereich von 30.000 bis 55.000 EW ein Verfahren mit PAK nutzen. Lediglich eine Kläranlage nutzt bisher eine Kombinationslösung aus Ozon und PAK.

Tabelle 5 Auflistung von Kläranlagen mit 4. Reinigungsstufe (Betrieb, Planung/Bau) im Bereich von 30.000 bis 55.000 EW in Deutschland und der Schweiz, Datenquellen: (VSA, 2019) und (KomS BW, 2021)

PLANUNG/BAU O. BETRIEB	VERFAHREN	AUSBAU-GRÖßE	ORT	LAND	LINK
Betrieb	PAK + Sedimentation + Filtration	34.000 EW	Herisau	Schweiz	Steckbrief Bericht
Betrieb	PAK in BB	32.000 EW heute	Flos Wetzikon	Schweiz	Steckbrief Bericht
Betrieb	Ozonung + Wirbelbett/Festbett	30.000 EW	Duisburg-Vierlinden	Deutschland (NRW)	Steckbrief Bericht
Betrieb	PAK + Sedimentation + Filtration	55.000 EW	Dülmen	Deutschland (NRW)	Steckbrief
Betrieb	PAK + Sedimentation + Filtration	43.000 EW	Stockacher Aach	Deutschland (BW)	Steckbrief
Betrieb	PAK + Sedimentation + Tuchfiltration	35.000 EW	Laichingen	Deutschland (BW)	Steckbrief

PLANUNG/BAU O. BETRIEB	VERFAHREN	AUSBAU-GRÖßE	ORT	LAND	LINK
Betrieb	PAK + Sedimentation + Sandfiltration	36.000 EW	Albstadt Lautlingen	Deutschland (BW)	-
Betrieb	PAK + Sedimentation + Sandfiltration	46.700 EW	Öhringen	Deutschland (BW)	Steckbrief
Betrieb	PAK + Sedimentation + Filtration	36.000 EW	Albstadt-Lautlingen	Deutschland (BW)	-
Betrieb	Ozon + PAK + Fällung + Sandfiltration	50.000 EW	Eriskirch	Deutschland (BW)	-
Planung/Bau Stand 2019	GAK im Wirbelbett	43.000 EW	Niederglatt-Fischbach	Schweiz	-
Planung/Bau Stand 2019	Ozonung + Filtration (bestehend)	54.000 EW	Kloten-Opfiko	Schweiz	Bericht1 Bericht2
Planung/Bau Stand 2019	PAK vor Filtration	30.000 EW	Untermarch	Schweiz	Bericht
Planung/Bau Stand 2019	Ozonung + Sandfilter	45.600 EW	Buchs	Schweiz	-
Planung/Bau Stand 2019	Ozonung mit Sandfiltration (bestehend)	30.000 EW	Birsig	Schweiz	-
Planung/Bau Stand 2019	PAK Dosierung vor Filtration	40.000 EW	Ergolz 1	Schweiz	Bericht
Planung/Bau Stand 2019	Ozonung mit zweistrasiger Nachbehandlung (GAK und Sandfilter)	35.000 EW	Weissenburg	Deutschland (BY)	Bericht
Planung Stand 2021	PAK	30.200 EW	Achern	Deutschland (BW)	-
Planung Stand 2021	PAK	41.000 EW	Kornwestheim	Deutschland (BW)	-
Planung Stand 2021	GAK	34.600 EW	Immenstaad	Deutschland (BW)	-

Weitere Kläranlagen mit 4. Reinigungsstufe mit anderen Ausbaugrößen oder Forschungsprojekte können unter anderem der in Kapitel 3.1 aufgeführten Links entnommen werden.

5.2 Anlagen im Bereich um 12.000 EW

In Tabelle 6 sind bereits bestehende und geplante bzw. gerade im Bau befindliche Kläranlagen im Bereich von 9.000 bis 16.000 EW aufgeführt (auch hier, wenn möglich mit weiterführendem Link). Es lässt sich feststellen, dass die Spurenstoffentfernungs-Technologien in dieser Größenordnung an Kläranlagen relativ gleich verteilt sind (vgl. Abbildung 14). Es ist jedoch zu beachten, dass lediglich acht Anlagen im Vergleich enthalten sind.

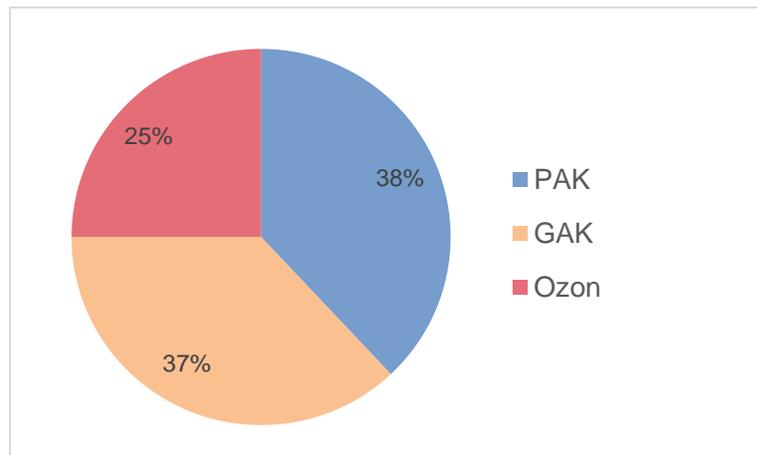


Abbildung 14 Verteilung der Technologien zur Spurenstoffentfernung bei Kläranlagen von 9.000 bis 16.000 EW

Tabelle 6 Auflistung von Kläranlagen mit 4. Reinigungsstufe (Betrieb, Planung/Bau) im Bereich von 9.000 bis 16.000 EW in Deutschland, Frankreich und der Schweiz, Datenquellen: (VSA, 2019) und (KomS BW, 2021)

PLANUNG/BAU ODER BETRIEB	VERFAHREN	AUSBAU-GRÖÖE	ORT	LAND	LINK
Betrieb	GAK im Wirbelbett	15.000 EW	Penthaz	Schweiz	Steckbrief Bericht
Betrieb	Ozonung + Sandfilter	15.000 EW	St. Pourçain-sur-Sioule	Frankreich	-
Betrieb	Ozonung + Schönungsteich	13.000 EW	Bad Sassendorf	Deutschland (NRW)	Steckbrief
Betrieb	PAK + Flexbedfilter	12.000 EW	Barntrop	Deutschland (NRW)	Steckbrief
Planung/Bau Stand 2019	PAK + Sedimentation + Filtration	12.000 EW	Fehraltorf	Schweiz	-
Planung/Bau Stand 2019	PAK vor Filtration	15.000 EW	Gossau-Grüninge	Schweiz	Steckbrief
Planung/Bau Stand 2019	GAK	13.800 EW	Darmsheim, Sindelfingen	Deutschland (BW)	-
Planung/Bau Stand 2019	GAK	16.000 EW	Halzhausen	Deutschland (BW)	-

Auch hier gilt, dass weitere Kläranlagen mit einer 4. Reinigungsstufe mit anderen Ausbaugrößen oder Forschungsprojekte unter anderem den Links in Kapitel 3.1 entnommen werden können.

6 Bereits durchgeführte Machbarkeitsstudien in Deutschland und der Schweiz

Die Begründungen der Studien für die jeweilige Vorzugsvariante werden im Folgenden kurz aufgelistet, dabei wurden sowohl die Machbarkeitsstudien von 30.000 bis 55.000 EW als auch die Studien von 9.000 bis 16.000 EW einbezogen. Dabei ist zu beachten, dass viele der Gründe nicht für jede Anlage mit der jeweiligen Technologie zutreffen. Genauere Informationen können den Links in Tabelle 7 und Tabelle 8 entnommen werden.

- Gründe für den Einsatz von PAK
 - Weiterverwendung bestehender Anlagenteile (Rührbehälter als Kontaktbecken, Fällmittelstation)
 - Einfache Implementierung auf der bestehenden KA
 - Kostengünstiger
 - Methode ohne Sedimentation deutlich kostengünstiger
 - Etwas besserer Rückhalt (als Ozon) von Mikroplastik
 - PAK in Kontaktbecken hat bessere Reinigungsleistung als PAK in BB
 - Auch bei Vorkommen Bromid, Nitrosamin-Vorläufersubstanzen oder Chrom im Abwasser einsetzbar
 - Keine/wenig Desorption im Gegensatz zu GAK
 - Im Falle einer Verpflichtung zur Klärschlammverbrennung bestehen keine Nachteile in der Schlammensorgung mehr (trotzdem fällt mehr Schlamm an als bei den anderen Methoden)
 - Zusätzlich CSB und Phosphorreduktion
 - Bei PAK mit Sedimentation und Filtration wurde bereits viel Erfahrung auf anderen ARA gesammelt
 - Wirkungsweise der Stoffelimination eindeutig und keine Bildung von Reaktionsprodukten
 - Gute Erfahrungen im Betrieb von bestehenden Anlagen
 - Bei Dosierung in BB kein Zwischenpumpwerk erforderlich
 - PAK in BB hat höhere Betriebssicherheit durch geringeren Technikanteil
- Gründe für den Einsatz von GAK
 - Geringer Wartungsaufwand, weil wenige Messstellen und Antriebe vorhanden
 - Kostengünstiger, wenn Sand-Carbon-Filter anstatt Flockungsfiltration verwendet wird
 - Etwas besserer Rückhalt (als Ozon) von Mikroplastik
 - Klärschlamm weiterhin landwirtschaftlich verwertbar
 - Auch bei Vorkommen Bromid, Nitrosamin-Vorläufersubstanzen oder Chrom im Abwasser einsetzbar
 - GAK kann regeneriert werden (PAK derzeit nicht)
 - Wenn keine Bausubstanz vorhanden ist, kostengünstiger als PAK
 - Keine Verringerung des Schlammalters in der Belebung
 - CSB und Phosphorreduktion
 - Vorgeschaltete Filter zögern Verschlammung der GAK deutlich hinaus
 - Wirkungsweise der Stoffelimination eindeutig und keine Bildung von Reaktionsprodukten
 - Hohe Betriebssicherheit durch geringeren Technikanteil

- Gründe für den Einsatz von Ozon
 - Kostengünstiger, wenn Schönungsteich als Nachreinigung ausreicht
 - Auch wenn Ozonung viel Energie benötigt, ist der Strompreis nicht ausschlaggebend
 - Geringer Wartungsaufwand (bei Variante Schönungsteich), aber geschultes Personal benötigt
 - Einfacher eine UV-Anlage anzufügen, falls Entfernung multiresistenter Keime erforderlich
 - Klärschlamm weiterhin landwirtschaftlich verwertbar
 - Geringste Baukosten, falls keine Bausubstanz vorhanden ist
 - Sehr gute CO₂-Bilanz bei Öko-Storm
 - Keine Verringerung des Schlammalters in der Belebung

Es lässt sich allgemein feststellen, dass der Einsatz von PAK oft Vorteile bei bereits bestehender Bausubstanz hat. Vor allem in Kombination mit Platzmangel auf dem übrigen Betriebsgelände.

Bei der Verwendung von PAK wurde in vielen der Machbarkeitsstudien darauf hingewiesen, dass auf ein Sedimentationsbecken verzichtet werden kann, da die Eliminationsrate sich dadurch nicht signifikant verbessert.

In vielen der betrachteten Machbarkeitsstudien wird betont, dass zur Planungssicherheit bzw. zur Bestimmung der Vorzugsvariante die gesetzlichen Vorgaben der kommenden Jahre eine entscheidende Rolle spielen. Daneben wird z.B. von Schütte, Kasper und Schacht (2018) vorgeschlagen, das Monitoring fortzusetzen, damit bei einer Konkretisierung der gesetzlichen Bestimmungen für die Auswahl eines Verfahrens auf eine größere Datenbasis zurückgegriffen werden kann.

Aus mehreren der Machbarkeitsstudien geht hervor, dass bewusst auf eine Polymerdosierung verzichtet wurde, weil dies offenbar keine ausschlaggebende Verbesserung der Spurenstoffentfernung mit sich bringt.

Hinsichtlich der maschinellen Ausrüstung in den untersuchten Studien kann festgehalten werden, dass als Sandfilter oft der von der Fa. Nordic Water Products AB vertriebene kontinuierlich gespülte Sandfilter DynaSand®-Filter betrachtet wurde. Zusätzlich werden für den GAK-Einsatz in mehreren Studien die kontinuierlich gespülten DynaSand® Carbon-Filter herangezogen. Es sind auch Machbarkeitsstudien enthalten, die für die PAK-Filtration oder vorgeschaltet für GAK-Anwendungen sogenannte Flexbed-Filter wie Fuzzy Filter® der Fa. Bosman Watermanagement GmbH verwenden.

6.1 Anlagen im Bereich um 40.000 EW

Für die Größenordnung von 30.000 bis 55.000 EW konnten 18 Machbarkeitsstudien verglichen werden, diese liegen alle in NRW in Deutschland. Diese sind in Tabelle 7 aufgelistet. In Abbildung 15 sind die Vorzugsvarianten aus Tabelle 7 gegenübergestellt.

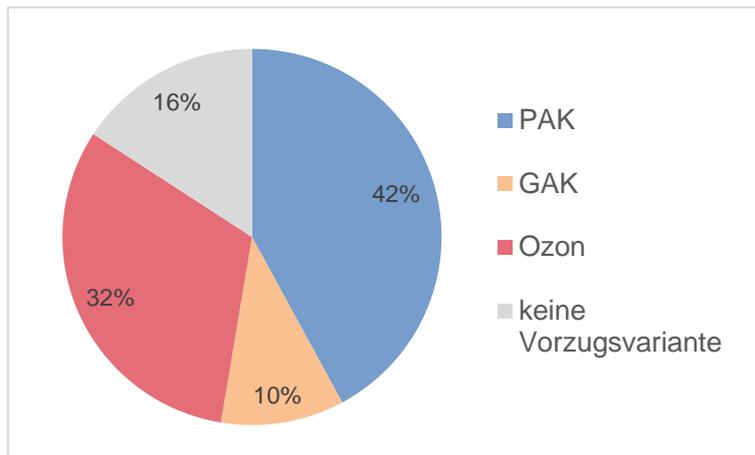


Abbildung 15 Vorzugsvarianten der Studien in Tabelle 7 bezüglich Verfahren zur 4. Reinigungsstufe (30.000 bis 55.000 EW)

Es lässt sich feststellen, dass über 40% eine PAK-Dosierung für die beste Variante halten, gefolgt von Ozon. Drei der Studien konnten aus unterschiedlichen Gründen keine beste Variante ermitteln.

Tabelle 7 Auflistung von Machbarkeitsstudien im Bereich von 30.000 bis 55.000 EW in Deutschland, Vorzugsvariante: grau markiert, Datenquellen: (KOM-M.NRW, 2021), (LANUV, 2022a) und (LANUV, 2022b)

VERFAHREN	AUSBAU-GRÖßE	ORT	LAND	LINK
<ul style="list-style-type: none"> PAK – mit Rückführung PAK – ohne Rückführung GAK Ozon 	49.000 EW	Ochtrup	Deutschland (NRW)	Kosten Studie
<ul style="list-style-type: none"> PAK in BB PAK in Kontaktbecken GAK Ozonbehandlung Ozonung und GAK * 	30.000 EW	Münster-Hiltrup	Deutschland (NRW)	Studie
<ul style="list-style-type: none"> PAK im Kontaktbecken + Flockungsfiltration PAK im Kontaktbecken + Tuchfiltration GAK in Flockungsfiltrationsbecken GAK in Sand-Carbon-Filtern Ozonung mit Schönungsteich 	34.000 EW	Horn-Bad Meinberg	Deutschland (NRW)	Studie
<ul style="list-style-type: none"> PAK mit Kontakt und -absetzbecken + Tuchfilter GAK Ozonung mit biol. Aktivkohlefilter Ozonung ohne biol. Nachbehandlung 	38.000 EW	Schwalm-tal-Amern	Deutschland (NRW)	Studie
<ul style="list-style-type: none"> PAK in BB PAK in Kontaktbecken GAK 	40.000 EW	Hörstel	Deutschland (NRW)	Studie

<ul style="list-style-type: none"> • Ozon • Ozonung und GAK 				
<ul style="list-style-type: none"> • PAK in Kontaktbecken ohne Rückführung • PAK in Kontaktbecken mit Rückführung in BB • PAK in BB • GAK mittels Sandfilter • Ozonung + Filtration mittels Sandfilter 	30.000 EW	Enningerloh	Deutschland (NRW)	Steckbrief
<ul style="list-style-type: none"> • PAK • GAK • Ozonung 	30.000 EW	Bad Lipspringe	Deutschland (NRW)	Steckbrief Studie
<ul style="list-style-type: none"> • PAK vor Sandfilter • PAK in BB • GAK-Druckfilter • Ozonung und Sandfilter 	47.000 EW	Wegberg	Deutschland (NRW)	Studie
<ul style="list-style-type: none"> • Simultane PAK in BB • Nachgeschaltete PAK • GAK • Ozonung • Kombination Ozonung und Ultraschall 	33.000 EW	Espelkamp	Deutschland (NRW)	Steckbrief Studie
<ul style="list-style-type: none"> • PAK in BB mit Sandfilter/Tuchfilter • PAK in adsorptiver Reinigungsstufe mit Sandfilter/Tuchfilter • GAK in Sand-Carbon-Filter • GAK in Festbett-Adsorber • Ozon, Nachbehandlung im Sandfilter 	30.000 EW	Geseke	Deutschland (NRW)	Steckbrief Studie
<ul style="list-style-type: none"> • PAK im Kontaktbecken + Sedimentation, Tuchfilter und Rezirkulation in BB • PAK im Kontaktbecken +Tuchfilter und Rezirkulation in BB • PAK im BB + Sandfilter nach NKB • GAK im Carbon-Filter + vorgeschalteter Sandfilter 	49.285 EW	Lengerich	Deutschland (NRW)	Steckbrief Studie
<ul style="list-style-type: none"> • PAK als nachgeschaltete Teilstrombehandlung mit Kontakt- und Absetzbecken • Ozon in nachgeschalteter Teilstrombehandlung • GAK in neu zu errichtender Filtrationsstufe als nachgeschaltete Teilstrombehandlung 	47.000 EW	Oelde	Deutschland (NRW)	Steckbrief Studie
<ul style="list-style-type: none"> • GAK-Kiesfilter • Simultane bzw. nachgeschaltete PAK mit Sandfiltrater • Ozonung (mit Bio-Adsorption zur Vorbehandlung des Abwassers des indirekt einleitenden Gewerbebetriebs sowie Überleitung und Tuchfiltration) * 	43.000 EW	Rhede	Deutschland (NRW)	Steckbrief
<ul style="list-style-type: none"> • PAK in BB + Flockungsfiltration • PAK in Kontaktbecken + Sedimentation und Flockungsfiltration • GAK + Flockungsfiltration • Ozonung + Flockungsfiltration* 	45.000 EW	Sassenberg-Füchtorf	Deutschland (NRW)	Steckbrief

<ul style="list-style-type: none"> PAK im Kontaktbecken + Sedimentation und Filtration mittels Tuchfilter PAK im Kontaktbecken + Tuchfilter PAK im Kontaktbecken + Tuchfilter und Rezirkulation in BB PAK im BB + Tuchfilter nach NKB Ozonung + Sandfilter 	30.500 EW	Stadtlohn	Deutschland (NRW)	Steckbrief Studie
<ul style="list-style-type: none"> PAK in BB mit Sandfilter/Tuchfilter PAK in adsorptiver Reinigungsstufe Sandfilter GAK in Sand-Carbon-Filter + vorgeschaltetem Sandfilter GAK in Festbett-Adsorber + vorgeschaltetem Sandfilter Ozonung, nachgeschalteter Sandfilter 	40.000 EW	Steinhagen	Deutschland (NRW)	Steckbrief
<ul style="list-style-type: none"> PAK in BB mit Sandfilter/Tuchfilter PAK in adsorptiver Reinigungsstufe GAK in Sand-Carbon-Filter GAK in Festbett-Adsorber Ozonung + nachgeschaltetem Schönungsteich Ozonung+ nachgeschaltetem Sandfilter 	30.000 EW	Verl-Sende	Deutschland (NRW)	Steckbrief
<ul style="list-style-type: none"> Ozonung mit Wirbelbettreaktor zur biologischen Nachbehandlung Ozonung mit nachgeschaltetem GAK-Filter 	40.000 EW	Wesseling-Rodderweg	Deutschland (NRW)	Steckbrief

* es konnte keine Vorzugsvariante bestimmt werden

6.2 Anlagen im Bereich um 12.000 EW

Die in Tabelle 8 grau hinterlegte Variante ist die aus der jeweiligen Machbarkeitsstudie hervorgegangene Vorzugsvariante. Insgesamt wurden 13 Machbarkeitsstudien in der Größenordnung von 9.000 bis 16.000 EW herangezogen. Wie in Abbildung 16 zu sehen ist, erscheint der Einsatz von pulverisierter Aktivkohle für die meisten Kläranlagen (7 aus 13) als sinnvollste Variante. Im Zuge einer dieser Machbarkeitsstudien konnte keine Vorzugsvariante ermittelt werden.

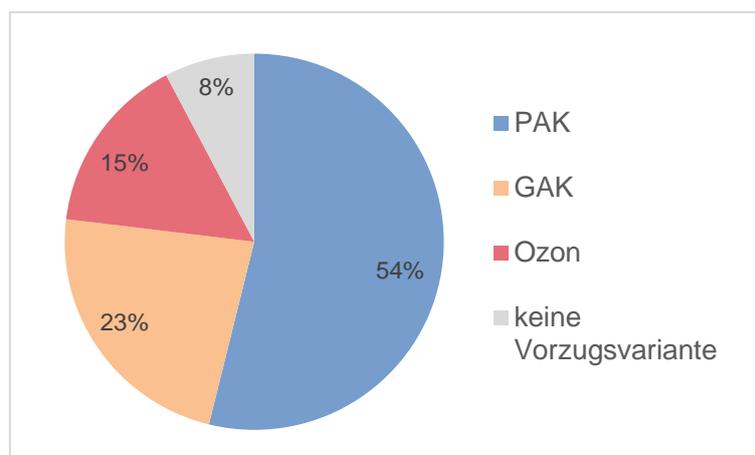


Abbildung 16 Vorzugsvarianten der Studien in Tabelle 8 bezüglich Verfahren zur 4. Reinigungsstufe (9.000 bis 16.000 EW)

Tabelle 8 Auflistung von Machbarkeitsstudien im Bereich von 9.000 bis 16.000 EW in Deutschland, Vorzugsvariante: grau markiert, Datenquellen: (KOM-M.NRW, 2021), (LANUV, 2022a) und (LANUV, 2022b)

VARIANTEN	AUSBAU-GRÖßE	ORT	LAND	LINK
<ul style="list-style-type: none"> PAK – mit Rückführung PAK – ohne Rückführung GAK Ozon 	14.800 EW (nach Um- bau)	Altenberge	Deutsch- land (NRW)	Studie
<ul style="list-style-type: none"> PAK im Verfahren Adsorption-Flockung-Sedimentation-Filtration PAK im Verfahren: Adsorption-Flockung-Filtration PAK im BB GAK 	11.000 EW	Horstmar	Deutsch- land (NRW)	Studie
<ul style="list-style-type: none"> PAK – mit Rückführung GAK Ozon 	14.000 EW	Nordwalde	Deutsch- land (NRW)	Studie
<ul style="list-style-type: none"> PAK in Kontaktbecken mit Filtration PAK in BB mit Filtration GAK Ozon 	15.000 EW	Lippetal	Deutsch- land (NRW)	Studie
<ul style="list-style-type: none"> PAK mit Neubau Sedimentationsbecken oder Umnutzung eines Nachklärbeckens + Flexbed-Filter PAK Rezirkulationsbetrieb + Flexbed-Filter GAK-Druckkessel + vorgeschalteter Flexbed-Filter 	12.000 EW	Barntrup	Deutsch- land (NRW)	Steckbrief Studie
<ul style="list-style-type: none"> PAK – mit Rückführung (Teilstrom) PAK – mit Rückführung (Vollstrom) Ozon 	15.000 EW	Südlohn	Deutsch- land (NRW)	Kosten Studie
<ul style="list-style-type: none"> PAK + Sedimentation im umgebauten NKB Sandfiltration mit Rezirkulation in BB PAK im Kontaktbecken + Sandfilter mit Rezirkulation in BB PAK im BB + Tuchfilter GAK im Carbon-Filter + vorgeschaltetem Sandfilter 	12.700 EW	Heiden	Deutsch- land (NRW)	Steckbrief Studie
<ul style="list-style-type: none"> PAK in BB + Flockungsfiltration PAK in Kontaktbecken + Sedimentation und Flockungsfiltration Ozonung mit Flockungsfiltration GAK mit Flockungsfiltration * 	12.500 EW	Hopsten	Deutsch- land (NRW)	Steckbrief Studie
<ul style="list-style-type: none"> PAK in BB mit Sandfilter/Tuchfilter PAK in adsorptiver Reinigungsstufe mit Sandfilter/Tuchfilter GAK in Sand-Carbon-Filter GAK in Festbett-Adsorber Ozonung, vorgesch. Tuchfilter, Schönungsteich Ozonung, nachgesch. Sandfilter 	10.000 EW	Langenberg	Deutsch- land (NRW)	Steckbrief Studie

<ul style="list-style-type: none"> • PAK in BB • PAK + nachgeschaltetem Sandfilter • GAK • Ozonung + Sandfilter 	12.000 EW	Netphen	Deutschland (NRW)	Steckbrief Studie
<ul style="list-style-type: none"> • PAK im Verfahren Adsorption-Flockung-Sedimentation-Filtration • PAK im Verfahren: Adsorption-Flockung-Filtration • PAK im BB • GAK 	13.000 EW	Osterwick	Deutschland (NRW)	Steckbrief Studie
<ul style="list-style-type: none"> • PAK im Kontaktbecken + Sedimentation, Sandfilter und Rezirkulation in BB • PAK im Kontaktbecken + Sandfilter und Rezirkulation in BB • PAK im BB + Tuchfiltration • GAK im Carbon-Filter + vorgeschalteter Sandfilter • Ozonung + Sandfilter 	10.000 EW	Saerbeck	Deutschland (NRW)	Steckbrief Studie

* es konnte keine Vorzugsvariante bestimmt werden

7 Varianten und Kriterien für die VKA Feldbach-Raabau und VKA Fladnitz im Raabtal

7.1 Mögliche Varianten

In den folgenden Kapiteln sollen nun infrage kommende Verfahren zur Spurenstoffentfernung für die beiden Kläranlagen des AWV Feldbach – Mittleres Raabtal bewertet werden. Als technisch und wirtschaftlich relevante Technologien können im Allgemeinen PAK, GAK und Ozonung bezeichnet werden. Die folgenden sechs Varianten stellen nach aktuellem Stand mögliche Varianten für die beiden Kläranlagen des AWV Feldbach – Mittleres Raabtal dar.

A.1 PAK-DOSIERUNG IN BELEBUNGSBECKEN MIT KONTINUIERLICH GESPÜLTEM SANDFILTER (NACHREINIGUNG)

Bei der Dosierung der pulverförmigen Aktivkohle direkt in die Belebung wird kein zusätzliches Becken benötigt. Nachgeschaltet ist die Installation eines Filters notwendig, um ein Abtreiben der PAK in das Gewässer zu verhindern. In diesem Fall wird hier ein kontinuierlich gespülter Sandfilter (KGS) betrachtet (vgl. Tabelle 9. und Abbildung 17).

Tabelle 9 Verfahrensbestandteile Variante A.1

HAUPTSYSTEM	DOSIERUNG IN/VOR	VORREINIGUNG	NACHREINIGUNG
PAK	Belebungsbecken (BB)	-	Kontinuierlich gespülter Sandfilter (KGS)

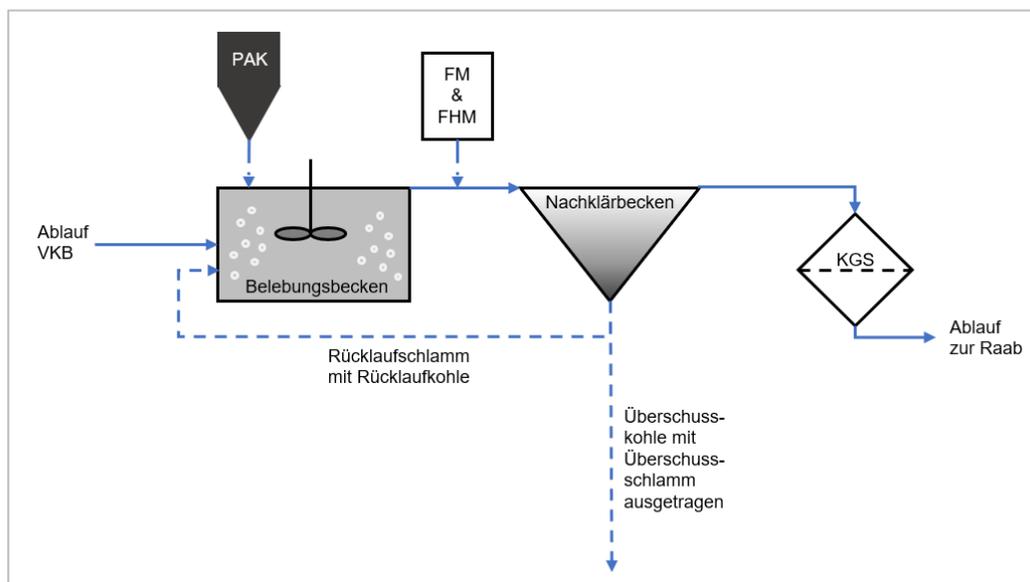


Abbildung 17 Verfahrensschema Variante A.1

A.2 PAK-DOSIERUNG IN KONTAKTBECKEN MIT ABSETZBECKEN ODER PARALLELPLATTENKLÄRER UND KONTINUIERLICH GESPÜLTEM SANDFILTER (NACHREINIGUNG)

Diese Variante stellt das sogenannte „Ulmer-Verfahren“ dar. Dabei wird die pulverisierte Aktivkohle in einem separaten Becken nach der Nachklärung zugegeben und über eine

Sedimentation wieder auszutragen. Die Sedimentation kann zum Beispiel mit einem Absetzbecken oder einem Parallelplattenklärer realisiert werden. Im Nachgang durchfließt das Abwasser dann einen Filter, z.B. einen kontinuierlich gespülten Sandfilter oder Tuchfilter, damit der Rückhalt der PAK gesichert werden kann.

Bei diesem Verfahren ist es möglich, weniger Kohle zuzugeben, da sich neben den Mikroschadstoffen, weniger störende Stoffe an die AK anlagern kann. Zudem ist mit diesem Verfahren möglich, die Kohle in einen eigenen Kreislauf zu fahren und damit nicht in Berührung mit dem Klärschlamm zu kommen. Bei diesem Vorgehen kann der Klärschlamm auch weiterhin (sofern gesetzlich erlaubt) landwirtschaftlich verwertet werden. Allerdings wird dann für die Überschusskohle eine zeitlich oder räumlich getrennte Schlammentwässerung benötigt.

Tabelle 10 Verfahrensbestandteile Variante A.2

HAUPTSYSTEM	DOSIERUNG IN/VOR	VORREINIGUNG	NACHREINIGUNG
PAK	Kontaktbecken (KB)	-	Sedimentationsbecken/ Parallelplattenklärer + KGS

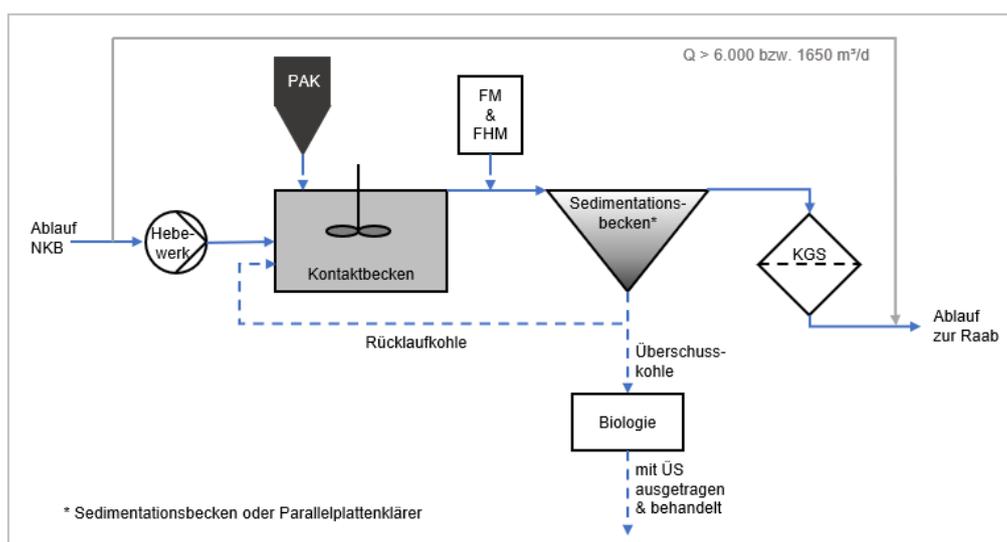


Abbildung 18 Verfahrensschema Variante A.2

B.1 GAK-FILTER MIT KONTINUIERLICH GESPÜLTEM SANDFILTER (VORREINIGUNG)

Um den GAK-Filter vor den Eintrag von hohen Konzentrationen von abfiltrierbaren Stoffen zu schützen, kann ein Filter (z.B. ein kontinuierlich gespülter Sandfilter, Flexbed-Filter oder Tuchfilter) vorgeschaltet werden.

Tabelle 11 Verfahrensbestandteile Variante B.1

HAUPTSYSTEM	DOSIERUNG IN/VOR	VORREINIGUNG	NACHREINIGUNG
GAK	Kontinuierlich gespülter Filter (KG)	KGS	-

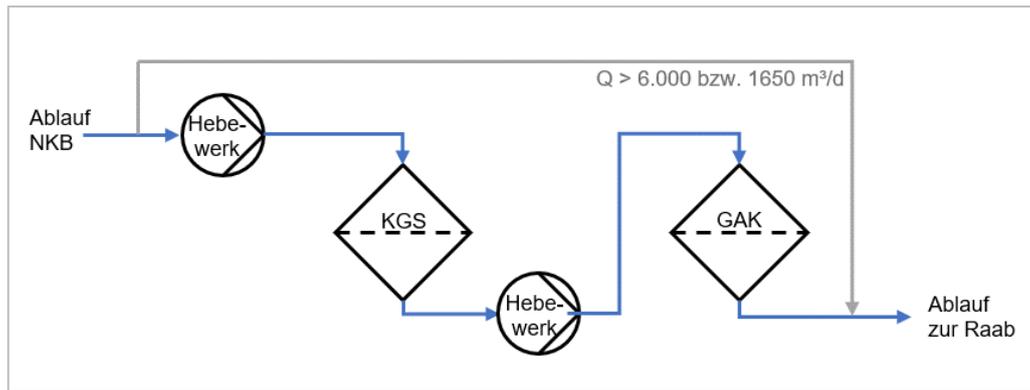


Abbildung 19 Verfahrensschema Variante B.1

B.2 GAK-FILTER MIT MIKROFILTRATION (VORREINIGUNG)

Diese Variante stellt die Methode aus dem Forschungsprojekt von Mach und Partner ZT-GmbH und SPIN TEC GmbH (2022) dar. Dabei wird eine Mikrofiltrations- bzw. Ultrafiltrationsmembran mit GAK umgeben. Das Schema eines Moduls ist in Abbildung 3 (Kapitel 3.2.3.1) dargestellt.

Bei dieser Behandlungsvariante ist es möglich, eine platzsparende 4. Reinigungsstufe umzusetzen. Bislang gibt es allerdings noch keine großtechnische Anlage.

Tabelle 12 Verfahrensbestandteile Variante B.2

HAUPTSYSTEM	DOSIERUNG IN/VOR	VORREINIGUNG	NACHREINIGUNG
GAK	Filtermodul	Mikrofilter	-

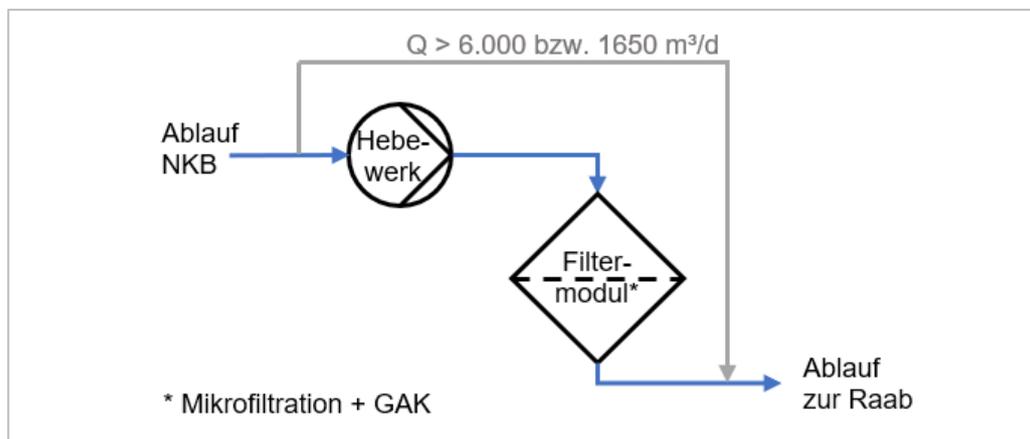


Abbildung 20 Verfahrensschema Variante B.2

C.1 OZONUNG MIT KONTINUIERLICH GESPÜLTEM SANDFILTER (BIOLOGISCHE NACHREINIGUNG)

Die Ozonung findet in einem eigenen Reaktionsbecken nach der Nachklärung statt. Bei der Begasung des Abwassers mit Ozon entstehen zum Teil ebenfalls schädliche Reaktionsprodukte. Zudem wird bei der Ozonung ein Teil des schlecht abbaubaren CSB in gut biologisch abbaubare Teile aufgebrochen. Dadurch erhöht sich die BSB₅-Konzentration im Ablauf

merklich. Daher ist es notwendig, eine biologische Stufe nach der Ozonung anzubringen. Dies kann unter anderem mit einem kontinuierlich gespülten Sandfilter realisiert werden.

