

Kostenschätzung der vierten Reinigungsstufe in Sachsen



Kosten der vierten Reinigungsstufe
für kommunale Kläranlagen
im Bundesland Sachsen –
Abschätzung auf Basis der Anforderungen
von Artikel 8 der Kommunalabwasserrichtlinie

Dr. Tobias Rocktäschel; M. Sc. Pablo Brambila; beide Dr. Born – Dr. Ermel GmbH

im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Veranlassung | 9 |
| 2 | Grundlagen | 10 |
| 2.1 | KARL | 10 |
| 2.2 | Kläranlagenauswahl und Priorisierung | 12 |
| 2.3 | Szenarien der Fertigstellungstermine der vierten Reinigungsstufe | 14 |
| 2.3.1 | Szenario 1 | 14 |
| 2.3.2 | Szenario 2 | 15 |
| 3 | Ausgewählte Verfahren zur Spurenstoffelimination | 17 |
| 3.1 | Ozonung | 17 |
| 3.2 | Adsorptive Verfahren | 18 |
| 3.2.1 | Granulierte Aktivkohle | 19 |
| 3.2.2 | Pulveraktivkohle (PAK) | 20 |
| 3.3 | Kombinationsverfahren Ozonung und GAK-Filter | 22 |
| 4 | Auslegung und Verfahrensauswahl | 24 |
| 4.1 | Größenclusterung | 24 |
| 4.2 | Dimensionierungswassermenge | 24 |
| 4.2.1 | Festlegung der Dimensionierungswassermenge | 25 |
| 4.2.2 | Zusätzlicher Ansatz mit Sicherheitszuschlag der Dimensionierungswassermengen | 26 |
| 4.3 | Verfahrensauswahl | 27 |
| 4.3.1 | Hinweise für die Verfahrensauswahl im konkreten Planungsprozess | 27 |
| 4.3.2 | Verteilung der ausgewählten Verfahren auf die Kläranlagen in Sachsen | 28 |
| 5 | Kosten der vierten Reinigungsstufe | 30 |
| 5.1 | Investitionskosten | 30 |
| 5.1.1 | Szenario 1 | 33 |
| 5.1.2 | Szenario 2 | 34 |
| 5.1.3 | Szenario 1 mit erhöhter Dimensionierungswassermenge | 35 |
| 5.1.4 | Szenario 2 mit erhöhter Dimensionierungswassermenge | 36 |
| 5.2 | Betriebskosten | 37 |
| 5.2.1 | Szenario 1 | 39 |
| 5.2.2 | Szenario 2 | 40 |
| 5.2.3 | Szenario 1 mit erhöhter Dimensionierungswassermenge | 41 |
| 5.2.4 | Szenario 2 mit erhöhter Dimensionierungswassermenge | 42 |
| 5.3 | Finanzierungskosten | 42 |
| 5.3.1 | Szenario 1 | 43 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5.3.2 | Szenario 2..... | 44 |
| 5.3.3 | Szenario 1 mit erhöhter Dimensionierungswassermenge | 45 |
| 5.3.4 | Szenario 2 mit erhöhter Dimensionierungswassermenge | 46 |
| 5.4 | Kumulierte Gesamtkosten | 47 |
| 5.4.1 | Szenario 1..... | 47 |
| 5.4.2 | Szenario 2..... | 48 |
| 5.4.3 | Szenario 1 mit erhöhter Dimensionierungswassermenge | 49 |
| 5.4.4 | Szenario 2 mit erhöhter Dimensionierungswassermenge | 50 |
| 5.5 | Jährliche Gesamtkosten..... | 51 |
| 5.5.1 | Szenario 1..... | 51 |
| 5.5.2 | Szenario 2..... | 52 |
| 5.5.3 | Szenario 1 mit erhöhter Dimensionierungswassermenge | 53 |
| 5.5.4 | Szenario 2 mit erhöhter Dimensionierungswassermenge | 54 |
| 5.6 | Spezifische Kosten..... | 55 |
| 5.7 | Berücksichtigung der erweiterten Herstellerverantwortung | 58 |
| 5.7.1 | Szenario 1..... | 58 |
| 5.7.2 | Szenario 2..... | 60 |
| 6 | Betrachtung weiterer Aspekte | 62 |
| 7 | Zusammenfassung..... | 63 |
| | Anhang..... | 68 |
| A 1 | Kläranlagenliste mit Rangfolge (Szenario 1) | 68 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Szenario 1 der Inbetriebnahmen im Bundesland Sachsen..... | 14 |
| Abbildung 2: Szenario 2 der Inbetriebnahmen im Bundesland Sachsen..... | 15 |
| Abbildung 3: Verfahrensbild Ozonung..... | 18 |
| Abbildung 4: Verfahrensbild GAK-Filter..... | 20 |
| Abbildung 5: Verfahrensbild PAK-Dosierung in die biologische Stufe..... | 21 |
| Abbildung 6: Verfahrensbild PAK-Dosierung vor einen Filter..... | 21 |
| Abbildung 7: Verfahrensbild PAK „Ulmer Verfahren“..... | 22 |
| Abbildung 8: Verfahrensbild Kombinationsverfahren Ozon und GAK-Filtration..... | 23 |
| Abbildung 9: Kumulierte Netto-Investitionskosten Szenario 1..... | 33 |
| Abbildung 10: Kumulierte Netto-Investitionskosten Szenario 2..... | 34 |
| Abbildung 11: Kumulierte Netto-Investitionskosten Szenario 1 mit erhöhter Dimensionierungswassermenge..... | 35 |
| Abbildung 12: Kumulierte Netto-Investitionskosten Szenario 2 mit erhöhter Dimensionierungs- wassermenge..... | 36 |
| Abbildung 13: Kumulierte Netto-Betriebskosten Szenario 1..... | 39 |
| Abbildung 14: Kumulierte Netto-Betriebskosten Szenario 2..... | 40 |
| Abbildung 15: Kumulierte Netto-Betriebskosten Szenario 1 mit erhöhter Dimensionierungs- wassermenge..... | 41 |
| Abbildung 16: Kumulierte Netto-Betriebskosten Szenario 2 mit erhöhter Dimensionierungs- wassermenge..... | 42 |
| Abbildung 17: Kumulierte Netto-Finanzierungskosten Szenario 1..... | 43 |
| Abbildung 18: Kumulierte Netto-Finanzierungskosten Szenario 2..... | 44 |
| Abbildung 19: Kumulierte Netto-Finanzierungskosten Szenario 1 mit erhöhter Dimensionierungs- wassermenge..... | 45 |
| Abbildung 20: Kumulierte Netto-Finanzierungskosten Szenario 2 mit erhöhter Dimensionierungs- wassermenge..... | 46 |
| Abbildung 21: Kumulierte Netto-Gesamtkosten Szenario 1..... | 47 |
| Abbildung 22: Kumulierte Netto-Gesamtkosten Szenario 2..... | 48 |
| Abbildung 23: Kumulierte Netto-Gesamtkosten Szenario 1 mit erhöhter Dimensionierungs- wassermenge..... | 49 |
| Abbildung 24: Kumulierte Netto-Gesamtkosten Szenario 2 mit erhöhter Dimensionierungs- wassermenge..... | 50 |
| Abbildung 25: Jährliche Netto-Gesamtkosten Szenario 1..... | 51 |
| Abbildung 26: Jährliche Netto-Gesamtkosten Szenario 2..... | 52 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 27: Jährliche Netto-Gesamtkosten Szenario 1 mit erhöhter Dimensionierungs- | |
| wassermenge | 53 |
| Abbildung 28: Jährliche Netto-Gesamtkosten Szenario 2 mit erhöhter Dimensionierung- | |
| swassermenge | 54 |
| Abbildung 29: Spezifische Netto-Investitionskosten bezogen auf die behandelte | |
| Abwassermenge..... | 55 |
| Abbildung 30: Spezifische Netto-Betriebskosten bezogen auf die behandelte Abwassermenge | 56 |
| Abbildung 31: Kumulierte Netto-Gesamtkosten Szenario 1 unter Berücksichtigung der | |
| erweiterten Herstellerverantwortung..... | 58 |
| Abbildung 32: Jährliche Netto-Gesamtkosten Szenario 1 unter Berücksichtigung der erweiterten | |
| Herstellerverantwortung..... | 59 |
| Abbildung 33: Kumulierte Netto-Gesamtkosten Szenario 2 unter Berücksichtigung | |
| der erweiterten Herstellerverantwortung | 60 |
| Abbildung 34: Jährliche Netto-Gesamtkosten Szenario 2 unter Berücksichtigung | |
| der erweiterten Herstellerverantwortung | 61 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 1: Fristen für den Ausbau mit einer vierten Reinigungsstufe | 10 |
| Tabelle 2: Liste der Substanzen..... | 11 |
| Tabelle 3: Inbetriebnahmen pro Jahr für die zwei Szenarien im Bundesland Sachsen | 16 |
| Tabelle 4: Unterteilung von Aktivkohle nach dem Durchmesser (DWA, 2021) | 19 |
| Tabelle 5: Übersicht Abbaubarkeit/Entfernbarkeit Substanzen aus der KARL | 23 |
| Tabelle 6: Clusterung der Kläranlagen in Sachsen für den Ausbau der vierten Reinigungsstufe | 24 |
| Tabelle 7: Mittelwerte der Jahresabwassermengen und Dimensionierungswassermengen..... | 26 |
| Tabelle 8: Dimensionierungswassermengen für Varianzanalyse | 27 |
| Tabelle 9: Verteilung der Verfahren zur Spurenstoffelimination | 28 |
| Tabelle 10: Verteilung der Verfahren zur vierten Reinigungsstufe auf die Kläranlagen in Sachsen..... | 29 |
| Tabelle 11: Anteile der Bau-, Maschinen- und EMSR-Technik für die Investitionskosten | 31 |
| Tabelle 12: Projektdauer | 32 |
| Tabelle 13: Ausgangswerte und spezifische Kosten für die Betriebskosten | 38 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-------------------|--|
| AEUV | Vertrag über die Arbeitsweise der Europäischen Union |
| AFS | Abfiltrierbare Stoffe |
| AK | Aktivkohle |
| BVT | Durchgesetzte Bettvolumina (Bed Volume Treated) |
| BW | Baden-Württemberg |
| CO ₂ e | CO ₂ -Äquivalent |
| CSB | Chemischer Sauerstoffbedarf |
| DOC | Gelöster Organischer Kohlenstoff (Dissolved Organic Carbon) |
| DWA | Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. |
| EBCT | Leerbettkontaktzeit eines GAK-Filters (Empty Bed Contact Time) |
| EMSR | Elektro-, Mess-, Steuer- und Regelungstechnik |
| EPR | Erweiterte Herstellerverantwortung (Extended Producer Responsibility) |
| EW | Einwohnerwert |
| FHM | Flockungshilfsmittel |
| FM | Fällmittel |
| GAK | Granulierte Aktivkohle |
| GK | Größenklasse |
| IBN | Inbetriebnahme |
| JAM | Jahresabwassermenge |
| KA | Kläranlage |
| KARL | Richtlinie (EU) 2024/3019 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. November 2024 über die Behandlung von kommunalem Abwasser (Kommunalabwasserrichtlinie) |
| KOM-M.NRW | Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe Nordrhein-Westfalen |

| | |
|----------------|---|
| KomS BW | Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg |
| LfULG | Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie |
| NRW | Nordrhein-Westfalen |
| O ₃ | Ozon |
| PAK | Pulveraktivkohle |
| SF | Sandfilter |
| UBA | Umweltbundesamt |

1 Veranlassung

Am 1. Januar 2025 ist die Richtlinie 2024/3019 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. November 2024 über die Behandlung von kommunalem Abwasser (EU-Kommunalabwasserrichtlinie, im Folgenden KARL genannt) in Kraft getreten. Sie ist von den Mitgliedstaaten bis zum 31. Juli 2027 in nationales Recht umzusetzen.