Tabelle 13 Verfahrensbestandteile Variante C.1

HAUPTSYSTEM	DOSIERUNG IN/VOR	VORREINIGUNG	NACHREINIGUNG
Ozon	Kontaktbecken	-	KGS

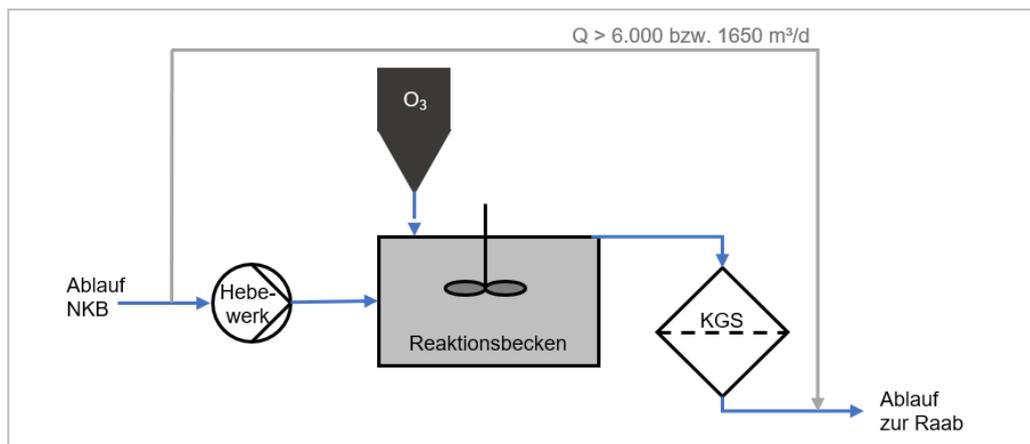


Abbildung 21 Verfahrensschema Variante C.1

C.2 KOMBINATION AUS OZON UND GAK-FILTER (BZW. BAK)

Die Nachbehandlung von ozoniertem Abwasser mit einem biologisch aktivierten GAK-Filter stellt die von Kreuzinger und Schaar (2016) für Österreich empfohlene Verfahrenskombination dar (siehe auch Kapitel 3.3.1).

Tabelle 14 Verfahrensbestandteile Variante C.2

HAUPTSYSTEM	DOSIERUNG IN/VOR	VORREINIGUNG	NACHREINIGUNG
Ozon	Kontaktbecken	-	BAK (biologisch aktivierte GAK)

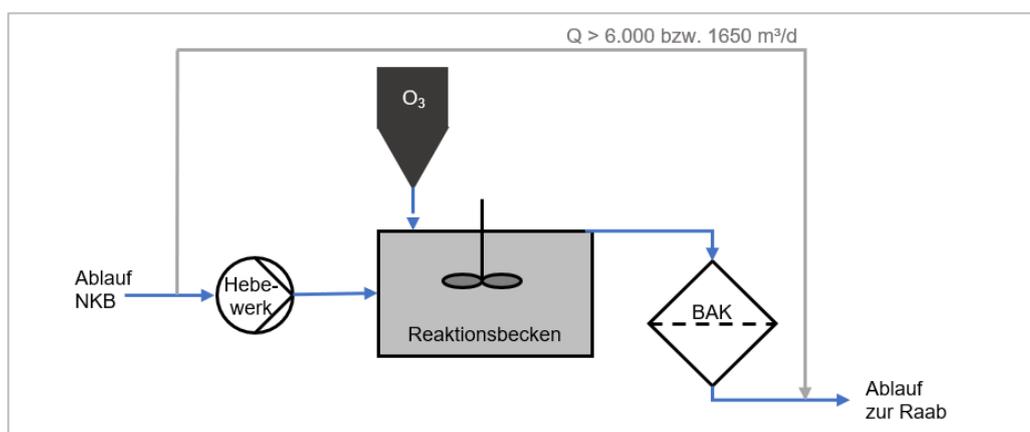


Abbildung 22 Verfahrensschema Variante C.2

Es wurden zunächst sechs Varianten erörtert, daraus werden folgende drei Varianten genauer betrachtet:

- A.1 PAK-Dosierung in Belebungsbecken mit kontinuierlich gespültem Sandfilter (Nachreinigung)
- B.1 GAK-Filter mit kontinuierlich gespültem Sandfilter (Vorreinigung)
- C.2 Kombination aus Ozonung und GAK-Filter (bzw. BAK)

Folgende Varianten wurden nicht weiter betrachtet:

- A.2 PAK-Dosierung in Kontaktbecken mit Absetzbecken oder Parallelplattenklärer und kontinuierlich gespültem Sandfilter (Nachreinigung)
zwei zusätzliche Becken (Kontakt- und Absetzbecken bzw. Parallelplattenklärer) und eine Sandfiltration benötigt -> hoher Platzbedarf und Investitionskosten
- B.2 GAK-Filter mit Mikrofiltration (Vorreinigung)
wenige Anhaltspunkt für eine Kostenschätzung vorhanden und bisher keine großtechnische Erfahrung
- C.1 Ozonung mit kontinuierlich gespültem Sandfilter (biologische Nachreinigung)
geringere Reinigungsleistung als mit BAK als Nachreinigung

7.2 Ausschluss- und Bewertungskriterien

Die ausgewählten Optionen für die VKA Feldbach-Raabau werden mit folgenden Kriterien bewertet. Dabei werden erst die Ausscheidungskriterien (siehe Tabelle 42) geprüft, um unter Umständen bereits Verfahren auszuschließen. Im Anschluss werden die verbleibenden Methoden durch ein Punktesystem (siehe Tabelle 42) bewertet. In Abbildung 23 sind die Bewertungskriterien zur Reihung der Verfahren anschaulich dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Wertung zu 50% aus den Jahreskosten (aus Investitions- und Betriebskosten) besteht.

Es wurden zwei Bewertungsmatrizen der drei Varianten erstellt. Die erste legt den Fokus mehr auf die betrieblichen Aspekte und die zweite Matrix ist mehr auf den Gewässerschutz fokussiert. Den Bewertungskriterien werden dann (abgesehen vom Kriterium Kosten) für jede der Varianten 0; 0,3; 0,5; 0,7; oder 1,0 Punkte verliehen. Dabei bedeuten 0 Punkte, dass das jeweilige Verfahren im jeweiligen Kriterium schlecht abschneidet, d.h. es nachteilige Auswirkungen hat (z.B. hoher Personalaufwand oder keine Flexibilität bezüglich der Wassermenge). 1,0 Punkte erreicht ein Verfahren in einem Kriterium, wenn es besonders gut abschneidet (z.B. geringer CO₂-Fußabdruck oder es gibt bereits viel Erfahrung mit dem Verfahren in der Spurenstoffentfernung). Das Kriterium Kosten wird folgendermaßen gewichtet. Die preisgünstigste Variante (anhand der Grobkostenschätzung) erhält 1,0 Punkte und die anderen prozentual weniger.

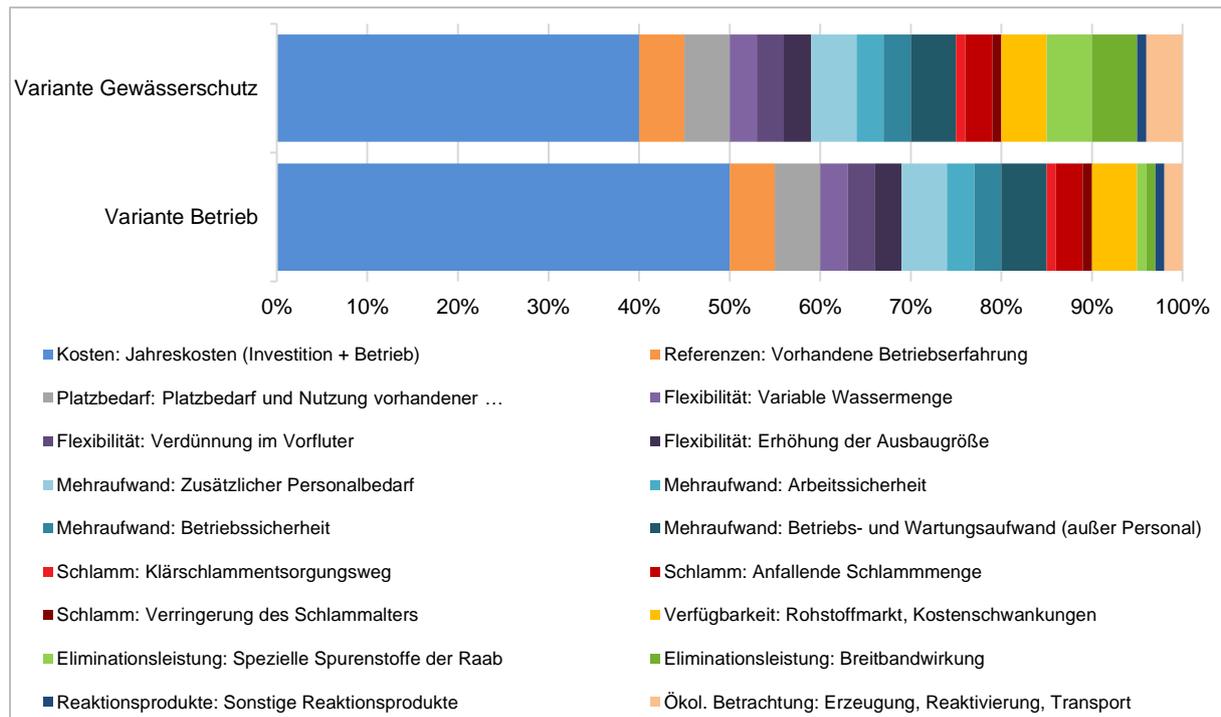


Abbildung 23 Grafische Darstellung der Gewichtung der spezifischen Bewertungskriterien zur Gewichtung der Verfahren (Varianten Betrieb und Gewässerschutz)

Die genaue Aufschlüsselung der Bewertung ist Tabelle 42 zu entnehmen. Sollte eines der Ausschlusskriterien ein Verfahren betreffen, fällt dieses sofort aus der Bewertung heraus.

- Die als Risikoindirekteinleiter von Bromid, Nitrosamin-Vorläufersubstanzen und Chrom eingestuftem Industriezweig werden vom VSA laufend in einer [Stoffliste](#) aktualisiert.
- Die Ableitung des Überschussschlammes wird vor allem aus folgenden Gründen zum Ausschlusskriterium. Es ist unklar, ob im Kanalnetz wieder Spurenstoffe aus der PAK freigesetzt werden. Die PAK landet letztlich über den Primärschlamm mit im Faultrum und es gibt dazu bisher kaum Erfahrungen. Die PAK mindert zudem etwas die Aufenthaltszeit in der Faulung.

Die Bewertungskriterien-/kategorien, anhand derer die Vorzugsvariante ausgewählt wird, werden im Folgenden kurz erklärt.

- **Kosten**
Die Jahreskosten (in €/a) darin sind die Kapitalkosten bezüglich der Investition als auch die Betriebskosten enthalten.
- **Referenzen**
Desto mehr Pilot- und großtechnische Anlagen für ein Verfahren bereits umgesetzt wurden, desto wahrscheinlicher lässt sich folgern, ob das Verfahren die gesetzten Reinigungsziele erreichen kann. Außerdem ist es für solche Verfahren im Allgemeinen auch einfacher Kostenschätzungen aufzustellen.

- **Platzbedarf**
Zur Reduktion der Flächenversiegelung und sparsamen Nutzung des begrenzten Platzangebots auf den Grundstücken der Kläranlagen. Auch wird in diesem Punkt bewertet, ob bereits vorhandene Bau- und Verfahrenstechnik genutzt werden kann.
- **Flexibilität**
Es wird bewertet, ob die Technik flexibel auf eine variable Wassermenge reagiert. Dies kann durch Zulaufschwankung, ein spezielles Steuerungskonzept oder eine Kapazitätserweiterung der Kläranlage auftreten. Um die Betriebskosten niedrig zu halten, wäre folgendes Steuerungskonzept denkbar. Es wird die Spurenstoffentfernung nur dann betrieben, wenn der Abwasseranteil durch die Einleitung der jeweiligen ARA über einem festgelegten Grenzwert zu liegen kommt. Dafür könnte eine Echtzeitübertragung der Pegelstände im Vorfluter in die Kläranlage der aktuellen Abflussmenge der ARA gegenübergestellt werden und z.B. bei mehr als dem vorher definierten Abwasseranteil am Gesamtabfluss die Spurenstoffentfernung in Betrieb genommen werden. Zur Umsetzung dieses Behandlungskonzepts muss allerdings die gesetzliche Regelung auf die Immission im Gewässer ausgelegt sein und nicht auf die Emission der ARA. Außerdem ist dieses Konzept nicht für alle technischen Verfahren zur Mikroschadstoffentfernung gleichermaßen gut geeignet. Nachteile hat hier vor allem die GAK-Filtration, da bei längeren Stillstandszeiten die Filter austrocknen können. Auch bei einer biologischen Aktivierung der Aktivkohle (BAK) können Leistungseinbußen auftreten, da die am Korn adsorbierte Bakterien infolge des fehlenden Substratmangels ihre Aktivität reduzieren.
- **Mehraufwand für die ARA**
Dabei werden sowohl der zusätzliche Personalaufwand, die Arbeitssicherheit (Hantieren mit Gefahrenstoffen, z.B. Ozon), die Betriebssicherheit (Höhe des Risikos eines Ausfalls der 4. Reinigungsstufe) und der Betriebs- und Wartungsaufwand ausschließlich des Personalaufwands (Verschleiß der Anlagenteile etc.) einbezogen.
- **Schlamm**
Es wird zum einen bewertet, ob der Klärschlamm ausschließlich der Verbrennung zugeführt werden darf und ob sich die Schlammmenge insgesamt erhöht. Andererseits wird auch einbezogen, ob die Methode das Schlammalter in der Biologie verringert. Sowohl die Klärschlammmentsorgung als auch das Schlammalter wurden aufgrund der Gegebenheiten sehr gering gewichtet.
- **Verfügbarkeit**
Es werden die Verbrauchsmaterialien (Aktivkohle und Reinsauerstoff) bezüglich ihrer Verfügbarkeit auf dem internationalen Rohstoffmarkt und der Preisstabilität bewertet.
- **Eliminationsleistung**
Als spezielle Spurenstoffe in der Raab wird vor allem das Diclofenac gesehen (siehe Kapitel 10). Bei der Breitbandwirkung wird betrachtet, ob das Verfahren bei vielen verschiedenen Spurenstoffen eine gute Reinigungsleistung erreicht.

- Reaktionsprodukte**
 Da manche Reaktionsprodukte aus der Ozonung ebenfalls negative Einflüsse auf Organismen haben können, werden diese als eigenes Kriterium erfasst. In diesem Punkt wird nicht auf Bromat, Nitrosamine oder Chrom(IV) eingegangen, da diese bereits in den Ausschlusskriterien enthalten sind.
- Ökologische Betrachtung**
 Der ökologische Einfluss der Verfahren wird anhand des CO₂-Footprints abgeschätzt. Dabei fließt zum Beispiel auch ein, ob die Aktivkohle regeneriert werden kann oder welche Dosiermengen erforderlich sind. In Anhang D ist eine Aufstellung hinsichtlich des Energiebedarfs auf der Kläranlage sowie des Energiebedarfs für die Erzeugung der PAK und den CO₂-Emissionen dargestellt. Unabhängig vom Verfahren lässt sich festhalten, dass sich, verglichen mit der konventionellen Abwasserreinigung, die CO₂-Emissionen durch eine 4. Reinigungsstufe stark erhöhen (ca. 0,145 kg_{CO2}/m³ (0,246 kg_{CO2e}/m³) Remy et al. (2011) in Bolle und Pinnekamp (2015)).

Tabelle 15 Bewertung der Kriterien für die VKA Feldbach-Raabau und VKA Fladnitz im Raabtal

AUSSCHLUSSKRITERIEN			
Kategorie	Kriterium	Folge	
Reaktionsprodukte	Bildungspotential von Bromat, Nitrosaminen und Chrom(VI)	Wenn vorhanden, Ausschluss aller Varianten mit Ozonung	
Schlamm	Ableitung des Überschussschlammes in den Zulauf einer anderen ARA	Wenn vorhanden, Ausscheiden der PAK-Dosierung in die Belebung aus und bei der PAK-Dosierung im Kontaktbecken, darf keine Rückführung in die Belebung betrieben werden	
SPEZIFISCHE BEWERTUNGSKRITERIEN ZUR REIHUNG DER VERFAHREN			
Kategorie	Kriterium	Gewichtung Variante Betrieb	Gewichtung Variante Gewässerschutz
Kosten	Jahreskosten (Investition + Betrieb)	50%	40%
Referenzen	Vorhandene Betriebserfahrung	5%	5%
Platzbedarf	Platzbedarf und Nutzung vorhandener Verfahrens- und Bautechnik	5%	5%
Flexibilität	Variable Wassermenge	3%	3%
	Abschalten, wenn ausreichend Verdünnung im Vorfluter	3%	3%
	Erhöhung der Ausbaugröße	3%	3%
Mehraufwand für die ARA	Zusätzlicher Personalbedarf	5%	5%
	Arbeitssicherheit	3%	3%
	Betriebssicherheit	3%	3%

	Betriebs- und Wartungsaufwand (abgesehen vom Personalaufwand)	5%	5%
Schlamm	Klärschlammabfuhrweg	1%	1%
	Anfallende Schlammmenge	3%	3%
	Verringerung des Schlammalters	1%	1%
Verfügbarkeit	Abhängigkeit vom Rohstoffmarkt, Kostenschwankungen	5%	5%
Eliminationsleistung	Spezielle Spurenstoffe der Raab	1%	5%
	Breitbandwirkung	1%	5%
Reaktionsprodukte	Sonstige Reaktionsprodukte	1%	1%
Ökologische Betrachtung	AK-Herstellung, Reaktivierung, O ₃ - Erzeugung, Transport	2%	4%

8 VKA Feldbach-Raabau

Die Kostenermittlung erfolgt auf unterschiedlichem Wege. Zum einen werden die Kosten aus anderen Projekten (umgesetzte Anlagen und Machbarkeitsstudien) verglichen. Zum anderen werden auch für die Varianten A.1, B.1 und C.2 Grobkostenschätzungen durchgeführt.

8.1 Kostenermittlung: Literatur und Daten aus Deutschland und der Schweiz

8.1.1 Investitionskosten

LITERATUR

In den verwendeten Literaturquellen waren keine allgemeinen Angaben zu Investitionskosten bezüglich einer 4. Reinigungsstufe zu finden.

BESTEHENDE ANLAGEN UND ANDERE MACHBARKEITSSTUDIEN

Im Folgenden sind die Investitionskosten einer 4. Reinigungsstufe im Bereich um 40.000 EW der Machbarkeitsstudien vor allem aus Deutschland ausgewertet. Zunächst sind die minimalen, maximalen und mittleren Investitionskosten aus den bereits bestehenden Anlagen und den Machbarkeitsstudien dargestellt (Tabelle 16). Die gesammelten Daten zu Investitions- und Betriebskosten sind in Anhang B zu finden.

Tabelle 16 Investitionskosten für eine 4. Reinigungsstufe im Bereich um 40.000 EW (Baukostenindex basierend auf 2021)

	AN- ZAHL*	INVESTITIONSKOSTEN BASIS 2021	BAUTECHNIK	MASCHINEN- TECHNIK	ESMR- TECHNIK	SONSTIGE BAUKOSTEN
PAK in BB	8	Minimum	74.340 €	1.091.880 €	201.120 €	233.730 €
		Maximum	1.728.990 €	3.679.290 €	1.006.050 €	565.140 €
		Arithm. Mittel	868.838 €	2.208.218 €	671.235 €	390.230 €
PAK in KB	17	Minimum	168.360 €	1.382.220 €	392.760 €	242.040 €
		Maximum	3.144.900 €	3.479.040 €	1.116.390 €	706.560 €
		Arithm. Mittel	1.488.773 €	2.327.284 €	774.415 €	470.636 €
GAK	13	Minimum	227.070 €	1.126.200 €	390.870 €	293.310 €
		Maximum	4.607.100 €	4.825.140 €	1.758.450 €	770.280 €
		Arithm. Mittel	1.695.125 €	2.246.834 €	840.741 €	454.530 €
Ozonung	11	Minimum	420.300 €	869.910 €	51.030 €	241.080 €
		Maximum	2.868.210 €	3.156.360 €	1.952.220 €	793.590 €
		Arithm. Mittel	1.416.665 €	1.940.795 €	930.224 €	456.950 €
Ozonung + BKA	2	Minimum	1.065.540 €	2.058.660 €	604.650 €	253.500 €
		Maximum	1.538.280 €	3.417.330 €	617.970 €	456.600 €
		Arithm. Mittel	1.301.910 €	2.737.995 €	611.310 €	355.050 €

* Anzahl der einbezogenen Kostenschätzungen bzw. Kostenauswertungen

Im Allgemeinen variieren die Investitionskosten vor allem dadurch stark, ob bestehende Bauwerke oder Maschinenteknik weiterverwendet werden kann. Auf der VKA Feldbach-Raabau ist es nicht möglich, bestehende Becken usw. zu nutzen. In Abbildung 24 sind die in Tabelle 16 einzeln aufgeführten Kategorien „Ozonung“ und „Ozonung + BAK“ wegen besserer Sichtbarkeit unter „Ozonung“ zusammengefasst.

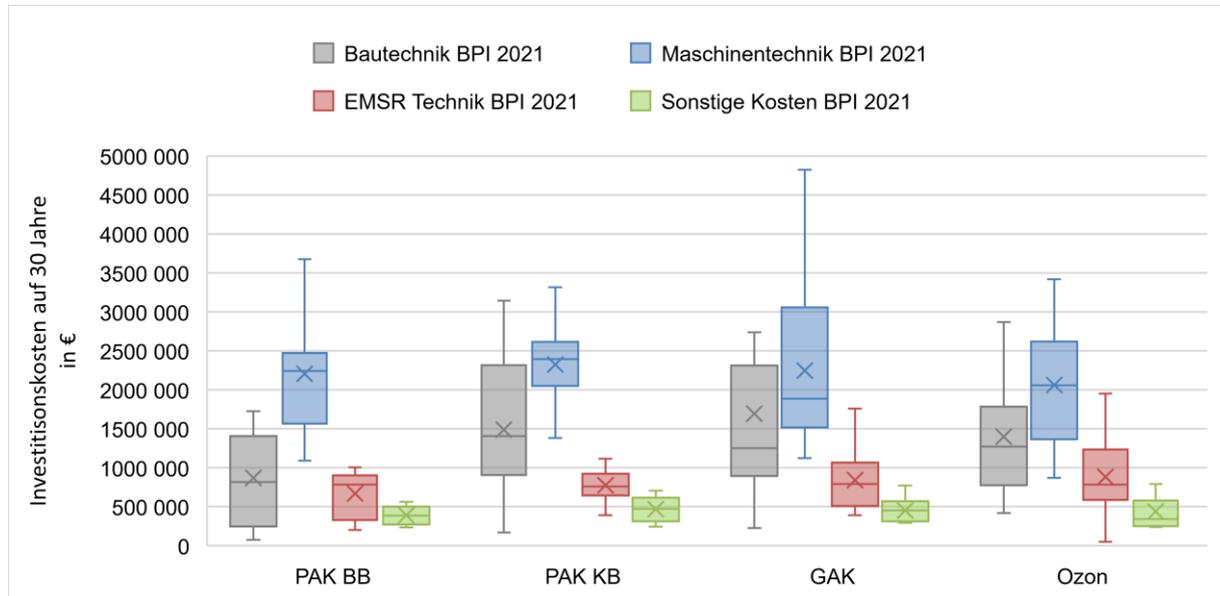


Abbildung 24 Grafische Darstellung der Investitionskosten um 40.000 EW (Datengrundlage: bestehende Anlagen und Machbarkeitsstudien)

Zusammenfassend liegen die Verfahren in einem ähnlichen Bereich. Auffällig ist, dass bei der Bautechnik die PAK-Dosierung in die Belebung am kostengünstigsten ist. Lediglich bei der GAK-Filtration sind starke Schwankungen bei den maschinentechnischen Kosten verzeichenbar. Bei der EMSR-Technik liegt die Ozonung tendenziell am höchsten. Die sonstigen Investitionskosten bewegen sich für alle Verfahren in ähnlichen Spannen.

8.1.2 Betriebskosten

LITERATUR

Nach dem DWA Themenband T3/2015 können die Instandhaltung/Wartungskosten prozentual von den Investitionskosten abgeschätzt werden, z. B.:

- Bau 0,5 %/a
- Maschinenteknik 2,0 %/a
- Elektrotechnik 2,5 %/a

Kreuzinger et al. (2011) schätzen die Betriebskosten einer 4. Reinigungsstufe auf 10 bis 20 % der Gesamtbetriebskosten.

BESTEHENDE ANLAGEN UND ANDERE MACHBARKEITSSTUDIEN

Bei der Auswertung der bestehenden Anlagen und Machbarkeitsstudien lässt sich feststellen, dass die Betriebskosten für die Varianten sich nicht sehr stark voneinander unterscheiden (vgl. Abbildung 25).

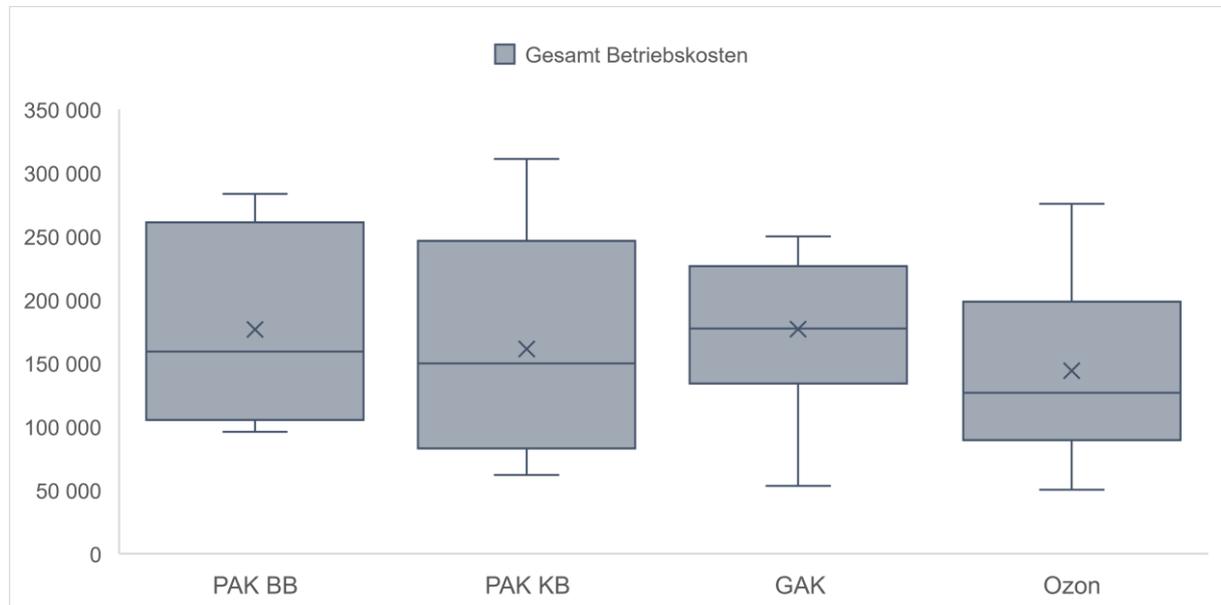


Abbildung 25 Grafische Darstellung der Betriebskosten um 40.000 EW (Datengrundlage: Machbarkeitsstudien)

Die detaillierten Daten zu Investitions- und Betriebskosten sind in Anhang B zu finden.

8.1.3 Jahreskosten

LITERATUR

Das KOM-M.NRW (2015) gibt in seinem Bericht zum Erfahrungsaustausch mit Ingenieurbüros eine Grafik zu spezifischen Jahreskosten (JK) von PAK, GAK und Ozonung an (Abbildung 26) an. Darin sind auch Kostenfunktionen für PAK und Ozonung angegeben. Die Kosten für die Analytik wurden in den Funktionen nicht mitberücksichtigt. Dies resultiert bei 40.000 EW in $JK_{PAK, Feldbach} = 0,092 \text{ €/m}^3$ und $JK_{Ozon, Feldbach} = 0,059 \text{ €/m}^3$.



Abbildung 26 Kostenzusammenstellung KOM-M.NRW Stand 2015 (KOM-M.NRW (2015, S. 27) bearbeitet)

Die überarbeitete und erweiterte Auflage des Berichts des KOM-M.NRW (2016, S. 59) sieht eine Kostenfunktion unabhängig von der Verfahrenswahl vor (Stand 2016). Die VKA Feldbach-Raabau (40.000 EW) würde somit im Bereich um 0,122 €/m³ liegen.

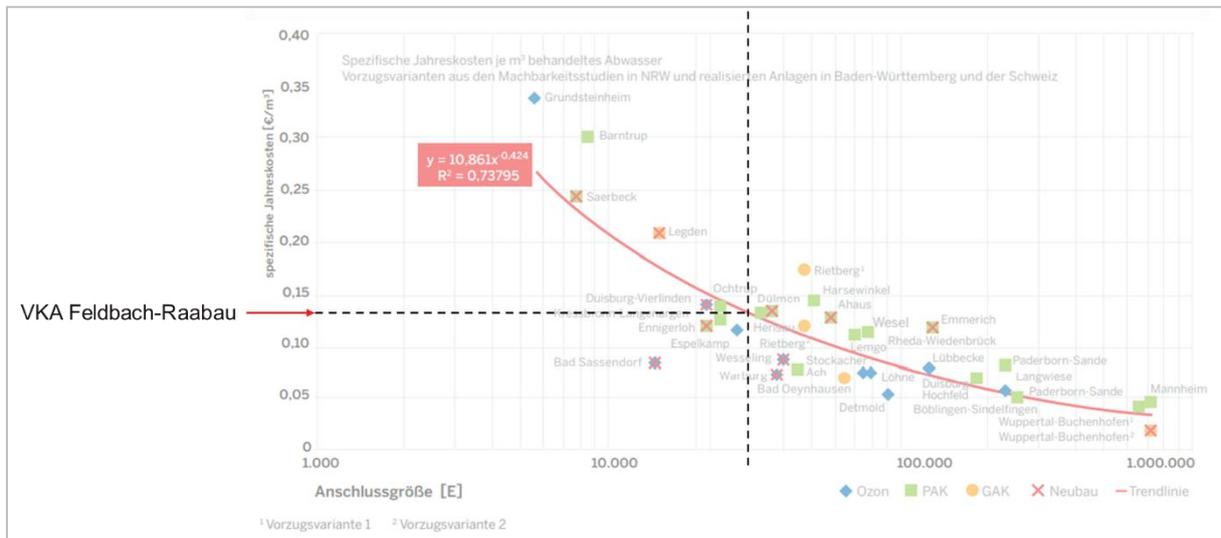


Abbildung 27 Kostenzusammenstellung KOM-M.NRW Stand 2016 (KOM-M.NRW (2016, S. 59) bearbeitet)

Die Jahreskosten in Abbildung 28 sind aufgeteilt in Anlagen mit und ohne den Neubau eines Sandfilters zu finden. Laut DWA T3/2015 ist für Kläranlagen bis 50.000 EW mit spezifischen Jahreskosten von bis zu 0,40 €/m³ zu rechnen. Diese Angabe liegt um einiges höher als die der vorangegangenen Diagramme von KOM-M.NRW 2015 und 2016.

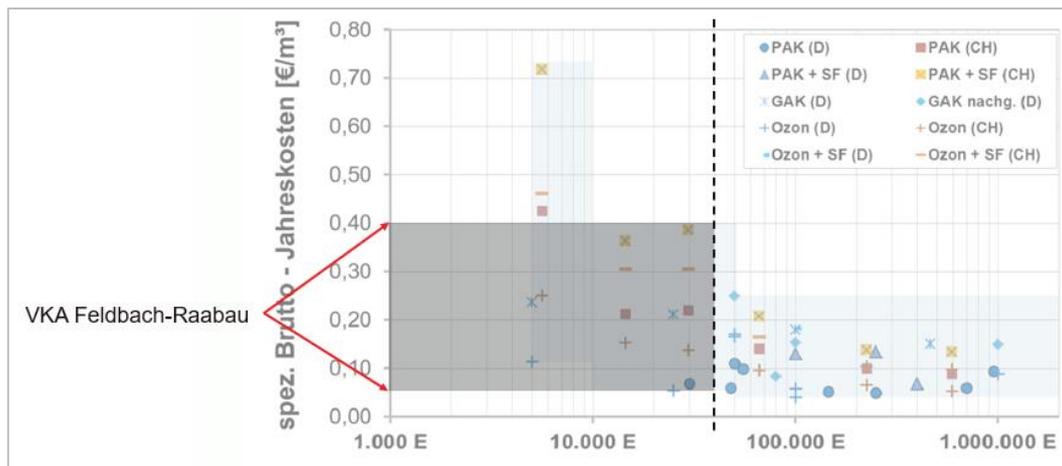


Abbildung 28 Kostenzusammenstellung DWA T3/2015 (DWA (2015, S. 37) bearbeitet)

BESTEHENDE ANLAGEN UND ANDERE MACHBARKEITSSTUDIEN

In den beiden folgenden Abbildungen werden die spezifischen Jahreskosten der in den Kapiteln 5.1 und 6.1 angeführten Anlagen gegenübergestellt. Es wird durch die Abkürzungen T und V angedeutet, ob es sich dabei um eine Teil- oder Vollstrombehandlung handelt.

Die Investitionskosten wurden einheitlich auf 2021 bezogen (berechnet mit dem österreichischen Baupreisindex). Als inflationsbereinigter Realzinssatz wurde $i = 3\%$ angenommen. Es wurde einheitlich folgende Nutzungsdauer angesetzt:

- Bautechnik: 30 Jahre
- Maschinentchnik: 15 Jahre
- EMSR-Technik: 10 Jahre
- Nebenkosten: 30 Jahre

Es konnten aus den Daten aus Deutschland und der Schweiz für die Kostenbetrachtung 1 bestehende Anlagen aus Deutschland (BY) und 50 Machbarkeitsstudien aus Deutschland (NRW) herangezogen werden.

In Abbildung 29 sind im Vergleich zu Abbildung 30 die Jahreskosten auf die gesamte Zulaufmenge der Kläranlagen bezogen, während in Abbildung 30 die Jahreskosten in Bezug auf die in der 4. Reinigungsstufe behandelte Wassermenge dargestellt ist. Den Unterschied ergeben Teilstrombehandlungen, welche in den meisten Fällen angestrebt werden. Lediglich bei der PAK-Dosierung in die Belebung ist es nicht möglich, nur den Trockenwetterteilstrom zu behandeln. In den beiden Diagrammen ist zusätzlich durch ausgefüllte bzw. leere Symbole dargestellt, ob es sich dabei um eine Voll- oder Teilstrombehandlung handelt.

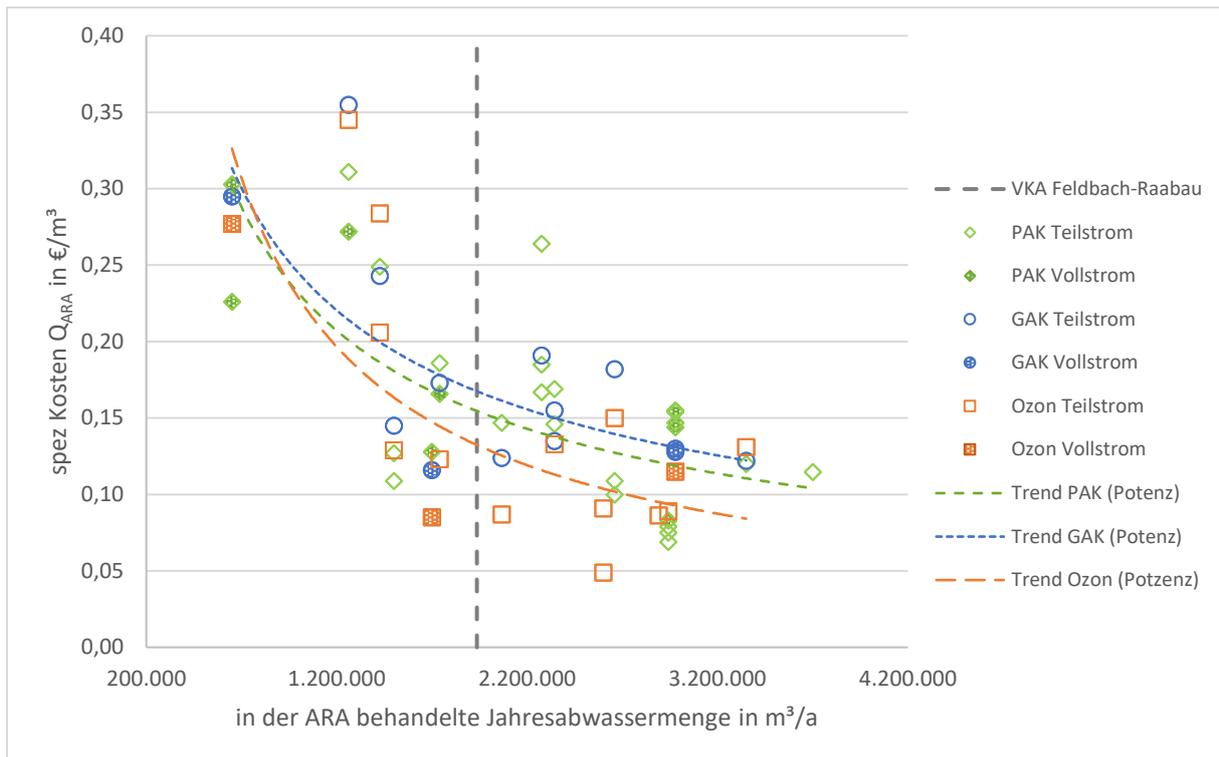


Abbildung 29 Vergleich der spezifischen Jahreskosten für eine 4. Reinigungsstufe in Bezug auf die Wassermenge im Zulauf der ARA (im Bereich um 40.000 EW) Baukostenindex basierend auf 2021

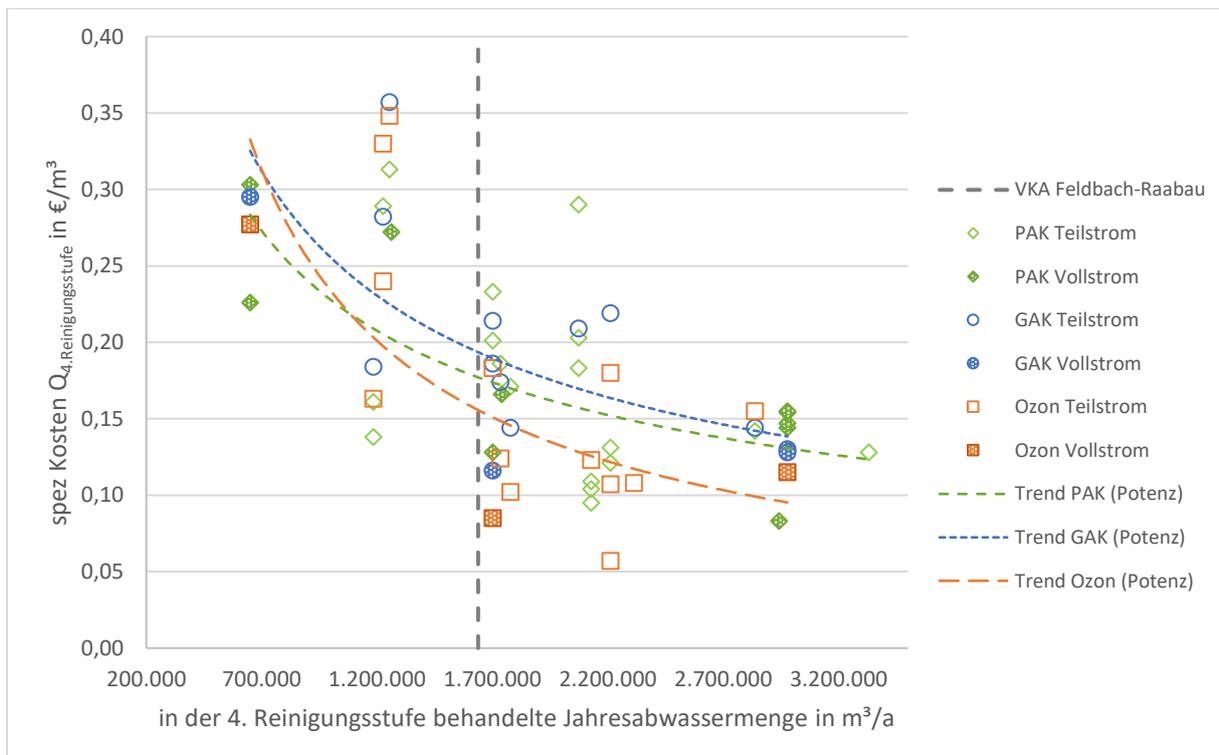


Abbildung 30 Vergleich der spezifischen Jahreskosten für eine 4. Reinigungsstufe in Bezug auf die in der 4. Reinigungsstufe behandelte Wassermenge (im Bereich um 40.000 EW) Baukostenindex basierend auf 2021

In den folgenden drei Tabellen werden die Verfahren PAK, GAK und Ozon getrennt betrachtet. Bei der PAK-Dosierung wird angegeben, ob die Dosierung in die Belebungsbecken oder in ein eigenes Kontaktbecken erfolgt und ob ein Sedimentationsbecken vorgesehen ist. Zudem wird angegeben, welches Nachreinigungsverfahren angedacht ist und ob das System im Voll- oder Teilstrom betrieben werden soll.