Artikel 8 Absatz 1 KARL verpflichtet die Mitgliedstaaten, kommunale Abwasserbehandlungsanlagen mit einer Abwasserfracht von 150.000 Einwohnerwerten (EW) und mehr in mehreren Etappen bis zum Jahr 2045 mit einer vierten Reinigungsstufe auszustatten. Gleiches gilt für kommunale Abwasserbehandlungsanlagen, die kommunales Abwasser aus Siedlungsgebieten mit 10.000 EW und mehr einleiten, sofern sie sich in einem der von den Mitgliedstaaten auszuweisenden Gebiete befinden, in denen die Konzentration von Mikroschadstoffen aus Abwasserbehandlungsanlagen ein Risiko für die Umwelt oder die menschliche Gesundheit darstellt (Artikel 8 Absatz 2 und 4 KARL).

Die verpflichtende Einführung der Viertbehandlung soll sicherstellen, dass ein breites Spektrum der nach der Erst-, Zweit- und Drittbehandlung verbliebenen Mikroschadstoffe aus dem kommunalen Abwasser entfernt wird (Erwägungsgrund 18 KARL). Nach dem Stand der Technik stellen derzeit oxidative und adsorptive Verfahren effektive Methoden zur Spurenstoffelimination dar. Die Verfahren können in den Abwasserbehandlungsprozess oder als nachgeschaltete Verfahrensstufen integriert werden (Pinnekamp, et al., 2015).

Zur Vorbereitung der Umsetzung des aufgrund von Artikel 8 KARL zu erlassenden Bundes- und Landeswasserrechtes hat das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) die Dr. Born – Dr. Ermel GmbH beauftragt, eine Kostenschätzung der mit der Einführung der vierten Reinigungsstufe im Freistaat Sachsen verbundenen Investitions-, Betriebs- sowie Finanzierungskosten vorzunehmen.

Die vorliegende detaillierte Kostenanalyse soll eine fundierte Grundlage für rechtliche, fachliche und politische Entscheidungen bieten, um eine effiziente und sozialverträgliche Einführung der vierten Reinigungsstufe zu ermöglichen. Die Kostenschätzung schafft zum einen Klarheit über den erforderlichen Investitionsbedarf. Zum anderen zeigt sie die langfristig zu erwartenden Betriebskosten und Finanzierungskosten. Dies ist entscheidend, um die Akzeptanz der Maßnahmen in der Öffentlichkeit und bei den betroffenen Abwasserbeseitigungspflichtigen (Gemeinden und Abwasserzweckverbände) zu fördern. Zudem können die ermittelten Kosten Hinweise auf das ungefähre Maß der finanziellen Belastung von Bürgern und Wirtschaft geben.

2 Grundlagen

2.1 KARL

Die KARL ersetzt die bisher gültige Richtlinie des Rates vom 21. Mai 1991 über die Behandlung von kommunalem Abwasser (91/271/EWG).

Artikel 8 KARL regelt die stufenweise Einführung einer Viertbehandlung. Danach müssen die Mitgliedstaaten bis zum 31. Dezember 2030 eine Liste der Gebiete erstellen, in denen hohe Konzentrationen von Mikroschadstoffen aus kommunalen Abwasserbehandlungsanlagen eine Gefahr für die Gesundheit und die Umwelt darstellen. Kommunale Kläranlagen in Siedlungsgebieten mit 10.000 EW und mehr, die sich in einem solchen gelisteten Gebiet befinden, sind etappenweise mit einer vierten Reinigungsstufe auszustatten. Unabhängig davon ist der Ausbau mit einer vierten Reinigungsstufe für kommunale Kläranlagen mit 150.000 EW und mehr verpflichtend.

Der etappenweise Ausbau muss bis 2045 abgeschlossen sein. Die gemäß Artikel 8 Absatz 1 und 4 KARL von jedem Mitgliedstaat einzuhaltenden Fristen sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Fristen für den Ausbau mit einer vierten Reinigungsstufe

| Jahr | Prozentsatz bezogen auf Anzahl der Kläranlagen 10.000 bis < 150.000 EW | Prozentsatz bezogen auf Anzahl der Kläranlagen ab 150.000 EW |
|-------------|--|---|
| 2033 | 10% | 20% |
| 2036 | 30% | |
| 2039 | 60% | 60% |
| 2045 | 100% | 100% |

Die Tabelle 3 in Anhang I Teil C KARL beinhaltet die Anforderungen an die Viertbehandlung. Für eine darin aufgelistete Auswahl an organischen Stoffen muss eine Mindesteliminationsleistung von 80 % bezogen auf die Zulaufcharge erzielt werden. Die Liste beinhaltet zwei Kategorien an organischen Stoffen. Unter Kategorie 1 sind acht Spurenstoffe aufgeführt, die sehr leicht zu behandeln sind. Unter Kategorie 2 sind vier Spurenstoffe aufgeführt, die leicht zu entfernen sind.

Gemäß Anhang I Teil C Nr. 2 KARL sind zur Ermittlung der Eliminationsleistung am Ablauf und erforderlichenfalls auch am Zulauf der kommunalen Abwasserbehandlungsanlage abflussproportionale oder zeitproportionale 24-Stunden-Proben zu entnehmen. Wird die Überwachung von Mikroschadstoffen mit zeitproportionalen Proben durchgeführt, müssen es 48-Stunden-Proben sein. Nach Anhang I Teil C Tabelle 3, Anmerkung 1 KARL ist die Konzentration der in nachfolgender Tabelle 2 genannten organischen Stoffe zu messen. Erst auf Grundlage dieser verpflichtenden Messungen ist nach Anhang I Teil C

Tabelle 3, Anmerkung 2 KARL bei Trockenwetterabfluss der Prozentsatz der Elimination für mindestens sechs der insgesamt zwölf in Tabelle 2 aufgeführten Stoffe zu berechnen.

Tabelle 2: Liste der Substanzen¹

| Kategorie | Substanz |
|--|---|
| Kategorie 1 (Stoffe, die sehr leicht zu behandeln sind) | Amisulprid |
| | Carbamazepin |
| | Citalopram |
| | Clarithromycin |
| | Diclofenac |
| | Hydrochlorothiazid |
| | Metoprolol |
| | Venlafaxin |
| Kategorie 2 (Stoffe, die leicht zu entfernen sind) | Benzotriazol |
| | Candesartan |
| | Irbesartan |
| | Gemisch aus 4-Methylbenzotriazol und 5-Methylbenzotriazol |

Artikel 9 KARL verpflichtet die Mitgliedstaaten, bis spätestens 31. Dezember 2028 ein System der erweiterten Herstellerverantwortung (EPR) einzuführen. Hersteller, die Humanarzneimittel und kosmetische Mittel in Verkehr bringen, müssen danach mindestens 80 % der Gesamtkosten der vierten Reinigungsstufe (einschließlich der Investitions- und Betriebskosten) tragen. Damit soll entsprechend dem in Artikel 191 Absatz 2 des Vertrages über die Arbeitsweise der Europäischen Union (AEUV) verankerten Verursacherprinzip sichergestellt werden, dass die Hersteller von Produkten, deren Inhaltsstoffe als Mikroschadstoffe in das kommunale Abwasser gelangen, Verantwortung für die zu ihrer Entfernung erforderliche Behandlung übernehmen (Erwägungsgrund 20 KARL). Ausnahmen sind möglich, wenn der Hersteller nachweisen kann, dass die Menge der in Produkten enthaltenen Stoffe unter einer Tonne pro Jahr liegt oder die im Produkt enthaltenen Stoffe rasch biologisch abbaubar sind oder keine Mikroschadstoffe im Abwasser hinterlassen.

¹ aus Anhang I Teil C Tabelle 3 KARL

2.2 Kläranlagenauswahl und Priorisierung

Grundlage für die Bearbeitung des Projektes ist eine vom LfULG erstellte Kläranlagenliste, in der insgesamt 61 kommunale Kläranlagen im Bundesland Sachsen aufgeführt sind, für welche die Ausrüstung mit einer vierten Reinigungsstufe in Betracht kommt. Darunter sind 58 Kläranlagen mit einer Ausbaugröße ab 10.000 EW und drei Kläranlagen ab 150.000 EW. Die Liste wurde anonymisiert an die Dr. Born – Dr. Ermel GmbH übergeben. Die Größenklasse für jede Kläranlage < 150.000 EW wurde geclustert übergeben, d. h. anhand der genauen Ist-Kapazität kann kein Rückschluss auf die jeweilige Kläranlage und auf ihren „Rang“ in der Priorisierung gezogen werden. Die Kläranlagen 1, 2 und 10 der Liste sind aufgrund ihrer Größenklasse identifizierbar. Es handelt sich dabei um die drei großen sächsischen Kläranlagen.

Die Kläranlagenliste basiert auf einer Ausarbeitung des LfULG vom August 2024, in der eine Abschätzung nach der im Entwurf vorliegenden KARL vorgenommen wurde, wie viele Kläranlagen unter verschiedenen Betrachtungsweisen mit einer vierten Reinigungsstufe ausgerüstet werden müssten. Dabei wurden als Kriterien u. a. die Gewässerbelastung mit Diclofenac und anderen Mikroschadstoffen (aktuelle Messdaten), Bezug zur Trinkwassergewinnung sowie zum Orientierungsrahmen des Spurenstoffdialogs des Bundes verwendet. Die für diese Studie durch das LfULG festgelegte Priorisierung, das heißt die Dringlichkeit und Reihenfolge der Inbetriebnahmen des Ausbaus der insgesamt 61 Kläranlagen mit einer vierten Reinigungsstufe, erfolgte dann wiederum unter Berücksichtigung der Gewässersituation (ökologischer Zustand), Bezug zur Trinkwassergewinnung, Abwasseranteil und verschiedener chemischer Gewässergütekriterien.

Hinweis zur Auswahl und Festlegung auf derzeit 61 Kläranlagen: Es steht fest, dass die drei sächsischen Kläranlagen in Dresden, Leipzig und Chemnitz auf Grund ihrer Kapazität über 150.000 EW mit einer vierten Reinigungsstufe ausgestattet werden müssen. Die 58 Kläranlagen ab 10.000 EW, für welche zunächst die Ausweisung der Risikogebiete nach Artikel 8 Absatz 2 KARL erfolgen muss, sind aktuell eine grobe, eher konservative Abschätzung auf Basis der oben beschriebenen Kriterien. Die Risikobetrachtung nach Artikel 8 Absatz 2 KARL konnte - mangels noch ausstehender deutschlandweiter Methodik - noch nicht durchgeführt werden und kann zu abweichenden Ergebnissen führen. Die Ausgestaltung der Risikobetrachtung soll durch ein REFOPLAN-Forschungsvorhaben, welches beim Umweltbundesamt (UBA) angesiedelt ist, ausgearbeitet werden und wird voraussichtlich erst 2027 feststehen. Danach muss in Sachsen die Risikobetrachtung durchgeführt und die konkret betroffenen Kläranlagen ab 10.000 EW identifiziert werden.

Die vom LfULG für die Bearbeitung der vorliegenden Studie übergebene Liste beinhaltet zu jeder Kläranlage die folgenden Daten:

- Kläranlagenname, anonymisiert
- Rang (Reihenfolge der Inbetriebnahmen, von 1 bis 61)
- Jahresabwassermenge in m³/a (2020, 2022, 2024)
- Ausbaugröße in EW (Ist-Ausbaugröße geclustert in 5.000-EW-Schritten, z. B. 15.000 bis 19.999 EW, 20.000 bis 24.999 EW, 25.000 bis 29.999 EW usw.)

Die Daten entstammen der Kommunalabwasserdatenbank Sachsen (2020, 2022, 2024). Die Daten wurden von den Aufgabenträgern bzw. den unteren Wasserbehörden als Datenerfasser in die Datenbank eingetragen. Als Grundlage zur Berechnung der Dimensionierungswassermenge für die vierte Reinigungsstufe wird der Mittelwert der drei Werte der Jahresabwassermengen der Kommunalabwasserdatenbank 2020, 2022, 2024 zugrunde gelegt. Die Festlegung der Dimensionierungswassermenge wird in Kapitel 4.2 näher beschrieben.

Die Kläranlagenliste mit den Angaben zur Clusterung der Ausbaugröße (EW), Rangfolge und Wassermenge befindet sich im Anhang A 1. Sie enthält als Ergebnis der Studie für jede Kläranlage die Zuordnung zur Größenklassen-Untergruppe, Angaben zum gewählten Verfahren sowie die geschätzten Gesamtinvestitionskosten und Betriebskosten. Für die drei großen sächsischen Kläranlagen entstammen die Informationen zu Ausbaugröße, Dimensionierungswassermenge sowie Investitions- und Betriebskosten den Angaben der Aufgabenträger bzw. Betriebsführer der Kläranlagen.

2.3 Szenarien der Fertigstellungstermine der vierten Reinigungsstufe

Die Festlegung der Fertigstellungstermine geht von der Annahme aus, dass die Verpflichtungen zur Einhaltung der Fristen aus Artikel 8 Absatz 1 und 4 KARL (siehe Tabelle 1) im Rahmen der Umsetzung in Bundesrecht 1:1 auf jedes einzelne Bundesland übertragen werden. In der Folge müsste Sachsen, ebenso wie alle anderen Bundesländer, diese Fristen eigenständig einhalten

2.3.1 Szenario 1

Um die in der KARL festgeschriebenen Fristen und gleichzeitig die Rangfolge gemäß Priorisierungsliste (siehe Anhang A 1) einzuhalten, wurde ein mögliches Szenario zu Inbetriebnahme (IBN)- bzw. Fertigstellungsterminen für die insgesamt 61 Kläranlagen erstellt. Zur Einhaltung der Fristen ist jeweils die Anzahl der fertiggestellten Anlagen maßgebend. Das Szenario 1 ist in Abbildung 1 dargestellt.

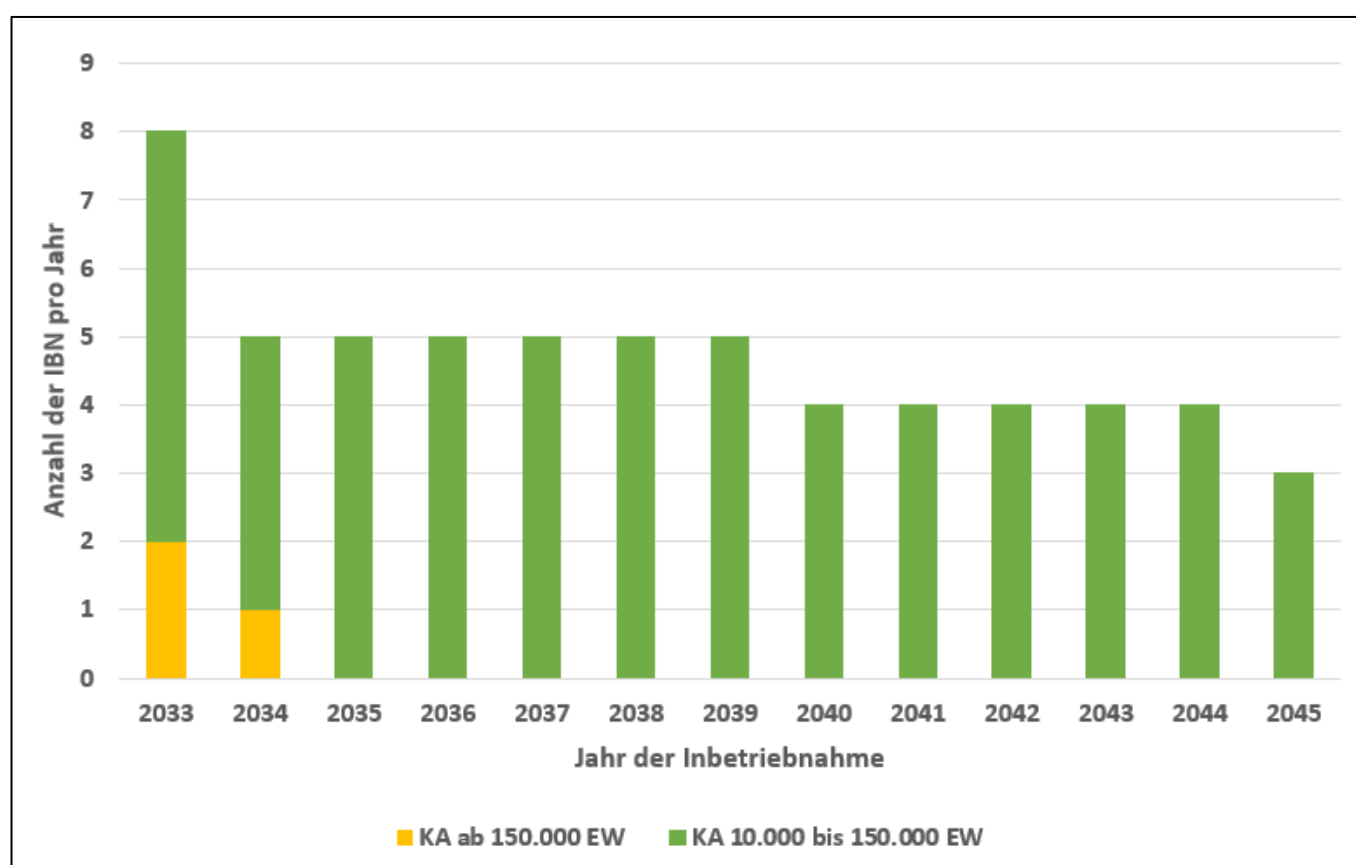


Abbildung 1: Szenario 1 der Inbetriebnahmen im Bundesland Sachsen

2.3.2 Szenario 2

Ein zweites Szenario wurde betrachtet, in welchem die Inbetriebnahmen der drei Kläranlagen ab 150.000 EW besser an die Fristen der KARL angepasst sind (je eine Inbetriebnahme im Jahr 2033, 2039 und 2045).

Das Szenario 2 ist in Abbildung 2 dargestellt.

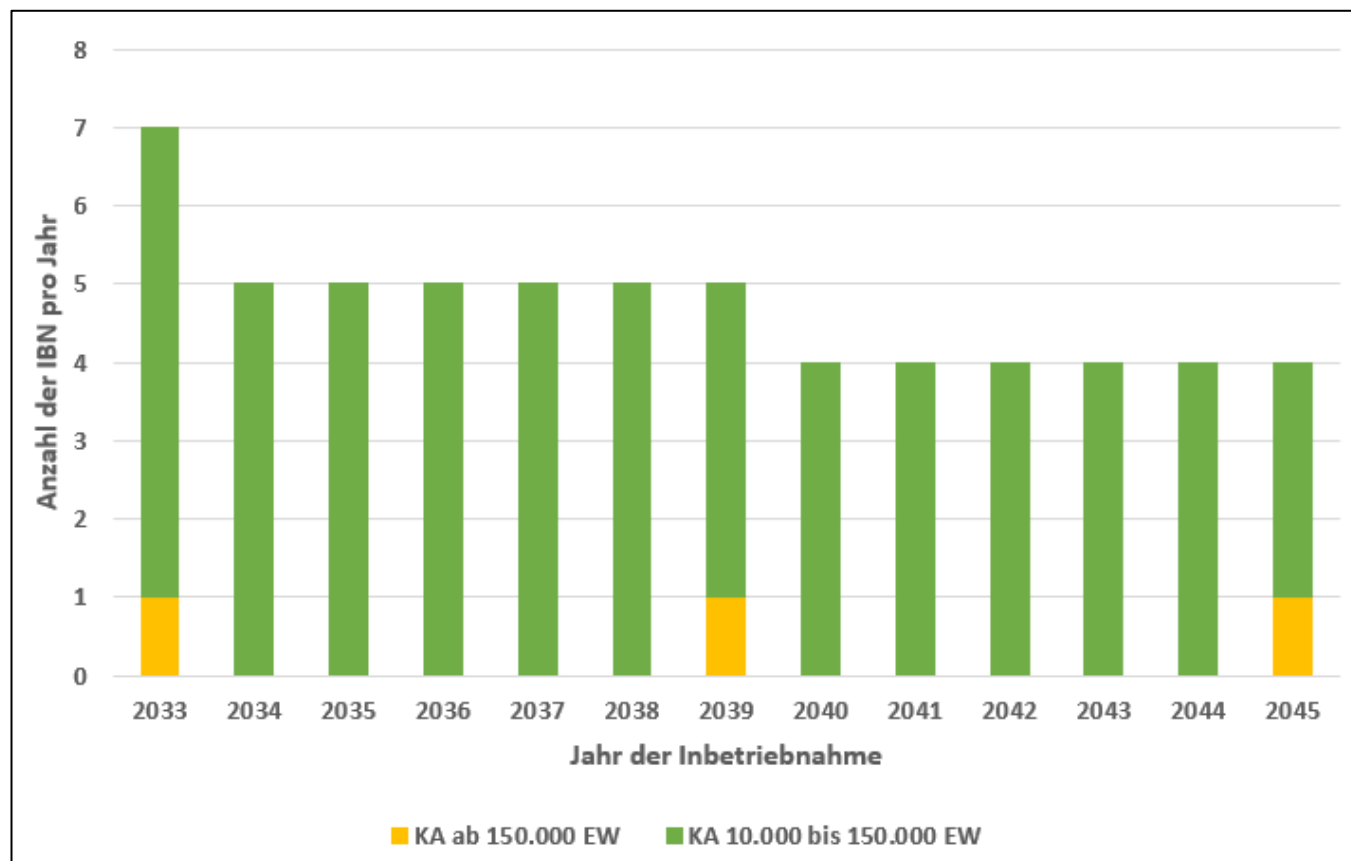


Abbildung 2: Szenario 2 der Inbetriebnahmen im Bundesland Sachsen

Zur Überprüfung der Einhaltung der Fristen wurde die Anzahl der Inbetriebnahmen pro Jahr für die beiden Kläranlagengrößen in Prozent dargestellt und den Fristen aus der KARL gegenübergestellt, siehe Tabelle 3.