Tabelle 17 PAK Anlagen im Bereich um 40.000 EW spezifische Kosten

ARA	BB/ KB ^A	SB ^B	NACH- REINIGUNG ^C	VOLL- /TEIL- STROM ^D	ZULAUF ARA IN M ³ /A	SPEZ. KOS- TEN Q _{ARA} BPI 2021 IN €/M ³	ZULAUF 4. REINIGUNGS- STUFE IN M ³ /A	SPEZ. KOSTEN Q _{4, REINIGUNGSSTUFE} BPI 2021 IN €/M ³
Lengerich	BB		KGS	T	2.275.775	0,185	2.072.420	0,203
Wegberg	BB			T	2.659.875	0,109	2.210.892	0,131
Geseke	BB		KGS	V	2.977.634	0,144	2.977.634	0,144
Geseke	BB		TF	V	2.977.634	0,147	2.977.634	0,147
Hörstel	BB		n.s.	V	1.261.381	0,272	1.261.381	0,272
Münster- Hiltrup	BB		TF	V	1.740.159	0,166	1.740.159	0,166
Sassen- berg- Füchtorf	BB		n.s.	V	650.000	0,226	650.000	0,226
Stadtlohn	BB		TF	V	2.940.869	0,083	2.940.869	0,083
Bad Lip- psprunge	KB	SB	FB Sand	T	2.065.706	0,147	1.776.507	0,171
Herisau	KB	SB	FB Sand	T	3.700.000	0,115	3.330.000	0,128
Horn-Bad Meinberg	KB		n.s.	T	2.343.969	0,169	1.700.000	0,233
Horn-Bad Meinberg	KB		TF	T	2.343.969	0,146	1.700.000	0,201
Hörstel	KB	SB	n.s.	T	1.261.381	0,311	1.252.417	0,313
Lengerich	KB	SB	TF	T	2.275.775	0,167	2.072.420	0,183
Lengerich	KB		TF	T	2.275.775	0,264	2.072.420	0,290
Münster- Hiltrup	KB	SB	TF	T	1.740.159	0,186	1.733.390	0,186
Ochtrup	KB	SB	FB Mehr- schicht	T	1.500.000	0,127	1.183.771	0,161
Ochtrup	KB		FB Mehr- schicht	T	1.500.000	0,109	1.183.771	0,138
Oelde	KB	SB	TF	T	3.350.000	0,120	2.836.735	0,142

ARA	BB/ KB ^A	SB ^B	NACH- REINIGUNG ^C	VOLL- /TEIL- STROM ^D	ZULAUF ARA IN M ³ /A	SPEZ. KOS- TEN Q _{ARA} BPI 2021 IN €/M ³	ZULAUF 4. REINIGUNGS- STUFE IN M ³ /A	SPEZ. KOSTEN Q ₄ _REINIGUNGSSTUFE BPI 2021 IN €/M ³
Schwalmtal -Amern	KB	SB	TF	T	1.425.577	0,249	1.225.013	0,289
Stadtlohn	KB	SB	TF	T	2.940.869	0,079	2.127.719	0,109
Stadtlohn	KB		TF	T	2.940.870	0,069	2.127.719	0,095
Stadtlohn	KB		TF	T	2.940.870	0,075	2.127.719	0,104
Wegberg	KB		FB Sand	T	2.659.875	0,100	2.210.892	0,121
Espelkamp	KB		n.s. Sand	V	1.700.000	0,128	1.700.000	0,128
Geseke	KB	SB	KGS	V	2.977.634	0,154	2.977.634	0,154
Geseke	KB	SB	TF	V	2.977.634	0,155	2.977.634	0,155
Sassen- berg- Füchtorf	KB	SB	n.s.	V	650.000	0,303	650.000	0,303

^A Dosierung in BB: Belebungsbecken, KB: Kontaktbecken

^B SB: Sedimentationsbecken vorhanden

^C KGS: kontinuierlich gespülter Sandfilter, TF: Tuchfilter, FB: Festbett-Filter, n.s.: nicht spezifiziert

^D T: Teilstrom, V: Vollstrom

Für die GAK-Filtration werden die GAK-Filter- und Vorfilterarten angegeben. Ebenso wie Informationen zur Voll-/Teilstrombehandlung.

Tabelle 18 GAK Anlagen im Bereich um 40.000 EW spezifische Kosten

ARA	GAK FILTER ^A	VORFILTER ^B	VOLL- /TEIL- STROM ^C	ZULAUF ARA IN M ³ /A	SPEZ. KOS- TEN Q _{ARA} BPI 2021 IN €/M ³	ZULAUF 4. REINIGUNGS- STUFE IN M ³ /A	SPEZ. KOSTEN Q ₄ _REINIGUNGS- STUFE BPI 2021 IN €/M ³
Bad Lip- psprunge	FB	ST	T	2 065 706	0,124	1 776 507	0,144
Horn-Bad Meinberg	FB		T	2 343 969	0,155	1 700 000	0,214
Münster- Hiltrup	FB		T	1 740 159	0,173	1 733 390	0,174
Ochtrup	FB	FB Mehr- schicht	T	1 500 000	0,145	1 183 771	0,184
Oelde	FB	TF	T	3 350 000	0,122	2 836 735	0,144
Espelkamp	FB		V	1 700 000	0,116	1 700 000	0,116
Geseke	FB	KGS	V	2 977 634	0,128	2 977 634	0,128
Hörstel	FB Druck	TF	T	1 261 381	0,355	1 252 417	0,357

ARA	GAK FILTER ^A	VORFILTER ^B	VOLL- /TEIL-STROM ^C	ZULAUF ARA IN M ³ /A	SPEZ. KOSTEN Q _{ARA} BPI 2021 IN €/M ³	ZULAUF 4. REINIGUNGSSTUFE IN M ³ /A	SPEZ. KOSTEN Q ₄ _REINIGUNGSSTUFE BPI 2021 IN €/M ³
Wegberg	FB Druck		T	2 659 875	0,182	2 210 892	0,219
Horn-Bad Meinberg	KG		T	2 343 969	0,135	1 700 000	0,186
Lengerich	KG	KGS	T	2 275 775	0,191	2 072 420	0,209
Geseke	KG	KGS	V	2 977 634	0,130	2 977 634	0,130
Schwalmtal -Amern	n.s.		T	1 425 577	0,243	1 225 013	0,282
Sassenberg-Füchtorf	n.s.	n.s.	V	650 000	0,295	650 000	0,295

^A FB: Festbett-Filter, FB Druck: Festbett-Druckfilter, KG: kontinuierlich gespült, aufwärts durchströmt, n.s.: nicht spezifiziert

^B KGS: kontinuierlich gespülter Sandfilter, TF: Tuchfilter, FB: Festbett-Filter, ST: Schönungsteich, n.s.: nicht spezifiziert

^C T: Teilstrom, V: Vollstrom

Die Ozon-Systeme unterscheiden sich durch das Eintragungssystem des Ozons in das Abwasser. Bei einigen wenigen Anlagen wurde ein Vorfilter mit betrachtet. Bei den Nachbehandlungsmethoden nach der Ozonungsstufe wurde bei einer Anlage keine BSB₅-Restentfernung vorgesehen. Im Regelfall sollte diese aber angedacht werden, da sich während der Ozonung biologisch leichter abbaubare Bruchstücke bilden und diese entfernt werden sollten. Zusätzlich wurden noch Angaben zur Voll- bzw. Teilstrombehandlung gemacht.

Tabelle 19 Ozon Anlagen im Bereich um 40.000 EW spezifische Kosten

ARA	OZON EIN-TRAG ^A	VORFIL-TER ^B	NACH-REINI-GUNG ^C	VOLL- /TEIL-STROM ^D	ZULAUF ARA IN M ³ /A	SPEZ. KOSTEN Q _{ARA} BPI 2021 IN €/M ³	ZULAUF 4. REINI-GUNGSSTUFE IN M ³ /A	SPEZ. KOSTEN Q ₄ _REINIGUNGSSTUFE BPI 2021 IN €/M ³
Bad Lippspringe	Diff		ST	T	2 065 706	0,087	1 776 507	0,102
Horn-Bad Meinberg	Diff		ST	T	2 343 969	0,133	1 700 000	0,183
Hörstel	Diff		TF	T	1 261 381	0,345	1 252 417	0,348
Münster-Hiltrup	Diff		ST	T	1 740 159	0,123	1 733 390	0,124
Ochtrup	Diff		FB Mehrschicht	T	1 500 000	0,129	1 183 771	0,163
Oelde	Diff		SchwB	T	3 350 000	0,131	2 836 735	0,155

ARA	OZON EIN-TRAG ^A	VORFIL-TER ^B	NACH-REINI-GUNG ^C	VOLL- /TEIL-STROM ^D	ZULAUF ARA IN M ³ /A	SPEZ. KOS-TEN Q _{ARA} BPI 2021 IN €/M ³	ZULAUF 4. REINI-GUNGS-STUFE IN M ³ /A	SPEZ. KOSTEN Q ₄ _REINIGUNGS-STUFE BPI 2021 IN €/M ³
Schwalmtal -Amern	Diff	n.s.	BAK	T	1 425 577	0,284	1 225 013	0,330
Schwalmtal -Amern	Diff	n.s. Sand		T	1 425 577	0,206	1 225 013	0,240
Stadtlohn	Diff		KGS	T	2 940 870	0,089	2 127 719	0,123
Wegberg	Diff		FB Sand	T	2 659 875	0,150	2 210 892	0,180
Wesseling-Rodderweg	Diff		WB	T	2 600 000	0,049	2 210 000	0,057
Wesseling-Rodderweg	Diff		KG BAK	T	2 600 000	0,091	2 210 000	0,107
Geseke	Diff		KGS	V	2 977 634	0,115	2 977 634	0,115
Espelkamp	Diff + Inj		ST	V	1 700 000	0,085	1 700 000	0,085
Weißenburg	Inj		KGS (BAK + Sand)	T	2 890 516	0,086	2 312 413	0,108
Sassenberg-Füchtorf	n.s.		n.s.	V	650 000	0,277	650 000	0,277

^A Ozon Eintrag über Diff: Diffusoren oder Inj: Injektoren

^B n.s.: nicht spezifiziert

^C KGS: kontinuierlich gespülter Sandfilter, TF: Tuchfilter, FB: Festbett-Filter, ST: Schönungsteich, BAK: biologisch aktivierte GAK, SchwB: Schwebbett-Filter, n.s.: nicht spezifiziert

^D T: Teilstrom, V: Vollstrom

Zusammenfassend lässt sich bestätigen, dass mit zunehmender Ausbaugröße bzw. Wassermenge die Jahreskosten für alle drei Systeme sinken.

Nach der Auswertung der bestehenden Anlagen und anderen Machbarkeitsstudien würde eine 4. Reinigungsstufe für die VKA Feldbach-Raabau vermutlich Jahreskosten im Bereich von

- ca. 0,10 bis 0,20 €/m³ (bezogen auf die gesamte Zulaufmenge der Kläranlage)
- ca. 0,12 bis 0,25 €/m³ (bezogen auf die in der 4. Reinigungsstufe behandelte Abwassermenge)

verursachen. Dennoch kann aus den ausgewerteten Daten keine genaue Aussage dazu getroffen werden, welches System (PAK, GAK oder Ozonung) für die VKA Feldbach-Raabau am wirtschaftlichsten wäre, da alle Verfahren sich in einer ähnlichen Spanne befinden. Daher wird im kommenden Kapitel eine Grobkostenschätzung für verschiedene Möglichkeiten der Spurenstoffentfernung an der VKA Feldbach-Raabau erstellt.

8.2 Auslegung und Grobkostenschätzung der ausgewählten Anlagenkonzepte

Es werden von den in Kapitel 7.1 angeführten Varianten lediglich für drei davon genauere Kostenschätzungen vorgenommen. Vor allem dadurch, dass sich in den letzten Jahren die Preise oft sehr stark und schnell ändern, kann dies nur als grobe Schätzung gewertet werden. Bis zum konkreten Umsetzungsfall können die Preise sich bereits signifikant verändert haben.

WASSERMENGE ZUR AUSLEGUNG DER 4. REINIGUNGSSTUFE

Da es bisher in Österreich keine Grenzwerte zu Spurenstoffen gibt, fehlen Anhaltspunkte, ob eine Voll- oder Teilstrombehandlung benötigt wird. Im Regenwetterfall sinkt die Konzentration der Spurenstoffe im Abwasser und damit auch die Effizienz der Entfernung durch eine 4. Reinigungsstufe. Die Fracht der Spurenstoffe bleibt allerdings gleich. Zudem bewirkt das Regenwasser auch eine höhere Verdünnung der Konzentrationen der anthropogenen Spurenstoffe im Vorfluter. Demnach wird empfohlen, die 4. Reinigungsstufe lediglich auf den im Bescheid festgelegten Trockenwetterwert auszulegen. Dieser liegt laut Bescheid von 2018 bei der VKA Feldbach-Raabau bei 6.000 m³/d (vgl. Abbildung 31). Bei der Auslegung auf den Durchfluss in l/s sind auch unterschiedliche Möglichkeiten denkbar:

- Gleichmäßige Beschickung mit Pufferteich: 69 l/s bzw. 250 m³/h
- Beschickung nach Anfall ohne Pufferteich: 100 l/s bzw. 360 m³/h (TW lt. Bescheid)

Dies ist für die Variante der PAK-Dosierung in die Belebungsbecken nicht möglich. Dort muss der Vollstrom von 14.000 m³/d (bzw. 260 l/s, 940 m³/h) behandelt werden.

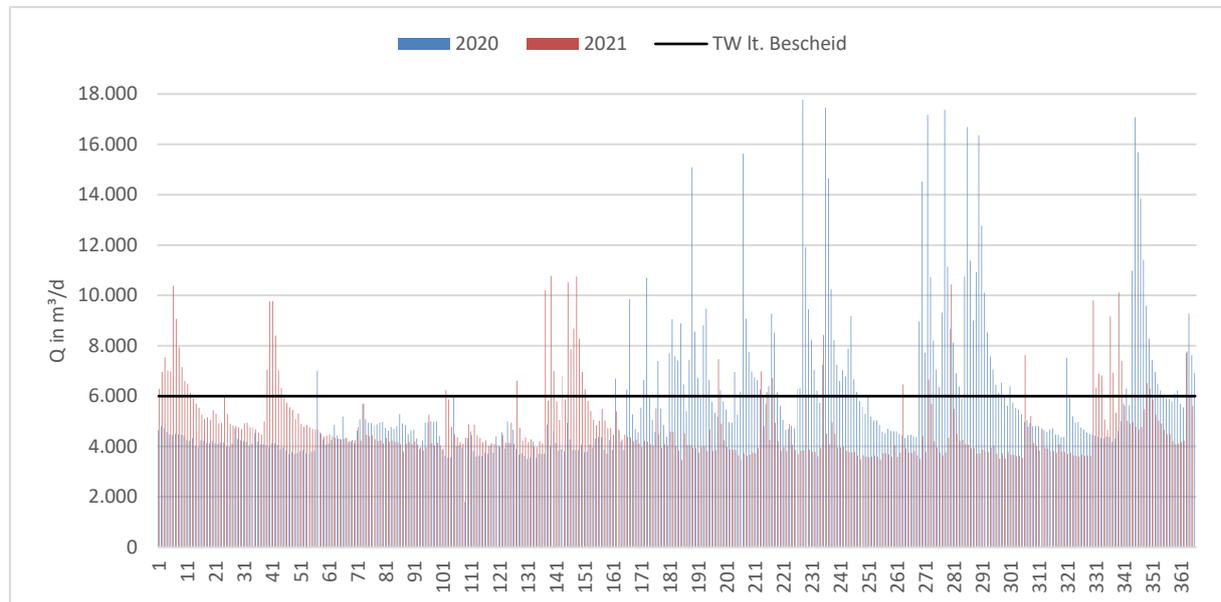


Abbildung 31 Abwassermenge der VKA Feldbach-Raabau in den Jahren 2020 und 2021

Wie bereits in erwähnt werden drei der sechs Varianten für die VKA Feldbach-Raabau bewertet. Für diese werden in den Kapiteln 8.2.1, 8.2.2 und 8.2.3 Grobkostenschätzungen erstellt. Dafür werden die in Tabelle 20 enthaltenen Wassermengen verwendet.

Tabelle 20 Auslegungswassermenge (VKA Feldbach-Raabau)

VARIANTEN	AUSLEGUNG DER	m ³ /a	m ³ /d	m ³ /h	l/s
A.1	Becken	1.936.325	14.000	940	260
	Dosierung ins Belebungsbecken, daher Auslegung auf den Vollstrom				
	Nachreinigung	1.936.325	14.000	940	260
	Ebenfalls auf Vollstrom ausgelegt, um Abtrieb der PAK zu vermeiden				
	Betriebsmittelverbrauch PAK, FM, FHM etc.		5.780		
	Auf das arithmetische Mittel des Betrachtungszeitraums ausgelegt, da nicht zu erwarten ist, dass signifikant höhere Abwassermengen zu erwarten sind.				
VARIANTEN	AUSLEGUNG DER	m ³ /a	m ³ /d	m ³ /h	l/s
B.1, C.2	Becken	1.739.455	6.000	360	100
	Auslegung auf den TW-Teilstrom (ohne Pufferteich)				
	Nachreinigung	1.739.455	6.000	360	100
	ohne Pufferteich				
	Betriebsmittelverbrauch PAK, FM, FHM etc.		5.780		
	Auf das arithmetische Mittel des Betrachtungszeitraums ausgelegt, da nicht zu erwarten ist, dass signifikant höhere Abwassermengen zu erwarten sind.				

GRUNDSTÜCK

Da auf dem derzeitigen Betriebsgelände der VKA Feldbach-Raabau nur wenig Platz für eine 4. Reinigungsstufe ist, müsste unter Umständen für die Erweiterung der Kläranlage ein Grundstück erworben werden. Im Westen und im Osten der VKA Feldbach-Raabau liegen jeweils Felder (Grundstück Nr. 1173/3 Gemeinde Feldbach und Grundstück 3/10 Gemeinde Leitersdorf) (Land Steiermark // GIS-Steiermark, 2022). Der Erwerb eines weiteren Grundstücks wird in der Kostenschätzung nicht betrachtet. Je nach Ausführung der 4. Reinigungsstufe ist es auch möglich, diese auf dem bestehenden Betriebsgelände unterzubringen.

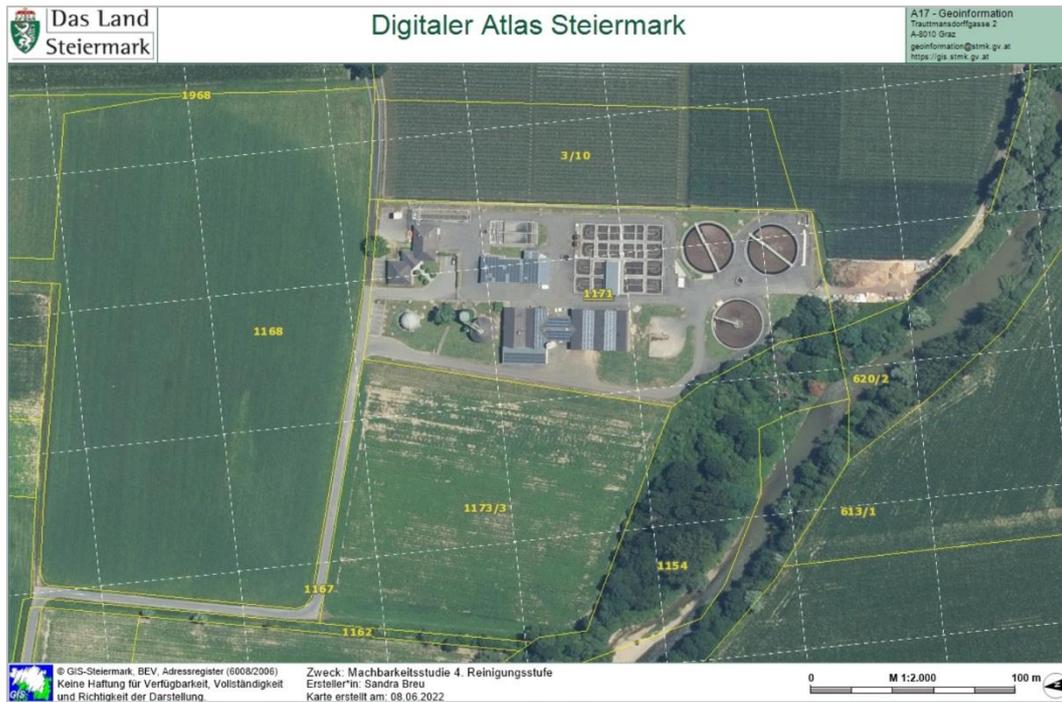


Abbildung 32 Grundstücke um die VKA Feldbach-Raabau (Land Steiermark // GIS-Steiermark, 2022)

BESTEHENDE ANLAGENTEILE ZUR WEITERVERWENDUNG IN DER 4. REINIGUNGSSTUFE

Da auf der VKA Feldbach-Raabau keine nutzbaren Ressourcen (Becken, Filter etc.) zur Verfügung stehen, werden die nachfolgenden Varianten für eine 4. Reinigungsstufe als Neubau konzipiert.

GRUNDLAGEN FÜR DIE KOSTENRECHNUNG

Bei der Variantenbetrachtung setzen sich die Betriebskosten aus betriebsgebundenen und verbrauchsgebundenen Kosten zusammen. Dabei werden die in Tabelle 21 angeführten Grundlagen verwendet. Nach Angaben der Fa. Donau Carbon GmbH (Kiewel, 2022) können derzeit die Kosten für Aktivkohle mit 2.200 €/t abgeschätzt werden, dies gilt für PAK, neuer GAK und regenerierter GAK. Der starke Preisanstieg der regenerierten GAK liegt vor allem an den hohen Stromkosten. Bei den neuen Aktivkohlen sind vor allem die Energiekosten für den Transport aus Asien und Amerika ausschlaggebend.

Für die Kosten der Spurenstoffanalyse wurden 300 €/Probe angesetzt und mit einer Wochenmischprobe pro Woche kalkuliert. Es ist zu erwarten, dass die Proben anfangs relativ häufig genommen werden müssen und mit der Zeit größere Abstände zwischen den Analysen liegen können. Die in Zukunft gesetzlich geregelte Probenahmehäufigkeit wird sich vermutlich nach den Größenklassen der Kläranlagen richten.

Tabelle 21 Grundlagen für die Betriebskostenschätzung (alle Preise sind in Netto angegeben)

KOSTENANTEIL	PREIS	EINHEIT
Strom	0,30	€/kWh
PAK (Frischkohle)	2.200	€/t _{PAK}
GAK (Frischkohle)	2.200	€/t _{GAK}
GAK (Frischkohle)	2.200	€/t _{GAK}
Fällmittel (Eisen-III-Chlorid)	230	€/t
Flockungshilfsmittel	1.300	€/t (Wirksubstanz)
Sauerstoff (inkl. Tankmiete)	0,30	€/kg (Schätzwert)
Schlamm Entsorgung (Verbrennung)	130	€/t
Personal	50.000	€/Mitarbeiter/Jahr
Analysekosten	300	€/Probe

8.2.1 Variante A.1: PAK-Dosierung in Belebungsbecken (KGS als Nachreinigung)

Für die PAK-Dosierung in die Belebung wird neben einem Silo zur Lagerung eine volumetrische oder gravimetrische Dosier- und Einmischeinheit benötigt, dies wird mit einer Wasserstrahlpumpe umgesetzt. In der Nachklärung setzt sich die Aktivkohle zusammen mit dem Belebtschlamm ab und wird am Ende mit dem Überschussschlamm ausgetragen und entwässert. Der Nachklärung nachgeschaltet ist eine Filtration mit einem kontinuierlich gespülten Sandfilter in Betonbauweise vorgesehen.

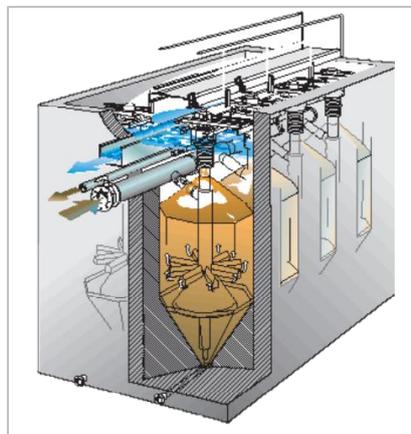


Abbildung 33 Betonbauweise eines kontinuierlich gespülten Sandfilters (Nordic Water Products AB., n.d.)

Es wurden folgenden Anlagenkomponenten berücksichtigt:

- Zuführende und ableitende Rohrleitungen
- Beschickungspumpwerk
- Kontinuierlich gespülte Sandfilter, maschinelle Einrichtung, Betonbau

- Trichtereinbauten mit Verspannelementen
- Zuflussverteiler und Sandverteilerkegel
- Sandwäscher mit Waschlabyrinthen
- Tragkonstruktion für innere Rohrleitungen und Sandwäscher
- Kompressorstation, Einhausung
- Fällmitteldosierungstation

8.2.1.1 Auslegung

ABSCHÄTZUNG DER PAK-DOSIERUNG

Es wird in Anlehnung an andere Machbarkeitsstudien mit einer Dosiermenge von 20 g_{PAK}/m³ Abwasser gerechnet. Daraus ergibt sich ein Tagesbedarf von ca. 116 kg_{PAK}/d und pro Jahr 42.194 kg_{PAK}/a (vgl. Tabelle 22). Es werden neben der Aktivkohle auch Fäll- und Flockungshilfsmittel benötigt. Diese Abschätzungen können ebenfalls Tabelle 22 abgeschätzt entnommen werden.

Tabelle 22 Variante A.1: Auslegung PAK, Fäll- und Flockungshilfsmittel

PAK	WERT (GEWÄHLT/BERECHNET)	EINHEIT
Dosiermenge PAK	20	g/m ³
Tagesbedarf an PAK	116	kg/d
Jahresbedarf an PAK	42.194	kg/a
Schüttdichte PAK	425	kg/m ³
Größe des PAK-Silos	40	m ³
Nachfüllintervall des PAK-Silos	4,8	Monate
FÄLLMITTEL (FM)	WERT	EINHEIT
Dosiermenge Fe	5,0	g/m ³
Jahresbedarf an Fe	10.548	kg/a
Eisenanteil am Fällmittel	14	%
Jahresbedarf an Fällmittel	75.343	kg/a
Dichte des Fällmittels Fe(III)Cl	1.440	kg/m ³
Größe der vorhandenen Fällmittelsilos	2*12 = 24	m ³
Nachfüllintervall der Fällmittelsilos	2,2	Monate
FLOCKUNGSHILFSMITTEL (FHM)	WERT	EINHEIT
Dosiermenge FHM	0,3	g/m ³
Jahresbedarf an FHM	633	kg/a
Dichte des FHM	850	kg/m ³
Größe des Lagergebindes für FHM	1	m ³
Wechsel des Gebindes	16,1	Monate

Durch die PAK-Zugabe entsteht mehr Klärschlamm, welcher der Verbrennung zugeführt werden muss. Es wird angenommen, dass aus 1 kg PAK 1,5 kg Klärschlamm entstehen (Kreienborg, Wortmann, Bertzbach, & Launay, 2019). Die zusätzliche Schlammproduktion (Trockensubstanz) kann daher mit 174 kg/d bzw. 63,3 t/a abgeschätzt werden. Bei einem TS-Gehalt im Klärschlamm von ca. 30% sind dies 580 kg/d bzw. 210 t/a.

ABSCHÄTZUNG DER KONTINUIERLICH GESPÜLTEN SANDFILTER

Die Auslegung des Sandfilters wird, wie in Tabelle 23 zu sehen, abgeschätzt.

Tabelle 23 Variante A.1: Auslegung kontinuierlich gespülter Sandfilter

KONTINUIERLICH GESPÜLTEN SANDFILTER	WERT (GEWÄHLT/BERECHNET)	EINHEIT
Filtereinbauteile	14	Stk.
Filterfläche je Einbauteil	6	m ²
Filterfläche gesamt	80	m ²
Oberflächenbelastung	max. 12	m ³ /m ² /h
Spülwassermenge	im Mittel ca. 30	m ³ /h
Druckluftbedarf	ca. 20	Nm ³ /h
Sand (Körnung: 1 bis 2 mm)	16	t/Filter
Gesamtmenge Sand	224	t
Filterbetthöhe	1,50	m
Volumen des Betonbauwerks (BxLxH)	ca. 7,5 x 21 x 5,5 = 578	m ³
Fläche inkl. Anbau masch. Technik	ca. 164	m ²

8.2.1.2 Grobkostenschätzung

Die Grobkostenschätzung für die Variante A.1 ist in die Investitionskosten (Tabelle 24) und die Betriebskosten (Tabelle 25) unterteilt.

Im Bereich des PAK-Silos ist aus Arbeitsschutzgründen sowohl eine O₂- als auch eine CO-Sonde erforderlich.

Tabelle 24 Variante A.1: Grobkostenschätzung Investitionskosten

KOSTENPUNKT	ANMERKUNG	SPEZ. KOSTEN	MENGE	KOSTENSCHÄTZUNG
BAUKOSTEN				
ROHRLEITUNGEN, KANÄLE, ERDARBEITEN				
Zu-/Ablaufanbindung	Rohrleitungen/ Betonarbeiten	300 €/m	200 m	60.000 €
Dosierleitung PAK		150 €/m	20 m	3.000 €
BAUWERKE (HOCHBAU, TIEFBAU, SCHÄCHTE)				

Schacht Zwischenpumpwerk, Verteilerbauwerk	zu Sandfilter	15.000 €/PA	1 PA	15.000 €
MID Schacht		5.000 €/PA	1 PA	5.000 €
Kontinuierlich gespülter Sandfilter	Betonbauwerk	500 €/m ³	578 m ³	289.000 €
BAUWERKE HOCHBAU				
Raumzelle/Container Kontinuierlich gespülte Sandfilter	für Technik, EMSR	60.000 €/PA	1 PA	60.000 €
SONSTIGES				
Fundamente	PAK Silo und Fertigcontainer	25.000 €/PA	1 PA	25.000 €
Brauch-/Trinkwasseranschluss		5.000 €/PA	1 PA	5.000 €
Kabeltrassen, Kabelschächte		10.000 €/PA	1 PA	10.000 €
Wegeanbindung/Außenanlagen		110 €/m ²	680 m ²	74.800 €
Geländer, Abdeckungen, Treppen, Bediensteg (etc.)		20.000 €/PA	1 PA	20.000 €
Baustelleneinrichtung		7%		39.676 €
Summe Baukosten				606.476 €
MASCHINENTECHNIK KOSTEN				
KONTINUIERLICH GESPÜLTE SANDFILTER				
Filtereinbauteile	inkl. Sand, Verrohrung etc.	40.000 €/Stk.	14 Stk.	560.000 €
Sandfüllung		55 €/t	224 t	12.320 €
Kompressorstation	für Sandfilter	35.000 €/PA	1 PA	35.000 €
ZWISCHENPUMPWERK, SCHÄCHTE				
Pumpen		30.000 €/Stk.	3 Stk.	90.000 €
Armaturen, Schieber		50.000 €/PA	1 PA	50.000 €
PAK-SILO, FÄLLMITTELDOSIERUNG				
Dosierstation Fällmittel		35.000 €/PA	1 PA	35.000 €
PAK-Silo 40 m ³	mit Dosiereinheit, Steuerung	300.000 €/Stk.	1 Stk.	300.000 €
Erstbefüllung PAK-Silo		2.200 €/t	34 t	74.800 €
Dokumentation, Inbetriebnahme		10.000 €/PA	1 PA	10.000 €
SONSTIGES				
Baustelleneinrichtung		10.000 €/PA	1 PA	10.000 €
Summe Maschinentechnik Kosten				1.177.120 €
ESMR KOSTEN				
MID		4.000 €/Stk.	1 Stk.	10.000 €
Trübungsmessung		2.500 €/PA	1 PA	5.000 €
Blitzschutz		5.000 €/PA	1 PA	40.000 €
SPS-System, Einbindung Prozessleitsystem	PAK Anlage + Sandfilter	52.000 €/PA	1 PA	52.000 €
Summe ESMR Kosten				63.500 €
SONSTIGES				

Nebenkosten	Ing. Honorare, Prüfgebühren	10%	184.800 €
uV rd.		10,0%	203.104 €
Summe Sonstiges			387.904 €
Summe Investitionskosten			2.235.000 €

Die spezifischen Kosten für Strom, PAK etc. beziehen sich auf Tabelle 21

Tabelle 25 Variante A.1: Grobkostenschätzung Betriebskosten

KOSTENPUNKT	ANMERKUNG	SPEZ. KOSTEN	MENGE	KOSTENSCHÄTZUNG
WARTUNG/INSTANDHALTUNG				
Baukosten		1,5%		9.097 €/a
Maschinentechnik Kosten		3,0%		35.314 €/a
ESMR-Technik Kosten		3,0%		1.905 €/a
Summe Wartung/Instandhaltung				32.022 €/a
VERBRAUCHSSTOFFE				
Fällmittel		150 €/t _{FM}	75,3 t/a	11.295 €/a
Flockungshilfsmittel		3.000 €/t _{FHM}	633 kg/a	1.899 €/a
PAK		2.200 €/t _{PAK}	42 t/a	92.400 €/a
Sand	0,2 Füllungen/a	55 €/t	44,8 t/a	2.464 €/a
Summe Verbrauchsstoffe				108.058 €/a
ENERGIEBEDARF				
Zwischenpumpwerk	Laufzeit 24 h/d, Förderhöhe 8 m, 5 W/m ³ /m, 1.936.325 m ³ /a	0,30 €/kWh	77.453 kWh/a	23.236 €/a
Kompressorstation	Laufzeit 6 h/d, 5,5 kW	0,30 €/kWh	12.045 kWh/a	3.614 €/a
Dosierpumpen PAK, FM	Laufzeit 24 h/d, 1 kW	0,30 €/kWh	8.760 kWh/a	2.628 €/a
Sonstiges (Messtechnik etc.)		0,30 €/kWh	10.000 kWh/a	3.000 €/a
Summe Energiebedarf				32.478 €/a
SCHLAMMENTSORGUNG				
Zusätzlicher Schlamm (PAK)	bei TS von ca. 30%	130 €/t	210 t/a	27.300 €/a
Summe Schlammentsorgung				27.300 €/a
PERSONALKOSTEN				
Personalaufwand		50.000 €/P./a	0,4 P.	20.000 €/a
Summe Personalkosten				20.000 €/a
SONSTIGES				
uV und Rundung		10,1%		25.248 €
Summe Sonstiges				25.248 €/a
Summe Betriebskosten				275.000 €/a

Nachfolgend werden die Investitions- und Betriebskosten in Jahreskosten dargestellt und diese auch in Bezug zur Wassermenge dargestellt.

Tabelle 26 Variante A.1: Grobkostenschätzung Jahreskosten – Betrachtungszeitraum 30 Jahre

KOSTENPUNKT	ANMERKUNG	KOSTEN AUF 30 JAHRE	KOSTEN PRO JAHR
INVESTITIONSKOSTEN			
Baukosten	30 a	606.476 €	20.216 €/a
Maschinentechnik Kosten	15 a	2.354.240 €	78.475 €/a
EMSR-Technik Kosten	10 a	190.500 €	6.350 €/a
Nebenkosten	30 a	387.904 €	12.930 €/a
Summe Investitionskosten pro Jahr			90.467 €/a
BETRIEBSKOSTEN			
Wartung/Instandhaltung			46.316 €/a
Verbrauchsstoffe			108.058 €/a
Energiebedarf			32.478 €/a
Schlamm Entsorgung			27.300 €/a
Personalkosten			20.000 €/a
Spurenanalytik			15.600 €/a
Sonstiges			25.248 €/a
Summe Betriebskosten			275.000 €/a
Summe Jahreskosten			392.971 €/a
Summe Jahreskosten gerundet			393.000 €/a
Kosten pro Zulaufmenge ARA			0,20 €/m³
Kosten pro behandelte Menge 4. Reinigungsstufe			0,16 €/m³

Laut Bolle und Pinnekamp (2015) ist „der Energiebedarf der Zugabe von PAK ist nicht von der Dosiermenge abhängig. Bei günstigen Bedingungen kann der Verbrauch in Höhe von ca. 0,03 kWh/m³ für die Adsorptionsstufe angesetzt werden.“ Der spezifische Energiebedarf liegt laut der Grobkostenschätzung bei etwa 0,056 kWh/m³ in der 4. Reinigungsstufe behandeltes Abwasser (= Menge Zulauf Kläranlage). Dies liegt etwas überhalb des ausgewiesenen Bereichs des KOM-M.NRW (2016) von 0,016 und 0,044 kWh/m³.

FLEXBED-FILTER ALS ALTERNATIVE ZUM KONTINUIERLICH GESPÜLTEN SANDFILTER

Anstatt der kontinuierlich gespülten Sandfilter könnte zum Beispiel auch ein Flexbed-Filter angedacht werden. Von der Fa. Bosman Watermanagement GmbH (2022) konnte dazu ein Richtpreis von 330.000 € für 3 Stk. Fuzzy Filter Typ 8 mit einer Kapazität von 936 m³/h (Netto - Filterbetfläche 3 x 6 m² = 18 m²) geschätzt werden. Eine schematische Darstellung des Filters sowie das Filtermaterial ist in Abbildung 34 zu sehen.