Tabelle 3: Inbetriebnahmen pro Jahr für die zwei Szenarien im Bundesland Sachsen

| | Fristen KARL | | Szenario 1 | | Szenario 2 | |
|----------------|--------------------------|------------------|--------------------------|------------------|--------------------------|------------------|
| Inbetriebnahme | KA 10.000 bis 149.999 EW | KA ab 150.000 EW | KA 10.000 bis 149.999 EW | KA ab 150.000 EW | KA 10.000 bis 149.999 EW | KA ab 150.000 EW |
| 2033 | 10 % | 20 % | 10 % (6) | 67 % (2) | 10 % (6) | 33 % (1) |
| 2034 | | | 17 % (4) | 100 % (1) | 19 % (5) | |
| 2035 | | | 26 % (5) | | 28 % (5) | |
| 2036 | 30 % | | 35 % (5) | | 36 % (5) | |
| 2037 | | | 43 % (5) | | 45 % (5) | |
| 2038 | | | 52 % (5) | | 53 % (5) | |
| 2039 | 60 % | 60 % | 60 % (5) | | 60 % (4) | 67 % (1) |
| 2040 | | | 67 % (4) | | 67 % (4) | |
| 2041 | | | 74 % (4) | | 74 % (4) | |
| 2042 | | | 81 % (4) | | 81 % (4) | |
| 2043 | | | 88 % (4) | | 88 % (4) | |
| 2044 | | | 95 % (4) | | 95 % (4) | |
| 2045 | 100 % | 100 % | 100 % (3) | | 100 % (3) | 100 % (1) |

Die Zahlen in Klammern stellen die Anzahl der Kläranlagen dar, die nach den Szenarien 1 und 2 in jedem Jahr in Betrieb gehen.

3 Ausgewählte Verfahren zur Spurenstoffelimination

Die vierte Reinigungsstufe umfasst fortschrittliche Verfahren, die eine umfassende Entfernung von Spurenstoffen gewährleisten. Die folgend aufgeführten Verfahren haben sich bewährt und stellen den Stand der Technik dar (ARGE Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW, 2016). Nach aktuellen Kenntnissen kann davon ausgegangen werden, dass die geforderte Mindesteliminationsrate von 80 % für Spurenstoffe mit den bisher in Deutschland angewandten Verfahren und Auslegungsraten der vierten Reinigungsstufe erzielt werden kann (Prof. Dr. -Ing. Drewes, 2025).

Auf Basis großtechnischer Projekte aus Baden-Württemberg, Nordrhein-Westfalen und der Schweiz (CH) wurde eine Auswahl an Verfahren zur Spurenstoffelimination getroffen. Dabei wird aufgrund der Art der Elimination zwischen oxidativen und adsorptiven Verfahren unterschieden. Die für diese Studie ausgewählten Verfahren werden in diesem Kapitel näher beschrieben.

3.1 Ozonung

Die Ozonung hat sich als oxidatives Verfahren zur Spurenstoffelimination etabliert. Es ist eine effektive Methode, um organische Spurenstoffe aus dem Abwasser zu entfernen. Ozon ist ein starkes Oxidationsmittel, das aufgrund seiner hohen Reaktivität in der Lage ist, komplexe organische Verbindungen zu oxidieren. Dieser Oxidationsprozess führt zur Bildung von Hydroxylradikalen ($\text{OH}\cdot$), die besonders reaktiv sind und organische Schadstoffe angreifen und abbauen können. Durch die Oxidation wird die chemische Struktur der Spurenstoffe so verändert, dass sie leichter biologisch abgebaut und durch nachfolgende Behandlungsstufen entfernt werden können (ARGE Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW, 2016).

Ozonung Hauptverfahrensstufe

Die Ozonung wird nach der biologischen Reinigung in den Abwasserbehandlungsprozess integriert. Nach der Nachklärung fließt das Abwasser in den Ozonreaktor, wo es mit dem Ozon in Kontakt gebracht wird. Der Reaktor ist so konzipiert, dass eine optimale Durchmischung und Kontaktzeit gewährleistet sind, um eine maximale Oxidation der Spurenstoffe zu erreichen. Der Ozonreaktor ist ein geschlossenes, gasdichtes Bauwerk, das in Kammern aufgeteilt ist. Die verschiedenen Kammern dienen einerseits der zuvor beschriebenen Durchmischung, andererseits der Entgasung. In der Entgasungsstufe werden die gasförmigen Reaktionsprodukte und freies Ozon aus dem Wasser entfernt. Dies geschieht durch Belüftung oder andere spezielle Ausgasungseinheiten. Überschussiges Ozon wird durch einen Ozonvernichter entfernt, um sicherzustellen, dass kein Ozon in die Umwelt gelangt (Brückner, 2021).

Die spezifische Ozondosierung kann je nach Abwasserinhaltsstoffen variieren. Mit einer Dosierung im Bereich zwischen $0,7 - 0,9 \text{ g}_{\text{Ozon}}/\text{g}_{\text{DOC}}$ kann für die meisten Spurenstoffe eine Elimination von mindestens 80% erzielt werden. Für die Auslegung einer Ozonungsanlage sollten Versuche zur Ermittlung der Ozonzehrung mit dem Abwasser durchgeführt werden (Abegglen & Siegrist, 2012).

Ozonung Nachbehandlungsstufe

Da Ozon nicht nur mit den Spurenstoffen reagiert, kann es durch Oxidation anderer Substanzen zur Bildung von Nebenprodukten kommen. Um diese aus dem Abwasser zu entfernen, wird das ozonierte Abwasser einer biologisch aktiven Nachbehandlung zugeführt, bevor es in den Vorfluter eingeleitet wird. Die Nachbehandlung kann beispielsweise in Form einer Sandfiltration realisiert werden. Das Verfahrensbild für die Ozonung ist in Abbildung 3 dargestellt.

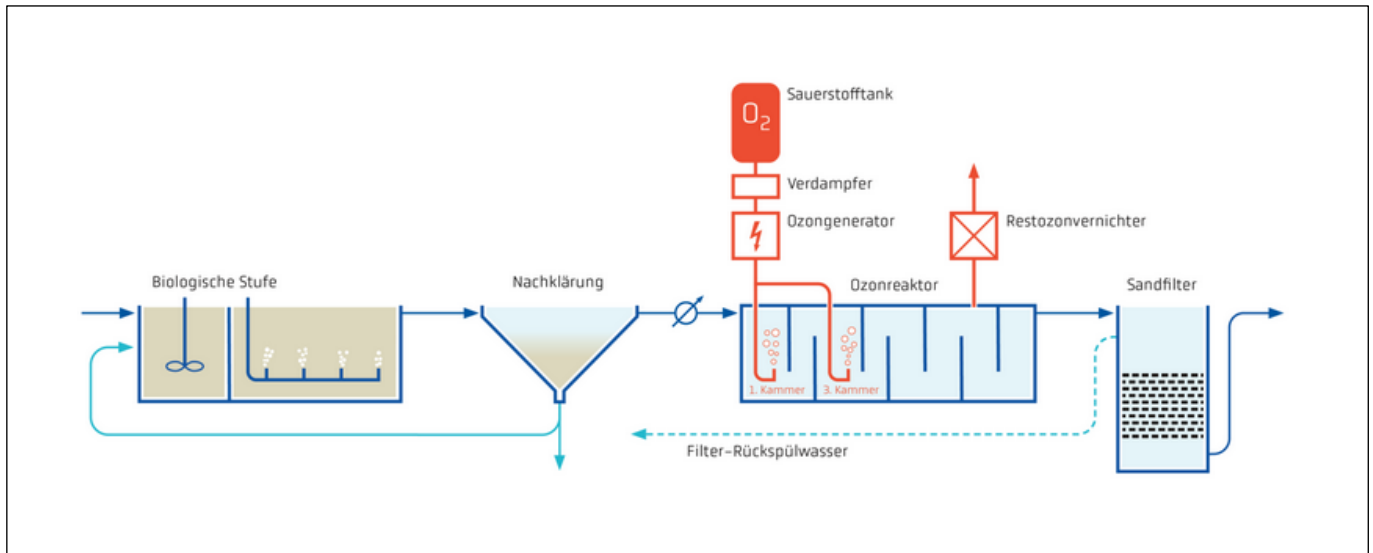


Abbildung 3: Verfahrensbild Ozonung
(VSA Plattform Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen, 2025a)

3.2 Adsorptive Verfahren

Adsorptive Verfahren stellen neben den oxidativen Verfahren eine effektive Behandlungsstufe zur Entfernung von Spurenstoffen aus Abwasser dar. Die Anwendung von Aktivkohle hat sich dabei als geeignet erwiesen.

Als Ausgangsmaterial für die Herstellung von Aktivkohle dienen Steinkohle, Braunkohle, Kokosnussschalen sowie Holz. Durch die thermische Aktivierung von Aktivkohle bei ca. 800° C erhält diese eine hochporöse Oberfläche. Die spezifische Porenfläche von Aktivkohle liegt im Bereich von 500 bis 1.500 m²/g (DWA, 2021). Diese Porenfläche steht der Adsorption von Mikroschadstoffen zur Verfügung. Je nach Korngröße wird zwischen Pulveraktivkohle und granulierter Aktivkohle unterschieden. Die Korndurchmesser sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4: Unterteilung von Aktivkohle nach dem Durchmesser (DWA, 2021)

| Aktivkohle | Korngröße |
|------------------------|---------------------|
| Pulveraktivkohle | 0,005 mm bis 0,1 mm |
| Granulierte Aktivkohle | 0,6 mm bis 2,4 mm |

Die Verfahrenstechniken für den Einsatz von PAK und GAK unterscheiden sich. GAK dient vorwiegend als Filtermaterial in offenen und geschlossenen Raumfiltern, während PAK direkt in das Becken dosiert wird und dort unmittelbar mit dem Abwasser in Kontakt kommt.