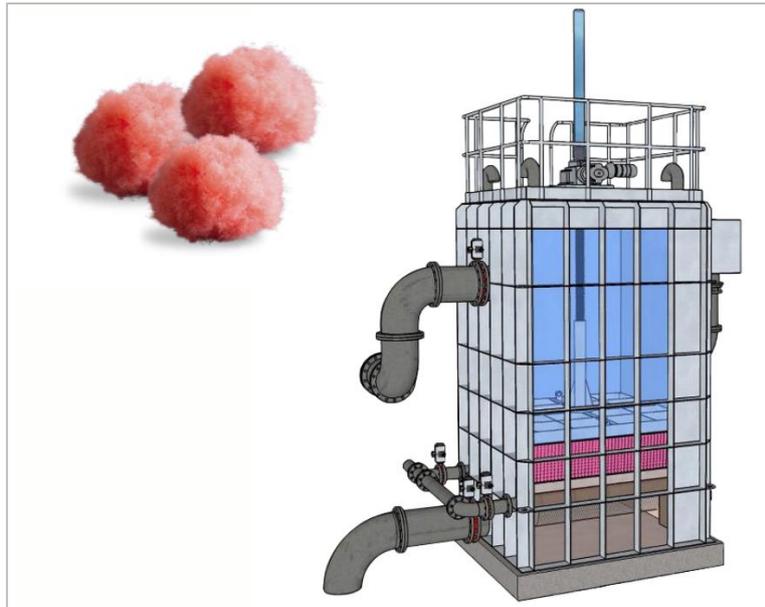


Abbildung 34 Darstellung eines Flexbed-Filters und des Filtermaterials (Bosman Watermanagement GmbH, 2022)

Aus Gründen des Frostschutzes ist es allerdings erforderlich, den die Flexbed-Filter einzuhäusen oder mindestens zu isolieren und mit Begleitheizung zu versehen.

LAGERUNG DER PAK IN BIGBAGS ALS ALTERNATIVE ZUR LAGERUNG IN EINEM SILO

Neben der üblichen Lagerung der PAK in einem Silo gibt es auch die Option mit der Anlieferung in BigBags. Dazu gibt es Systeme, die BigBags direkt staubfrei in die Mischstation zu integrieren.

8.2.2 Variante B.1: GAK-Filter (KGS als Vorfiltration)

In der Variante B.1 ist nach den Nachklärbecken erst ein kontinuierlich gespülter Sandfilter und dann ein ebenfalls kontinuierlich gespülter GAK-Filter vorgesehen. Nach der Empfehlung des KOM-M.NRW (2016) sollte die Beschickung von GAK-Filtration mit einer möglichst geringen organischen Fracht und Feststoffkonzentration von im Mittel möglichst unter 15 mg AFS/L erfolgen. Daher wird in Variante B.1 ein Sandfilter vorgesehen.

Die Anlagenkomponenten setzen sie wie folgt zusammen:

- Zuführende und ableitende Rohrleitungen
- Beschickungspumpwerk
- Kontinuierlich gespülte Sandfilter, maschinelle Einrichtung, Betonbau
 - Trichtereinbauten mit Verspannelementen
 - Zuflussverteiler und Sandverteilerkegel
 - Sandwäscher mit Waschlabyrinthen
 - Tragkonstruktion für innere Rohrleitungen und Sandwäscher
- Kontinuierlich gespülte GAK-Filter, maschinelle Einrichtung, Betonbau

- Trichtereinbauten mit Verspannelementen
- Zuflussverteiler und GAK-Verteilerkegel
- GAK-Wäscher mit Waschlabyrinthen
- Tragkonstruktion für innere Rohrleitungen und Wäscher
- Kompressorstation, Einhausung

8.2.2.1 Auslegung

ABSCHÄTZUNG DER KONTINUIERLICH GESPÜLTEN GAK- UND SANDFILTER

- A. Bewährte Filtrationsgeschwindigkeiten liegen zwischen 2 und 8 m/h (KOM-M.NRW, 2016).
- B. Leerbettkontaktzeit (EBCT) wird aus dem Quotienten aus Filterbetthöhe und Filtergeschwindigkeit berechnet. Gibt die theoretische Aufenthaltszeit des Wassers im Filter an. Die KOM-M.NRW stellt fest, für die notwendige EBCT besteht eine leichte Abhängigkeit vom DOC oder auch CSB im Zulauf einer GAK-Stufe mit Maximalwerten bis etwa 30 Minuten (KOM-M.NRW, 2016).
- C. Mit einer Korngröße von 0,4 bis 3,0 mm
- D. Das durchgesetzte Bettvolumina (BVT) ist der Quotient aus dem durchgesetzten Wasservolumen und dem Filtervolumen. Damit kann die Laufzeit bis zum Austausch des Filtermaterials grob angegeben werden. Als maximale Bettvolumina werden für die Auslegung $11.000 \text{ m}^3_{\text{Abwasser}}/\text{m}^3_{\text{GAK}}$ angenommen. Dann müsste das Filterbett ca. 1 x im Jahr ausgetauscht werden, dies entspricht ca. alle 12 Monate. Zur Ermittlung der möglichen BVT ist es wichtig, Versuche im Labor oder halbtechnischen Maßstab durchzuführen (KOM-M.NRW, 2016, S. 39).
- E. Für den Anbau mit Maschinenteknik werden ca. 50 m² geschätzt.

Tabelle 27 Variante B.1: Auslegung kontinuierlich gespülter GAK- und Sandfilter

KONTINUIERLICH GESPÜLTEN GAK-FILTER	HIN-WEISE	WERT (GEWÄHLT/BERECHNET)	EINHEIT
Filtereinbauteile		10	Stk.
Filterfläche je Einbauteil		6	m ²
Filterfläche gesamt		60	m ²
Filtergeschwindigkeit	A	6	m ³ /m ² /h
Leerbettkontaktzeit (EBCT)	B	Minimal 15	min
Spülwassermenge		15	m ³ /h
Druckluftbedarf		23	Nm ³ /h
Schüttdichte		490	kg/m ³
GAK Menge pro Filter	C	7,8	t/Filter
Gesamtmenge GAK	C	78	t

Gesamtvolumen GAK		159	m ³
Jährlich zu behandelnde Bettvolumina BVT	D	10.940	BV/a
Volumen des Betonbauwerks (BxLxH)		ca. 6,5 x 12,5 x 5,5 = 447	m ³
Fläche inkl. Anbau masch. Technik	E	ca. 132	m ²
KONTINUIERLICH GESPÜLTER SANDFILTER		WERT (GEWÄHLT/BE- RECHNET)	EINHEIT
Filtereinbauteile		5	Stk.
Filterfläche je Einbauteil		6	m ²
Filterfläche gesamt		30	m ²
Oberflächenbelastung		max. 12	m ³ /m ² /h
Spülwassermenge		im Mittel ca. 10	m ³ /h
Druckluftbedarf		ca. 12	Nm ³ /h
Sand (Körnung: 1 bis 2 mm)		16	t/Filter
Gesamtmenge Sand		80	t
Filterbetthöhe		1,50	m
Volumen des Betonbauwerks (BxLxH)		ca. 3,0 x 12,5 x 5,5 = 206	m ³
Fläche inkl. Anbau masch. Technik		Ca. 88	m ²

8.2.2.2 Grobkostenschätzung

Die Grobkostenschätzung für die Variante B.1 ist in die Investitionskosten (Tabelle 28) und die Betriebskosten (Tabelle 29) unterteilt.

Tabelle 28 Variante B.1: Grobkostenschätzung Investitionskosten

KOSTENPUNKT	ANMERKUNG	SPEZ. KOS- TEN	MENGE	KOSTENSCHÄTZUNG
BAUKOSTEN				
ROHRLEITUNGEN, KANÄLE, ERDARBEITEN				
Zu-/Ablaufanbindung	Rohrleitungen/ Betonarbeiten	300 €/m	200 m	60.000 €
Ablauf Waschwasser GAK-Filter		200 €/m	140 m	28.000 €
BAUWERKE (HOCHBAU, TIEFBAU, SCHÄCHTE)				
Schacht Zwischenpumpwerk, Verteilerbauwerk		15.000 €/PA	1 PA	15.000 €
MID Schacht		5.000 €/PA	1 PA	5.000 €
Kontinuierlich gespülter GAK-Fil- ter	Betonbauwerk	500 €/m ³	206 m ³	103.000 €
Kontinuierlich gespülter Sandfil- ter	Betonbauwerk	500 €/m ³	578 m ³	289.000 €

BAUWERKE HOCHBAU				
Raumzelle/Container Kontinuierlich gespülte Sandfilter	für Technik, EMSR	60.000 €/PA	1 PA	60.000 €
SONSTIGES				
Fundamente	Raumzelle	25.000 €/PA	1 PA	25.000 €
Brauch-/Trinkwasseranschluss		5.000 €/PA	1 PA	5.000 €
Kabeltrassen, Kabelschächte		10.000 €/PA	1 PA	10.000 €
Wegeanbindung/Außenanlagen		110 €/m ²	680 m ²	74.800 €
Geländer, Abdeckungen, Treppen, Bediensteg (etc.)		20.000 €/PA	1 PA	20.000 €
Baustelleneinrichtung		7%		48.636 €
Summe Baukosten				743.436 €
MASCHINENTECHNIK KOSTEN				
KONTINUIERLICH GESPÜLTE GAK-FILTER				
Filtereinbauteile	inkl. Verrohrung etc.	40.000 €/Stk.	10 Stk.	400.000 €
erste GAK-Füllung		2.200 €/PA	78 t	171.600 €
Kompressorstation	für GAK-Filter	25.000 €/PA	1 PA	25.000 €
KONTINUIERLICH GESPÜLTE SANDFILTER				
Filtereinbauteile	inkl. Verrohrung etc.	40.000 €/Stk.	5 Stk.	200.000 €
Sandfüllung		55 €/t	80 t	4.400 €
Kompressorstation	für Sandfilter	12.500 €/PA	1 PA	12.500 €
ZWISCHENPUMPWERK, SCHÄCHTE				
Pumpen		20.000 €/Stk.	6 Stk.	120.000 €
Armaturen, Schieber		50.000 €/PA	2 PA	100.000 €
SONSTIGES				
Baustelleneinrichtung		10.000 €/PA	1 PA	10.000 €
Summe Maschinentechnik Kosten				1.043.500 €
ESMR KOSTEN				
MID		4.000 €/Stk.	1 Stk.	4.000 €
Trübungsmessung		2.500 €/Stk.	1 Stk.	2.500 €
Blitzschutz		5.000 €/PA	1 PA	5.000 €
SPS-System, Einbindung Prozessleitsystem	GAK-Filter + Sandfilter	50.000 €/PA	1 PA	52.000 €
Summe ESMR Kosten				63.500 €
NEBENKOSTEN				
Ing. Honorare, Prüfgebühren		10%		185.134 €
uV rd.		10%		204.430 €
Summe Sonstige Kosten				389.564 €
Summe Investitionskosten				2.240.000 €

Die spezifischen Kosten für Strom, PAK etc. beziehen sich auf Tabelle 21.

Bei der Reaktivierung der GAK ist mit einem Verlust von ca. 10 – 20 % zu rechnen, der durch frische GAK aufgefüllt werden muss. Ein Großteil der Verlustmenge der GAK kann als PAK weiterverwendet werden (Kolisch et al. (2014) und Alt et al. (2014) in KOM-M.NRW (2016)).

Tabelle 29 Variante B.1: Grobkostenschätzung Betriebskosten

KOSTENPUNKT	ANMERKUNG	SPEZ. KOSTEN	MENGE	KOSTENSCHÄTZUNG
WARTUNG/INSTANDHALTUNG				
Baukosten		1,5%		11.152 €/a
Maschinentechnik Kosten		3,0%		31.305 €/a
ESMR-Technik Kosten		3,0%		1.905 €/a
Summe Wartung/Instandhaltung				44.362 €/a
VERBRAUCHSSTOFFE				
GAK		2.200 €/t _{GAK}	78 t/a	171.600 €/a
Sand	0,2 Füllungen/a	55 €/t	16 t/a	880 €/a
Summe Verbrauchsstoffe				172.480 €/a
ENERGIEBEDARF				
Zwischenpumpwerk 1	Laufzeit 24 h/d, Förderhöhe 8 m, 5 W/m ³ /m, 1.739.455 m ³ /a	0,30 €/kWh	69.578 kWh/a	20.873 €/a
Zwischenpumpwerk 2	Laufzeit 24 h/d, Förderhöhe 8 m, 5 W/m ³ /m, 1.739.455 m ³ /a	0,30 €/kWh	69.578 kWh/a	20.873 €/a
Kompressorstationen	Laufzeit 6 h/d, 11 kW	0,30 €/kWh	24.090 kWh/a	7.227 €/a
Sonstiges (Messtechnik etc.)		0,30 €/kWh	10.000 kWh/a	3.000 €/a
Summe Energiebedarf				51.974 €/a
PERSONALKOSTEN				
Personalaufwand		50.000 €/P./a	0,4 P.	20.000 €/a
Summe Personalkosten				20.000 €/a
SPURENSTOFFANALYTIK				
Analysekosten		300 €/Probe	52 Proben/a	15.600 €/a
Summe Spurenstoffanalytik				15.600 €/a
SONSTIGES				
uV und Rundung		10 %		30.585 €
Summe Sonstiges				30.585 €/a
Summe Betriebskosten				335.000 €/a

Nachfolgend werden die Investitions- und Betriebskosten in Jahreskosten dargestellt und diese auch in Bezug zur Wassermenge dargestellt.

Tabelle 30 Variante B.1: Grobkostenschätzung Jahreskosten – Betrachtungszeitraum 30 Jahre

KOSTENPUNKT	ANMERKUNG	KOSTEN AUF 30 JAHRE	KOSTEN PRO JAHR
INVESTITIONSKOSTEN			
Baukosten	30 a	743.436 €	24.781 €/a
Maschinentechnik Kosten	15 a	2.087.000 €	69.567 €/a
EMSR-Technik Kosten	10 a	190.500 €	6.350 €/a
Nebenkosten	30 a	389.564 €	12.985 €/a
Summe Investitionskosten pro Jahr			113.683 €/a
BETRIEBSKOSTEN			
Wartung/Instandhaltung			44.362 €/a
Verbrauchsstoffe			172.480 €/a
Energiebedarf			51.974 €/a
Schlamm Entsorgung			
Personalkosten			20.000 €/a
Spurestoffanalytik			15.600 €/a
Sonstiges			30.585 €/a
Summe Betriebskosten			335.000 €/a
Summe Jahreskosten			448.683 €/a
Summe Jahreskosten gerundet			449.000 €/a
Kosten pro Zulaufmenge ARA			0,23 €/m³
Kosten pro behandelte Menge 4. Reinigungsstufe			0,26 €/m³

Der spezifische Energiebedarf liegt laut der Grobkostenschätzung bei etwa 0,089 kWh/m³ in der 4. Reinigungsstufe behandeltes Abwasser (= Menge Zulauf Kläranlage). Dies ist knapp über dem ausgewiesenen Bereich des KOM-M.NRW (2016) von 0,02 und 0,06 kWh/m³. Da sich Abbildung 35 vermutlich lediglich auf die GAK-Filtration (ohne Vorfilter) bezieht, liegt der Energiebedarf pro Wassermenge in der Kostenschätzung im mittleren Bereich.

Auch von anderen Quellen wird der Energiebedarf (lediglich) der GAK-Filterzellen auf 0,01 bis 0,05 kWh/m³ behandeltem Abwasser geschätzt (z.B. Bolle und Pinnekamp (2015)).

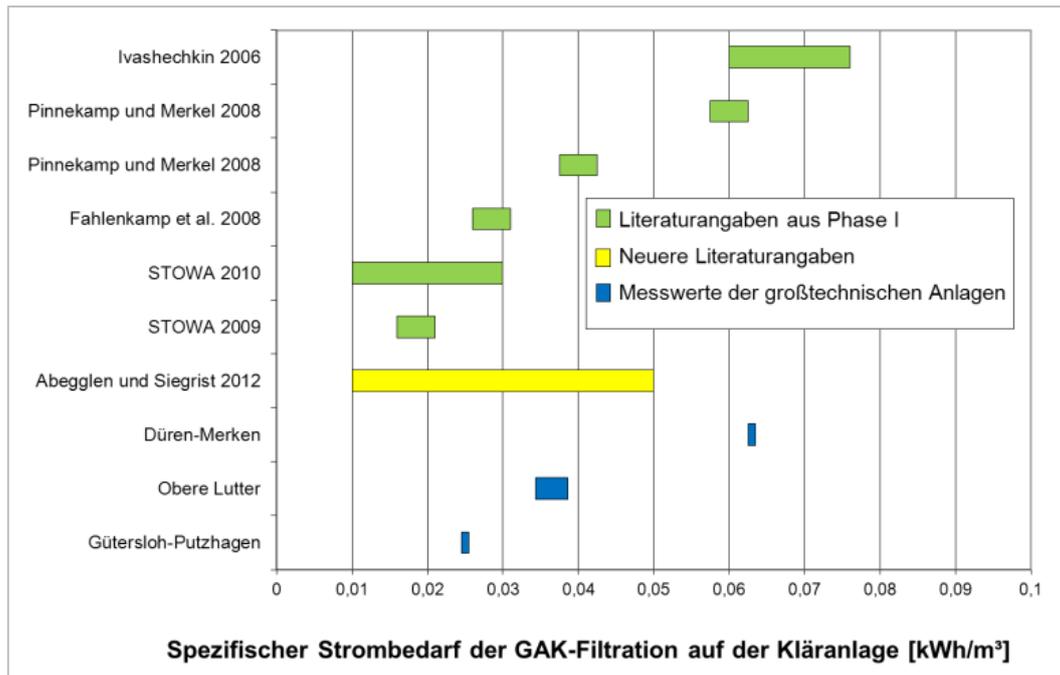


Abbildung 35 Spezifischer Stromverbrauch einer GAK-Stufe in Bezug auf die in der GAK gefilterte Wassermenge (Bolle & Pinnekamp, 2015, S. 9)

Bolle und Pinnekamp (2015) geben zusätzlich eine genauere Aufschlüsselung für eine 4. Reinigungsstufe mit GAK-Filtration an. Die Schwankungen ergeben sich aus den gewählten Betriebsparameter und Gegebenheiten.

- 0,06 kWh/m³ bei günstigen Randbedingungen (kein Hebewerk nötig, Annahme eines niedrigen Strombedarfs für die Vorfiltration und GAK-Filtration)
- 0,17 kWh/m³ bei ungünstigen Randbedingungen (10 m Förderhöhe, Annahme eines hohen Strombedarfs für Vorfiltration und GAK-Filtration)

In Weißenburg werden pro Filterzelle ca. 16 kWh/d benötigt (Rödel, et al., 2019).

FLEXBED-FILTER ALS ALTERNATIVE ZUM KONTINUIERLICH GESPÜLTEN SANDFILTER

Anstatt der kontinuierlich gespülten Sandfilter könnte zum Beispiel auch ein Flexbed-Filter zum Rückhalt der AFS angedacht werden. Von der Fa. Bosman Watermanagement GmbH (2022) wurden dazu zwei Möglichkeiten vorgestellt. Entweder 1 Stk. Fuzzy Filter Typ 8 mit einer Kapazität von 360 m³/h (Netto - Filterbetfläche: 6 m²) zum Richtpreis von 110.000 € oder 2 Stk. Fuzzy Filter Typ 6 (Kapazität 3600 m³, Netto - Filterbetfläche 2 x 3,06 m² = 6,12 m²) für 160.000 €. Eine schematische Darstellung dieser Filter und das Filtermaterial ist in Abbildung 34 zu sehen.

8.2.3 Variante C.2: Kombination aus Ozon und GAK-Filter (bzw. BAK)

Die beiden Ozonreaktoren (Kontaktbecken) werden mit dem Abwasser aus der Nachklärung beschickt. Nach der Reaktion im Kontaktreaktor fließt das Abwasser zum BAK-Filter zur biologischen Nachbehandlung, im Anschluss wird es in die Raab eingeleitet. Der Sauerstoff, der

für die Ozonerzeugung benötigt wird, kann auf unterschiedliche Arten erzeugt werden. Üblich ist entweder die Verwendung von flüssigem Sauerstoff (LOX), komprimierter getrockneter Luft oder Sauerstoff aus einer PSA-Anlage (Pressure Swing Adsorption). Für eine 4. Reinigungsstufe wird im Moment vor allem aus wirtschaftlichen Gründen die Verwendung von LOX empfohlen. Bei der Ozonerzeugung werden ca. 10 M.-% des Sauerstoffs in Ozon umgewandelt (KOM-M.NRW, 2016, S. 27). Die Steuerung und Regelung wird von Kreuzinger et al. (2011) über UV/Vis-Absorption (DOC im Zulauf und O₃ im Ablauf als Steuer- bzw. Regelparameter) empfohlen. Die Höhenverluste der Anlage, welche Zulaufleitungen, Ozonreaktor, biologische Nachbehandlung sowie Ablaufleitungen beinhalten, werden mit rd. 0,50 m abgeschätzt. Der entstehende Arbeitsaufwand für Variante C.2 wird ca. mit 0,8 Mitarbeiter abgeschätzt.

Der Eintrag des Ozons kann über Diffusoren oder Injektoren geregelt sein. Beide Systeme bieten nach Angaben des KOM-M.NRW (2016, S. 28) eine gute Eintragungseffizienz. Bei Diffusoren ist eine Beckentiefe von mindestens 5 m erforderlich, um den Übergang des Ozons in das Wasser möglichst gut zu erreichen. Der Betrieb von Injektoren stellt einen weiteren Energieverbrauch da. Nach der Auswertung von Zech und Schatz (2016) sind folgende Kostenpunkte (Betriebskosten) für Injektoren bzw. Diffusoren zu erwarten.

- Injektor: +26.280 kWh/a (Strombezug)
- Diffusor: +5.000 €/a (wartungsintensiv) + 14.783 €/kg_{O₃} (in 20 % der Zeit eine Abregelung der Ozonkonzentration im Ausgang des Ozonreaktors)

Daher wurde für die Machbarkeitsstudie die Injektor-Variante gewählt.

Die Bestandteile der Variante C.2 sind.

- Zuführende und ableitende Rohrleitungen
- Beschickungspumpwerk
- Sauerstofftank mit Kaltvergaser und Verdampfer
- Ozonerzeuger
- Kontaktbecken
- Wärmetauscher und Kühlung des Ozongenerators mit gereinigtem Wasser aus dem GAK-Filter
- Eintragungssystem (Pumpe-Injektorsystem)
- katalytischer Restozonvernichter
- Kontinuierlich gespülte GAK-Filter, maschinelle Einrichtung, Betonbau
 - Trichtereinbauten mit Verspannelementen
 - Zuflussverteiler und GAK-Verteilerkegel
 - GAK-Wäscher mit Waschlabyrinthen
 - Tragkonstruktion für innere Rohrleitungen und Wäscher
- Kompressorstation, Einhausung

8.2.3.1 Auslegung

ABSCHÄTZUNG DER OZONUNG

Die folgende Abschätzung der Ozonung wurde nach KOM-M.NRW (2016) durchgeführt. Folgende Hinweise beziehen sich auf Tabelle 31.

- A. Die spezifische Ozonzehrung z_{spez} wird von Kreuzinger et al. (2011, S. 82) 0,6 bis 0,7 g_{O_3}/g_{DOC} , von Abegglen und Siegrist (2012) auf 0,7 bis 0,9 g_{O_3}/g_{DOC} und von Barenbruch und Firk (2014) auf 0,6 bis 0,8 g_{O_3}/g_{DOC} geschätzt. Für die Berechnungen wird ein Wert von $z_{spez} = 0,7 g_{O_3}/g_{DOC}$ angenommen, da dieser im Bereich von allen Schätzungen liegt. Es wird davon ausgegangen, dass kaum Nitrit im Ablauf vorhanden ist. Dies ist wichtig, da das Nitrit sonst mit einem Verbrauch von 3,43 g_{O_3}/g_{NO_2-N} zu Nitrat oxidiert werden würde und damit weniger Ozon zur Aufspaltung der Mikroschadstoffe zur Verfügung stehen würde (KOM-M.NRW, 2016, S. 30).
- B. Da der DOC im Ablauf der Nachklärung c_{DOC} auf der Kläranlage in Feldbach-Raabau nicht direkt bestimmt wird, wird er folgendermaßen abgeschätzt. Der DOC im Ablauf der Nachklärung wird durch den 85%-Perzentil des CSB abgeschätzt. Ein Erfahrungswert für das CSB/TOC-Verhältnis liegt bei ca. 2,8 bis 3,0. Da die abfiltrierbaren Stoffe als sehr gering eingeschätzt werden, wird der gesamte TOC-Wert auch als DOC-Wert angenommen. Daraus ergeben sich $c_{DOC} = ca. 6,0 g_{DOC}/m^3$ im Ablauf der Nachklärung.
- C. Die Ozonkonzentration c_{O_3} liegt im Erfahrungsbereich von 2 bis 7 g_{O_3}/m^3 behandeltem Abwasser (KOM-M.NRW, 2016, S. 54).
- D. Der minimale Zufluss im 2-h-Mittel $Q_{T,2h,min}$ wird aus den Betriebsdaten mit 66 m^3/h abgeschätzt.
- E. Annahme: 0,09 kg_{O_3} pro 1 kg_{O_2}
- F. Nach dem KOM-M.NRW (2016, S. 29) liegt bei 10 M.-% Ozon im Produktgas die maximale Ozonkonzentration im Produktgas bei 148 g_{O_3}/Nm^3 .
- G. Die Zeit bis zur vollständigen Ozonzehrung $t_{Zehrung}$ wird bei der detaillierten Auslegung aus Ozonzehrungsversuchen gewonnen. Da diese im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie nicht ermittelt wurde, wird auf die Empfehlung von Kreuzinger et al. (2011, S. 82) zurückgegriffen. Empfohlen wird eine mittlere hydraulische Aufenthaltszeit von 20 min.
- H. Nach Kreuzinger et al. (2011) soll der Kontaktreaktor als Kaskade ausgeführt sein, d.h. es werden jeweils zwei Eintrags- und „Reaktionsbehälter“ mit je 10 min Aufenthaltszeit vorgesehen.

Tabelle 31 Variante C.2: Auslegung Ozonung

OZONERZEUGUNG	HINWEIS	WERT (GEWÄHLT/BERECHNET)	EINHEIT
Auslegung maximale Ozonmenge z_{spez}	A	0,7	g_{O_3}/g_{DOC}
DOC Konzentration (Annahme) c_{DOC}	B	ca. 0,6	g_{DOC}/m^3

Erforderliche Ozonkonzentration c_{O_3}	C	4,8	g_{O_3}/m^3
Gewählte Ozonkonzentration c_{O_3}		5	g_{O_3}/m^3
Max. Auslegungswassermenge Q_{Bem}		360	m^3/h
Min. Auslegungswassermenge $Q_{T,2h,min}$	D	66	m^3/h
Erforderliche Max. Ozon-Produktionskapazität $B_{O_3,max}$		1,8	kg_{O_3}/h
Gewählte max. Ozon-Produktionskapazität $B_{O_3,max}$		2,0	kg_{O_3}/h
Mittlere Ozon-Produktion $B_{O_3,mittel}$		1,2	kg_{O_3}/h
Min. Ozon-Produktion $B_{O_3,min}$		0,3	kg_{O_3}/h
Jährliche Ozon-Produktion		10.545	kg_{O_3}/a
Spez. Sauerstoffbedarf / LOX		10	kg_{O_2}/kg_{O_3}
Ozonkonzentration im Produktgas $c_{CO_3,Produktgas}$	E	148	g_{O_3}/Nm^3
Jährlicher Sauerstoff-Bedarf		105.485	kg_{O_2}/a
Max. einzutragender Gasvolumenstrom $Q_{O_2/O_3,max}$	F	13,5	Nm^3/h
Min. einzutragender Gasvolumenstrom $Q_{O_2/O_3,max}$	F	2,0	Nm^3/h
OZONREAKTOR	HINWEIS	WERT (GEWÄHLT/BERECHNET)	EINHEIT
Mittlere Aufenthaltszeit t_{OR}	G	20	min
Ozonzehrung $t_{Zehrung}$	G	10	min
Erf. Volumen Ozonreaktor (Ansatz Aufenthaltszeit) V_{OR}		120	m^3
Erf. Volumen Bereich Ausgasung V_{Gas}		60	m^3
Summe erforderliches Reaktorvolumen V_{ges_1}		180	m^3
Reaktorvolumen (Ansatz Ozonzehrung) $Q_{Bem} \times t_{Zehrung} / 0,35 = V_{ges_2}$		171	m^3
Gewähltes Reaktorvolumen V_{ges}		180	m^3
Anzahl der Becken (Kammern) n_{OR}	H	1 Becken, 2 Kammern	
Gewähltes Volumen der Ausgasungszone V_{OR-A}		90	m^3

ABSCHÄTZUNG DER KONTINUIERLICH GESPÜLTEN GAK-FILTER

Die als Nachbehandlung nach der Ozonung vorgesehene Behandlung mit einem biologisch aktiven GAK-Filter ist in Tabelle 32 ausgelegt.

- A. Bewährte Filtrationsgeschwindigkeiten liegen zwischen 2 und 8 m/h (KOM-M.NRW, 2016).
- B. Leerbettkontaktzeit (EBCT) wird aus dem Quotienten aus Filterbetthöhe und Filtergeschwindigkeit berechnet. Gibt die theoretische Aufenthaltszeit des Wassers im Filter an. Die KOM-M.NRW stellt fest, für die notwendige EBCT besteht eine leichte Abhängigkeit vom DOC oder auch CSB im Zulauf einer GAK-Stufe mit Maximalwerten bis etwa 30 Minuten (KOM-M.NRW, 2016).

- C. Mit einer Korngröße von 0,4 bis 3,0 mm
- D. Das durchgesetzte Bettvolumina (BVT) ist der Quotient aus dem durchgesetzten Wasservolumen und dem Filtervolumen. Damit kann die Laufzeit bis zum Austausch des Filtermaterials grob angegeben werden. Die Schätzungen und Erfahrungen zur behandelbaren Abwassermenge geht dabei weit auseinander (siehe z.B. KOM-M.NRW (2016, S. 39)). Für die biologisch aktivierte Aktivkohle wird hier eine behandelbare Abwassermenge von $15.000 \text{ m}^3_{\text{Abwasser}}/\text{m}^3_{\text{GAK}}$ angenommen. Damit ergibt sich ein Austausch des Filterbetts von ca. 0,73 x im Jahr, dies entspricht ca. alle 8,6 Monate.
- E. Für den Anbau mit Maschinenteknik werden ca. 50 m² geschätzt.

Tabelle 32 Variante C.2: Auslegung kontinuierlich gespülter BAK-Filter

KONTINUIERLICH GESPÜLTER GAK-FILTER	HIN-WEISE	WERT (GEWÄHLT/BERECHNET)	EINHEIT
Filtereinbauteile		10	Stk.
Filterfläche je Einbauteil		6	m ²
Filterfläche gesamt		60	m ²
Filtergeschwindigkeit	A	6	m ³ /m ² /h
Leerbettkontaktzeit (EBCT)	B	Minimal 15	min
Spülwassermenge		15	m ³ /h
Druckluftbedarf		23	Nm ³ /h
Schüttdichte		490	kg/m ³
GAK Menge pro Filter	C	7,8	t/Filter
Gesamtmenge GAK	C	78	t
Gesamtvolumen GAK		159	m ³
Jährlich zu behandelnde Bettvolumina BVT	D	10.940	BV/a
Volumen des Betonbauwerks (BxLxH)		ca. 6,5 x 12,5 x 5,5 = 447	m ³
Fläche inkl. Anbau masch. Technik	E	ca. 132	m ²

8.2.3.2 Grobkostenschätzung

Die Grobkostenschätzung für die Variante C.2 ist in die Investitionskosten (Tabelle 33) und die Betriebskosten (Tabelle 34) unterteilt.

Tabelle 33 Variante C.2: Grobkostenschätzung Investitionskosten

KOSTENPUNKT	ANMERKUNG	SPEZ. KOSTEN	MENGE	KOSTENSCHÄTZUNG
BAUKOSTEN				
ROHRLEITUNGEN, KANÄLE, ERDARBEITEN				

Zu-/Ablaufanbindung	Rohrleitungen/ Betonarbeiten	300 €/m	200 m	60.000 €
Ablauf Waschwasser GAK-Filter		200 €/m	140 m	28.000 €
BAUWERKE (HOCHBAU, TIEFBAU, SCHÄCHTE)				
Schacht Zwischenpumpwerk, Verteilerbauwerk		15.000 €/PA	1 PA	15.000 €
MID Schacht		5.000 €/PA	1 PA	5.000 €
Ozonreaktor		500 €/m ³	100 m ³	50.000 €
Kontinuierlich gespülter GAK-Filter	Betonbauwerk	500 €/m ³	206 m ³	103.000 €
BAUWERKE HOCHBAU				
Raumzelle/Container Ozonanlage	für Technik, EMSR	60.000 €/PA	1 PA	60.000 €
Raumzelle/Container Kontinuierlich gespülte Sandfilter	für Technik, EMSR	60.000 €/PA	1 PA	60.000 €
SONSTIGES				
Fundamente	Silo, Kühler, Fertigercontainer	25.000 €/PA	1 PA	25.000 €
Sauerstofftank – Miettank	in O ₂ -Lieferung enthalten	-	-	-
Brauch-/Trinkwasseranschluss		5.000 €/PA	2 PA	10.000 €
Kabeltrassen, Kabelschächte		10.000 €/PA	1 PA	10.000 €
Wegeanbindung/Außenanlagen		110 €/m ²	680 m ²	74.800 €
Geländer, Abdeckungen, Treppen, Bediensteg (etc.)		25.000 €/PA	1 PA	25.000 €
Baustelleneinrichtung		7%		42.756 €
Summe Baukosten				592.606 €
MASCHINENTECHNIK KOSTEN				
OZONERZEUGERANLAGE				
Ozongenerator, Eintragssystem, Kompressor, Restozonvernichter, Kühlwasserversorgung, Rohrleitungen etc.		500.000 €/PA	1 PA	500.000 €
KONTINUIERLICH GESPÜLTE GAK-FILTER				
Filtereinbauteile	inkl. GAK, Verrohrung etc.	40.000 €/Stk.	10 Stk.	400.000 €
erste GAK-Füllung		2.200 €/t	78 t	171.600 €
Kompressorstation	für GAK-Filter	25.000 €/PA	1 PA	25.000 €
ZWISCHENPUMPWERK, SCHÄCHTE				
Pumpen		20.000 €/Stk.	6 Stk.	120.000 €
Armaturen, Schieber		50.000 €/PA	2 PA	100.000 €
SONSTIGES				
Baustelleneinrichtung		10.000 €/PA	1 PA	10.000 €
Summe Maschinenteknik Kosten				1.326.600 €
ESMR KOSTEN				
MID		4.000 €/Stk.	1 Stk.	4.000 €

Trübungsmessung	2.500 €/Stk.	2 Stk.	5.000 €
O ₃ -, O ₂ -Umgebungsmessung, O ₃ -Abgasmessung, Lokale SPS in Ozonanlage enthalten	-	-	-
Blitzschutz	5.000 €/PA	1 PA	5.000 €
SPS-System, Einbindung Pro- zessleitsystem	35.000 €/PA	1 PA	34.000 €
Summe ESMR Kosten			48.000 €
SONSTIGES			
Nebenkosten	Ing. Honorare, Prüfgebühren	10%	193.815 €
uV rd.		10%	212.979 €
Summe Sonstiges			406.794 €
Summe Investitionskosten			2.344.000 €

Die spezifischen Kosten für Strom, PAK etc. beziehen sich auf Tabelle 21.

Tabelle 34 Variante C.2: Grobkostenschätzung Betriebskosten

KOSTENPUNKT	ANMERKUNG	SPEZ. KOS- TEN	MENGE	KOSTENSCHÄTZUNG
WARTUNG/INSTANDHALTUNG				
Baukosten		1,5%		8.439 €/a
Maschinentechnik Kosten		3,0%		39.798 €/a
ESMR-Technik Kosten		3,0%		1.440 €/a
Summe Wartung/Instandhaltung				49.677 €/a
VERBRAUCHSSTOFFE				
Sauerstoff	inkl. Tankmiete	0,3 €/kgO ₂	105.485 kgO ₂ /a	31.646 €/a
GAK		2.200 €/t _{GAK}	57 t/a	125.400 €/a
Summe Verbrauchsstoffe				157.046 €/a
ENERGIEBEDARF				
Zwischenpumpwerk 1	Laufzeit 24 h/d, Förderhöhe 8 m, 5 W/m ³ /m, 1.739.455 m ³ /a	0,30 €/kWh	69.578 kWh/a	20.873 €/a
Zwischenpumpwerk 2	Laufzeit 24 h/d, Förderhöhe 8 m, 5 W/m ³ /m, 1.739.455 m ³ /a	0,30 €/kWh	69.578 kWh/a	20.873 €/a
Kompressorstationen	Laufzeit 6 h/d, 5,5 kW	0,30 €/kWh	12.045 kWh/a	3.614 €/a
Ozonung	10 kWh/kgO ₃ , 10.545 kgO ₃ /a	0,30 €/kWh	105.450 kWh/a	31.635 €/a
Injektor	0,016 kWh/m ³	0,30 €/kWh	27.831 kWh/a	8.350 €/a
Sonstiges (Messtechnik etc.)		0,30 €/kWh	10.000 kWh/a	3.000 €/a
Summe Energiebedarf				88.345 €/a
PERSONALKOSTEN				

Personalaufwand	50.000 €/P./a	0,8 P.	40.000 €/a
Summe Personalkosten			40.000 €/a
SPURENSTOFFANALYTIK			
Analysekosten	300 €/Probe	52 Proben/a	15.600 €/a
Summe Spurenstoffanalytik			15.600 €/a
SONSTIGES			
uV und Rundung	10 %		35.333 €
Summe Sonstiges			35.333 €/a
Summe Betriebskosten			386.000 €/a

Nachfolgend werden die Investitions- und Betriebskosten in Jahreskosten dargestellt und diese auch in Bezug zur Wassermenge dargestellt.

Tabelle 35 Variante C.2: Grobkostenschätzung Jahreskosten – Betrachtungszeitraum 30 Jahre

KOSTENPUNKT	ANMERKUNG	KOSTEN AUF 30 JAHRE	KOSTEN PRO JAHR
INVESTITIONSKOSTEN			
Baukosten	30 a	562.606 €	18.754 €/a
Maschinentechnik Kosten	15 a	2.653.200 €	88.440 €/a
EMSR-Technik Kosten	10 a	144.000 €	4.800 €/a
Nebenkosten	30 a	406.794 €	13.560 €/a
Summe Investitionskosten pro Jahr			125.553 €/a
BETRIEBSKOSTEN			
Wartung/Instandhaltung			49.677 €/a
Verbrauchsstoffe			157.046 €/a
Energiebedarf			88.345 €/a
Schlamm Entsorgung			
Personalkosten			40.000 €/a
Spurenstoffanalytik			15.600 €/a
Sonstiges			34.968 €/a
Summe Betriebskosten			386.000 €/a
Summe Jahreskosten			511.553 €/a
Summe Jahreskosten gerundet			512.000 €/a
Kosten pro Zulaufmenge ARA			0,26 €/m³
Kosten pro behandelte Menge 4. Reinigungsstufe			0,29 €/m³

Der spezifische Energiebedarf liegt laut der Grobkostenschätzung bei etwa 0,15 kWh/m³ in der 4. Reinigungsstufe behandeltes Abwasser (= Menge Zulauf Kläranlage). Dies liegt innerhalb des ausgewiesenen Bereichs des KOM-M.NRW (2016) von 0,04 bis 0,17 kWh/m³. Auch im Vergleich mit Abbildung 36 liegt der spezifische Energiebedarf im Mittelfeld. Nach Bolle und Pinnekamp (2011) kann nur für die Ozonung der Energiebedarf mit 0,1 bis 0,2 kWh/m³ (bzw. 9 bis 18 kWh/EW/a) angenommen werden.