Die Adsorbierbarkeit von organischen Spurenstoffen an die Aktivkohle wird stark vom Gehalt des Abwassers an Gelöstem Organischen Kohlenstoff (Dissolved Organic Carbon, DOC) beeinflusst. Damit Aktivkohle optimal ausgenutzt werden kann, müssen daher die vorherigen Behandlungsstufen in der Kläranlage eine sehr gute Reinigungsleistung bringen.

3.2.1 Granulierte Aktivkohle

Granulierte Aktivkohle Filter werden nach der biologischen Stufe integriert. Bei einer hohen Feststoffbelastung im Ablauf der Nachklärung kann optional vor dem GAK-Filter eine Vorbehandlungsstufe geplant werden. Diese kann als eine Raum- oder Flächenfiltration ausgeführt werden. Der zusätzliche Rückhalt von Partikeln in der vorgeschalteten Filterstufe reduziert die Belastung des GAK-Filters und ermöglicht dadurch längere Betriebszeiten zwischen den erforderlichen Spülzyklen. Ein Vorteil dieses Verfahrens hinsichtlich der Integration in eine bestehende Kläranlage kann sein, dass eine vorhandene Filtrationsanlage in vielen Fällen zu einem GAK-Filter umgerüstet werden kann (Benstöm, 2017).

Die Bemessung eines GAK-Filters kann anhand der hydraulischen Filterkontaktzeit (engl. „empty bed contact time“ EBCT) oder über eine definierte Filtergeschwindigkeit erfolgen. In den DWA-Arbeits- und Merkblättern DWA-M 285-2 und DWA-A 203 finden sich Orientierungswerte für die Bemessung und weitere wichtige Aspekte, die bei der Planung zu berücksichtigen sind. Zudem sollten Versuche mit dem zu behandelnden Abwasser durchgeführt werden, um die Mikroschadstoffe in dem Abwasser zu charakterisieren und somit einen bedarfsgerechten Einsatz von GAK zu wählen.

Die Adsorptionskapazität von GAK nimmt mit zunehmender Betriebszeit des Filters ab. Sie wird durch eine sogenannte Durchbruchskurve sichtbar. Diese zeigt eine mit der Betriebszeit des GAK-Filters ansteigende Konzentration der Spurenstoffe im Ablauf. Um eine kontinuierlich hohe Eliminationsleistung sicherzustellen, muss die GAK daher regelmäßig ausgetauscht werden. Der Austausch erfolgt nach dem Erreichen eines bestimmten im Filter durchgesetzten Bettvolumens. Bettvolumen bezeichnet das Volumen des durchgesetzten Wasservolumens zum Volumen der Aktivkohle im Filter und wird in der Einheit m^3 Abwasser pro m^3 GAK angegeben. Das Bettvolumen dient zur Beschreibung der zeitlichen Auslastung und Reinigungsleistung eines GAK-Filters (Benstöm, 2017).

Das Verfahrensbild für die GAK-Filtration ist in Abbildung 4 dargestellt.

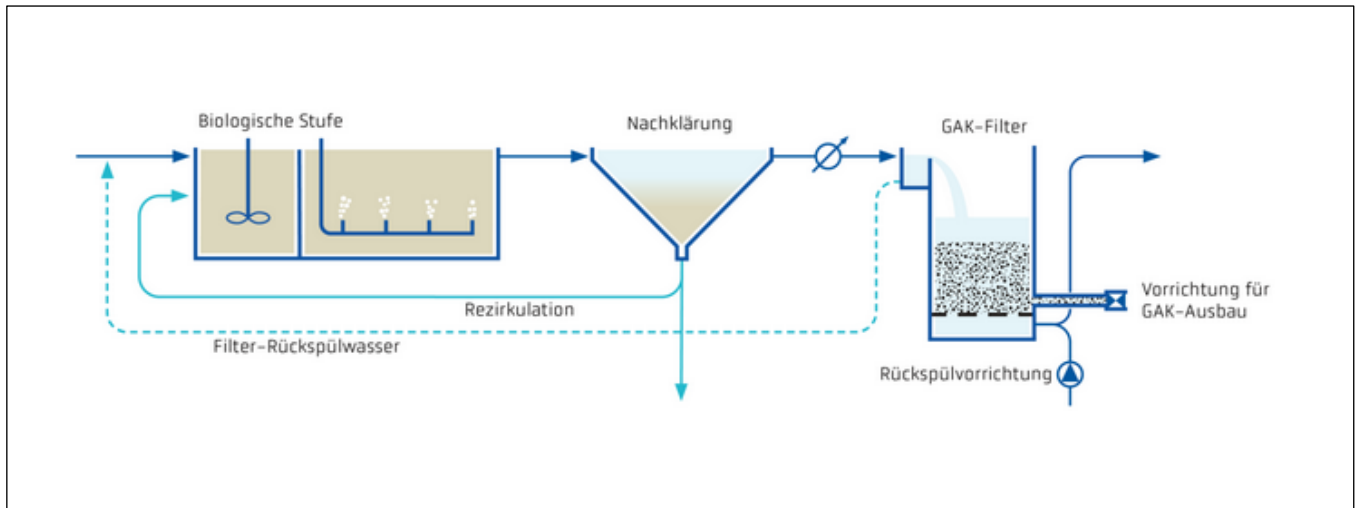


Abbildung 4: Verfahrensbild GAK-Filter
(VSA Plattform Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen, 2025b)

3.2.2 Pulveraktivkohle (PAK)

Pulveraktivkohle wird dem Abwasser direkt zugegeben und adsorbiert die Spurenstoffe während des Kontakts. Prinzipiell kann PAK an verschiedenen Stellen der Kläranlage eingesetzt werden. Das DWA-M 285-2 beschreibt drei verschiedene Dosierstellen für Pulveraktivkohle: Dosierung vor einen Filter, Dosierung in die biologische Stufe und Dosierung in einer separaten Adsorptionsstufe. Ein Vorteil von Pulveraktivkohle ist die bedarfsgerechte, belastungsabhängige Dosierung (DWA, 2021).

Die Bemessung der Kontaktstufe erfolgt mithilfe der erforderlichen Kontaktzeit des Abwassers mit der Pulveraktivkohle.

Dosierung von Pulveraktivkohle in die biologische Stufe

Bei der Dosierung von Pulveraktivkohle in die biologische Stufe handelt es sich um ein einstufiges Verfahren. Die Nachklärung dient als Rückhalt für die PAK. Um einen sicheren Rückhalt der PAK zu gewährleisten, wird der Nachklärung eine Filtrationsanlage nachgeschaltet. Da die PAK in den Belebtschlamm eingebunden wird, besteht bei diesem Verfahren keine Entkopplung der Verweilzeit von PAK von der Aufenthaltszeit des Abwassers in der biologischen Stufe. Die PAK wird mit dem Überschussschlamm abgetrennt. Abbildung 5 zeigt das Verfahrensbild.

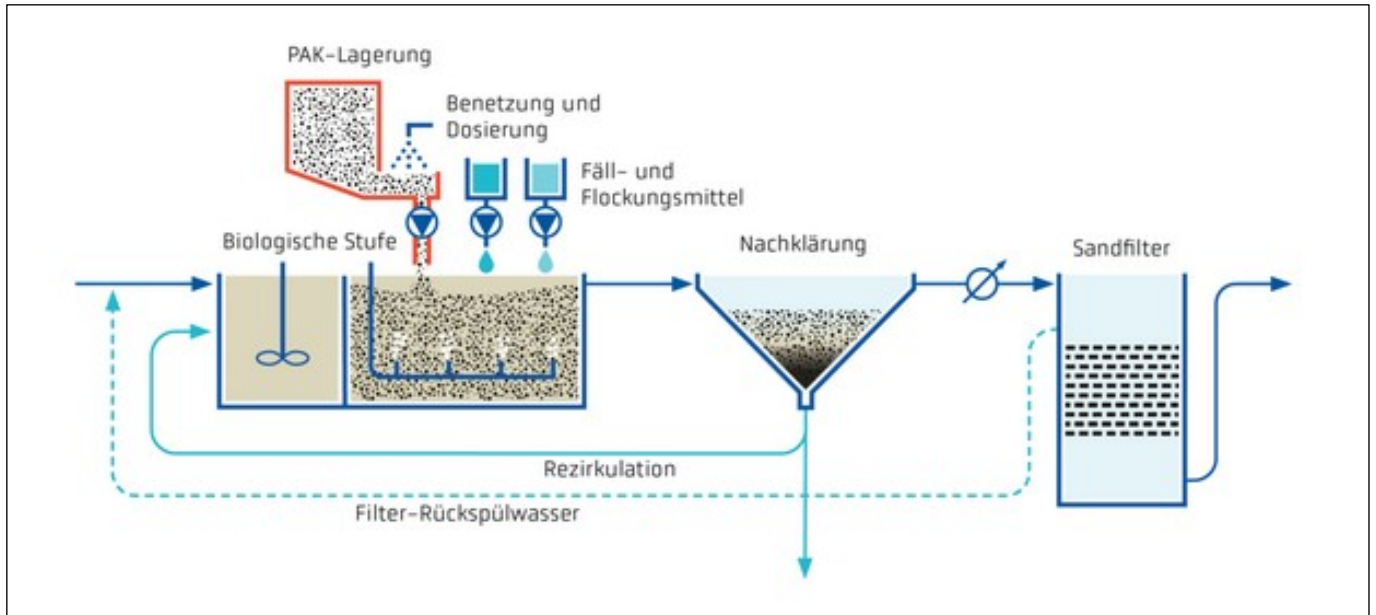


Abbildung 5: Verfahrensbild PAK-Dosierung in die biologische Stufe
(VSA Plattform Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen, 2025c)

Dosierung von Pulveraktivkohle vor einen Filter

Die Dosierung von Pulveraktivkohle erfolgt nach der biologischen Stufe in ein separates Misch- und Kontaktbecken. Die Abtrennung der Pulveraktivkohle erfolgt in einer nachgeschalteten Filtrationsstufe. Es handelt sich um ein zweistufiges Verfahren. Die Überschussskohle wird in die biologische Stufe zurückgeführt bzw. (dis)kontinuierlich aus dem System entnommen. Das Verfahrensbild ist in Abbildung 6 dargestellt.