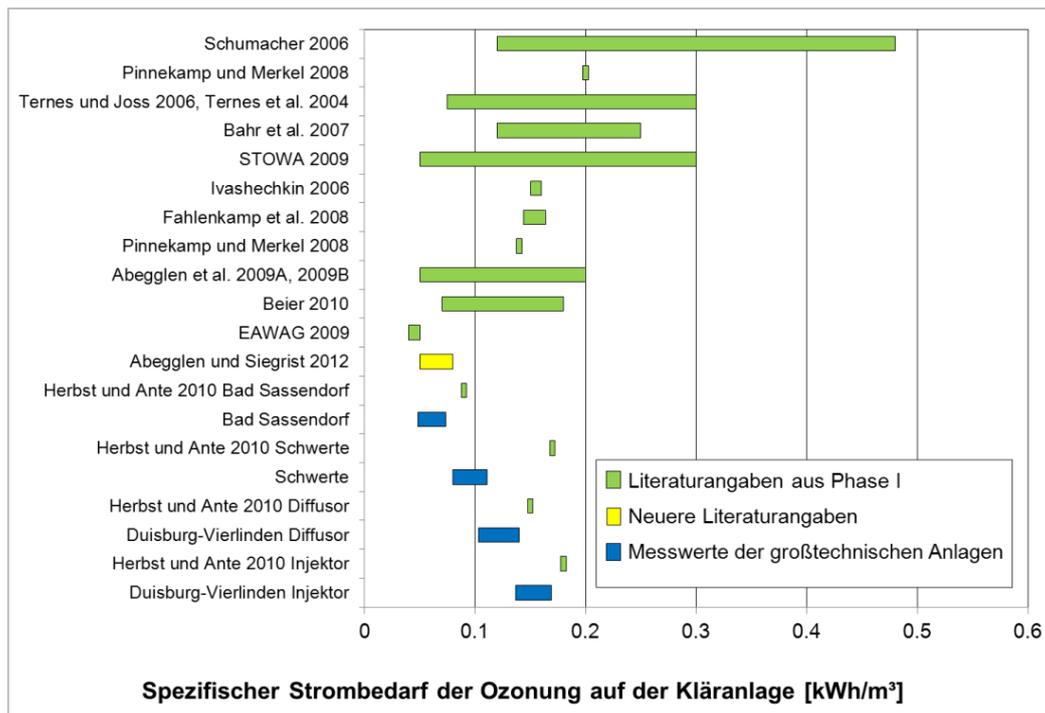


Abbildung 36 Spezifischer Strombedarf der Ozonung in Bezug auf die in der Ozonung behandelten Abwassermenge (Bolle & Pinnekamp, 2015, S. 4)

8.3 Vergleich und Bewertung der ausgewählten Anlagenkonzepte

Zunächst werden die drei ausgearbeiteten Varianten monetär miteinander verglichen (Tabelle 36), dabei geht die Variante A.1 (PAK-Dosierung in die Belebung Sandfiltration nach der Nachklärung) insgesamt als günstigste Variante hervor. Die Investitionskosten sind bei Variante laut derzeitigen Schätzungen in etwa gleich, dies liegt unter anderem an der Vollstrombehandlung bei Variante A.1. Dadurch werden bei Variante A.1 durch die deutlich mehr Sandfilter benötigt als bei Variante B.1. Dieser Unterschied bezüglich der Voll- und Teilstrombehandlung ist auch in den spezifischen Jahreskosten in den beiden letzten Zeilen der Tabelle 36 zu sehen.

Tabelle 36 Finanzieller Variantenvergleich – Betrachtungszeitraum 30 Jahre

VARIANTE	A.1	B.1	C.2
INVESTITIONSKOSTEN			
Baukosten	20.216 €/a	24.781 €/a	18.754 €/a
Maschinentechnik Kosten	78.475 €/a	69.567 €/a	88.440 €/a
EMSR-Technik Kosten	6.350 €/a	6.350 €/a	4.800 €/a
Nebenkosten	12.930 €/a	12.985 €/a	13.560 €/a
Investitionskosten pro Jahr	117.971 €/a	113.683 €/a	125.553 €/a
BETRIEBSKOSTEN			
Wartung/Instandhaltung	46.316 €/a	44.362 €/a	49.677 €/a
Verbrauchsstoffe	108.058 €/a	172.480 €/a	157.046 €/a
Energiebedarf	32.478 €/a	51.974 €/a	88.345 €/a

Schlammentsorgung	27.300 €/a		
Personalkosten	20.000 €/a	20.000 €/a	40.000 €/a
Spurenstoffanalytik	15.600 €/a	15.600 €/a	15.600 €/a
Sonstiges	25.248 €/a	30.585 €/a	35.333 €/a
Summe Betriebskosten	275.000 €/a	335.000 €/a	386.000 €/a
Summe Jahreskosten	392.971 €/a	448.683 €/a	511.553 €/a
Summe Jahreskosten gerundet	393.000 €/a	449.000 €/a	512.000 €/a
Kosten pro Zulaufmenge ARA	0,20 €/m ³	0,23 €/m ³	0,26 €/m ³
Kosten pro behandelte Menge 4. Reinigungsstufe	0,20 €/m ³	0,26 €/m ³	0,29 €/m ³

Der grafische Vergleich der in Tabelle 36 aufgezeigten Jahreskosten ist in Abbildung 37 zu sehen.

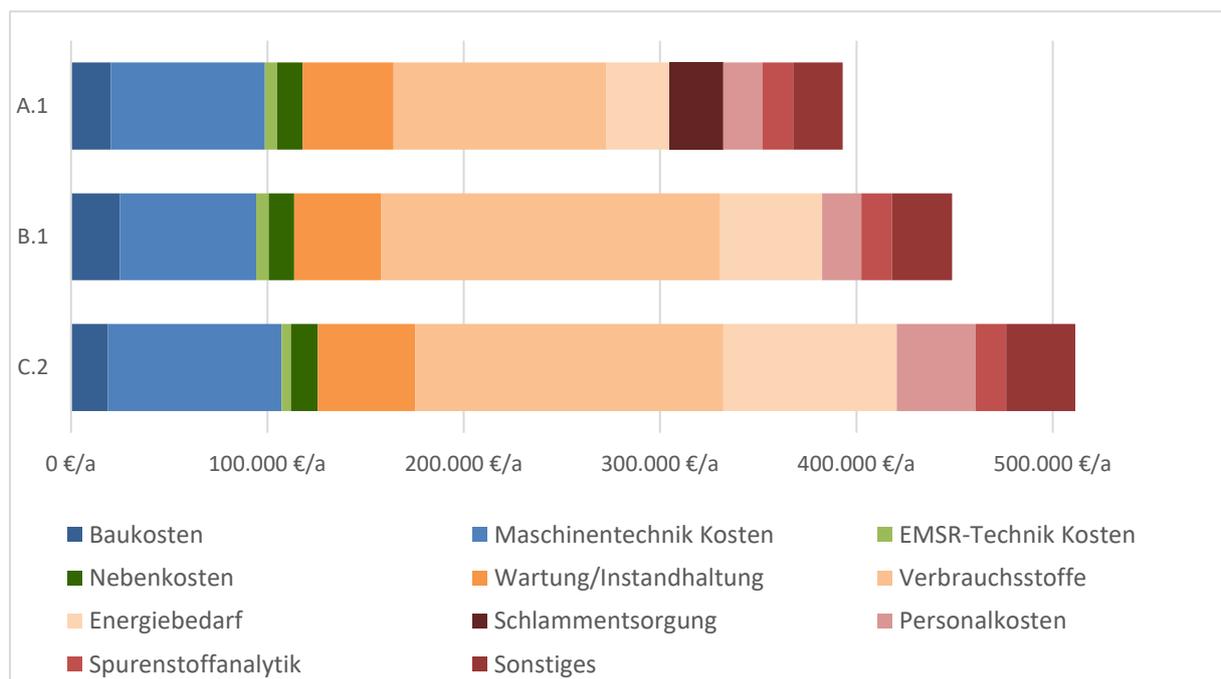


Abbildung 37 Jahreskosten aus der Grobkostenschätzung der Varianten A.1, B.1 und C.2 (blau und grün: Investitionskosten, orange und rot: Betriebskosten)

Im Vergleich mit den zuvor ausgewerteten bestehenden Anlagen und anderen Machbarkeitsstudien liegen die Kosten aus der Grobkostenschätzung relativ hoch. Die Jahreskosten in Bezug auf die in der 4. Reinigungsstufe behandelte Wassermenge sind in Abbildung 38 eingezeichnet. Bei den anderen Machbarkeitsstudien wurden die Kosten für die Spurenstoffanalytik, im Gegensatz zu dieser Studie meist nicht mit betrachtet. Die Kosten hierfür belaufen sich laut derzeitiger Grobkostenschätzung auf ca. 0,008 bis 0,009 €/m³.

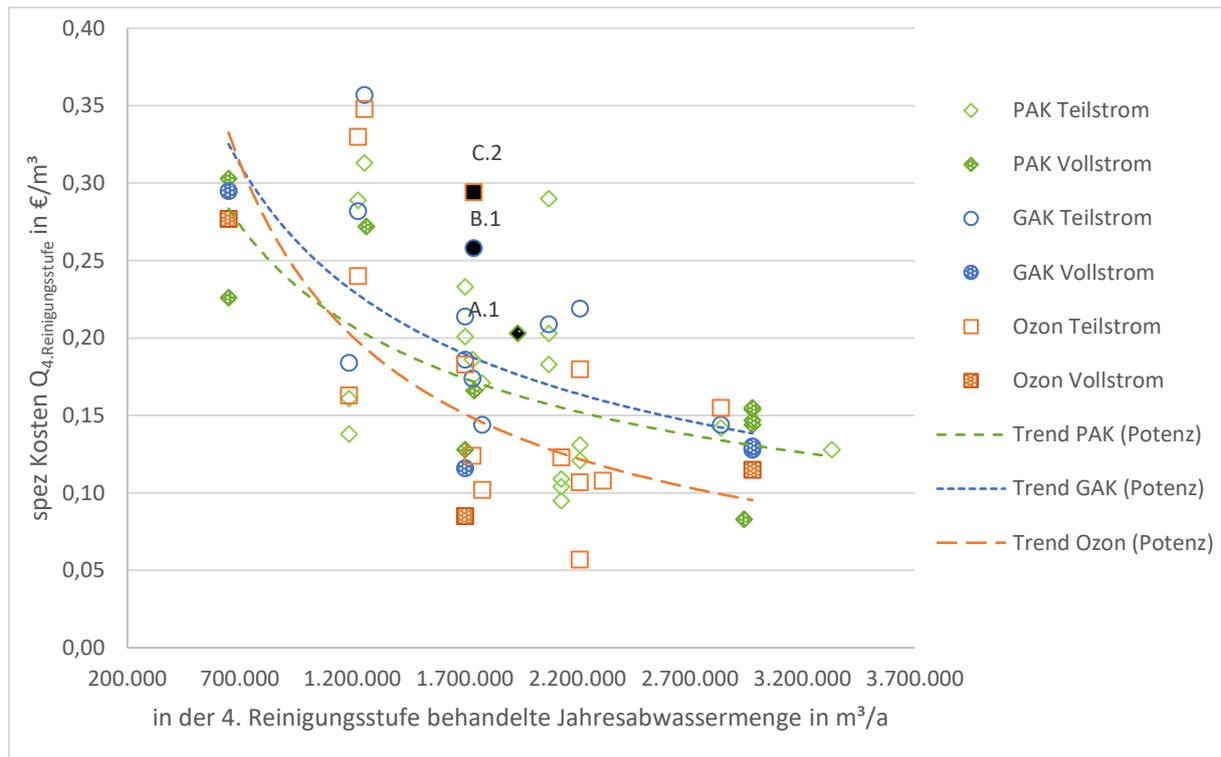


Abbildung 38 Spezifische Jahreskosten bezogen auf die in der 4. Reinigungsstufe behandelte Abwassermenge mit den Varianten A.1, B.1 und C.2

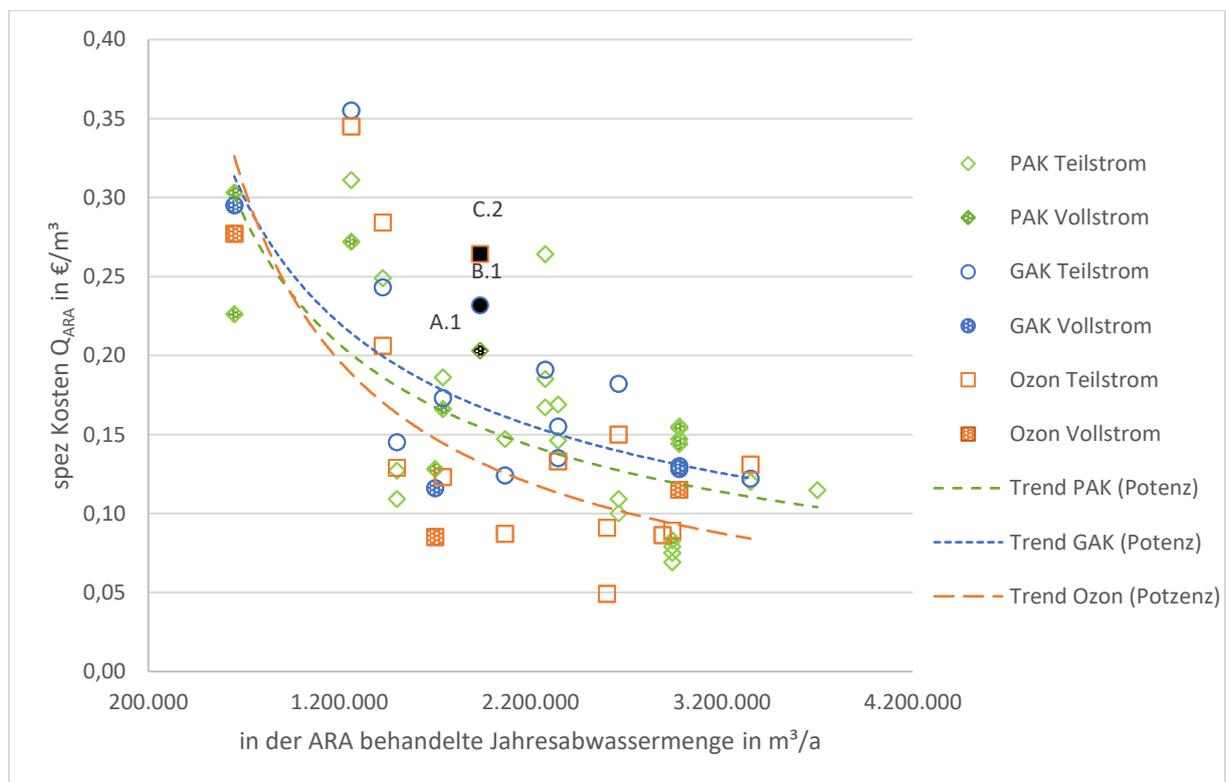


Abbildung 39 Spezifische Jahreskosten bezogen auf die Zulaufmenge der ARA mit den Varianten A.1, B.1 und C.2

Von den Varianten A.1, B.1 und C.2 sind auf der VKA Feldbach-Raabau keine von den beiden Ausschlusskriterien (siehe 7.2) betroffen. Es wurden zwei Bewertungsmatrizen der drei Varianten mit den in Kapitel 7.2 vorgestellten Bewertungskriterien erstellt. Die erste legt den Fokus mehr auf die betrieblichen Aspekte und die zweite Matrix ist mehr auf den Gewässerschutz fokussiert.

Tabelle 37 Bewertung der Varianten für die VKA Feldbach-Raabau

KATEGORIE	KRITERIUM	GEWICHTUNG BETRIEB	GEWICHTUNG GEWÄSSERSCHUTZ	A.1	B.1	C.2
Kosten	Jahreskosten	50%	40%	1 am preisgünstigsten	0,86 bezogen auf Preis von A.1	0,70 bezogen auf Preis von A.1
Referenzen	Vorhandene Betriebserfahrung	5%	5%	1 am meisten umgesetzte Anlagen	0,7	0,5
Platzbedarf	Platzbedarf und Nutzung vorhandener Verfahrens-/Bautechnik	5%	5%	1 PAK-Dosierung in BB	0,7	0,7
Flexibilität	Variable Wassermenge	3%	3%	0,7 permanente Überdosierung	0,7 Dosisanpassung GAK nicht möglich	0,7 Dosisanpassung GAK nicht möglich
	Abschalten, wenn ausreichend Verdünnung im Vorfluter	3%	3%	0,3 Vollstrom	1	0,7
	Erhöhung der Ausbaugröße	3%	3%	1 Zusätzliche Sandfilter, mehr PAK	0,7 Zusätzliche GAK- und Sandfilter	0,5 Zusätzliche GAK-Filter, Ozonungsbecken fixe Größe
	Zusätzlicher Personalbedarf	5%	5%	0,7	0,7	0,3
Mehraufwand für die ARA	Arbeitssicherheit	3%	3%	0,7 Brandschutz bei Lagerung	1	0,5 Gasaustritt
	Betriebssicherheit	3%	3%	1	1	0,7
	Betriebs- und Wartungsaufwand	5%	5%	0,7	1	0,5
Schlamm	Klärschlamm-sorgungsweg	1%	1%	0,7 Verbrennung	1	1
		3%	3%	0,5	1	1

KATEGORIE	KRITERIUM	GEWICHTUNG BETRIEB	GEWICHTUNG GEWÄSSER- SCHUTZ	A.1	B.1	C.2
	Anfallende Schlammmenge			+ Menge PAK		
	Verringerung des Schlammalters	1%	1%	0,7	1	1
				PAK in BB		
				0,3	0,5	0,5
Verfügbarkeit	Abhängigkeit vom Rohstoffmarkt, Kostenschwankungen	5%	5%	PAK nicht regenerierbar	Große GAK-Menge (regenerierbar, aber hoher Strombedarf)	Große GAK-Menge, O ₃ auch aus Luft generierbar
Eliminationsleistung	Spezielle Spurenstoffe der Raab	1%	5%	1	1	1
				Diclofenac	Diclofenac	Diclofenac
	Breitbandwirkung	1%	5%	0,5	0,7	1
				Kombination		
Reaktionsprodukte	Sonstige Reaktionsprodukte	1%	1%	1	1	0,5
				Transformationsprodukte		
Ökologische Betrachtung	AK-Herstellung, Reaktivierung, O ₃ -Erzeugung, Transport	2%	4%	0,7	0,5	1
				nicht reaktivierbar	mehr AK als bei PAK	Strom
Summe		100%	100%			

Aus der Bewertung mit Fokus auf den **Betrieb** geht hervor, dass die Variante A.1 mit 86% am besten abschneidet. Dicht gefolgt von der GAK-Variante B.1 mit 83%. Vor allem durch die höheren Jahreskosten liegt die Kombinationsvariante C.2 mit 66% dahinter (Abbildung 40).

Die Bewertung mit Schwerpunkt auf den **Gewässerschutz** favorisiert ebenfalls Variante A.1 mit 84%, gefolgt von Variante B.1 mit 82% und C.2 mit 69%. Dies zeigt, dass die Abstände zwischen den Varianten geringer sind als beim Fokus auf den Betrieb (Abbildung 41).

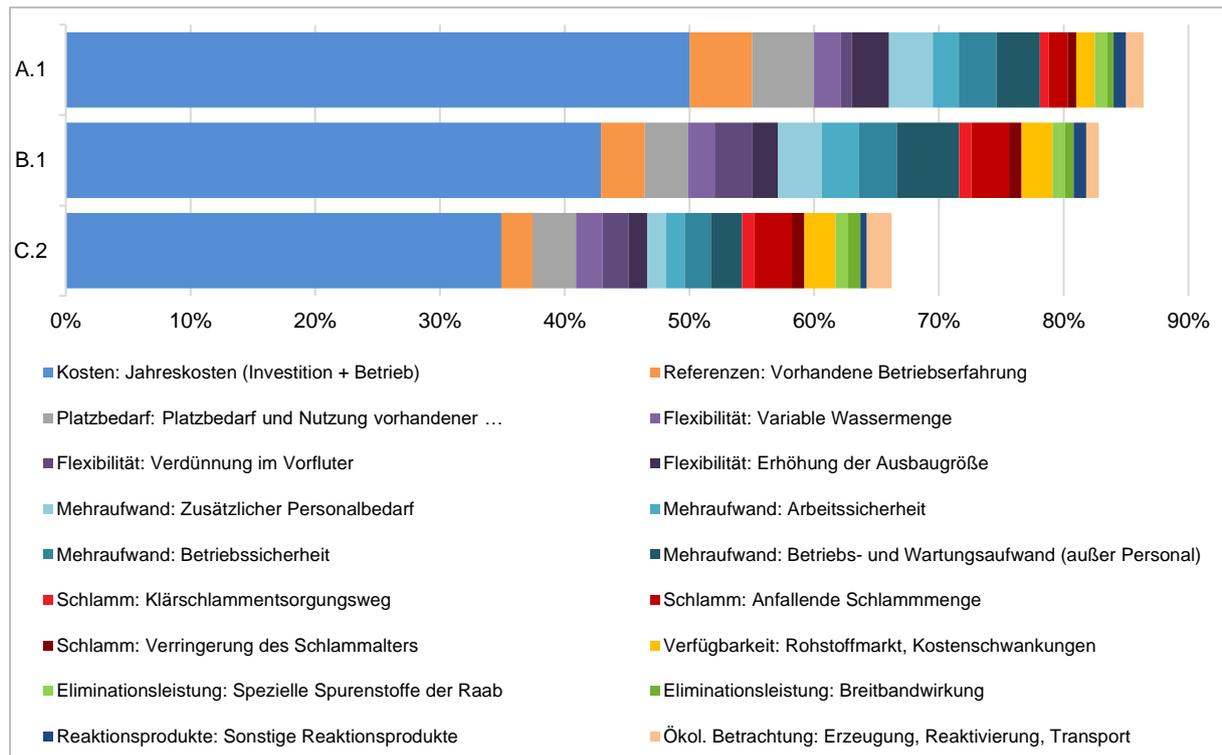


Abbildung 40 Grafische Darstellung der Variantenbewertung für die VKA Feldbach-Raabau (Version Betrieb)

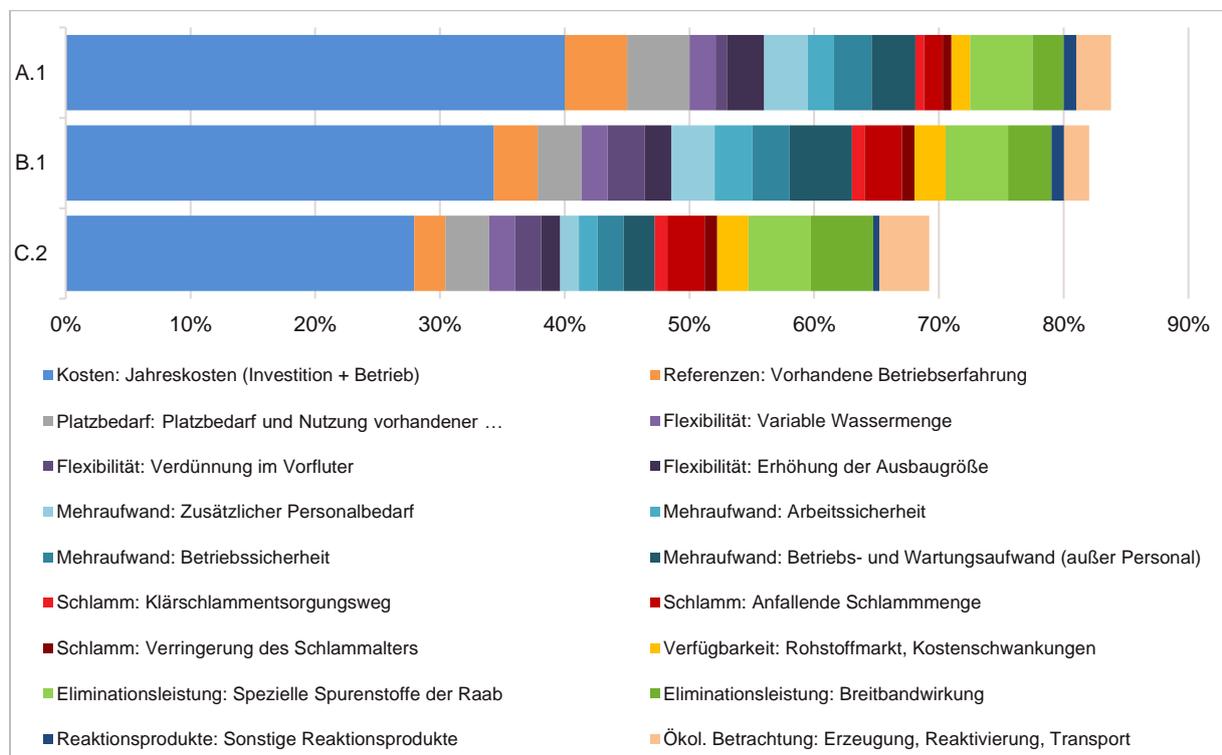


Abbildung 41 Grafische Darstellung der Variantenbewertung für die VKA Feldbach-Raabau (Version Gewässerschutz)

8.4 Vorzugsvariante

In Kapitel 8.3 wurden die drei Varianten mit den aus Kapitel 7.2 bekannten Kriterien gegenübergestellt, um eine Vorzugsvariante zu ermitteln.

Als Vorzugsvariante ging im Rahmen dieser Studie die Variante A.1, welche die PAK-Dosierung in die Belebung mit nachgeschalteter Sandfiltration darstellt, hervor. Sie ist mit etwa 397.000 €/a (bzw. 0,21 €/m³ behandeltem Abwasser) nach derzeitigen Schätzungen die günstigste Variante und wurde durch die Bewertungsmatrix an erster Stelle bestätigt. Allerdings liegt die Variante A.1 nur leicht vorne und durch eine Vielzahl von Einflussfaktoren kann sich eine andere Reihung ergeben. Einige dieser Einflussfaktoren sind:

- veränderte Preise der Investitionskosten (z.B. Stahl, Beton etc.)
- veränderte Preise für die Verbrauchsmaterialien (v.a. Aktivkohle)
- Schwankungen im Strompreis (Einfluss vor allem auf Ozonung und GAK-Regeneration)
- tatsächlich erforderliche PAK-Dosiermenge
- tatsächlich möglicher Durchsatz in GAK-Filtern (BVT)
- tatsächlich erforderliche Ozondosierung
- zukünftige Klärschlammensorgung (Verpflichtung zur Verbrennung)
- neue wirtschaftliche Technologien (z.B. Ultrafiltration)
- gesetzliche Anforderungen zur Spurenstoffentfernung (Vollstrom/Teilstrom, Leitparameter etc., Möglichkeit des Abschaltens bei genügend Verdünnung im Vorfluter)

In den beiden folgenden Zeichnungen ist ein Vorschlag für eine ungefähre Anordnung der 4. Reinigungsstufe von Variante A.1 bei der VAK Feldbach-Raabau dargestellt. Das PAK-Silo inkl. Dosiereinheit könnte neben dem Verteilerschacht der Belebungsbecken aufgestellt werden, die Dosierung erfolgt dann in den Verteilerschacht (Abbildung 42). Die Sandfilter könnten im Süd-östlichen Ende des Grundstücks der VKA Feldbach-Raabau untergebracht werden, falls dies die örtlichen Gegebenheiten zulassen (Abbildung 43).

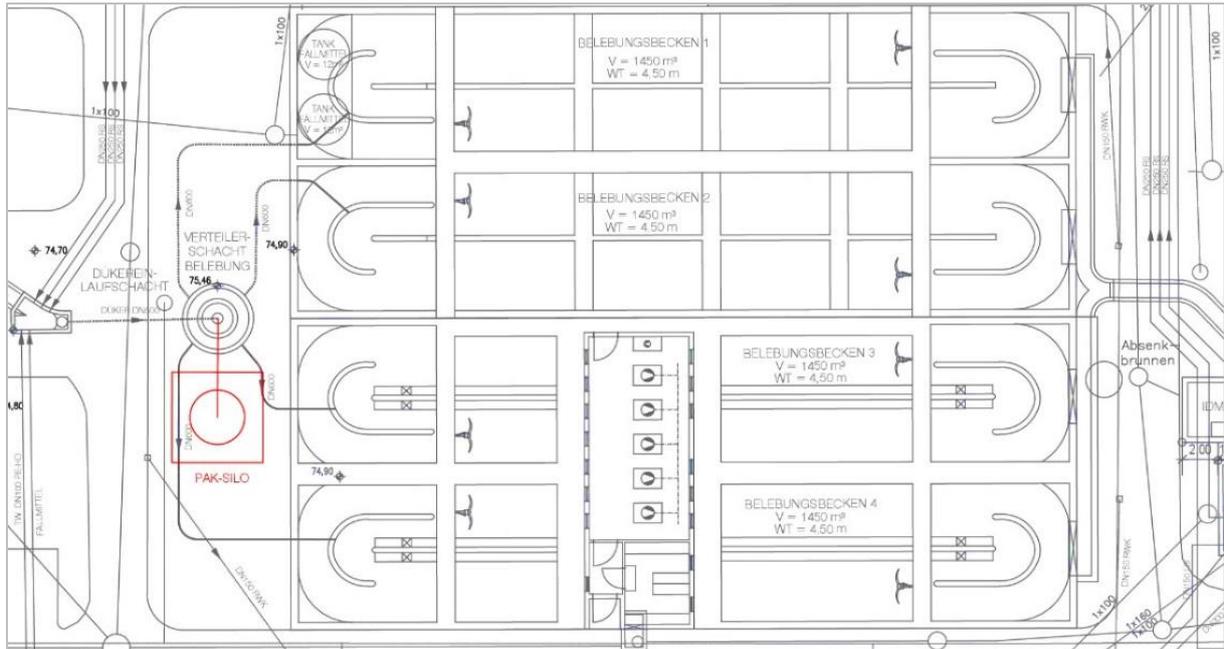


Abbildung 42 Mögliche ungefähre Lage des PAK-Silos (bearbeiteter Ausschnitt aus TDC Ziviltechniker GmbH (2018))

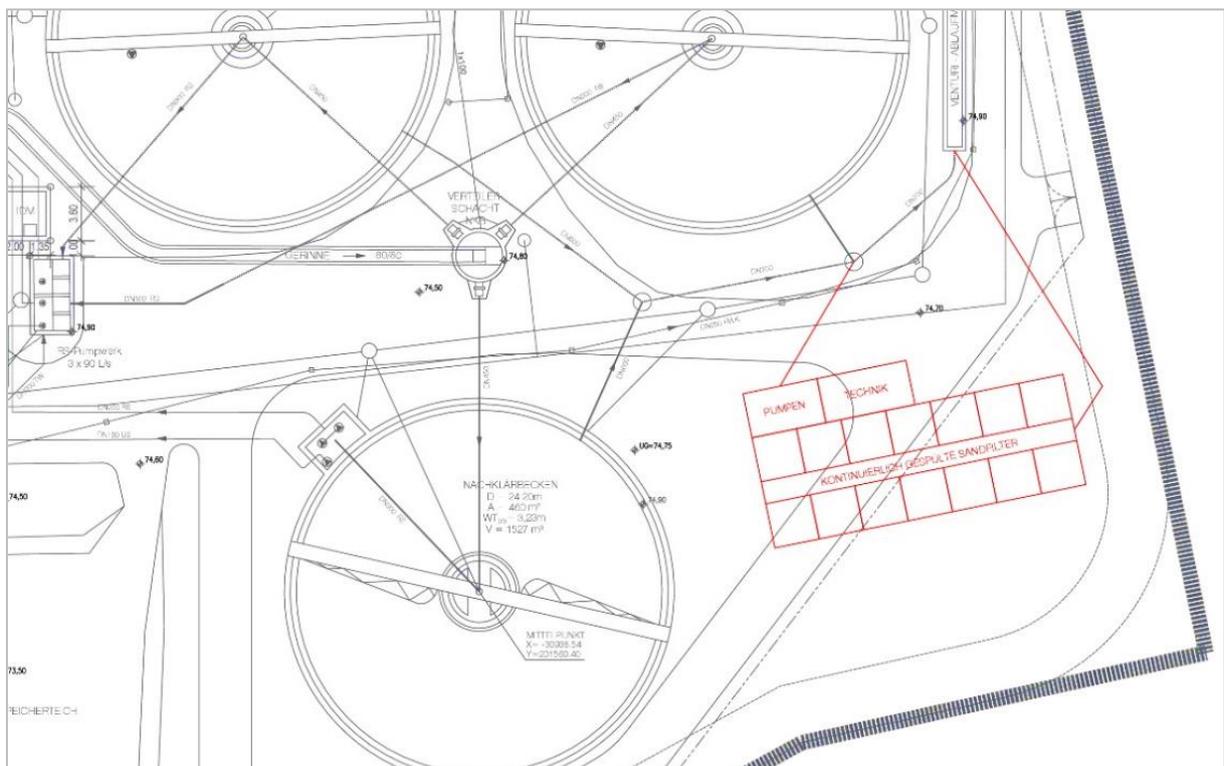


Abbildung 43 Mögliche ungefähre Lage der Sandfilter (bearbeiteter Ausschnitt aus TDC Ziviltechniker GmbH (2018))

9 VKA Fladnitz im Raabtal

Für die VKA Fladnitz im Raabtal werden keine der in Kapitel 7.1 beschriebenen Varianten für eine genauere Kostenschätzung herangezogen, da es eher unwahrscheinlich ist, dass die VKA Fladnitz im Raabtal in Zukunft mit einer 4. Reinigungsstufe ausgestattet wird. Falls an den Kläranlagen an der Raab Spurenstoffentfernungen betrieben werden sollen, ist es wahrscheinlicher, dass die VKA Fladnitz im Raabtal aufgelassen wird und das Abwasser mit in der VKA Feldbach-Raabau behandelt wird.

9.1 Technisch und wirtschaftlich relevante Anlagenkonzepte

Wie bereits in Kapitel 4.3 beschrieben, wird der Überschussschlamm aus der VKA Fladnitz im Raabtal über das Kanalnetz in den Zulauf der VKA Feldbach-Raabau geleitet. Daher wird vor allem durch mögliche Rücklösungen im Kanalnetz die Variante, bei der die Aktivkohle in den Überschussschlamm gelangt, derzeit hier nicht empfohlen (vgl. Ausschlusskriterium „Schlamm“). Im Allgemeinen sind sonst alle anderen der in Kapitel 7.1 möglich. Es werden hier zur Kostenabschätzung keine Berechnungen direkt für die VKA Fladnitz im Raabtal durchgeführt, sondern lediglich die bestehenden Daten ausgewertet.

9.2 Kostenermittlung: Literatur und Daten aus Deutschland

WASSERMENGE ZUR AUSLEGUNG DER 4. REINIGUNGSSTUFE

Da es bisher in Österreich keine Grenzwerte zu Spurenstoffen gibt, fehlen Anhaltspunkte, ob eine Voll- oder Teilstrombehandlung benötigt wird. Im Regenwetterfall sinkt die Konzentration der Spurenstoffe im Abwasser und damit auch die Effizienz der Entfernung durch eine 4. Reinigungsstufe. Die Fracht der Spurenstoffe bleibt allerdings gleich. Zudem bewirkt das Regenwasser auch eine höhere Verdünnung der Konzentrationen der anthropogenen Spurenstoffe im Vorfluter. Demnach wird empfohlen, die 4. Reinigungsstufe lediglich auf den im Bescheid festgelegten Trockenwetterwert auszulegen. Dieser liegt laut Bescheid von 2004 bei der VKA Fladnitz im Raabtal bei 1.650 m³/d (vgl. Abbildung 31). Bei der Auslegung auf den Durchfluss in l/s sind auch unterschiedliche Möglichkeiten denkbar:

- Gleichmäßige Beschickung mit Pufferteich: 19 l/s bzw. 69 m³/h
- Beschickung nach Anfall ohne Pufferteich: 55 l/s bzw. 198 m³/h (TW lt. Bescheid)

Dies ist für die Variante der PAK-Dosierung in die Belebungsbecken nicht möglich. Dort muss der Vollstrom von 3.300 m³/d (bzw. 88 l/s, 317 m³/h) behandelt werden.

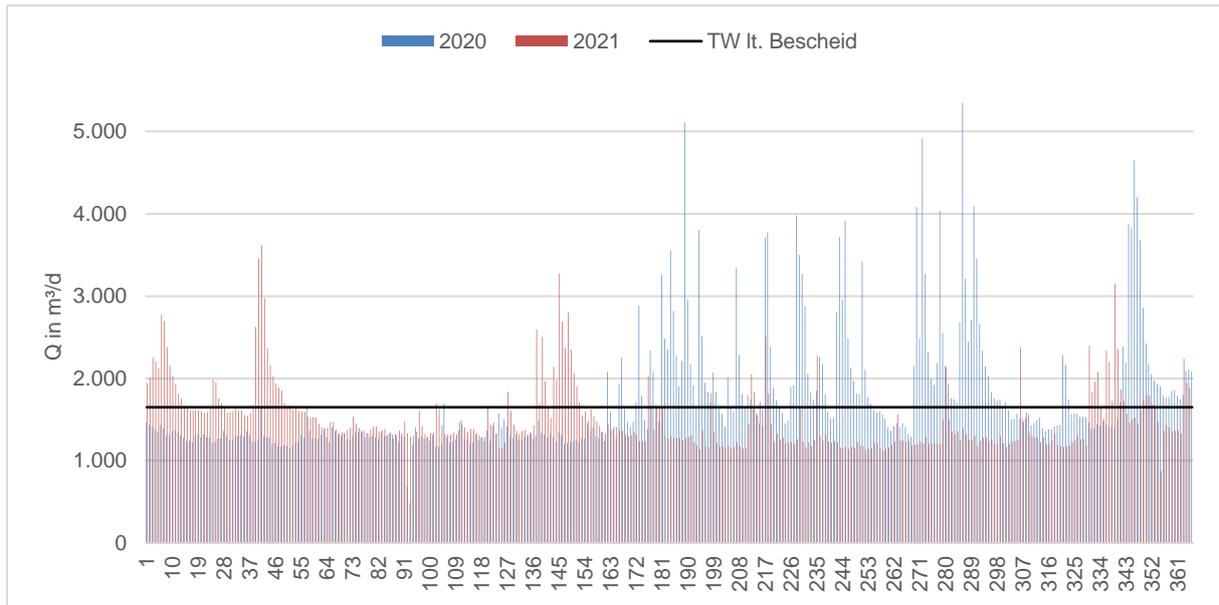


Abbildung 44 Abwassermenge der VKA Fladnitz im Raabtal in den Jahren 2020 und 2021

GRUNDSTÜCK

Auf dem Gelände der VKA Fladnitz im Raabtal steht eine Fläche von ca. 800 m² zur Verfügung. Ansonsten liegt noch ein freies Grundstück mit ca. 5600 m² süd-westlich der Kläranlage (Grundstück Nr. 358/1) (Land Steiermark // GIS-Steiermark, 2022). Der eventuelle Kauf eines neuen Grundstücks wird in dieser Studie nicht mitberücksichtigt.