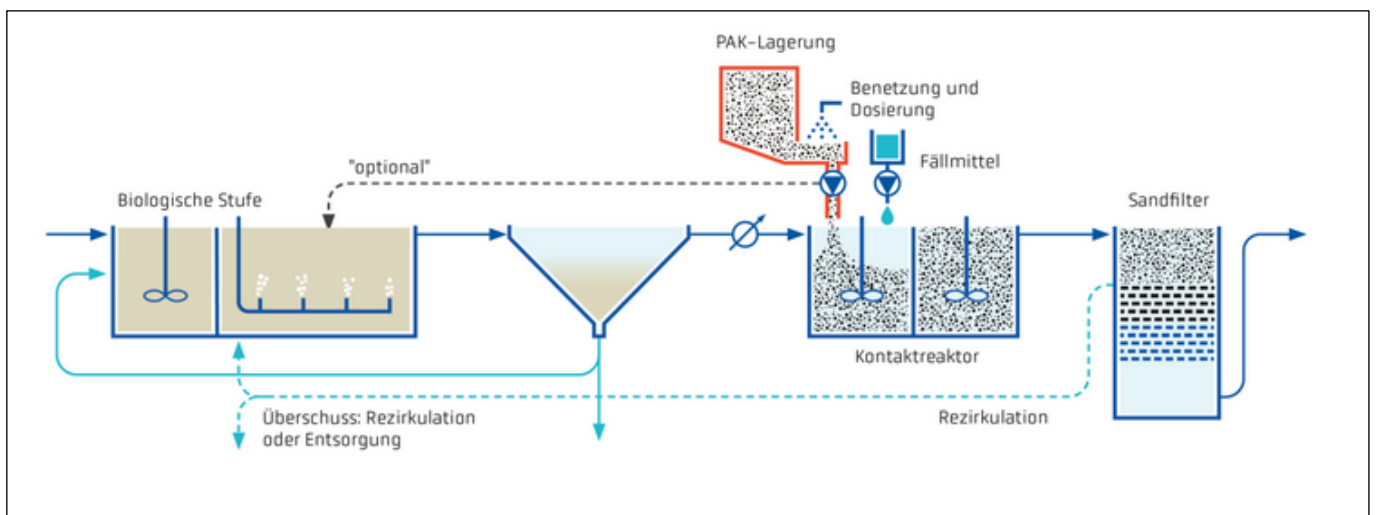


Abbildung 6: Verfahrensbild PAK-Dosierung vor einen Filter
(VSA Plattform Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen, 2025c)

„Ulmer Verfahren“ - Dosierung von Pulveraktivkohle in eine nachgeschaltete Stufe

Das Ulmer Verfahren wurde 2003 erstmals zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Steinhäule in Neu-Ulm in Betrieb genommen. Nach der Nachklärung fließt das Abwasser in ein Misch- und Kontaktbecken. In diesem findet die PAK-Dosierung statt. Zusätzlich werden in der Adsorptionsstufe Fällmittel und polymere Flockungsmittel zudosiert, um die Adsorption zu unterstützen. Anschließend fließt das Abwasser in ein Sedimentationsbecken. Der Aktivkohleschlamm aus dem Sedimentationsbecken wird in das Adsorptionsbecken zurückgeführt. Die Überschusskohle wird der biologischen Stufe zugeführt bzw. (dis)kontinuierlich aus dem System entnommen. In der biologischen Stufe findet eine weitere Beladung der Aktivkohle statt. Bei diesem Verfahren handelt es sich um ein zweistufiges Verfahren. Abschließend erfolgt der Rückhalt der beladenen PAK in einer Filtrationsstufe. Ein Nachteil des Ulmer Verfahrens ist der sehr große Platzbedarf, der durch die Verfahrensstufen und dazugehörigen Becken entsteht. Durch die Rückführung der Pulveraktivkohle in die biologische Stufe wird diese in die Schlammflocken eingebunden, was zu einer Erhöhung des Feststoffgehalts führt (Krahnstöver, 2019). Das Verfahrensbild für das Ulmer Verfahren ist in Abbildung 7 dargestellt.

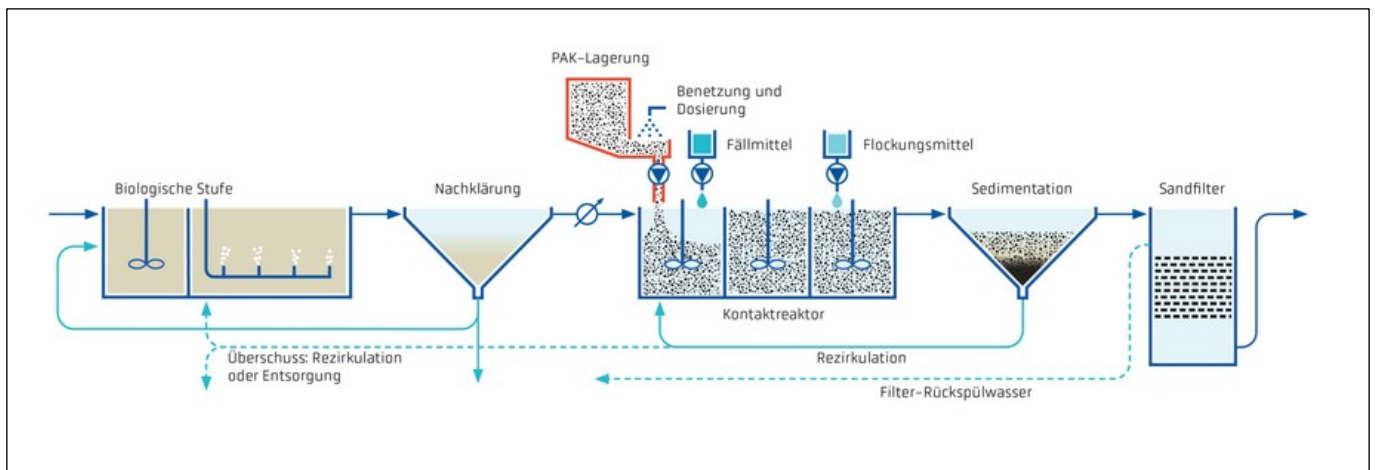


Abbildung 7: Verfahrensbild PAK „Ulmer Verfahren“
(VSA Plattform Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen, 2025c)

3.3 Kombinationsverfahren Ozonung und GAK-Filter

Neben den Einzelverfahren stellt das Kombinationsverfahren aus Ozonung und Filtration mit granulierter Aktivkohle eine weitere effektive Methode zur Spurenstoffelimination dar. Diese Verfahrenskombination nutzt die Vorteile der Ozonung und der Adsorption durch Aktivkohle, um eine maximale Reinigungsleistung zu erzielen und eine größere Anzahl an Substanzen zu eliminieren. Beim Kombinationsverfahren wird kein zusätzlicher Sandfilter benötigt, da der GAK-Filter die Funktion der Elimination der bei der Ozonung entstehenden Transformationsprodukte mit übernimmt.

Nach der biologischen Reinigungsstufe fließt das Abwasser in den Ozonreaktor. Nach der Ozonung wird das Abwasser in den GAK-Filter geleitet. Die verbleibenden Spurenstoffe sowie die Transformationsprodukte, die während der Ozonung entstanden sind, adsorbieren an der Oberfläche des Aktivkohlefilters.

Das Verfahrensbild ist in Abbildung 8 dargestellt.

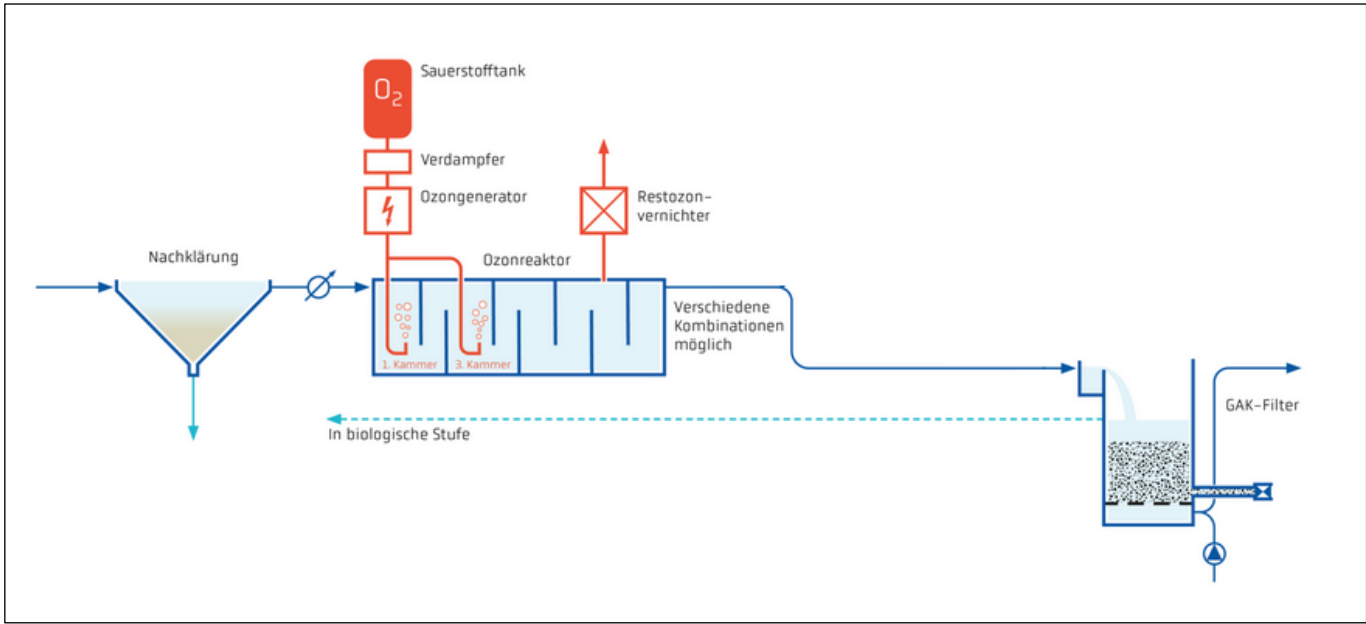


Abbildung 8: Verfahrensbild Kombinationsverfahren Ozon und GAK-Filtration (VSA Plattform Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen, 2025d, verändert)

Die beiden Merkblätter DWA-M 285-2 und DWA-M 285-3 bieten einen Überblick über die Abbaubarkeit bzw. Entfernbarekeit der relevanten Mikroschadstoffe. Diese Übersicht ist für die in der KARL aufgeführten Substanzen in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Übersicht Abbaubarkeit/Entfernbarekeit Substanzen aus der KARL

| Kategorie | Substanz | Adsorptive Verfahren | Oxidative Verfahren |
|-------------|--|----------------------|---------------------|
| Kategorie 1 | Amisulprid | Sehr gut / gut | Sehr gut |
| | Carbamazepin | Sehr gut / gut | Sehr gut |
| | Citalopram | Sehr gut / gut | Sehr gut |
| | Clarithromycin | Sehr gut / gut | Sehr gut |
| | Diclofenac | Sehr gut / gut | Sehr gut |
| | Hydrochlorothiazid | Sehr gut / gut | Gut |
| | Metoprolol | Sehr gut / gut | Gut |
| | Venlafaxin | Sehr gut / gut | Sehr gut |
| Kategorie 2 | Benzotriazol | Sehr gut / gut | Mäßig |
| | Candesartan | Mittel / mäßig | Mäßig |
| | Irbesartan | Sehr gut / gut | Mäßig |
| | Gemisch aus 4-Methylbenzotriazol und 5-Methylbenzontriazol | Sehr gut / gut | Mäßig |

4 Auslegung und Verfahrensauswahl

Die Verfahrensstufe zur Spurenstoffelimination wird nach der erforderlichen Reinigungsleistung bemessen. Um die gewählte Reinigungsleistung zu erzielen, bieten sich grundsätzlich die zwei Möglichkeiten, die Anlage auf Vollstrom oder auf einen Teilstrom auszulegen. In diesem Kapitel werden die einzelnen Aspekte der Auslegung näher erläutert.