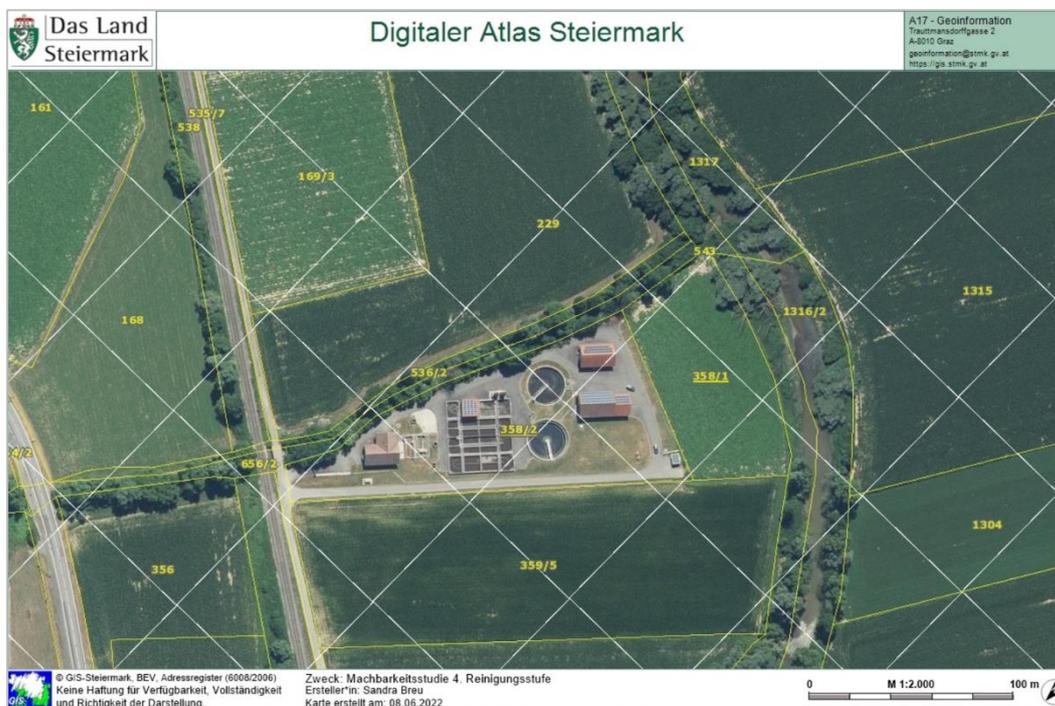


Abbildung 45 Grundstücke um die VKA Fladnitz im Raabtal (Land Steiermark // GIS-Steiermark, 2022)

BESTEHENDE ANLAGENTEILE ZUR WEITERVERWENDUNG IN DER 4. REINIGUNGSSTUFE

Auf dem Betriebsgelände der VKA Fladnitz im Raabtal sind alte Schlammbehälter vorhanden. Ob diese im Rahmen einer 4. Reinigungsstufe genutzt werden könnten, ist ungewiss. Die Option müsste bei der konkreten Auswahl eines Verfahrens geprüft werden.

9.2.1 Investitionskosten

LITERATUR

In der Literatur konnten keine allgemeinen Angaben zu Investitionskosten für eine Spurenstoffentfernung gefunden werden.

BESTEHENDE ANLAGEN UND ANDERE MACHBARKEITSSTUDIEN

In Tabelle 38 sind zunächst die minimalen, maximalen und mittleren Investitionskosten aus den bereits bestehenden Anlagen und den Machbarkeitsstudien dargestellt. Die gesammelten Daten zu Investitions- und Betriebskosten sind in Anhang C zu finden.

Anders als in Tabelle 16 fällt in Tabelle 38 eine Kategorie weg, bei den vorliegenden bestehenden Anlagen und Machbarkeitsstudien Bereich um 12.000 EW keine mit einer Kombination betrachtet wurde.

Tabelle 38 Investitionskosten für eine 4. Reinigungsstufe im Bereich um 12.000 EW (Baukostenindex basierend auf 2021)

	AN-ZAHL*	INVESTITIONSKOSTEN BASIS 2021	BAUTECHNIK	MASCHINEN-TECHNIK	ESMR-TECHNIK	SONSTIGE BAUKOSTEN
PAK in BB	8	Minimum	323.370 €	785.640 €	197.580 €	151.590 €
		Maximum	743.730 €	1.996.470 €	839.310 €	272.850 €
		Arithm. Mittel	527.393 €	1.352.040 €	562.886 €	206.786 €
PAK in KB	20	Minimum	348.150 €	737.010 €	348.570 €	159.840 €
		Maximum	1.880.970 €	4.529.640 €	1.175.280 €	789.840 €
		Arithm. Mittel	1.032.335 €	1.940.129 €	774.34 € ²	354.767 €
GAK	11	Minimum	538.950 €	329.310 €	155.340 €	155.340 €
		Maximum	1.852.710 €	3.949.890 €	1.175.280 €	718.860 €
		Arithm. Mittel	929.656 €	1.428.483 €	652.825 €	293.148 €
Ozonung	9	Minimum	510.810 €	748.410 €	300.090 €	188.790 €
		Maximum	1.554.900 €	2.172.060 €	1.289.010 €	385.080 €
		Arithm. Mittel	886.423 €	1.724.387 €	705.603 €	295.744 €

Es lässt sich vor allem in der grafischen Darstellung in Abbildung 46 gut erkennen, dass die Variante der PAK-Dosierung in die Belegung deutlich niedrigere Baukosten mit sich bringt. Die höchsten Baukosten sind vermutlich bei der PAK-Dosierung in ein Kontaktbecken anzusetzen. Auch bei den Kosten für die Maschinenteknik liegt die Variante der PAK-Zugabe in die

Belebungsbecken am höchsten, gefolgt von der Ozonung. Bei der ESMR-Technik und den Nebenkosten liegen alle Varianten etwa gleich auf.

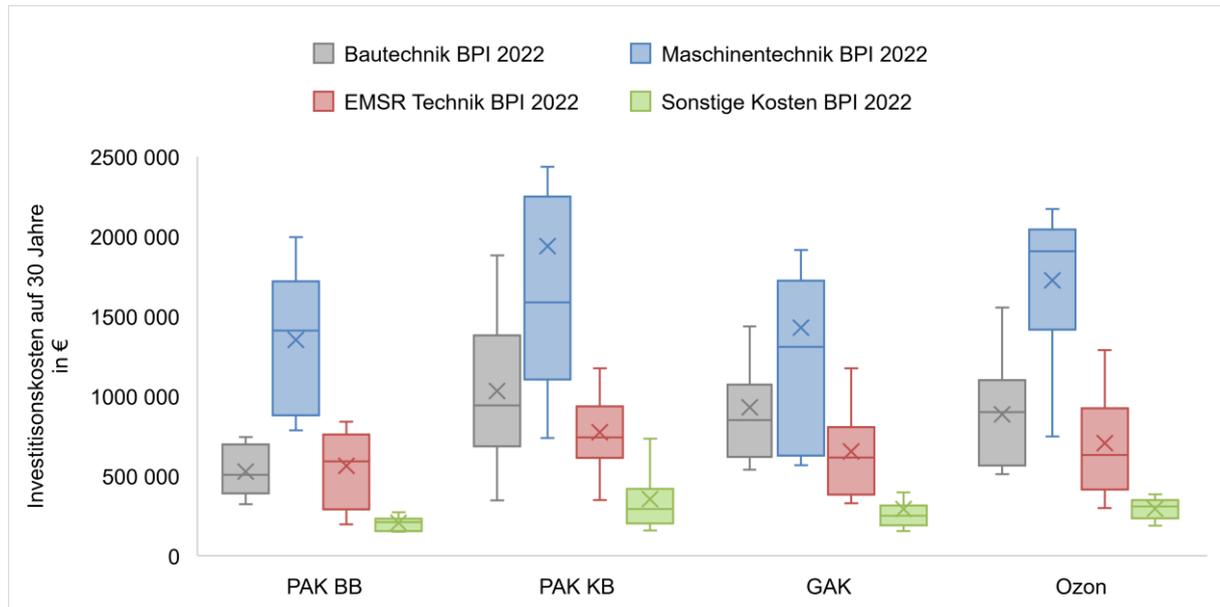


Abbildung 46 Grafische Darstellung der Investitionskosten um 12.000 EW (Datengrundlage: Machbarkeitsstudien)

In Anhang C sind die Investitions- und Betriebskosten der einzelnen Anlagen zu finden.

9.2.2 Betriebskosten

LITERATUR

Analog zu Kapitel 8.1.2 können auch nach dem DWA Themenband T3/2015 hier die Instandhaltung/Wartungskosten prozentual von den Investitionskosten abgeschätzt werden, z. B.:

- Bau 0,5 %/a
- Maschinentechnik 2,0 %/a
- Elektrotechnik 2,5 %/a

Kreuzinger et al. (2011) schätzen die Betriebskosten einer 4. Reinigungsstufe auf 10 bis 20 % der Gesamtbetriebskosten.

BESTEHENDE ANLAGEN UND ANDERE MACHBARKEITSSTUDIEN

Die Auswertung der Betriebskosten in Abbildung 47 lässt darauf schließen, dass es keine starken Unterschiede in den Betriebskosten für die Varianten gibt. Die PAK-Dosierung in ein Kontaktbecken liegt bei der Auswertung etwas niedriger als die anderen Varianten.

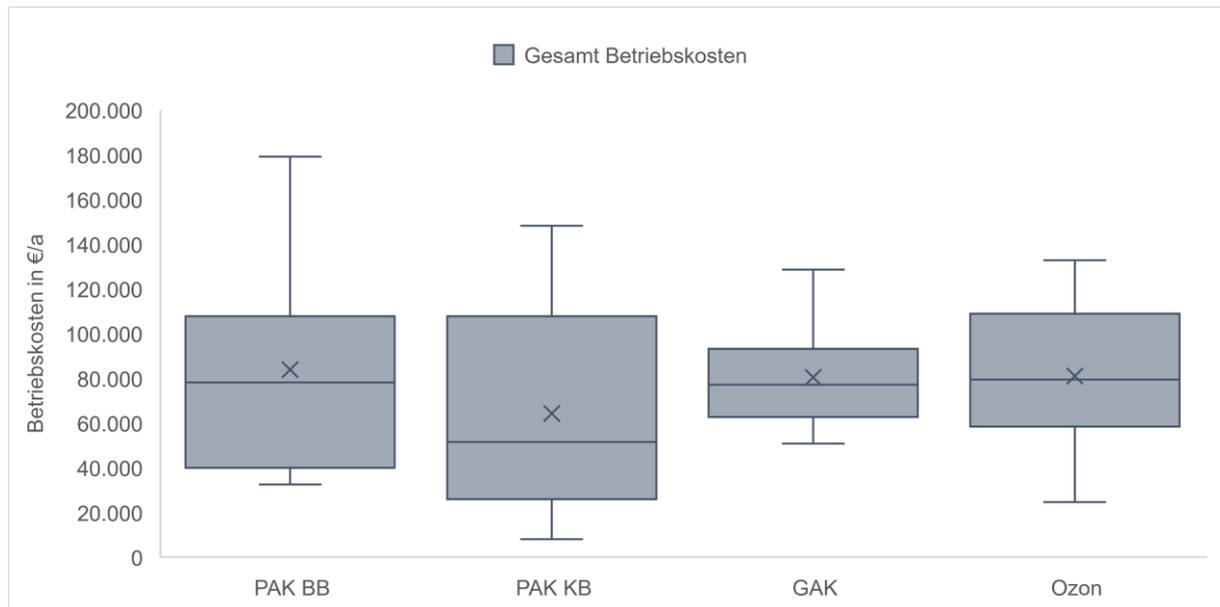


Abbildung 47 Grafische Darstellung der Betriebskosten um 12.000 EW (Datengrundlage: Machbarkeitsstudien)

Die genauen Angaben zu Investitions- und Betriebskosten sind in Anhang C zu finden.

9.2.3 Jahreskosten

LITERATUR

Das KOM-M.NRW (2015) gibt in seinem Bericht zum Erfahrungsaustausch mit Ingenieurbüros eine Grafik zu spezifischen Jahreskosten (JK) von PAK, GAK und Ozonung an (Abbildung 26). Darin sind auch Kostenfunktionen für PAK und Ozonung angegeben. Die Kosten für die Analytik wurden in den Funktionen nicht mitberücksichtigt.

Wie auch für die VKA Feldbach-Raabau werden die Jahreskosten für eine 4. Reinigungsstufe auch nach den vom KOM-M.NRW (2015, S. 27) veröffentlichten Kostenfunktionen (Stand 2015) abgeschätzt. Die Kosten für Analytik wurden in den Funktionen nicht mitberücksichtigt.

Bei den in Abbildung 50 dargestellten Jahreskosten sind Unterscheidungen für Anlagen mit und ohne den Neubau eines Sandfilters zu finden. Laut DWA T3/2015 ist für Kläranlagen bis 50.000 EW mit spezifischen Jahreskosten von bis zu 0,40 €/m³ zu rechnen.

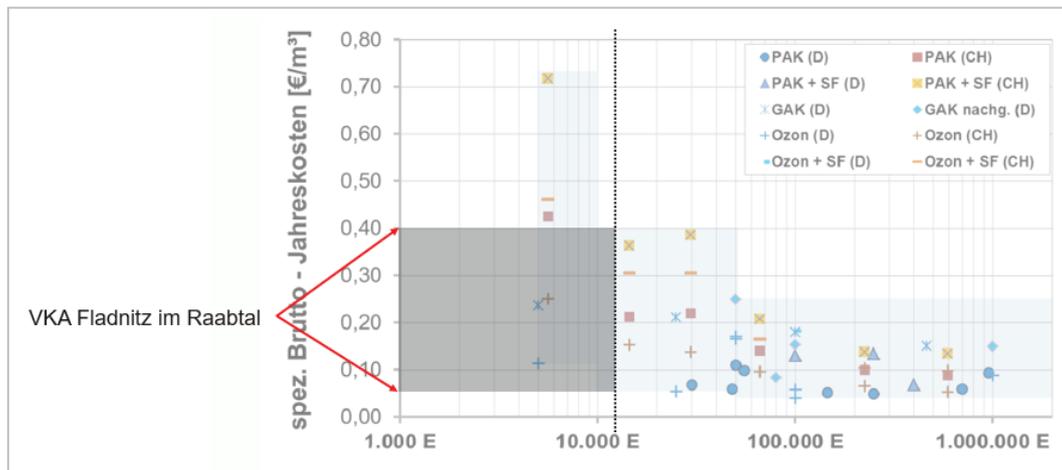


Abbildung 50 Kostenzusammenstellung DWA T3/2015 (DWA (2015, S. 37) bearbeitet)

BESTEHENDE ANLAGEN UND ANDERE MACHBARKEITSSTUDIEN

In den beiden folgenden Abbildungen werden die spezifischen Jahreskosten der in den Kapiteln 5.2 und 6.2 angeführten Anlagen gegenübergestellt. Es wird durch die Abkürzungen T und V angedeutet, ob es sich dabei um eine Teil- oder Vollstrombehandlung handelt.

Die Investitionskosten wurden analog zu Kapitel 8.1 einheitlich auf 2021 bezogen (berechnet mit dem österreichischen Baupreisindex). Als inflationsbereinigter Realzinssatz wurde $i = 3\%$ angenommen. Es wurde einheitlich folgende Nutzungsdauer angesetzt:

- Bautechnik: 30 Jahre
- Maschinentchnik: 15 Jahre
- EMSR-Technik: 10 Jahre
- Nebenkosten: 30 Jahre

Es konnten aus den Daten aus Deutschland 55 Machbarkeitsstudien aus Deutschland (NRW) herangezogen werden, die Jahreskosten dieser sind in Abbildung 51 und Abbildung 52 grafisch dargestellt. Im ersten Diagramm sind die Jahreskosten bezogen auf die gesamte Zulaufmenge der jeweiligen Kläranlage dargestellt. Das zweite Diagramm beinhaltet die Jahreskosten mit Bezug auf die in der 4. Reinigungsstufe behandelten Wassermenge. Den Unterschied ergeben Teilstrombehandlungen, welche in den meisten Fällen angestrebt werden. Lediglich bei der PAK-Dosierung in die Belebung ist es nicht möglich, nur den Trockenwetterteilstrom zu behandeln. In den beiden Diagrammen ist zusätzlich durch ausgefüllte bzw. leere Symbole dargestellt, ob es sich dabei um eine Voll- oder Teilstrombehandlung handelt.

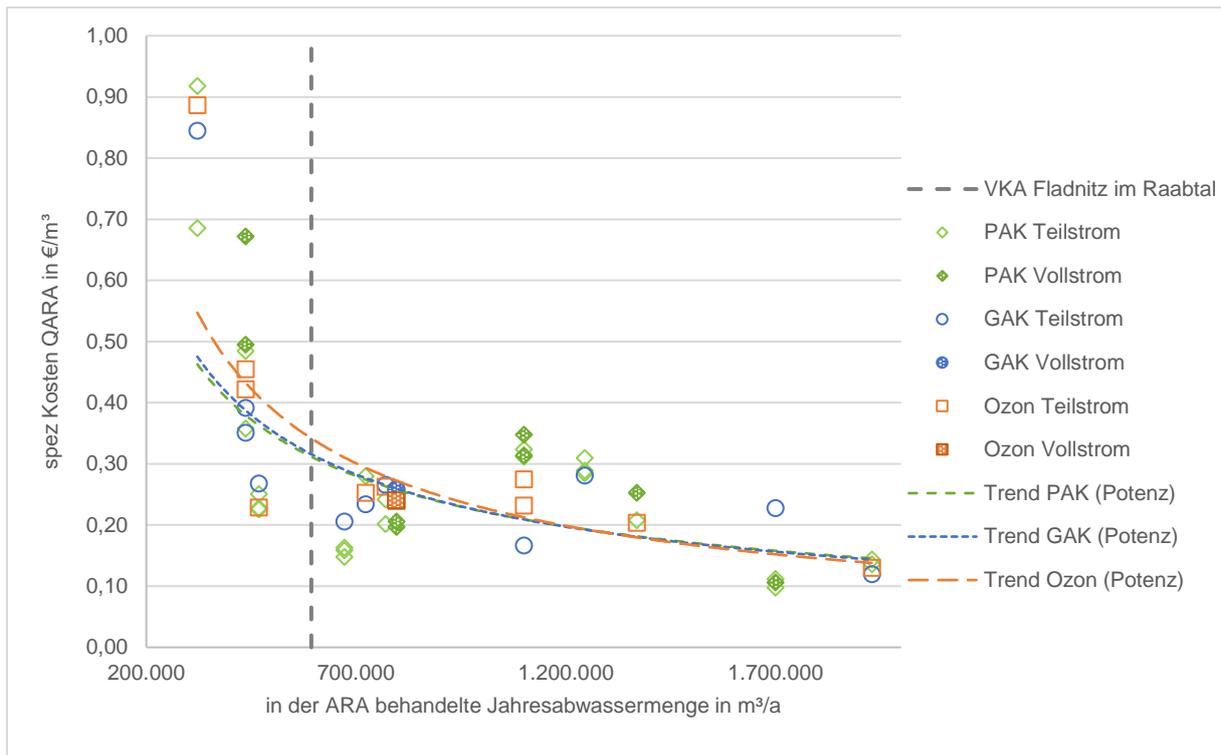


Abbildung 51 Vergleich der spezifischen Jahreskosten für eine 4. Reinigungsstufe in Bezug auf die Wassermenge im Zulauf der ARA (im Bereich um 12.000 EW) Baukostenindex basierend auf 2021

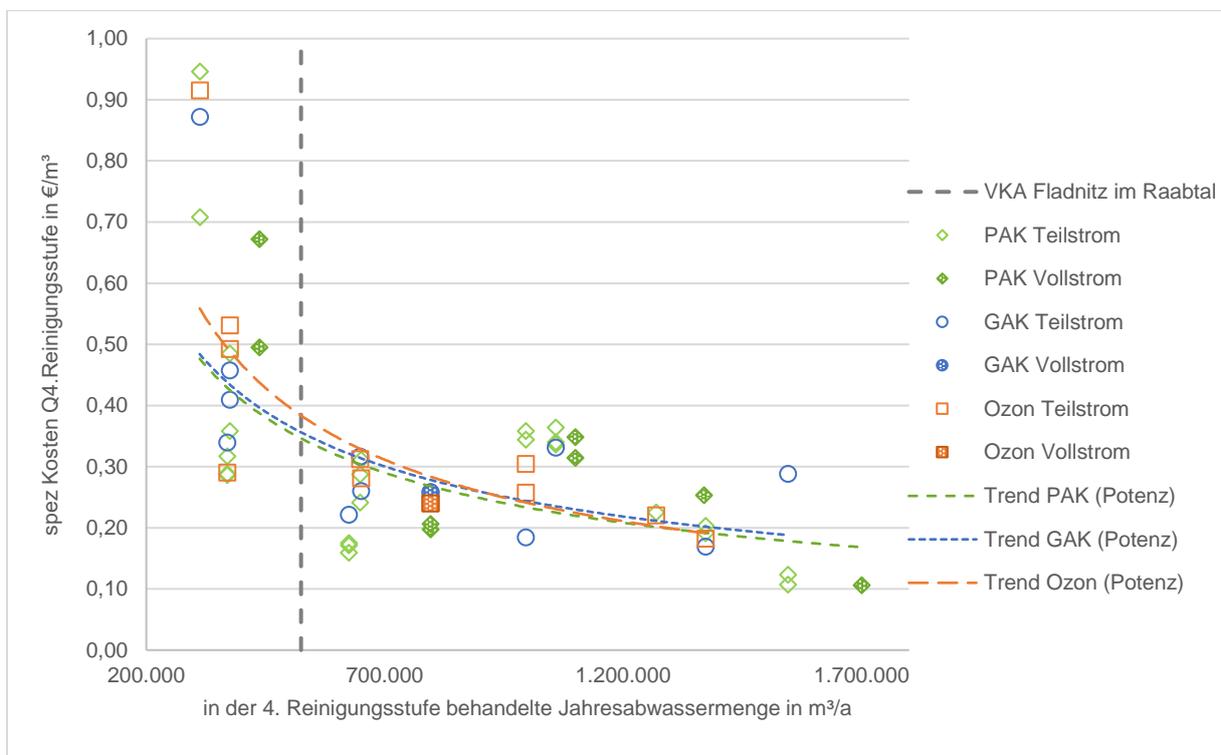


Abbildung 52 Vergleich der spezifischen Jahreskosten für eine 4. Reinigungsstufe in Bezug auf die in der 4. Reinigungsstufe behandelte Wassermenge (im Bereich um 12.000 EW) Baukostenindex basierend auf 2021

Bei Abbildung 51 und Abbildung 52 ist auffällig, dass bei der Jahresabwassermenge von 321.788 m³/a (bzw. 310.962 m³/a) sehr hohe spezifische Preise ermittelt wurden. Diese stammen aus der Machbarkeitsstudie zur ARA Hopsten, die Datengrundlage ist von 2013 und die Studie wurde 2015 erstellt. Auch den Autoren der Studie sind die Kosten ungewöhnlich hoch vorgekommen, die Begründung liegt in der allgemein geringen jährlichen Abwassermenge, die Wahl einer verhältnismäßig teuren Flockungsfiltration und keine vorhandenen Bauteile der ARA, die im Zuge der 4. Reinigungsstufe weiterverwendet werden können.

Nachfolgend werden in drei Tabellen die Verfahren PAK, GAK und Ozon einzeln betrachtet. Bei der PAK-Dosierung sind folgende Informationen angegeben:

- Erfolgt die Dosierung in die Belebungsbecken oder in ein eigenes Kontaktbecken
- Ist, wie beim Ulmer-Verfahren ein Sedimentationsbecken vorgesehen
- Die Art des Nachreinigungsverfahrens
- Betrieb im Voll- oder Teilstrom

Tabelle 39 PAK Anlagen im Bereich um 12.000 EW spezifische Kosten

ARA	BB/ KB ^A	SB ^B	NACH- REINIGUNG ^C	VOLL- /TEIL- STROM ^D	ZULAUF ARA IN M ³ /A	SPEZ. KOS- TEN Q _{ARA} BPI 2021 IN €/M ³	ZULAUF 4. REINIGUNGS- STUFE IN M ³ /A	SPEZ. KOSTEN Q _{4, REINIGUNGSSTUFE} BPI 2021 IN €/M ³
Heiden	BB		TF	T	672.073	0,163	624.515	0,175
Hopsten	BB		TF	T	321.788	0,686	312.000	0,708
Netphen	BB		FB Sand	T	1.930.000	0,136	1.373.000	0,191
Saerbeck	BB		TF	T	468.205	0,228	369.882	0,288
Horstmar	BB		TF	V	796.289	0,206	796.289	0,206
Langenberg	BB		KGS	V	437.000	0,577	437.000	0,672
Langenberg	BB		TF	V	437.000	0,425	437.000	0,495
Lippetal	BB		FXB	V	1.100.000	0,348	1.100.000	0,348
Lippetal	BB		TF	V	1.100.000	0,314	1.100.000	0,314
Osterwick	BB		KGS	V	1.700.325	0,106	1.700.325	0,106
Altenberge	KB	SB	KGS	T	770.000	0,242	648.000	0,287
Altenberge	KB		KGS	T	770.000	0,202	648.000	0,241
Barntrup	KB	SB	FXB	T	1.245.000	0,310	1.058.250	0,364
Barntrup	KB	SB	FXB	T	1.245.000	0,289	1.058.250	0,340
Barntrup	KB		FXB	T	1.245.000	0,285	1.058.250	0,336
Heiden	KB	SB	KGS	T	672.073	0,159	624.515	0,171
Heiden	KB		KGS	T	672.073	0,148	624.515	0,159

ARA	BB/ KB ^A	SB ^B	NACH- REINIGUNG ^C	VOLL- /TEIL- STROM ^D	ZULAUF ARA IN M ³ /A	SPEZ. KOS- TEN Q _{ARA} BPI 2021 IN €/M ³	ZULAUF 4. REINIGUNGS- STUFE IN M ³ /A	SPEZ. KOSTEN Q ₄ _REINIGUNGS- STUFE BPI 2021 IN €/M ³
Hopsten	KB	SB	TF	T	321.788	0,918	312.000	0,946
Langenberg	KB	SB	KGS	T	437.000	0,485	375.000	0,485
Langenberg	KB	SB	TF	T	437.000	0,358	375.000	0,358
Lippetal	KB		FXB	T	1.100.000	0,324	995.500	0,358
Lippetal	KB		TF	T	1.100.000	0,312	995.500	0,344
Netphen	KB	SB	FB Sand	T	1.930.000	0,144	1.373.000	0,203
Nordwalde	KB	SB	TF	T	722.897	0,280	650.607	0,311
Osterwick	KB	SB	KGS	T	1.700.325	0,112	1.546.031	0,123
Osterwick	KB		KGS	T	1.700.325	0,098	1.546.031	0,107
Saerbeck	KB	SB	KGS	T	468.205	0,251	369.882	0,317
Saerbeck	KB		KGS	T	468.205	0,226	369.882	0,286
Südlohn	KB	SB	TF	T	1.369.660	0,208	1.269.240	0,208
Horstmar	KB	SB	TF	V	796.289	0,251	796.289	0,251
Horstmar	KB		TF	V	796.289	0,197	796.289	0,197
Südlohn	KB	SB	TF	V	1.369.660	0,253	1.369.660	0,253

^A Dosierung in BB: Belebungsbecken, KB: Kontaktbecken

^B SB: Sedimentationsbecken vorhanden

^C KGS: kontinuierlich gespülter Sandfilter, TF: Tuchfilter, FB: Festbett-Filter, FXB: Flexbed-Filter, n.s.: nicht spezifiziert

^D T: Teilstrom, V: Vollstrom

Bei der GAK-Filtration werden folgende Informationen mit angeführt:

- Die Art des GAK-Filters
- Die Art des Vorfilters
- Informationen zur Voll-/Teilstrombehandlung

Tabelle 40 GAK Anlagen im Bereich um 12.000 EW spezifische Kosten

ARA	GAK FILTER ^A	VORFILTER ^B	VOLL- /TEIL- STROM ^C	ZULAUF ARA IN M ³ /A	SPEZ. KOS- TEN Q _{ARA} BPI 2021 IN €/M ³	ZULAUF 4. REINIGUNGS- STUFE IN M ³ /A	SPEZ. KOSTEN Q ₄ _REINIGUNGS- STUFE BPI 2021 IN €/M ³
Altenberge	FB		T	770 000	0,266	648 000	0,316
Barntrup	FB	FXB	T	1 245 000	0,281	1 058 250	0,331
Hopsten	FB	n.s.	T	321 788	0,845	312 000	0,872
Langenberg	FB	KGS	T	437 000	0,392	375 000	0,457

ARA	GAK FILTER ^A	VORFILTER ^B	VOLL- /TEIL- STROM ^C	ZULAUF ARA IN M ³ /A	SPEZ. KOSTEN Q _{ARA} BPI 2021 IN €/M ³	ZULAUF 4. REINIGUNGSSTUFE IN M ³ /A	SPEZ. KOSTEN Q ₄ _REINIGUNGSSTUFE BPI 2021 IN €/M ³
Netphen	FB	FB Sand	T	1 930 000	0,120	1 373 000	0,169
Nordwalde	FB		T	722 897	0,234	650 607	0,260
Heiden	KG	KGS	T	672 073	0,206	624 515	0,221
Langenberg	KG	KGS	T	437 000	0,351	375 000	0,409
Lippetal	KG		T	1 100 000	0,167	995 500	0,184
Osterwick	KG	KGS	T	1 700 325	0,228	1 546 031	0,288
Saerbeck	KG	KGS	T	468 205	0,268	369 882	0,339
Horstmar	n.s.	KGS	V	796 289	0,258	796 289	0,258

^A FB: Festbett-Filter, FB Druck: Festbett-Druckfilter, KG: kontinuierlich gespült, aufwärts durchströmt, n.s.: nicht spezifiziert

^B KGS: kontinuierlich gespülter Sandfilter, FB: Festbett-Filter, FXB: Flexbed-Filter, n.s.: nicht spezifiziert

^C T: Teilstrom, V: Vollstrom

Angaben zu den aufgeführten Ozon-Systemen:

- Diffusor oder Injektor als Eintragungssystem des Ozons in das Abwasser
- Wahl eines Vorfilters
- Nachbehandlungsmethode nach der Ozonungsstufe
- Voll- bzw. Teilstrombehandlung

Tabelle 41 Ozon Anlagen im Bereich um 12.000 EW spezifische Kosten

ARA	OZON EIN-TRAG ^A	VORFILT-ER ^B	NACH-REINI-GUNG ^C	VOLL- /TEIL- STROM ^D	ZULAUF ARA IN M ³ /A	SPEZ. KOSTEN Q _{ARA} BPI 2021 IN €/M ³	ZULAUF 4. REINIGUNGSSTUFE IN M ³ /A	SPEZ. KOSTEN Q ₄ _REINIGUNGSSTUFE BPI 2021 IN €/M ³
Altenberge	Diff		n.s. Sand	T	770 000	0,263	648 000	0,312
Hopsten	Diff		TF	T	321 788	0,887	312 000	0,915
Langenberg	Diff	TF	ST	T	437 000	0,455	375 000	0,531
Langenberg	Diff	TF	KGS	T	437 000	0,422	375 000	0,492
Lippetal	Diff		KGS	T	1 100 000	0,275	995 500	0,304
Lippetal	Diff		ST	T	1 100 000	0,232	995 500	0,257
Nordwalde	Diff		KGS	T	722 897	0,253	650 607	0,281
Südlohn	Diff		KGS	T	1 369 660	0,204	1 269 240	0,220
Netphen	Inj		FB Sand	T	1 930 000	0,130	1 373 000	0,182

ARA	OZON EIN- TRAG ^A	VORFILT- ER ^B	NACH- REINI- GUNG ^C	VOLL- /TEIL- STROM ^D	ZULAUF ARA IN M ³ /A	SPEZ. KOS- TEN Q _{ARA} BPI 2021 IN €/M ³	ZULAUF 4. REINIGUNGS- STUFE IN M ³ /A	SPEZ. KOSTEN Q _{4. REINIGUNGSSTUFE} BPI 2021 IN €/M ³
Saerbeck	Inj		KGS	T	468 205	0,229	369 882	0,290
Horstmar	Inj		KGS	V	796 289	0,240	796 289	0,240

^A Ozon Eintrag über Diff: Diffusoren oder Inj: Injektoren

^B TF: Tuchfilter

^C KGS: kontinuierlich gespülter Sandfilter, TF: Tuchfilter, FB: Festbett-Filter, ST: Schönungsteich, n.s.: nicht spezifiziert

^D T: Teilstrom, V: Vollstrom

Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass auch hier stark auffällig zunehmender Ausbaugröße bzw. Wassermenge die Jahreskosten für alle drei Systeme sinken. Die PAK-Dosierung in ein Kontaktbecken scheint im Bereich um 12.000 EW insgesamt die teuerste Variante zu sein. Trotzdem ist schwierig zu sagen, welches Verfahren (PAK, GAK oder Ozonung) für die VKA Fladnitz im Raabtal am wirtschaftlichsten wäre, da alle Systeme sich in einer ähnlichen Spanne befinden.

Vermutlich würde eine 4. Reinigungsstufe für die VKA Fladnitz im Raabtal Jahreskosten im Bereich von

- ca. 0,20 bis 0,40 €/m³ (bezogen auf die gesamte Zulaufmenge der Kläranlage)
- ca. 0,25 bis 0,50 €/m³ (bezogen auf die in der 4. Reinigungsstufe behandelte Abwassermenge)

verursachen.

AUS ERKENNTNISSEN DER GROBKOSTENSCHÄTZUNG FÜR DIE VKA FELDBACH-RAABAU

Aus den Ergebnissen der Grobkostenschätzung für die VKA Feldbach-Raabau kann abgeleitet werden, dass die spezifischen Kosten für eine 4. Reinigungsstufe auf der kleineren VKA Fladnitz im Raabtal auch im Vergleich zu den herangezogenen etwas älteren Literaturstellen und Machbarkeitsstudien (trotz Valorisierung) ebenfalls etwas höher ausfallen würden.

10 Gewässerschutz

10.1 Bestand

SPURENSTOFFE

Im Rahmen des [GZÜV Sondermessprogramms 2017/2018](#) wurden Arzneimittelwirkstoffe und Hormone in österreichischen Fließgewässern vom Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus analysiert und in einem Bericht zusammengefasst. Dabei wurde auf 85 Arzneimittelwirkstoffe, 5 Wirkstoffmetaboliten und 5 Hormone (Östrogene) an 20 Messstellen in Flüssen jeweils im 4. Quartal 2017 und im 2. Quartal 2018 getestet.

Insgesamt konnten in allen 10 Kläranlagenabläufen nur 12 der 88 Wirkstoffe nicht nachgewiesen werden, das Gleiche gilt auch für die Untersuchungen in den Flüssen. Das Umweltbundesamt (Clara, Hartmann, & Deutsch, 2019, S. 32 f) wählte als Bewertungskriterien unterschiedliche Referenzen, da es europaweit keine einheitliche Qualitätsnorm gibt. Letztlich wurden die Spurenstoffe wie in Tabelle 42 ersichtlich bewertet.

Tabelle 42 Kriterien für Grenzwerte im Sondermessprogramm Arzneimittelwirkstoffe und Hormone in Fließgewässern (Clara, Hartmann, & Deutsch, 2019, S. 34)

BEWERTUNGSKRITERIUM	PARAMETER
QK-chron ¹	10,11-Dihydro-10,11-Dihydroxycarbamazepin, 17α-Östradiol, 17β-Östradiol, 17α-Ethinylöstradiol Acetylsulfamethoxazol, Amoxicillin, Atenolol, Azithromycin, Bezafibrat, Clarithromycin, Clofibrinsäure, Dehydro-Erythromycin, Diclofenac, Erythromycin, Est-ron, Ibuprofen, Irbesartan, Mefenaminsäure, Metformin, Metoprolol, Naproxen, Phenazon, Propranolol, Propyphenazon, Sulfamidin, Sulfamethoxazol, Trimethoprim, Valsartan.
PNEC ²	Carbamazepin, Citalopram, Clindamycin, Diazepam, Doxycyclin, Duloxetine, Fenofibrat, Furosemid, Gabapentin, Gemfibrozil, Iohexol, Iopromid, Ketoprofen, Koffein, Levitiracetam, Metronidazol, Oxytetracyclin, Paracetamol (Acetaminophen), Penicillin G, Pentoxifyllin, Primidon, Roxithromycin, Sotalol, Sulfadiazin, Sulfadimethoxin, Sulfathiazol, Tramadol, Venlafaxin.
GOW ³	4-Formylaminoantipyrin, Amidotrizoesäure, Iopamidol.
TW-TW ⁴	4-Acetylaminoantipyrin, 4-Formylaminoantipyrin, Amlodipin, Ampicillin, Atorvastatin, Bisoprolol, Bupropion, Canrenon, Capecitabin, Carvedilol, Clopidogrel, Codein, Enalapril, Gliclazid, Guaifenesin, Hydrochlorothiazid, Iomeprol, Iopamidol, Ioversol, Josamycin, Oxazepam, Oxcarbazepin, Pantoprazol, Penicillin V, Prothipendyl, Quetiapin, Ranitidin, Salbutamol, Sertralin, Sitagliptin, Sulfadoxin, Temazepam, Terbutalin, Theophyllin, Trazodon, Valaciclovir, Verapamil.
Kein Kriterium	Östriol.

¹ Chronisches Qualitätskriterium

² Predicted No Effect Concentration

³ gesundheitlicher Orientierungswert des deutschen Umweltbundesamtes

⁴ Toleranzwerte für Säuglinge in Trinkwasser

An der Raab wurde die Probenahmestelle in Neumarkt im Burgenland gewählt. An dieser Stelle hat die Raab einen Abwasseranteil von ca. 8,8% in Bezug auf Mittelwasser MQ (von kommunalen Kläranlagen in Österreich). An der Probenahmestelle an der Raab in Neumarkt wurde lediglich der Parameter Diclofenac überschritten (Bewertungskriterium QK-chorn = 0,050 µg/l). Alle Parameter können in Anhang A eingesehen werden. Nachgewiesen werden konnten bei der ersten Probenahme 51% und bei der zweiten Probenahme 54% der 95 Stoffe. Zudem wurden auch biologische Wirktests durchgeführt. In der Raab wurden beim ERα-CALUX-Wirktest in beiden Proben nur östrogene Aktivitäten unterhalb des Triggerwertes von 0,00050 µg EEQ/l nach Kienle et al. (2018) gemessen⁵. Zur Überprüfung der herbiziden Wirkung wurde die Photosynthesehemmung und die Wachstumshemmung untersucht. In den beiden Proben aus der Raab wurden keine der Triggerwerte für die Photosynthesehemmung von 0,07 µg DEQ/l oder der Wachstumshemmung von 0,13 µg DEQ/l nach Escher et al. (2018) und Kienle et al. (2018) überschritten⁶.