4.1 Größenclassierung

Für die Festlegung der Dimensionierungswassermenge und Abschätzung der Kosten wurden die 61 Kläranlagen in die folgenden Untergruppen nach Ausbaugrößen zusammengefasst. Die Bildung der Untergruppen ermöglicht eine differenziertere Darstellung der Kosten für die jeweiligen Ausbaugrößen. Die Clusterung ist in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Clusterung der Kläranlagen in Sachsen für den Ausbau der vierten Reinigungsstufe

| Untergruppe | Einwohnerwerte (EW) | Anzahl KA in Sachsen für die 4. RS |
|-------------|---------------------|------------------------------------|
| 4A | 10.000 – 19.999 | 16 |
| 4B | 20.000 – 49.999 | 26 |
| 4C | 50.000 – 99.999 | 10 |
| 5A | 100.000 – 149.999 | 6 |
| 5B | 150.000 – 499.999 | 1 |
| 5C | Ab 500.000 | 2 |

4.2 Dimensionierungswassermenge

Bei der Auslegung der vierten Reinigungsstufe ist die Ermittlung einer geeigneten Dimensionierungswassermenge ein zentraler Planungsschritt. Sie bildet die Grundlage für die Auslegung verfahrenstechnischer Komponenten und beeinflusst die Investitions- und Betriebskosten maßgeblich (VSA; Hunziker Betatech AG, 2024). Es gibt aktuell in Deutschland keine Vorschriften für die Wahl der Dimensionierungswassermenge für die Verfahrensstufe zur vierten Reinigungsstufe.

Die Festlegung der Dimensionierungswassermenge richtet sich nach der erforderlichen Reinigungsleistung der Stufe zur Spurenstoffelimination. Nach Prüfung verschiedener Kriterien kann eine Teilstrom- oder eine Vollstrombehandlung erforderlich sein. Bei einer Teilstrombehandlung ist das Jahresmittel des maximalen stündlichen Trockenwetterzufluss $Q_{T,h,max}$ zugrunde zu legen. Eine Vollstrombehandlung wird dagegen für den Mischwasserzufluss Q_M bemessen (ARGE Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW, 2016).

In den Planungsleitlinien des Kompetenzzentrums für Spurenstoffe Baden-Württemberg (KomS-BW) und des Kompetenzzentrums Mikroschadstoffe Nordrhein-Westfalen (KOM-M.NRW) sind Erläuterungen zur Auslegung einer Spurenstoffeliminationsstufe zu finden. Es ist zu empfehlen, den gesamten Planungsprozess einschließlich der Festlegung der Dimensionierungswassermenge mit der zuständigen Genehmigungsbehörde abzustimmen.

Die Vorgehensweisen des KomS-BW und des KOM-M.NRW werden nachfolgend näher betrachtet.

Kompetenzzentrum Baden-Württemberg

Zur Festlegung der Dimensionierungswassermenge unterscheidet das KomS-BW zwischen Misch- und Trennsystemen. Während bei Mischsystemen eine Teilstrombehandlung geplant werden kann, ist bei vorwiegend Trennsystemen eine Vollstrombehandlung zu wählen.

Bei einer Teilstrombehandlung sind mindestens der maximale Trockenwetterzufluss und mindestens 70% der Jahresabwassermenge zu behandeln. Gleichzeitig soll die Behandlungswassermenge 90% der Jahresabwassermenge nicht überschreiten.

Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe Nordrhein-Westfalen

Das KOM-M.NRW unterscheidet zwischen einem emissions- und immissionsbasierten Ansatz. Beim emissionsbasierten Ansatz wird ein Reinigungsziel von 80 % für ausgewählte Spurenstoffe verfolgt. In diesem Fall ist die vierte Reinigungsstufe mindestens für die Jahresschmutzwassermenge auszulegen.

Der immissionsbasierte Ansatz ist zu wählen, wenn das Gewässer, in das eingeleitet wird, besondere sensible Eigenschaften oder Nutzungen aufweist oder zur Trinkwassergewinnung genutzt wird. Im Fall einer Auslegung nach dem immissionsbasierten Ansatz kann eine Vollstrombehandlung erforderlich sein.

4.2.1 Festlegung der Dimensionierungswassermenge

Da es sich nicht um eine konkrete Anlagenbetrachtung für jede einzelne Kläranlage handelt, weicht die Festlegung der Dimensionierungswassermenge für diese Studie von den Ansätzen der Kompetenzzentren ab. Die Dimensionierungswassermenge wird jeweils für die in Tabelle 6 aufgeführten Größenklassen-Untergruppen entsprechend der nachfolgend beschriebenen Vorgehensweise festgelegt.

Im ersten Schritt wurden für die sechs Untergruppen jeweils Bemessungstabellen für die vier ausgewählten Verfahren zur Spurenstoffelimination erstellt. Als Eingangsparameter für die Bemessung dienen die stündlichen Mittelwerte der Jahresabwassermenge. Zunächst wurde für jede Kläranlage der arithmetische Mittelwert der Jahresabwassermenge aus den Jahren 2020, 2022 und 2024 gebildet. Aus den Mittelwerten jeder Kläranlage wurden für die Untergruppen Mittelwerte gebildet (für die Kläranlagen Nr. 14 und 28 aus der Priorisierungsliste liegen nur zwei Jahreswerte vor). Die mittleren stündlichen

Zuflüsse und die Mittelwerte der Jahresabwassermenge für die sechs Untergruppen sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Die mittleren stündlichen Zuflüsse bilden die Dimensionierungswassermenge.

Tabelle 7: Mittelwerte der Jahresabwassermengen und Dimensionierungswassermengen

| Untergruppe | Einwohnerwerte (EW) | Arithmetischer Mittelwert JAM (m^3/a) | Dimensionierungswassermenge (m^3/h) |
|-------------|---------------------|---|---|
| 4A | 10.000 – 19.999 | 1.002.669 | 114 |
| 4B | 20.000 – 49.999 | 1.602.005 | 183 |
| 4C | 50.000 – 99.999 | 4.869.976 | 556 |
| 5A | 100.000 – 149.999 | 6.712.947 | 766 |
| 5B | 150.000 – 499.999 | 29.261.231 | 3.340 |
| 5C | Ab 500.000 | 49.994.738 | 5.707 |

4.2.2 Zusätzlicher Ansatz mit Sicherheitszuschlag der Dimensionierungswassermengen

Um die Varianz dieses wichtigen Bemessungsparameters zu berücksichtigen und den Einfluss auf die Investitions-, Betriebs- und Finanzierungskosten abzuschätzen, wurden die Dimensionierungswassermengen um einen Sicherheitszuschlag erhöht. Die Sicherheitszuschläge wurden in Anlehnung an die Ermittlung des maximalen stündlichen Trockenwetterabflusses ($Q_{T,h,max}$) nach dem ATV-DVWK-A 198 definiert. Für dessen Ermittlung wird der Faktor $X_{Q_{max}}$ zugrunde gelegt. Für kleinere Siedlungsgebiete kann der Schmutzwasserabfluss im Jahresmittel ($Q_{S,aM}$) um bis zu 100 % ansteigen. In Städten mit mehr als 100.000 EW erhöht sich der $Q_{S,aM}$ um bis zu 50 %. Für diese Studie wurden, um den Einfluss einer höheren Dimensionierungswassermenge auf die Investitions- und Betriebskosten zu untersuchen, die ursprünglich ermittelten Werte aus Tabelle 7 für die Untergruppen 4A bis 4C um $\approx 30\%$ und für die Untergruppen 5A bis 5C um $\approx 20\%$ erhöht. Die so ermittelte Dimensionierungswassermenge für jede Untergruppe ist in Tabelle 8 dargestellt.

Hinweis: für die drei großen sächsischen Kläranlagen wurden im Nachhinein konkrete Bemessungswerte und Planungskosten übergeben, so dass die Festlegungen für die Untergruppen 5B und 5C laut Tabelle 7 und Tabelle 8 nicht mehr relevant sind.

Tabelle 8: Dimensionierungswassermengen für Varianzanalyse

| Untergruppe | Einwohnerwerte (EW) | Dimensionierungswassermenge mit Sicherheitszuschlag (m ³ /h) |
|-------------|---------------------|---|
| 4A | 10.000 – 19.999 | 150 |
| 4B | 20.000 – 49.999 | 238 |
| 4C | 50.000 – 99.999 | 723 |
| 5A | 100.000 – 149.999 | 920 |
| 5B | 150.000 – 499.999 | 4.008 |
| 5C | Ab 500.000 | 6.850 |

4.3 Verfahrensauswahl

4.3.1 Hinweise für die Verfahrensauswahl im konkreten Planungsprozess

Bei der Auswahl eines geeigneten Verfahrens für die jeweilige Kläranlage sind in der Projektbearbeitung technische, wirtschaftliche und standortspezifische Kriterien zu berücksichtigen. Dazu zählen u. a. die Ausstattung der Bestandsanlage, das Platzangebot für die zu errichtenden Anlagen, die Notwendigkeit von Pumpwerken (Hydraulik), Konzentrationen der Abwasserinhaltsstoffe und die erzielbaren Eliminationsraten, die im Einzelfall zu prüfen sind. Ziel ist es, das Verfahren zu identifizieren, das eine wirksame und sichere Elimination der relevanten Spurenstoffe gewährleistet und sich gleichzeitig möglichst ressourcenschonend und wirtschaftlich vertretbar in die bestehende Anlagenstruktur integrieren lässt. Ein zentrales Kriterium ist die Reinigungsleistung gegenüber einer definierten Auswahl an Spurenstoffen. Auch die Notwendigkeit einer Verbesserung der Reinigungsleistung hinsichtlich anderer Parameter wie CSB, AFS oder Stickstoff kann eine Rolle spielen. Wesentliche Kriterien sind zudem die Betriebssicherheit und Flexibilität gegenüber hydraulischen und stofflichen Schwankungen, der Platzbedarf sowie Personalbedarf, Energie-, Chemikalien- und Ressourcenverbrauch. Ein weiteres Kriterium für die Auswahl ist, inwieweit ein Verfahren mit bestehenden Anlagenteilen kombinierbar ist, um tiefgreifende Anpassungen der Bestandsanlage weitestgehend zu vermeiden (ARGE Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW, 2016).