In Bezug auf die Fracht bewertet das Umweltbundesamt die Raab folgendermaßen. Lediglich für die Parameter Valsartan, Metformin und Mefenaminsäure stammen weniger als 100% der Fracht aus Abwassereinleitungen (Clara, Hartmann, & Deutsch, 2019, S. 179). Dies verhält sich sehr unterschiedlich in den untersuchten Flüssen.

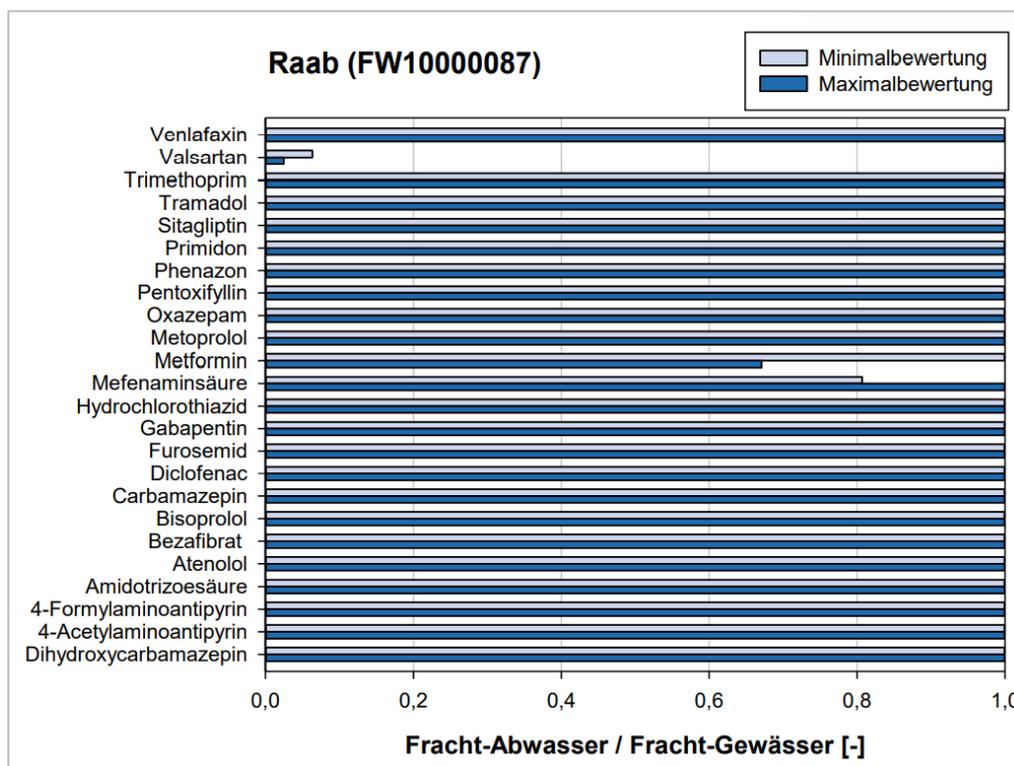


Abbildung 53 Anteile der Fracht aus Kläranlagenablauf an der Gesamtracht in der Raab. (Clara, Hartmann, & Deutsch, 2019, S. 179)

⁵ EEQ: β-Östradiol-Äquivalentkonzentration

⁶ DEQ: Diuron-Äquivalenzkonzentration

Zudem enthält der Bericht des Umweltbundesamtes auf den Seiten 189 bis 192 auch eine Liste zu Literaturdaten zum Vorkommen von in Arzneimittelwirkstoffen und Wirkstoffmetaboliten Fließgewässern.

Die Kläranlagen im Einzugsgebiet der Raab sind in Abbildung 54 zu sehen. Darin sind Kläranlagen aller Größenklassen sowie kommunale und industrielle Anlagen verzeichnet. Es liegen vor allem kleine ARAs im Einzugsgebiet.

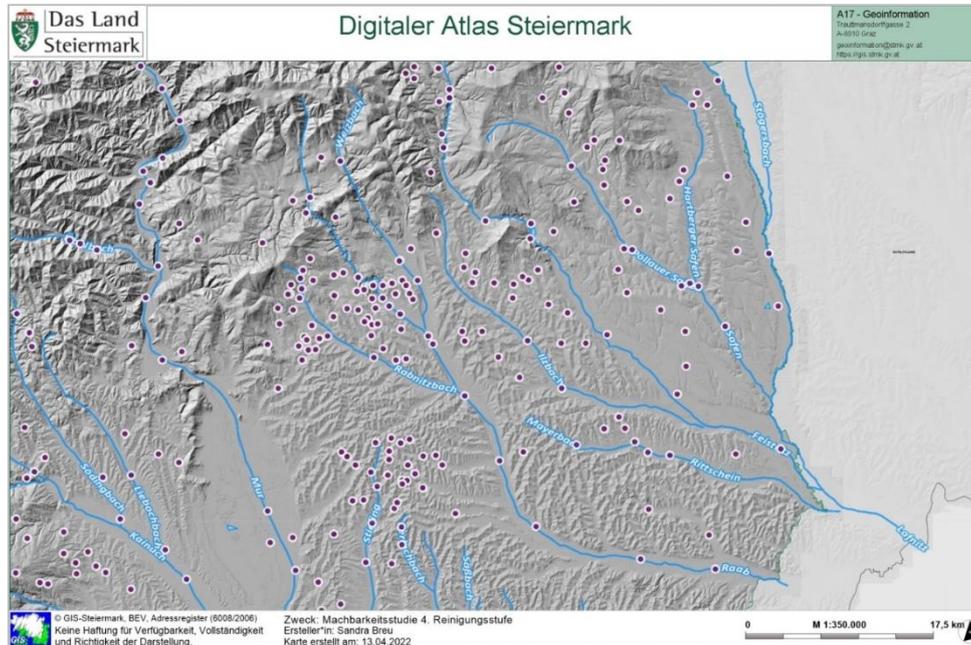


Abbildung 54 Kläranlagen in der Südoststeiermark (Land Steiermark // GIS-Steiermark, 2022)

NÄHRSTOFFE

Neben der Spurenstoffsituation ist auch der Gewässerzustand vor allem in Hinblick auf die Nährstoffsituation von Bedeutung. Die Raab hat im relevanten Abschnitt folgende Eigenschaften (Quellen BMLRT (2021) und Gabriel et al. (2021)).

- Fischregion: Epipotamal mittel
- Bioregion: Östliche Flach- und Hügelländer (Bioregionsnummer 13)
- Ökoregion: Ungarische Tiefebene
- Qualitätselement Phytobenthos: 1 (< 500 m),
- trophischer Grundzustand: meso-eutroph2
- saprobielle Grundzustand: 2,0 (Sommer)
- Bioregionstyp: H1
- Einzugsgebietsklasse: 2 (101–1000 km²) im relevanten Abschnitt der Raab

Die Jahresdurchschnitts-Umweltqualitätsnormen (JD-UQN) aus der Qualitätszielverordnung (QZV) Oberflächengewässer Chemie:

- Nitrit (NO₂-N)

> 30 mg Cl-/l: 300 µg/l (Potamalgewässer)

- Ammonium (NH₄-N)
 $(14,425 / (1 + 10^{7,688 - \text{pH}}) + 621,75 / (1 + 10^{\text{pH} - 7,688})) \cdot \min(2,85; 1,45 \cdot 10^{0,028 \cdot (25 - T)}) \mu\text{g/l}$

Zustandsklassen Einteilung laut QZV Oberflächengewässer Ökologie:

- Nitrat (NO₃-N)
 sehr guter Zustand: 4,0 mg/l (90%-Perzentil)
 guter Zustand 7,0 mg/l (90%-Perzentil)
- Ortho-Phosphat (PO₄-P)
 sehr guter Zustand: 0,070 mg/l (90%-Perzentil)
 guter Zustand 0,200 mg/l (90%-Perzentil)

Als Messstelle in der Raab wurden die Daten der ST192.N/004 Ertlermühle herangezogen (Land Steiermark, 2022), die ca. 800 m flussaufwärts von der Einleitstelle der VKA Feldbach-Raabau liegt. Dort umfassen die Parameter 10 bzw. 11 Messwerten (Monatliche Messungen in 2021) bei:

- Nitrit (NO₂-N)
 Zwischen 14,9 und 56,4 µg/l bei einem Chlorgehalt von 40,0 bis 87,5 mg Cl-/l -> keine Überschreitungen
- Ammonium (NH₄-N)
 Alle zehn NH₄-N-Messwerte befinden sich zwischen 47,0 und 144,9 µg/l, während der Grenzwert zwischen 303,6 und 915,0 µg/l variiert. -> keine Überschreitungen
- Nitrat (NO₃-N)
 Zwischen 1,6 und 3,2 mg/l -> sehr guter Zustand
- Ortho-Phosphat (PO₄-P)
 Zwischen 0,011 und 0,488 mg/l, 90%-Perzentil 0,0457 mg/l -> kein guter Zustand

Damit lässt sich zusammenfassen, dass es nur beim Ortho-Phosphat zu hohe Messwerte auftreten. Neben den Kläranlagen wird Phosphat vor allem durch die Landwirtschaft in die Raab eingetragen. Dies bestätigt auch der Bericht von Gabriel et al. (2011) zur Nährstoffmodellierung in Einzugsgebieten. Dabei wird für die Raab der Anteil der Erosion von landwirtschaftlichen Flächen an Stickstoffemissionen auf 2% geschätzt und für Phosphoremissionen auf 39%.

10.2 Handlungsbedarf beim Gewässer

Die Analysen des Umweltbundesamtes zeigen deutlich, dass Spurenstoffe in messbaren Mengen in der Raab vorhanden sind. Da es jedoch kaum zu Überschreitungen kommt, stellt sich die Frage, ob in Österreich der Fokus der Ausrüstung von Kläranlagen mit einer 4. Reinigungsstufe vermehrt auf anderen, stärker belasteten Gewässern liegen sollte. Außerdem wird an der Raab kein Oberflächenwasser oder Uferfiltrat als Trinkwasser entnommen und die Raab bildet keinen Zufluss in einen sensiblen See.

Daneben ist die Nährstoffsituation hinsichtlich der hohen Phosphat-Werte anzugehen. Dabei ist vermutlich die Landwirtschaft die Haupteintragsquelle.

10.3 Handlungsbedarf bei den Kläranlagen

Die Analysen des Umweltbundesamtes zeigen deutlich, dass Spurenstoffe in messbaren Mengen in der Raab vorhanden sind, die jedoch kaum zu Grenzwertüberschreitungen führen. Andererseits hat in der Raab in Neumark aber lediglich einer der 95 untersuchten Parameter den gesetzten Grenzwert (Chronisches Qualitätskriterium) überschritten, daher ist der Handlungsbedarf an der Raab nicht als dringend einzustufen. Zudem ist der Abwasseranteil an der Raab sowohl an der Einleitstelle der VKA Fladnitz im Raabtal als auch bei der VKA Feldbach-Raabau geringer als die in der Schweiz angesetzten 10%.

Daraus lässt sich ableiten, dass eine Spurenstoffentfernung an einer Kläranlage entlang der Raab sinnvoll ist, aber derzeit für den reinen Gewässerschutz nicht unbedingt erforderlich ist. Weitere Überlegungen für die Umsetzung einer Pilotanlage zur weitergehenden Abwasserreinigung sind im Zusammenhang mit einer weiterhin möglichst vielseitigen Nutzung der Raab zu empfehlen.

11 Zusammenfassung und Ausblick

Es gibt in Europa eine umfangreiche Diskussion zum Thema Spurenstoffen im Ablauf kommunaler Kläranlagen. Bislang existiert lediglich in der Schweiz eine gesetzliche Regelung zur Spurenstoffentfernung auf kommunalen Kläranlagen. Für die EU wird im Rahmen der Überarbeitung der „Kommunalen Abwasserrichtlinie“ (91/271/EWG) eine Regelung für Spurenstoffe erwartet. Ob diese konkrete Vorgaben zur Mikroschadstoffentfernung enthalten wird, ist allerdings noch nicht gesichert vorhersagbar. Bisher wurde sogenannte 4. Reinigungsstufen zur Elimination dieser Mikroschadstoffe bereits auf einigen Kläranlagen installiert. Diese liegen vor allem in der Schweiz, Baden-Württemberg und Nordrhein-Westfalen. Insgesamt sind mit Stand 2019 bzw. 2021 bereits 47 kommunale Kläranlagen mit 4. Reinigungsstufen ausgestattet und 47 weitere Spurenstoffentfernungen befanden/befinden sich in der Planungs-/Bauphase zu dem finden immer wieder Forschungs- und Pilotstudien statt.

Im Rahmen dieser Studie wurden mögliche Behandlungstechnologien betrachtet und bewertet. Daraus geht hervor, dass die derzeit wirtschaftlichen Methoden zur Umsetzung von Mikroschadstoffentfernung auf kommunalen Kläranlagen vor allem die pulverisierte Aktivkohle (PAK), die granulierten Aktivkohle (GAK) und die Ozonung sind.

Um Informationen aus den bereits bestehenden Anlagen und anderen Machbarkeitsstudien zu gewinnen, wurden eine Vielzahl von Studien im Bereich um 40.000 EW (Ausbaugröße der VKA Feldbach-Raabau) und 12.000 EW (Ausbaugröße der VKA Fladnitz im Raabtal) ausgewertet. Aus dieser Auswertung und aus Literaturangaben konnten die in Tabelle 43 aufgelisteten Jahreskosten für eine 4. Reinigungsstufe ermittelt werden.

Tabelle 43 Vergleich der Jahreskosten aus der Literatur und den Berichten zu bestehenden Anlagen und anderen Machbarkeitsstudien (BPI: Baupreisindex)

VERFAHREN	STAND	BEZUG	JAHRESKOSTEN 40.000 EW	JAHRESKOSTEN 12.000 EW	DATENQUELLE
PAK	2015	?	0,092 €/m ³	0,131 €/m ³	(KOM-M.NRW, 2015) aus Funktion
Ozonung	2015	?	0,059 €/m ³	0,099 €/m ³	(KOM-M.NRW, 2015) aus Funktion
4. Reinigungsstufe	2016	?	0,122 €/m ³	0,202 €/m ³	(KOM-M.NRW, 2016) aus Funktion
PAK	2018/19	Q _{4. Reinig.}	0,039 bis 0,070 €/m ³	0,039 bis 0,070 €/m ³	(Kreienborg, Wortmann, Bertzbach, & Launay, 2019)
4. Reinigungsstufe	2020	Q _{ARA}	0,057 bis 0,135 €/m ³	0,057 bis 0,135 €/m ³	(KomS BW, 2020)
PAK	2021 (BPI)	Q _{4. Reinig.}	0,171 €/m ³	0,346 €/m ³	Auswertung Anlagen/Machbarkeitsstudien
GAK	2021 (BPI)	Q _{4. Reinig.}	0,188 €/m ³	0,356 €/m ³	Auswertung Anlagen/Machbarkeitsstudien
Ozonung	2021 (BPI)	Q _{4. Reinig.}	0,149 €/m ³	0,382 €/m ³	Auswertung Anlagen/Machbarkeitsstudien

PAK	2021 (BPI)	Q_{ARA}	0,154 €/m ³	0,312 €/m ³	Auswertung Anlagen/Machbarkeitsstudien
GAK	2021 (BPI)	Q_{ARA}	0,167 €/m ³	0,316 €/m ³	Auswertung Anlagen/Machbarkeitsstudien
Ozonung	2021 (BPI)	Q_{ARA}	0,133 €/m ³	0,342 €/m ³	Auswertung Anlagen/Machbarkeitsstudien

Eine genauere Betrachtung inkl. Grobkostenschätzung wurde nur für die VKA Feldbach-Raabau erstellt. Es wurden zunächst sechs Varianten erörtert und daraus drei Varianten genauer betrachtet. Diese sind:

- A.1 PAK-Dosierung in Belebungsbecken mit kontinuierlich gespültem Sandfilter (Nachreinigung)
- B.1 GAK-Filter mit kontinuierlich gespültem Sandfilter (Vorreinigung)
- C.2 Kombination aus Ozonung und GAK-Filter (bzw. BAK)

Folgende Varianten wurden nicht weiter betrachtet:

- A.2 PAK-Dosierung in Kontaktbecken mit Absetzbecken oder Schrägklärer und kontinuierlich gespültem Sandfilter (Nachreinigung)
- B.2 GAK-Filter mit Mikrofiltration (Vorreinigung)
- C.1 Ozonung mit kontinuierlich gespültem Sandfilter (biologische Nachreinigung)

Alle drei Grobkostenschätzungen liegen bezogen auf die spezifischen Jahreskosten oberhalb der Literaturwerte bzw. der Schätzung von anderen Machbarkeitsstudien (vgl. Tabelle 44). Dies liegt vermutlich vor allem an den derzeit sich rasant ändernden Preisen.

Tabelle 44 Jahreskosten als Ergebnis der Grobkostenschätzung für die VKA Feldbach-Raabau

VARIANTE	JAHRESKOSTEN	JAHRESKOSTEN
	PRO ZULAUFMENGE ARA	PRO BEHANDELTE MENGE IN 4. REINIGUNGSSTUFE
A.1	0,20 €/m ³	0,20 €/m ³
B.1	0,23 €/m ³	0,26 €/m ³
C.2	0,26 €/m ³	0,29 €/m ³

Da die spezifischen Jahreskosten gemäß der Grobkostenschätzung höher liegen als aus der Auswertung der etwas älteren Literatur und anderen Machbarkeitsstudien hervorgeht, ist davon auszugehen, dass auch für die VKA Fladnitz im Raabtal die Kosten höher liegen würden, als die Daten in Tabelle 43 vermuten lassen.

Im Anschluss an die Grobkostenschätzung der drei Varianten A.1, B.1 und C.2 wurden diese anhand von Ausschluss- und Bewertungskriterien bewertet.

- Das erste Ausschlusskriterium bezieht sich auf Bromid, Nitrosamin-Vorläufersubstanzen und Chrom, beim Vorhandensein dieser würde die Ozonung ausgeschlossen werden, dies ist allerdings in Feldbach nicht zu erwarten. Das andere Ausschlusskriterium

würde die PAK-Dosierung in die Belegung ausschließen, falls der Überschussschlamm über das Kanalnetz abgeleitet würde, auch dies ist in Feldbach nicht der Fall.

- Die 18 Bewertungskriterien decken einen weiten Bereich von Kosten, Referenzen, Platzbedarf, Flexibilität, Mehraufwand, Schlamm, Verfügbarkeit, Eliminationsleistung, Reaktionsprodukte und ökologischer Betrachtung ab. Es wurden zwei Gewichtungsvarianten erstellt, eine mit dem Fokus auf dem Betrieb und die andere mit dem Schwerpunkt Gewässerschutz. Die Ergebnisse sind in Abbildung 55 dargestellt.

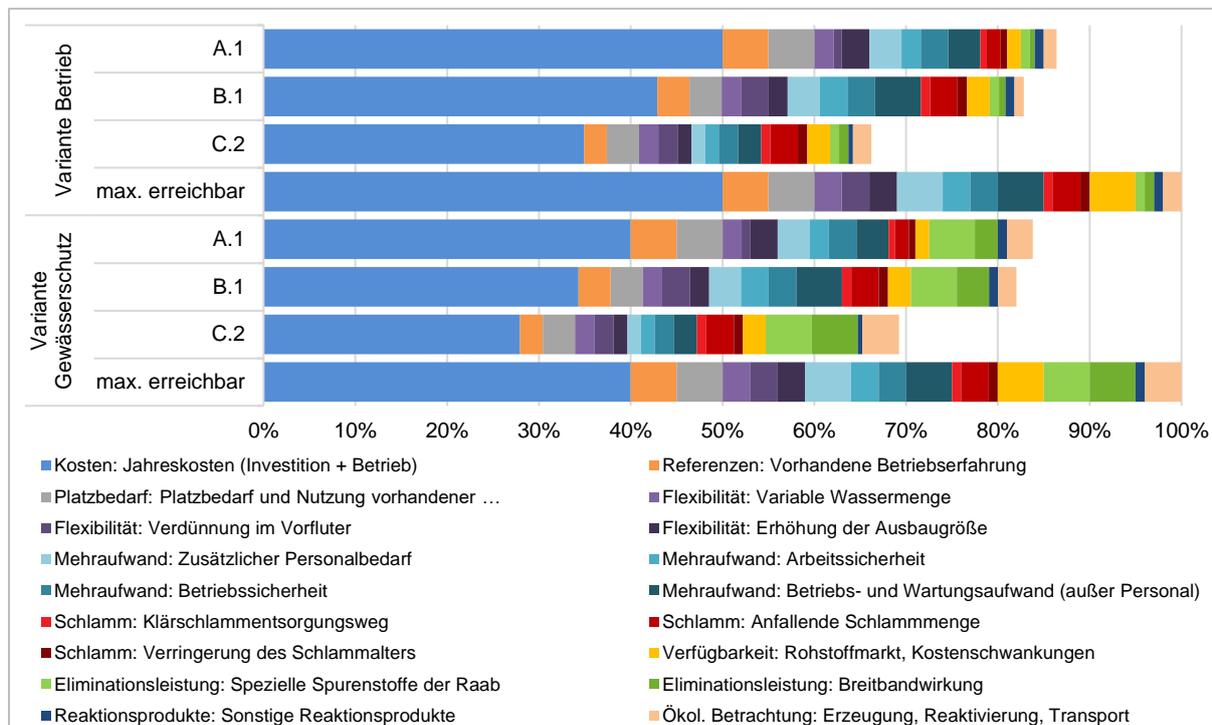


Abbildung 55 Bewertung der Varianten A.1, B.1 und C.2 mit den Bewertungsvarianten "Betrieb" und "Gewässerschutz"

Als Vorzugsvariante ging im Rahmen dieser Studie sowohl für die Bewertungsvariante „Betrieb“ als auch für „Gewässerschutz“ knapp die Variante A.1, welche die PAK-Dosierung in die Belegung mit nachgeschalteter Sandfiltration darstellt, hervor. Sie ist mit etwa 393.000 €/a (bzw. 0,20 €/m³ behandeltem Abwasser) nach derzeitigen Schätzungen die günstigste Variante und wurde durch die Bewertungsmatrix an erster Stelle bestätigt. Vor allem durch sich ändernde Preise für Investitions- und Betriebskosten und nur grob überschlägiger Auslegung ist die Reihung der Varianten allerdings eher instabil.

Aus Sicht des Gewässerschutzes lässt sich festhalten, dass bei den Nährstoffen die Ortho-Phosphat-Konzentration sehr hoch liegt. Phosphor wird neben Kläranlagenabläufen vor allem aus der Landwirtschaft eingetragen. Hinsichtlich der Spurenstoffe wurden bei der Studie des Umweltbundesamtes aus 85 Arzneimittelwirkstoffen, 5 Wirkstoffmetaboliten und 5 Hormonen lediglich Überschreitungen des Diclofenacs verzeichnet. In vielen der anderen untersuchten österreichischen Flüsse wurden deutlich höhere Werte aufgenommen. Da wie in Abbildung 53

zu sehen, fast die gesamte Fracht an Spurenstoffen in der Raab aus Kläranlagen stammt, mag dies in Zukunft ein wichtiger Hebel zur Eindämmung der Mikroschadstoffe in der Raab sein. Daraus lässt sich ableiten, dass eine Spurenstoffentfernung an einer Kläranlage entlang der Raab sinnvoll, aber nicht dringend erforderlich ist.

In Zukunft kann unter Umständen auch die Entkeimung des Abwassers eine größere Rolle spielen. Dann sind Methoden zur Spurenstoffentfernung mit einer Ozonung oder Ultrafiltration gegenüber den Aktivkohlevarianten im Vorteil. Bei PAK- oder GAK-Varianten besteht (neben der Nachrüstung einer Ozonung oder Ultrafiltration) auch die Möglichkeit, eine UV-Desinfektion nachzurüsten.

12 Literaturverzeichnis

- Abegglen, C., & Siegrist, H. (2012). Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser. Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen. *Umwelt-Wissen*, Nr. 1214, 210 S. Abgerufen am 28. Okt 2021 von www.bafu.admin.ch/uw-1214-d
- Abwasserverband Feldbach - Mittleres Raabtal. (o.D.). Umbau, Erweiterung u. Anpassung an den Stand der Technik: VKA Feldbach-Raabau.
- Barjenbruch, M., Gnirß, R., Bannick, C. G., Beier, S., Biebersdorf, N., Bleisteiner, S., . . . Montag, D. (2020). Analytik und Betriebsdokumentation bei Verfahren zur gezielten Spurenstoffentfernung - Empfehlungen für einen systematisierten Verfahrensvergleich bezüglich Spurenstoffentfernung, Nebenprodukten und Desinfektion. 67(10). doi:10.3242/kae2020.10.001
- Benstöm, F., & Nem, S. (2021). *Kläranlage Wegberg Machbarkeitsstudie 4. Reinigungsstufe*. Ingenieurgesellschaft für Abwasserwirtschaft und technische Dienstleistungen mbH. Abgerufen am 27. Jan 2022 von https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/forschung/21-05-31_699_1_Machbarkeitsstudie_Spurenstoffe_KA_Wegberg_FINALVERSION.pdf
- Beyerle, L., Brepols, C., & Wachendorf, N. (2018). *Machbarkeitsstudie zur Spurenstoffelimination auf dem Gruppenklärwerk Flerzheim*. Bergheim: Erftverband aquatec GmbH. Abgerufen am 30. Nov 2021 von https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/forschung/190504_Machbarkeitsstudien_Erft/181025bey1_studie_flerz_fin1.pdf
- Bjarenbruch, M., & Firk, W. (2014). Möglichkeiten der Elimination von Spurenstoffen auf kommunalen Kläranlagen. *Korrespondenz Abwasser*, 61(10), 861 – 875. Abgerufen am 13. Jun 2022
- BMLRT. (2021). *Entwurf Nationaler Gewässerbewirtschaftungsplan 2021*. Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus, Sektion I - Wasserwirtschaft. Abgerufen am 21. Apr 2022 von https://team.ikt-portal.at/index.php/s/yOpr3Xxj97qGdX?dir=undefined&path=%2Fkarten_Oberfl%C3%A4chengew%C3%A4sser&openfile=238226
- BMU Expertengremium zur Bewertung der Relevanz von Spurenstoffen. (2019). *Kurzprotokoll 1. Sitzung des Expertengremiums zur Bewertung der Relevanz von Spurenstoffen*. Bonn, Deutschland: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). Abgerufen am 02. Feb 2022 von https://www.dialog-spurenstoffstrategie.de/spurenstoffe-wAssets/docs/Expertengremium_Sitzung-1_Kurzprotokoll.pdf
- BMU Expertengremium zur Bewertung der Relevanz von Spurenstoffen. (2020). *Kurzprotokoll 2. Sitzung des Expertengremiums zur Bewertung der Relevanz von Spurenstoffen*. Bonn, Deutschland: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). Abgerufen am 02. Feb 2022 von https://www.dialog-spurenstoffstrategie.de/spurenstoffe-wAssets/docs/Expertengremium_Sitzung-2_Kurzprotokoll.pdf
- Bolle, F.-W., & Pinnekamp, J. (2011). *Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen - Phase I - Kurzbericht*. FiW an der RWTH Aachen und ISA der RWTH Aachen, Aachen, Deutschland. Abgerufen am 02. Mai 2022 von https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/wasser/abwasser/forschung/pdf/Kurzbericht_ENVELOSO.pdf
- Bolle, F.-W., & Pinnekamp, J. (2015). *Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen - Phase II - Kurzbericht*. FiW an der RWTH Aachen und ISA der RWTH Aachen, Aachen, Deutschland. Abgerufen am 07. Jun 2022 von https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/tx_mmresearchprojects/Envelos_II_Kurzfassung_FINAL.pdf
- Bosman Watermanagement GmbH. (09. Jun 2022). Datenblatt Bosman Flexbed FilterTM Flexbed FilterTM Typ .
- Bosman Watermanagement GmbH. (16. Jun 2022). Richtpreisangebot.
- Brunsch, A., Beyerle, L., Knorz, K., Brepols, C., Dahmen, H., Christoffels, E., & Schäfer, H. (2020). Retentionsbodenfilter zur Entfernung von Mikroschadstoffen aus Mischwasserabschlägen und Kläranlagenablauf. *Korrespondenz Abwasser*, 67(10), 780-788. doi:10.3242/kae2020.10.003
- Clara, M., Hartmann, C., & Deutsch, K. (2019). *Arzneimittelwirkstoffe und Hormone in Fließgewässern Gewässerzustandüberwachung (GZÜV) Sondermessprogramm 2017/2018*. Wien, Österreich: Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus. Abgerufen am 11. Apr 2022 von https://info.bmlrt.gv.at/dam/jcr:6bab30a8-49b3-4d46-8658-696ffb4f5a1/GZ%C3%9CV_SP_Arzneimittel_Fliessgew%C3%A4sser_Bericht_gsb.pdf
- DWA. (2015). *Möglichkeiten der Elimination von anthropogenen Spurenstoffen T3/2015*. Hennef, Deutschland: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA).
- DWA-M 285-2. (2021). *Spurenstoffentfernung auf kommunalen Kläranlagen – Teil 2: Einsatz von Aktivkohle – Verfahrensgrundsätze und Bemessung (1. Ausgabe Ausg.)*. Hennef, Deutschland: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA).
- Escher, B., Ait-Aïssa, S., Behnisch, P., Brack, W., Brion, F., Brouwer, A., . . . al., e. (2018). Effect-based trigger values for in vitro and in vivo bioassays performed on surface water extracts supporting the environmental quality standards (EQS) of the European Water Framework Directive. *Science of the Total Environment*, 628-629:748-765.

VERFASSER	LUGITSCH UND PARTNER ZT GMBH	BEARBEITER	SB
ADRESSE	Mozartweg 1, 8330 Feldbach	DATUM	03.08.2022
KONTAKT	+43(0)3152/4534 office@zt.lugitsch.at www.zt.lugitsch	SEITE	119

- Freitag-Ziegler, G., Kötter, E., & Stommel, H. (2019). *Wasser: Gewinnung*. Abgerufen am 31. Jan 2022 von Trinkwasser-Ressourcen und Gewässerschutz: <https://www.bzfe.de/lebensmittel/vom-acker-bis-zum-teller/wasser/wasser-gewinnung/>
- Gabriel, O., Hochedlinger, G., Broer, M. B., Humer, F., Dienstl, C., Donabaum, U., . . . Stockinger, W. (2021). *RaabSTAT Physikalisch-chemische und biologische Untersuchungen an der Raab in Österreich*. Umweltbundesamt GmbH, DWS Hydro-Ökologie GmbH. Abgerufen am 03. Jan 2022 von https://www.interreg-athu.eu/fileadmin/be_user_uploads/RaabSTAT/AT_-_Nationaler_Bericht.pdf
- Gabriel, O., Kovacs, A., Thaler, S., Zessner, M., Hochedlinger, G., Schilling, C., & Windhofer, G. (2011). *Stoffbilanzmodellierung für Nährstoffe auf Einzugsgebietsebene (STOBIMO-Nährstoffe) als Grundlage für Bewirtschaftungspläne und Maßnahmenprogramme*. BMLFUW - Sektion VII. Abgerufen am 09. Mai 2022 von https://info.bmlrt.gv.at/dam/jcr:5559cc5c-b909-41e5-ad07-6f9b64a43b7e/STOBIMO_Endbericht_final.pdf
- Gawel, E., Strunz, S., Holländer, R., Lautenschläger, S., Stumpf, L., Jaschke, G., & Spillecke, H. (2021). *Reform des Abwasserabgabengesetzes - mögliche Aufkommens- und Zahllasteffekte Abschlussbericht*. Umweltbundesamt Deutschland, Dessau-Roßlau, Deutschland. Abgerufen am 17. Dez 2021 von https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Forschungsdatenbank/fkz_3719_21_299_0_reform_abwasser_bf.pdf
- Gehrke, I., Bertling, R., Somborn-Schulz, A., Übele, S., Schiestel, T., Gawel, A., . . . Beery, M. (2021). Neue Materialien und Verfahren zur Spurenstoffelimination - eine vergleichende Messstudie zur Entfernung von Dicofenac - Teil 2: Membranverfahren sowie oxidative und reduktive Verfahren. *Korrespondenz Abwasser*, 68(4), 273 - 280. doi:10.3242/kae2021.04.003
- Hansen, J., & Andritschke, N. (2019). Vierte Reinigungsstufe für kleine und mittlere Kläranlagen (Gespräch). (4), S. 6-7.
- Harmjanßen, K., & Rummeler, M. (2017). *Möglichkeiten der Elimination anthropogener Mikroschadstoffe in der Kläranlage Osterwick*. Ingenieurbüro Rummeler + Hartmann GmbH. Abgerufen am 01. Dez 2021 von https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/forschung/170201_Machbarkeitsstudie_Rosendahl-Osterwick/Machbarkeitsstudie_Osterwick_Abschlussbericht.pdf
- Harmjanßen, K., & Rummeler, M. (2017). *Möglichkeiten der Elimination anthropogener Mikroschadstoffe in der Kläranlage Osterwick*. Gemeinde Rosendahl. Abgerufen am 10. Nov 2021 von https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/forschung/170201_Machbarkeitsstudie_Rosendahl-Osterwick/Machbarkeitsstudie_Osterwick_Abschlussbericht.pdf
- Kienle, C., Langer, M., Ganser, B., Gut, S., Schifferli, A., Thiemann, A., . . . Werner, I. (2017). *Biologische Nachbehandlung von kommunalem Abwasser nach Ozonung – ReTREAT: Teilprojekt Biotests*. Oekotoxzentrum, Schweizerisches Zentrum für angewandte Ökotoxikologie Eawag-EPFL. Dübendorf, Schweiz: Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Abteilung Wasser. Abgerufen am 18. Feb 2022 von https://www.oekotoxzentrum.ch/media/168206/2017_kienle_retreath_oekotox.pdf
- Kienle, C., Vermeirssen, E., Kunz, P., & Werner, I. (2018). Grobbeurteilung der Wasserqualität mit Biotests: Ökotoxikologische Biotests zur Beurteilung von abwasserbelasteten Fließgewässern. *Aqua und Gas*(4), 40-48.
- Kiewel, R. (01. Jun 2022). Donau Carbon - Aktivkohle.
- KOM-M.NRW. (2015). *Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination*. ARGE Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW. Abgerufen am 20. Apr 2022 von https://nrw-mikro.amit-services.de/fileadmin/user_upload/News/News_Startseite/DIN_A4_MIKRO_Planung.pdf
- KOM-M.NRW. (2016). *Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination* (2. überarbeitete und erweiterte Auflage Ausg.). (N. ARGE Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe, Hrsg.) Köln, Nordrhein-Westfalen, Deutschland. Abgerufen am 02. Feb 2022 von https://nrw-mikro.amit-services.de/fileadmin/user_upload/Broschueren_PDFs_und_Titel_JPGs/Anleitung_Planung_Dimensionierung_11_2016.pdf
- KOM-M.NRW. (2018). Mikroschadstoffelimination in kommunalen Kläranlagen in NRW (Stand 05/2018). Abgerufen am 01. Dez 2021 von https://nrw-mikro.amit-services.de/fileadmin/user_upload/Tatenbank/Projektsteckbriefe_PDF/180528_Karte_inklListe_Webseite.pdf
- KOM-M.NRW. (2021). *Projektsteckbriefe*. Abgerufen am 31. Jan 2022 von https://nrw-mikro.amit-services.de/tatenbank/nrw/projektsteckbriefe/?no_cache=1
- KomS BW. (2020). Leitfaden - Machbarkeitsstudien zur Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen. Baden-Württemberg, Deutschland. Abgerufen am 20. Sep 2021 von <https://koms-bw.de/cms/content/media/Handlungsempfehlung%20Machbarkeitsstudien%201seitig.pdf>
- KomS BW. (2020). *Spurenstoffe im Abwasser - Eine Handlungsempfehlung für Kommunen*. (K. S. Baden-Württemberg, Hrsg.) Stuttgart, Baden-Württemberg, Deutschland. Abgerufen am 25. Jan 2022 von https://koms-bw.de/cms/content/media/KomS-Broschuere_Spurenstoffe%20im%20Abwasser_Stand%20Oktober%202020_Web.pdf
- KomS BW. (2021). *Kläranlagenkarte zur Spurenstoffelimination*. Abgerufen am 25. Jan 2022 von <https://koms-bw.de/klaeranlagen/uebersichtskarte/>
- KomS BW. (kein Datum). *Physikalische Verfahren*. Abgerufen am 10. Feb 2022 von https://koms-bw.de/technologien/physikalische_verfahren/

- Kreienborg, J., Wortmann, E., Bertzbach, F., & Launay, M. (2019). *KomS-Langzeitbetrachtung zu Kosten der Pulveraktivkohlebehandlung*. Stuttgart: Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg. Abgerufen am 26. Nov 2021 von https://koms-bw.de/cms/content/media/Broschuere%20Langzeitbetrachtung%20Pulveraktivkohlebehandlung_Druck.pdf
- Kreuzinger, N., & Schaar, H. (2016). Spurenstoffelimination und 4. Reinigungsstufe - Aktueller Stand der Technischen Entwicklung. 25. Sprechertagung der ÖWAV-Kanal- und Kläranlagen-Nachbarschaften. Hagenberg.
- Kreuzinger, N., Schaar, H., Knasmüller, S., Ferk, F., Mišik, M., Sommer, R., . . . Bartel, C. (2011). *KomOzon Technische Umsetzung und Implementierung einer Ozonstufe für nach dem Stand der Technik gereinigtes kommunales Abwasser - Heranführung an den Stand der Technik*. Wien: Lebensministerium.
- Land Steiermark // GIS-Steiermark. (2022). *Digitaler Atlas Steiermark*. Von <https://gis.stmk.gv.at/wgportal/atlasmobile/map/Basiskarten/Basiskarte> abgerufen
- Land Steiermark. (06. Apr 2022). Messdaten Oberflächengewässer Raab (Stand 2021). Amt der Steiermärkischen Landesregierung A15 Energie, Wohnbau, Technik Referat Gewässeraufsicht und Gewässerschutz.
- LANUV. (2022a). *F&E-Projekte zur Abwasserbeseitigung - Kategorie: Kläranlage / Abwasserbeseitigung*. Abgerufen am 07. Jan 2022 von <https://www.lanuv.nrw.de/landesamt/forschungsvorhaben/klaeranlage-abwasserbeseitigung>
- LANUV. (2022b). *F&E-Projekte zur Abwasserbeseitigung - Kategorie: Machbarkeitsstudien*. Abgerufen am 07. Jan 2022 von <https://www.lanuv.nrw.de/landesamt/forschungsvorhaben/machbarkeitsstudien>
- Launay, M. (2020/21). Spurenstoffelimination in Baden-Württemberg - Strategie des Landes. *wwt Wasserwirtschaft Wassertechnik*, S. 25-28.
- Launay, M., & Hildebrand, A. (2021). Wie sich Spurenstoffe aus dem Abwasser eliminieren lassen - 10. KomS-VSA-Technologieforum Spurenstoffe. *Korrespondenz Abwasser*, 68(3), 164 - 168.
- Lehmann, S., Ogier, J., & Lipnizki, J. (2018). Erfahrungen mit Umkehrosmose als vierte Reinigungsstufe. *wwt Wasserwirtschaft Wassertechnik*(6), 10 - 13.
- Lifa, R. (2020). Eliminierung von Spurenstoffen mittels granulierter Aktivkohle. *wwt Wasserwirtschaft Wassertechnik*(6), 32 - 36.
- Mach und Partner ZT-GmbH und SPIN TEC GmbH. (2022). *Innovatives Multi-barrierensystem zur selektiven Abwasserbehandlung - Endbericht - Kurzfassung*. Österreich. Abgerufen am 07. Apr 2022
- Margot, J., Kienle, C., Magnet, A., Weil, M., Rossi, L., de Alencastro, L. F., . . . Barry, D. A. (2013). Treatment of micropollutants in municipal wastewater: Ozone or powdered activated carbon? *Science of The Total Environment*, 461–462, 480-498. doi:10.1016/j.scitotenv.2013.05.034
- Metzger, S., Barjenbruch, M., Beier, S., Mieke, U., & Nafu, I. (2020). Statusbericht "Spurenstoffentfernung auf kommunalen Kläranlagen in Deutschland". *Korrespondenz Abwasser KA*, 67(10), S. 769-779. doi:10.3242/kea2020.10.002
- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg. (2018). Arbeitspapier Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen. Abgerufen am 20. Sep 2021 von <https://www.koms-bw.de/cms/content/media/2018-11-20%20Arbeitspapier%20Spurenstoffe.pdf>
- Müller-Rechberger, H. (2022). Aktueller Status zur Überarbeitung der kommunalen Abwasserrichtlinie. *Zukünftige Anforderungen an die Abwasserbehandlung* 23. Feb 2022. Webinar.
- MULNV NRW. (2020). *Entwicklung und Stand der Abwasserbeseitigung in Nordrhein-Westfalen* (Bd. 19. Auflage). Düsseldorf: Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Abgerufen am 10. Feb 2022 von https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/wasser/abwasser/lagebericht/00_EStAb2020_Gesamtversion.pdf
- Naddeo, V., Meric, S., Kassinos, D., Belgiorno, V., & Guida, M. (2009). Fate of pharmaceuticals in contaminated urban wastewater effluent under ultrasonic irradiation. *Water Research*, 43(16), 4019 - 4027. doi:10.1016/j.watres.2009.05.027
- Nordic Water Products AB. (n.d.). *Kontinuierliche Filter - Eine bewährte Technologie auf dem neuesten Stand der Technik*. Abgerufen am 14. Jun 2022 von <https://www.nordicwater.com/wp-content/uploads/2016/07/S1501-DynaSand-brochure-DE-1.pdf>
- Panglisch. (2021). *HyFive – Hybride Membranprozesse als flexible und effiziente vierte Reinigungsstufe*. Abgerufen am 03. Jan 2022 von F&E-Projekte zur Abwasserbeseitigung Kategorie: ResA: https://www.lanuv.nrw.de/umwelt/wasser/abwasser/foerderung-von-fe-projekten-zur-abwasserbeseitigung/geoerderte-projekte?tx_cartproducts_products%5Bproduct%5D=1077&cHash=a8ea969fc7e7cc1c9ef0681e75331aec
- Rensch, D., Abegglen, C., Deminguez, D., Egli, C., LeGoaziou, Y., Schachtler, M., . . . Wunderlin, P. (2017). *Konzepte zur Überwachung der Reinigungsleistung von weitergehenden Verfahren zur Spurenstoffelimination*. Plattform „Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen“. Abgerufen am 22. Feb 2022 von https://micropoll.ch/wp-content/uploads/2020/06/2017_VSA_F_Konzepte-zur-%C3%9Cberwachung-der_.d.pdf
- Rödel, S., Günther, F., Rehbein, V., Steinle, E., Schatz, R., Zech, T., . . . Eßlinger, M. (2019). *Elimination von anthropogenen Spurenstoffen auf kommunalen Kläranlagen (Pilotprojekt 4. Reinigungsstufe). Errichtung und Nachweis der Leistungsfähigkeit einer vierten Reinigungsstufe auf*

- der Kläranlage Weißenburg. Abschlussbericht. Universität der Bundeswehr München, Institut für Wasserwesen, Dr.-Ing. Steinle Ingenieurgesellschaft für Abwassertechnik mbH, Bayerisches Landesamt für Umwelt und Universität der Bundeswehr München. Abgerufen am 24. Nov 2021 von <https://athene-forschung.unibw.de/doc/128025/128025.pdf>
- Rohlfing, R., & Müller-Schaper, J. (2019). *Machbarkeitsstudie Mikroschadstoffentfernung auf der Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg*. PFI Planungsgemeinschaft GmbH & Co. KG. Abgerufen am 03. Sep 2021 von https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/forschung/S2019-03-25_542-001_Spurenstoffelimination_Horn-Bad_Meinberg.pdf
- Rongen, R., & Schösser, F. (2022). Fa. Xylem Water Solutions Deutschland/Austria GmbH (Gesprächsprotokoll 18.02.2022).
- Schaar, H. (2015). *Ozonung von Kläranlagenablauf zur weitergehenden Abwasserreinigung*. Wien: TU Wien.
- Schaar, H., & Kreuzinger, N. (2017). 4. Reinigungsstufe auf Kläranlagen zur weitergehenden Behandlung kommunaler Abwässer. 69, 340-345. doi:10.1007/s00506-017-0406-z
- Schütte, M., Kasper, K., & Schacht, M. (2018). *Machbarkeitsstudie zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Hörstel*. Ingenieurbüro Frilling+Rofls GmbH und Ingenieurbüro Atemis GmbH. Abgerufen am 01. Dez 2021 von https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/forschung/190503_Machbarkeitsstudie_KA_H%C3%B6rstel/Kurzfassung_Abschlussbericht_Machbarkeitsstudie_Spurenstoffe_KA_Hoerstel.pdf
- Schütte, M., Wu, X., Schäpers, D., & Kasper, K. (2018). *Machbarkeitsstudie zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Münster-Hiltrup*. Ingenieurbüro Frilling+Rofls GmbH, Hydro-Ingenieure Planungsgesellschaft für Siedlungswasserwirtschaft mbH, Ingenieurbüro ATEMIS GMBH. Abgerufen am 10. Dez 2021 von https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/forschung/KA684_Kurzfassung_Studie_Spurenstoffe_Hiltrup.pdf
- Taudien, Y., Kolisch, G., Bornemann, C., & Nahrstedt, A. (2020). Langzeiterfahrungen zum Einsatz von GAK-Filtern bei der Spurenstoffelimination. *Korrespondenz Abwasser (KA)*(11), S. 858-867. doi:10.3242/kae2020.11.002
- TDC Ziviltechniker GmbH. (20. Apr 2018). Lageplan zur Verbandskläranlage Raabau - Konsenserhöhung - Einreichprojekt 2018 - Einlage Nr. 2 (Nach Plangrundlage: WR. Kollaudierung BA40, ZT Lugitsch GmbH, 2002).
- TDC ZT-GmbH & Lugitsch & Partner ZT GmbH. (2018). *Abwasserwirtschaftliche Studie Raabtal und Seitentäler: Bereich St. Margarethen bis Fehring*.
- Umweltministerium BW. (2018). *Arbeitspapier der Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen in Baden-Württemberg*. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Referat 53 – Gewässerreinigung, stehende Gewässer, Bodensee, Stuttgart. Abgerufen am 22. Feb 2022 von https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/3_Umwelt/Wasser/210614-Arbeitspapier-Spurenstoffelimination-kommunale-Klaeranlagen-barrierefrei.pdf
- UVEK. (3. Nov 2016). Verordnung zur Überprüfung des Reinigungseffekts von Maßnahmen zur Elimination von organischen Spurenstoffen bei Abwasserreinigungsanlagen, 814.201.231.
- VSA. (2018). Elimination von Mikroverunreinigungen auf ARA - Einflüsse auf die Verfahrenwahl - Für Gemeindevertreter und andere Entscheidungsträger. Schweiz. Abgerufen am 04. Okt 2021 von https://micropoll.ch/wp-content/uploads/2020/06/2018_VSA_PP_Einfl%C3%BCsse-auf-die-Verfahrenswa_d.pdf
- VSA. (2019). *Übersicht ARA Ausbau*. Abgerufen am 20. Jan 2022 von <https://micropoll.ch/ara-ausbau/>
- VSA. (2021). *Karte der ARA mit MV Stufe*. Abgerufen am 25. Jan 2022 von <https://micropoll.ch/Mediathek/karte-der-ara-mit-mv-stufe/>
- Waerner, Radeck, Finkemeyer, & Nagel. (2018). *Elimination von Mikroschadstoffen auf der Kläranlage Bad Wünnenberg Haaren - Machbarkeitsstudie*. Ingenieurbüro Dipl.-Ing. M. Danjes GmbH, Bad Wünnenberg. Abgerufen am 04. Okt 2021 von https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/forschung/Machbarkeit-Mikroschadst_KA-Haaren_1_Bericht_181107.pdf
- Weiß, F., & Biebersdorf, N. (2019). *Kläranlage Nordwalde Machbarkeitsstudie zur Elimination von Mikroschadstoffen*. Tuttahs & Meyer Ingenieurgesellschaft mgH. Abgerufen am 21. Jan 2022 von https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/forschung/190709_Nordwalde_Studie_MS_Elimination_Rev01.pdf
- Wunderlin, P., & Grelot, J. (2021). Abklärungen Verfahrenseignung Ozonung - Empfehlung. (VSA, Hrsg.) Abgerufen am 11. Feb 2022 von https://micropoll.ch/wp-content/uploads/2021/07/Anpassungen-Verfahrenseignung-Ozonung_Empfehlung-V2.pdf
- Zech, T., & Schatz, R. (2016). *Kläranlage Weißenburg - Pilotprojekt 4. Reinigungsstufe. Entwurf für die Stadt Weißenburg. Projektnummer: 065/12/14*. Ingenieurbüro Dr. Resch + Partner.

Abbildung auf der Titelseite:

Stadtgemeinde Feldbach. (2019). Blackout Vorsorge Geht uns alle an! BürgerInnen zeigen einfache Lösungen für die persönliche und kommunale Vorsorge. Präsentationsfolien vom Mi. 30. Jänner 2019 19:00 Uhr, Zentrum, Feldbach

VERFASSER	LUGITSCH UND PARTNER ZT GMBH	BEARBEITER	SB
ADRESSE	Mozartweg 1, 8330 Feldbach	DATUM	03.08.2022
KONTAKT	+43(0)3152/4534 office@zt.lugitsch.at www.zt.lugitsch	SEITE	122

13 Anhang

Anhang A Spurenstoffscreening Raab Umweltbundesamt 2017/2018

Anhang B Investitions- und Betriebskosten einer 4. Reinigungsstufe im Bereich um 40.000 EW

Anhang C Investitions- und Betriebskosten einer 4. Reinigungsstufe im Bereich um 12.000 EW

Anhang D Energetische und ökologische Betrachtung von PAK, GAK und Ozonung

Anhang A Spurenstoffscreening Raab Umweltbundesamt 2017/2018

Tabelle A 1 Spurenstoffscreening Raab bei Neumarkt Daten 2017/2018 (Clara, Hartmann, & Deutsch, 2019, S. 118 ff) NG: Nachweisgrenze, BG: Bestimmungsgrenze

Parameter	NG [$\mu\text{g/l}$]	BG [$\mu\text{g/l}$]	Raab / Neumarkt [$\mu\text{g/l}$]	
			Messung 1	Messung 2
Dihydroxycarbamazepin	0,00005	0,0001	0,056 \pm 0,017	0,044 \pm 0,013
4-Acetylaminoantipyrin	0,00005	0,0001	0,047 \pm 0,014	0,063 \pm 0,019
4-Formylaminoantipyrin	0,00025	0,0005	0,062 \pm 0,019	0,072 \pm 0,022
Acetylsulfamethoxazol	0,00005	0,0001	0,0007 \pm 0,00021	0,00016 \pm 0,000049
Amidotrizoessäure	0,005	0,01	0,025 \pm 0,0076	0,17 \pm 0,053
Amlodipin	0,005	0,01	n.n.	n.n.
Amoxicillin	0,005	0,01	n.n.	n.n.
Ampicillin	0,005	0,01	n.n.	n.n.
Atenolol	0,00025	0,0005	0,00091 \pm 0,00027	0,00095 \pm 0,00028
Atorvastatin	0,0005	0,001	0,0022 \pm 0,00066	0,0012 \pm 0,00035
Azithromycin*	0,005	0,01	n.n.	n.n.
Bezafibrat	0,0005	0,001	0,0050 \pm 0,0015	0,0070 \pm 0,0021
Bisoprolol	0,00005	0,0001	0,0070 \pm 0,0021	0,0068 \pm 0,0020
Bupropion	0,00005	0,0001	<BG	0,00052 \pm 0,00016
Canrenon (Sironolacton)	0,005	0,01	n.n.	n.n.
Capecitabin	0,00005	0,0001	<BG	0,00088 \pm 0,00026
Carbamazepin	0,00005	0,0001	0,016 \pm 0,0048	0,017 \pm 0,0050
Carvedilol	0,005	0,01	n.n.	n.n.
Citalopram	0,0005	0,001	0,0026 \pm 0,00078	0,0014 \pm 0,00043
Clarithromycin*	0,005	0,01	0,011 \pm 0,0032	n.n.
Clindamycin	0,005	0,01	n.n.	n.n.
Clofibrinsäure	0,0005	0,001	n.n.	n.n.
Clopidogrel	0,00025	0,0005	0,0013 \pm 0,00039	0,00059 \pm 0,00018
Codein	0,0005	0,001	n.n.	n.n.
Dehydro-Erythromycin	0,005	0,01	n.n.	n.n.
Diazepam	0,00005	0,0001	0,00014 \pm 0,000041	0,00010 \pm 0,000030
Diclofenac*	0,00005	0,0001	0,095 \pm 0,029	0,082 \pm 0,025
Doxycyclin	0,005	0,01	n.n.	n.n.
Duloxetin	0,005	0,01	n.n.	n.n.
Enalapril	0,00025	0,0005	n.n.	<BG
Erythromycin*	0,005	0,01	n.n.	n.n.
Fenofibrat	0,005	0,01	n.n.	n.n.
Furosemid	0,0005	0,001	0,014 \pm 0,0040	0,010 \pm 0,0031

Parameter	NG [$\mu\text{g/l}$]	BG [$\mu\text{g/l}$]	Raab / Neumarkt [$\mu\text{g/l}$]	
			Messung 1	Messung 2
Gabapentin	0,005	0,01	0,21±0,063	0,28±0,084
Gemfibrozil	0,0005	0,001	n.n.	n.n.
Gliclazid	0,00005	0,0001	0,00043±0,00013	0,00038±0,00011
Guafenisin	0,005	0,01	n.n.	n.n.
Hydrochlorothiazid	0,0005	0,001	0,049±0,015	0,0081±0,0024
Ibuprofen	0,005	0,01	n.n.	n.n.
Iohexol	0,005	0,01	0,058±0,017	0,10±0,032
lomeprol	0,005	0,01	n.n.	n.n.
lopamidol	0,005	0,01	0,021±0,0063	0,031±0,0093
lopromid	0,005	0,01	0,18±0,054	0,037±0,011
loversol	0,005	0,01	n.n.	n.n.
Irbesartan	0,00025	0,0005	0,0033±0,0010	0,0064±0,0019
Josamycin	0,005	0,01	<BG	n.n.
Ketoprofen	0,0005	0,001	n.n.	<BG
Koffein	0,005	0,01	0,021±0,0063	0,020±0,0060
Levetiracetam	0,005	0,01	n.n.	n.n.
Mefenaminsäure	0,0005	0,001	0,0087±0,0026	0,0086±0,0026
Metformin	0,005	0,01	0,11±0,032	0,25±0,075
Metoprolol	0,00025	0,0005	0,0097±0,0029	0,011±0,0033
Metronidazol	0,0005	0,001	n.n.	0,0012±0,00036
Naproxen	0,005	0,01	<BG	0,010±0,0030
Oxazepam	0,00005	0,0001	0,0074±0,0022	0,0086±0,0026
Oxcarbazepin	0,00025	0,0005	0,0013±0,00039	<BG
Oxytetracyclin	0,005	0,01	n.n.	n.n.
Pantoprazol	0,00025	0,0005	0,0016±0,00047	0,0036±0,0011
Paracetamol (Acetaminophen)	0,005	0,01	n.n.	n.n.
Penicillin G	0,005	0,01	n.n.	n.n.
Penicillin V	0,005	0,01	n.n.	n.n.
Pentoxifyllin	0,00005	0,0001	0,00060±0,00018	0,00048±0,00014
Phenazon	0,00025	0,0005	0,0015±0,00045	0,0013±0,0004
Primidon	0,00025	0,0005	0,010±0,003	0,0064±0,0019
Propanolol	0,0005	0,001	<BG	0,0011±0,00033
Propyphenazon	0,0005	0,001	n.n.	<BG
Prothipendyl	0,005	0,01	n.n.	n.n.
Quetiapin	0,00025	0,0005	0,0012±0,00036	<BG
Ranitidin	0,005	0,01	n.n.	n.n.
Roxithromycin	0,005	0,01	n.n.	n.n.
Salbutamol	0,0005	0,001	n.n.	n.n.

Parameter	NG [$\mu\text{g/l}$]	BG [$\mu\text{g/l}$]	Raab / Neumarkt [$\mu\text{g/l}$]	
			Messung 1	Messung 2
Sertralin	0,005	0,01	n.n.	n.n.
Sitagliptin	0,005	0,01	0,035 \pm 0,010	0,041 \pm 0,012
Sotalol	0,0005	0,001	0,0020 \pm 0,00060	0,0028 \pm 0,00083
Sulfadiazin	0,0005	0,001	n.n.	<BG
Sulfadimethoxin	0,0005	0,001	n.n.	n.n.
Sulfadimidin	0,0005	0,001	n.n.	<BG
Sulfadoxin	0,0005	0,001	n.n.	n.n.
Sulfamethoxazol	0,0005	0,001	0,0015 \pm 0,00045	n.n.
Sulfathiazol	0,00025	0,0005	n.n.	n.n.
Temazepam	0,005	0,01	n.n.	n.n.
Terbutalin	0,005	0,01	n.n.	n.n.
Theophyllin	0,005	0,01	n.n.	<BG
Tramadol	0,00005	0,0001	0,021 \pm 0,0064	0,022 \pm 0,0067
Trazodon	0,0005	0,001	0,0048 \pm 0,0015	0,0041 \pm 0,0012
Trimethoprim	0,00005	0,0001	0,0023 \pm 0,00068	0,0026 \pm 0,00079
Valaciclovir	0,005	0,01	n.n.	n.n.
Valsartan	0,00025	0,0005	0,030 \pm 0,0089	0,073 \pm 0,022
Venlafaxin	0,00005	0,0001	0,012 \pm 0,0035	0,013 \pm 0,0040
Verapamil	0,0005	0,001	n.n.	n.n.
Östron	0,00005	0,0001	0,00027 \pm 0,000081	n.n.
17 α -Östradiol	0,00005	0,0001	n.n.	n.n.
17 β -Östradiol	0,00005	0,0001	n.n.	n.n.
17 α -Ethinylöstradiol	0,00005	0,0001	n.n.	n.n.
Östriol	0,0003	0,0006	n.n.	n.n.

Anhang B Investitions- und Betriebskosten einer 4. Reinigungsstufe im Bereich um 40.000 EW

Tabelle A 2 Investitions- und Betriebskosten von PAK-Anlagen im Bereich um 40.000 EW

ARA	BB/ KB A	SB ^B	NACH- REINI- GUNG C	VOLL- /TEIL- STROM ^D	BAUTECH- NIK BPI 2021 IN €	MASCHI- NENTECH- NIK BPI 2021 IN €	EMSR TECHNIK BPI 2021 IN €	NEBEN- KOSTEN BPI 2021 IN €	GESAMT BETRIEBS- KOSTEN IN €/A
Lengerich	BB		KGS	T	1.728.990	3.679.290	815.880	565.140	115.449
Wegberg	BB			T	137.760	1.382.220	808.890		225.626
Geseke	BB		KGS	V	878.970	2.273.700	201.120	307.230	272.954
Geseke	BB		TF	V	578.730	2.497.680	237.180	287.880	283.522
Hörstel	BB		n.s.	V	1.374.720	2.396.310	1.006.050	480.960	149.853
Münster- Hiltrup	BB		TF	V	1.419.000	2.215.290	930.030	466.440	168.640
Stadtlohn	BB		TF	V	758.190	2.129.370	758.250	233.730	101.951
Bad Lip- psprunge	KB	SB	FB Sand	T	137.760	1.382.220	808.890		136.096
Horn-Bad Meinberg	KB		n.s.	T	2.303.970	2.521.950	1.116.390	706.560	264.000
Horn-Bad Meinberg	KB		TF	T	1.865.130	2.393.280	792.300	604.170	230.000
Hörstel	KB	SB	n.s.	T	2.334.240	2.588.130	1.086.570	644.370	149.906
Lengerich	KB	SB	TF	T	1.176.030	3.479.040	777.930	474.780	112.197
Lengerich	KB		TF	T	1.566.000	3.316.320	683.040	507.390	311.079
Münster- Hiltrup	KB	SB	TF	T	2.485.860	2.458.440	1.032.120	651.570	155.971
Ochtrup	KB	SB	FB Mehrs ch.	T	498.630	1.492.710	733.440		92.418
Ochtrup	KB		FB Mehrs ch.	T	74.340	1.091.880	612.480		95.966
Oelde	KB	SB	TF	T	3.144.900	2.640.240	1.114.650	615.990	164.795
Schwalmtal -Amern	KB	SB	TF	T	2.349.270	1.390.500	604.650	406.830	128.419
Stadtlohn	KB	SB	TF	T	1.409.100	2.188.980	758.250	301.080	64.841
Stadtlohn	KB		TF	T	928.530	1.988.490	758.250	242.040	61.942
Stadtlohn	KB		TF	T	979.680	2.302.740	758.250	265.800	66.242

ARA	BB/ KB A	SB ^B	NACH- REINI- GUNG C	VOLL- /TEIL- STROM ^D	BAUTECH- NIK BPI 2021 IN €	MASCHI- NENTECH- NIK BPI 2021 IN €	EMSR TECHNIK BPI 2021 IN €	NEBEN- KOSTEN BPI 2021 IN €	GESAMT BETRIEBS- KOSTEN IN €/A
Wegberg	KB		FB Sand	T	168.360	1.382.220	808.890		201.871
Espelkamp	KB		n.s. Sand	V	409.290	2.112.630	521.730	314.100	73.184
Geseke	KB	SB	KGS	V	1.525.290	2.424.210	392.760	414.570	262.709
Geseke	KB	SB	TF	V	1.281.000	2.672.310	407.940	403.260	267.124

Tabelle A 3 Investitions- und Betriebskosten von GAK-Anlagen im Bereich um 40.000 EW

ARA	GAK FILTER ^A	VOR- FILTER ^B	VOLL- /TEIL- STROM ^C	BAUTECH- NIK BPI 2021 IN €	MASCHI- NENTECH- NIK BPI 2021 IN €	EMSR TECHNIK BPI 2021 IN €	NEBEN- KOSTEN BPI 2021 IN €	GESAMT BETRIEBS- KOSTEN IN €/A
Bad Lip- pspringe	FB	ST	T	692.730	1.706.100	795.840	407.340	118.917
Horn-Bad Meinberg	FB		T	2.131.560	1.415.370	1.080.390	573.450	250.000
Münster- Hiltrup	FB		T	2.090.400	1.887.720	792.420	527.070	174.498
Ochtrup	FB	FB Mehr- ch.	T	682.770	1.126.200	948.960		116.926
Oelde	FB	TF	T	1.697.160	2.960.430	1.055.010	465.630	218.604
Espelkamp	FB		V	227.070	2.202.750	521.730	293.310	53.298
Geseke	FB	KGS	V	1.232.670	1.622.910	390.870	312.450	234.528
Hörstel	FB Druck	TF	T	2.740.230	3.157.470	1.325.490	770.280	158.219
Wegberg	FB Druck		T	4.607.100	4.825.140	1.758.450		197.963
Horn-Bad Meinberg	KG		T	2.492.070	1.260.960	684.240	583.680	214.000
Lengerich	KG	KGS	T	1.250.130	3.161.760	683.040	453.810	177.314
Geseke	KG	KGS	V	1.098.810	1.829.010	398.460	311.790	236.554
Schwalmtal -Amern	n.s.		T	1.093.920	2.053.020	494.730	301.020	149.185

Tabelle A 4 Investitions- und Betriebskosten von Ozon-Anlagen im Bereich um 40.000 EW

ARA	OZON EIN- TRAG ^A	VOR- FILTER ^B	NACH- REINI- GUNG ^C	VOLL- /TEIL- STROM ^D	BAUTECH- NIK BPI 2021 IN €	MASCHI- NENTECH- NIK BPI 2021 IN €	EMSR TECHNIK BPI 2021 IN €	NEBEN- KOSTEN BPI 2021 IN €	GESAMT BETRIEBS- KOSTEN IN €/A
Bad Lip- pspringe	Diff		ST	T	575.070	1.201.830	911.550	245.580	72.196
Horn-Bad Meinberg	Diff		ST	T	2.868.210	1.955.790	720.270	716.790	183.000
Hörstel	Diff		TF	T	1.775.040	2.480.040	1.041.210	549.540	216.321
Münster- Hiltrup	Diff		ST	T	1.240.380	1.202.190	51.030	322.290	140.017
Ochtrup	Diff		FB Mehr- schic- ht	T	420.300	1.653.300	812.850		89.555
Oelde	Diff		Schw B	T	2.615.640	2.764.320	1.431.510	578.850	211.590
Schwalmtal -Amern	Diff	n.s.	BAK	T	1.538.280	3.417.330	604.650	456.600	126.823
Schwalmtal -Amern	Diff	n.s. Sand		T	1.271.910	2.266.440	568.020	340.980	89.316
Stadtlohn	Diff		KGS	T	1.065.540	2.058.660	617.970	253.500	113.648
Wegberg	Diff		FB Sand	T	1.469.370	1.533.000	1.617.780		275.671
Weißen- burg	Inj		KGS (BAK + Sand)	T	1.792.680	3.156.360	1.952.220	793.590	120.763
Espelkamp	Diff + Inj		ST	V	605.520	869.910	782.610	241.080	50.220
Geseke	Diff		KGS	V	949.200	2.265.570	343.410	323.850	185.418

Anhang C Investitions- und Betriebskosten einer 4. Reinigungsstufe im Bereich um 12.000 EW

Tabelle A 5 Investitions- und Betriebskosten von PAK-Anlagen im Bereich um 12.000 EW

ARA	BB/ KB A	SB ^B	NACH- REINI- GUNG C	VOLL- /TEIL- STROM ^D	BAUTECH- NIK BPI 2021 IN €	MASCHI- NENTECH- NIK BPI 2021 IN €	EMSR TECHNIK BPI 2021 IN €	NEBEN- KOSTEN BPI 2021 IN €	GESAMT BETRIEBS- KOSTEN IN €/A
Heiden	BB		TF	T	323.370	947.820	596.460	151.590	35.101
Hopsten	BB		TF	T	743.730	1.996.470	839.310	272.850	81.588
Netphen	BB		FB Sand	T	726.000	785.640	568.680		179.163
Saerbeck	BB		TF	T	410.250	856.320	588.180	155.220	32.561
Horstmar	BB		TF	V	510.870	1.555.470	760.410	233.790	54.814
Langen- berg	BB		KGS	V	504.300	1.671.600	197.580	210.150	105.047
Langen- berg	BB		TF	V	384.090	1.735.530	197.580	199.530	108.608
Osterwick	BB		KGS	V	616.530	1.267.470	754.890	224.370	74.722
Altenberge	KB	SB	KGS	T	732.600	1.622.760	682.410	264.120	76.140
Altenberge	KB		KGS	T	348.150	1.373.520	580.050	187.560	72.900
Barntrup	KB	SB	FXB	T	1.570.800	4.529.640	1.175.280	789.840	8.343
Barntrup	KB	SB	FXB	T	1.333.200	4.331.880	1.175.280	733.680	8.262
Barntrup	KB		FXB	T	1.240.800	4.348.140	1.175.280	720.750	8.019
Heiden	KB	SB	KGS	T	546.150	786.660	689.670	173.190	27.221
Heiden	KB		KGS	T	494.370	744.030	633.750	159.840	25.624
Hopsten	KB	SB	TF	T	1.757.280	2.274.720	956.520	420.000	100.457
Langen- berg	KB	SB	KGS	T	853.170	1.965.960	348.570	287.760	110.266
Langen- berg	KB	SB	TF	T	772.530	2.173.740	348.570	293.760	118.163
Netphen	KB	SB	FB Sand	T	1.880.970	1.435.830	606.600		136.478
Nordwalde	KB	SB	TF	T	1.032.480	1.033.230	578.370	312.540	82.355
Osterwick	KB	SB	KGS	T	1.164.600	1.524.540	810.810	319.620	52.729
Osterwick	KB		KGS	T	811.050	1.315.440	792.180	255.720	50.271
Saerbeck	KB	SB	KGS	T	717.870	889.950	683.040	203.460	26.941

ARA	BB/ KB A	SB ^B	NACH- REINI- GUNG C	VOLL- /TEIL- STROM ^D	BAUTECH- NIK BPI 2021 IN €	MASCHI- NENTECH- NIK BPI 2021 IN €	EMSR TECHNIK BPI 2021 IN €	NEBEN- KOSTEN BPI 2021 IN €	GESAMT BETRIEBS- KOSTEN IN €/A
Saerbeck	KB		KGS	T	643.410	737.010	664.080	180.480	25.043
Südlohn	KB	SB	TF	T	1.211.190	1.900.620	875.760	359.310	125.173
Horstmar	KB	SB	TF	V	1.397.850	1.825.320	833.700	375.330	43.563
Horstmar	KB		TF	V	675.480	1.552.860	815.370	258.210	39.296
Südlohn	KB	SB	TF	V	1.462.740	2.436.720	1.061.550	445.410	148.205

Tabelle A 6 Investitions- und Betriebskosten von GAK-Anlagen im Bereich um 12.000 EW

ARA	GAK FILTER ^A	VOR- FILTER ^B	VOLL- /TEIL- STROM ^C	BAUTECH- NIK BPI 2021 IN €	MASCHI- NENTECH- NIK BPI 2021 IN €	EMSR TECHNIK BPI 2021 IN €	NEBEN- KOSTEN BPI 2021 IN €	GESAMT BETRIEBS- KOSTEN IN €/A
Altenberge	FB		T	849.750	1.499.370	735.510	272.730	93.150
Barntrup	FB	FXB	T	1.437.150	3.949.890	1.175.280	718.860	9.558
Hopsten	FB	n.s.	T	1.852.710	1.916.490	805.290	396.690	92.805
Langen- berg	FB	KGS	T	619.080	1.594.350	383.970	229.620	65.625
Netphen	FB	FB Sand	T	1.072.500	623.100	492.870		147.546
Nordwalde	FB		T	897.300	672.300	329.310	236.850	91.764
Heiden	KG	KGS	T	538.950	627.360	615.120	155.340	65.499
Langen- berg	KG	KGS	T	619.590	1.231.500	372.780	200.160	62.709
Osterwick	KG	KGS	T	869.520	1.309.560	866.730	267.120	128.710
Saerbeck	KG	KGS	T	651.900	566.730	607.170	164.820	50.874
Horstmar	n.s.	KGS	V	817.770	1.722.660	797.040	289.290	77.107

Tabelle A 7 Investitions- und Betriebskosten von Ozon-Anlagen im Bereich um 12.000 EW

ARA	OZON EIN- TRAG ^A	VOR- FILTER B	NACH- REINI- GUNG C	VOLL- /TEIL- STROM D	BAUTECH- NIK BPI 2021 IN €	MASCHI- NENTECH- NIK BPI 2021 IN €	EMSR TECHNIK BPI 2021 IN €	NEBEN- KOSTEN BPI 2021 IN €	GESAMT BETRIEBS- KOSTEN IN €/A
Altenberge	Diff		n.s. Sand	T	569.250	1.907.220	936.420	279.210	79.380

ARA	OZON EIN- TRAG ^A	VOR- FILTER B	NACH REINI- GUNG C	VOLL- /TEIL- STROM D	BAUTECH- NIK BPI 2021 IN €	MASCHI- NENTECH- NIK BPI 2021 IN €	EMSR TECHNIK BPI 2021 IN €	NEBEN- KOSTEN BPI 2021 IN €	GESAMT BETRIEBS- KOSTEN IN €/A
Hopsten	Diff		TF	T	1.554.900	2.172.060	911.130	385.080	103.841
Langen- berg	Diff	TF	ST	T	510.810	2.021.880	300.090	244.710	80.833
Langen- berg	Diff	TF	KGS	T	561.090	1.783.470	300.090	232.320	74.348
Nordwalde	Diff		KGS	T	1.079.100	1.290.810	632.250	349.620	76.943
Südlohn	Diff		KGS	T	899.310	1.985.520	1.289.010	348.840	113.895
Netphen	Inj		FB Sand	T	1.122.000	1.544.190	530.760		132.760
Saerbeck	Inj		KGS	T	716.400	748.410	626.130	188.790	24.613
Horstmar	Inj		KGS	V	964.950	2.065.920	824.550	337.380	42.493

Anhang D Energetische und ökologische Betrachtung von PAK, GAK und Ozonung

Tabelle A 8 Zusammenfassung der energetischen Betrachtung von PAK, GAK und Ozonung von Bolle und Pinnekamp (2015, S. 189)

PAK	10 - 20 g _{PAK} /m ³ behandeltes Abwasser
Energiebedarf auf der Kläranlage	Variante „nachgeschalte Zugabe“: Adsorption: 0,025 – 0,035 kWh _{el} /m ³ (Primärenergie: 0,05 – 0,08 kWh/m ³) (Messwerte) Filtration zum Kohlerückhalt (ggf. bereits vorhanden): 0,01 – 0,05 kWh _{el} /m ³ (Primärenergie: 0,02 – 0,11 kWh/m ³) (Messwert, Literaturangaben)
	Variante „Rezirkulationsbetrieb“: Messwerte: 0,08 kWh _{el} /m ³ (Primärenergie: 0,18 kWh/m ³), hoher Anteil an Pumpenergie
Energiebedarf außerhalb der Kläranlage (keine Betrachtung des Transports der Inputstoffe)	Hoher Input an thermischer Energie zur Aktivierung der Kohle: Primärenergie: 0,36 – 0,72 kWh/m ³ (Berechnungen, mittlere Annahmen) Werte mit hohen Unsicherheiten verbunden Fehlende Möglichkeit der Regeneration/Reaktivierung der PAK
CO ₂ -Emissionen	Hoch da vorwiegend Nutzung thermischer Energie aus fossilen Energieträgern zur Aktivierung der Kohle: 0,15 – 0,24 kg _{CO2} /m ³ (Berechnungen basierend auf mittleren Annahmen) Möglichkeit der Einbindung sekundärer Roh- und Brennstoffe
GAK	10 – 60 g _{GAK} /m ³ behandeltes Abwasser (abhängig von BVT)
Energiebedarf auf der Kläranlage	Geringe Erhöhung des Strombedarfs (Filtration ggf. bereits vorhanden): 0,02 – 0,06 kWh _{el} /m ³ inkl. Filtration (Primärenergie: 0,04 – 0,13 kWh/m ³) (Messwerte)
Energiebedarf außerhalb der Kläranlage (keine Betrachtung des Transports der Inputstoffe)	Frischkohle: Primärenergie 0,36 – 2,15 kWh/m ³ (Berechnung mit mittleren Annahmen) Regenerierte Kohle: Primärenergie 0,17 – 1,01 kWh/m ³ (Berechnungen mit mittleren Annahmen) Deutliche Einsparungen durch Nutzung von regenerierter Kohle
CO ₂ -Emissionen	Frischkohle: 0,26 kg _{CO2} /m ³ (Fallbeispiel) Regenerierte Kohle: 0,19 kg _{CO2} /m ³ (Fallbeispiel) Hoher Input an thermischer Energie aus fossilen Brennstoffen Werte mit großen Unsicherheiten verbunden Möglichkeit der Einbindung sekundärer Roh- und Brennstoffe

Ozonung	2 – 7 g _{O3} /m ³ behandeltes Abwasser
Energiebedarf auf der Kläranlage	Ozonung: Messwerte: 0,04 – 0,17 kWh _{el} /m ³ (Primärenergie: 0,09 – 0,37 kWh/m ³) Energieintensive Ozonerzeugung, zum Teil hoher Anteil an Pumpenergie Nachbehandlung zum Rückhalt/Abbau entstehender Transformationsprodukte erhöhen je nach Verfahren den Strombedarf um 0 – 0,05 kWh _{el} /m ³ (Primärenergie: 0 – 0,11 kWh/m ³ (Literaturwerte)
Energiebedarf außerhalb der Kläranlage (keine Betrachtung des Transports der Inputstoffe)	Strombedarf Sauerstoffbereitstellung: Primärenergie 0,03 – 0,09 kWh/m ³ (Berechnungen basieren auf mittleren Annahmen für 2,5 – 7,5 g _{O3} /m ³)
CO ₂ -Emissionen	Größtenteils durch Strombedarf bedingt: 0,06 – 0,13 kg _{CO2} /m ³ (Berechnungen basieren auf mittleren Annahmen für 2,5 – 7,5 g _{O3} /m ³) Einsparpotential durch Nutzung regenerativer Energien zur Stromerzeugung

Tabelle A 9 CO₂-Emissionen für Ozonung, PAK und GAK von PAK, GAK und Ozonung von Bolle und Pinnekamp (2015, S. 105 ff und 117)

VERFAHREN	SPEZ. CO ₂ -EMISSIONEN	ANMERKUNGEN
Ozon (Berechnung)	0,09 kg _{CO2} /m ³	5 g _{O3} /m ³
PAK (Berechnung)	0,19 kg _{CO2} /m ³	20 g _{PAK} /m ³
GAK (ARA Obere Lutter)	0,19 kg _{CO2e} /m ³	Reaktivat (50 g _{GAK} /m ³), konstante Beschickung
	0,26 kg _{CO2e} /m ³	Frischkohle (38 g _{GAK} /m ³), konstante Beschickung
	0,33 kg _{CO2e} /m ³	Frischkohle (50 g _{GAK} /m ³), dynamische Beschickung