Ein weiterer zentraler Aspekt betrifft die Bewertung potenzieller Nebenprodukte oder Reaktionsrückstände, die im Zuge der Hauptverfahrensstufe zur Spurenstoffelimination entstehen können. Diese müssen gegebenenfalls durch zusätzliche Verfahrensstufen, wie in Kapitel 3 beschrieben, sicher zurückgehalten werden. Eine sorgfältige Betrachtung der Umwelt- und Gesundheitsverträglichkeit solcher Abbauprodukte ist daher fester Bestandteil des Auswahlprozesses.

Vor einer Entscheidung sind Variantenuntersuchungen, Pilotversuche, die zu erfüllenden Genehmigungsanforderungen und Erfahrungen aus anderen Anlagen von Bedeutung. Die Auswahl des am besten geeigneten Verfahrens zur Spurenstoffelimination ist somit für jede Kläranlage ein Entscheidungsprozess, der enge Abstimmungen zwischen Aufsichtsbehörden, Betrieb und Planung erfordert.

4.3.2 Verteilung der ausgewählten Verfahren auf die Kläranlagen in Sachsen

Für die Kostenschätzung werden die im Kapitel 3 beschriebenen Verfahren zur Spurenstoffelimination prozentual auf die 58 Kläranlagen < 150.000 EW verteilt. Die Verteilung basiert auf den zahlreichen in Planung, Bau und Betrieb befindlichen Anlagen zur Spurenstoffelimination in Baden-Württemberg, Nordrhein-Westfalen und der Schweiz. Eine Übersicht der in Deutschland und der Schweiz eingesetzten Verfahren ist in Tabelle 9 dargestellt:

Tabelle 9: Verteilung der Verfahren zur Spurenstoffelimination

| Verfahren | BW | | NRW | | CH | |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | Anzahl | Anteil | Anzahl | Anteil | Anzahl | Anteil |
| GAK | 16 | 27% | 12 | 30% | 26 | 34% |
| PAK | 32 | 53% | 13 | 33% | 21 | 28% |
| Ozon | 7 | 12% | 13 | 33% | 25 | 33% |
| Ozon+GAK | 4 | 7% | 2 | 5% | 4 | 5% |
| PAK+UF | 1 | 2% | - | - | - | - |
| Gesamt | 60 | | 40 | | 76 | |

Quellen: BW: KomS-BW, NRW: KOM-M.NRW, CH: VSA Micropoll; Stand: April 2025

Für die Kostenschätzung dieser Studie wurde als PAK-Verfahren das „Ulmer Verfahren“ aufgrund seiner Vorteile gegenüber den anderen bekannten PAK-Verfahren hinsichtlich der Eliminationsraten und Betriebsstabilität ausgewählt. Die Wahl wird auch bestätigt durch die vielfache Implementierung in Kläranlagen in Baden-Württemberg, Nordrhein-Westfalen und der Schweiz. Beim GAK-Verfahren werden zwei Varianten betrachtet: mit vorgeschalteter Filtration und ohne vorgeschaltete Filtration.

Die gewählte Verteilung der Verfahren für die 58 Kläranlagen < 150.000 EW ist in Tabelle 10 dargestellt. Sie entspricht im Mittel etwa der Verteilung der Verfahren entsprechend Tabelle 9.

Tabelle 10: Verteilung der Verfahren zur vierten Reinigungsstufe auf die Kläranlagen in Sachsen

| Verfahren | Anteil | Anzahl der Kläranlagen |
|--|--------|--|
| Granulierte Aktivkohle | 31% | 18: 9 mit Sandfilter 9 ohne Sandfilter |
| Pulveraktivkohle „Ulmer Verfahren“ | 26% | 15 |
| Ozon | 31% | 18 |
| Kombinationsverfahren: Ozon und GAK-Filter | 12% | 7 |

Für die drei großen sächsischen Kläranlagen (Nr. 1, 2 und 10 aus der Kläranlagenliste – siehe A 1) entstammt die Verfahrensauswahl den Angaben der Aufgabenträger bzw. Betriebsführer der Kläranlagen. Diese sind in Tabelle 10 nicht enthalten.

5 Kosten der vierten Reinigungsstufe

Für die 58 Kläranlagen < 150.000 EW wurden jeweils die Investitions-, Betriebs- sowie Finanzierungskosten zum aktuellen Stand (2025) ermittelt. Die Investitions- und die Betriebskosten jeder Kläranlage wurden anhand spezifischer Kosten berechnet, die in einem ersten Schritt für die Untergruppen ermittelt wurden. In Kapitel 5.6 wird näher auf die Ermittlung der spezifischen Kosten eingegangen. Für die drei großen sächsischen Kläranlagen wurden Kostenangaben verwendet, die von den Aufgabenträgern bzw. Betriebsführern zur Verfügung gestellt wurden.

Die Investitions- und Betriebskosten werden zum Stand heute (2025) geschätzt. Um die langfristige Kapitalbindung und die damit verbundenen Finanzierungskosten über den Zeitraum bis 2045 realistisch abzubilden, wird ein kalkulatorischer Zinssatz von 3% pro Jahr berücksichtigt.

Die ersten Inbetriebnahmen sind gemäß den in Kapitel 2.3 beschriebenen Szenarien im Jahr 2033 angesetzt. Wie in den folgenden Kapiteln erläutert, fallen jedoch bereits vorher Planungskosten, Baukosten und Baunebenkosten an, so dass mit den ersten Investitionen ab 2028 gerechnet wird.

Bei den dargestellten Kosten handelt es sich um Nettokosten. Reinvestitionen wurden in dieser Studie nicht berücksichtigt.

5.1 Investitionskosten

Die Investitionskosten setzen sich aus Herstellungskosten und Baunebenkosten zusammen. Die Herstellungskosten unterteilen sich in Kosten für den Neubau von Bauwerken (Bautechnik) sowie Kosten für die Maschinen- und EMSR-Technik einschließlich der Inbetriebnahme der Anlagen. Bei den Baunebenkosten sind Planungskosten, insbesondere Ingenieurleistungen, in Höhe von 15 % sowie weitere Baunebenkosten wie Vorstudien, Gutachten und weitere vorbereitende Maßnahmen in Höhe von 20 % (jeweils bezogen auf die Herstellungskosten) berücksichtigt.

Zur Schätzung der Herstellungskosten wurden Erfahrungswerte aus Referenzprojekten herangezogen. Dabei wurden sowohl Projekte aus dem Bereich der Spurenstoffelimination als auch weitere Abwasserprojekte berücksichtigt, bei denen ähnliche Bauwerke geplant wurden. Die Herstellungskosten für die 4. Reinigungsstufe wurden mit einem spezifischen Preis von 1.000 €/m³ umbauter Raum für die Untergruppen 4A bis 4C und von 900 €/m³ umbauter Raum für die Untergruppen 5A bis 5C ermittelt.

Die Ermittlung des benötigten Volumens für die Bauwerke für jedes der ausgewählten Verfahren erfolgt über die Dimensionierungswassermenge der Untergruppen aus Tabelle 7 und Tabelle 8.

Beim GAK-Verfahren bestehen die für die Kostenschätzung berücksichtigten Anlagenteile im Wesentlichen aus dem GAK-Filter mit Rückspülvorrichtung und der optional vorzuschaltenden Filtration (Vorbehandlungsstufe). Beim PAK-Verfahren setzen sich die Anlagen aus dem Misch- und Kontaktbecken, der PAK-Lager- und Dosiereinheit, dem Absetzbecken und der nachgeschalteten Filtration zusammen. Bei der Ozonung sind insbesondere der Ozonreaktor einschließlich Ozongenerator und Restozonvernichter und die nachgeschaltete Filtrationsanlage zu berücksichtigen. Beim Kombinationsverfahren fallen Herstellungskosten für den Ozonreaktor sowie einen nachgeschalteten GAK-Filter an.

Anhand des benötigten Volumens der Bauwerke und des spezifischen Preises in €/m³ umbauter Raum lassen sich die Kosten für die Bautechnik schätzen.

Die Anforderungen an die Maschinen- und EMSR-Technik sind für jedes der ausgewählten Verfahren unterschiedlich. Für die Kostenschätzung dieser Anlagenteile wurde auf Basis von Erfahrungswerten aus Projekten zur vierten Reinigungsstufe ein Prozentsatz der Herstellungskosten angesetzt. Die Schätzung der Kosten für die Maschinen- und EMSR-Technik erfolgt anhand der Anteile und der zuvor geschätzten Kosten für die Bautechnik. Die angesetzten Prozentsätze sind in Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 11: Anteile der Bau-, Maschinen- und EMSR-Technik für die Investitionskosten

| Verfahren | Anteil Bautechnik [%] | Anteil Maschinen-technik [%] | Anteil EMSR-Technik [%] |
|--|-----------------------|------------------------------|-------------------------|
| Granulierte Aktivkohle | 55 | 29 | 16 |
| Pulveraktivkohle „Ulmer Verfahren“ | 52 | 32 | 16 |
| Ozon | 40 | 35 | 25 |
| Kombinationsverfahren: Ozon und GAK-Filter | 47 | 33 | 20 |

Rückbau- oder Umbaumaßnahmen sowie die Kosten für den Grunderwerb sind in der Kostenschätzung nicht enthalten.

Nach der Schätzung der Investitionskosten für die sechs Untergruppen (4A bis 5C) und die vier ausgewählten Verfahren der vierten Reinigungsstufe erfolgte eine Normalisierung der Investitionskosten, indem diese durch die durchschnittliche Jahresabwassermenge der jeweiligen Untergruppe (gemäß Tabelle 7) geteilt wurden. So konnten spezifische Investitionskosten in Euro pro Kubikmeter behandeltem Abwasser berechnet werden.

Die Schätzung der anfallenden Investitionskosten für die Kläranlagen der Untergruppen 4A bis 5A erfolgt auf Basis der spezifischen Investitionskosten der zugehörigen Untergruppe und der gemittelten Jahresabwassermenge. Die Investitionskosten der drei großen Kläranlagen basieren auf Informationen der Aufgabenträger bzw. Betriebsführer der Kläranlagen.

Zudem wurde jeder Kläranlage eine bestimmte Projektdauer zugewiesen. Die Projektdauer besteht aus der Planungs- und Bauphase. Sie wurden mit 3 bis 5 Jahren, jeweils vor Inbetriebnahme, angenommen. Zur Vereinfachung wird angenommen, dass die Gesamtinvestitionskosten innerhalb der Projektdauer gleichmäßig verteilt anfallen. Die für die jeweilige Untergruppe angesetzte Projektdauer ist in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12: Projektdauer

| Untergruppe | Einwohnerwerte (EW) | Projektdauer in Jahren |
|-------------|---------------------|------------------------|
| 4A | 10.000 – 19.999 | 3 |
| 4B | 20.000 – 49.999 | 3 |
| 4C | 50.000 – 99.999 | 4 |
| 5A | 100.000 – 149.999 | 4 |
| 5B | 150.000 – 499.999 | 5 |
| 5C | Ab 500.000 | 5 |

5.1.1 Szenario 1

Szenario 1 stellt die kumulative Entwicklung der Investitionskosten für die Inbetriebnahme der Kläranlagen entsprechend ihrem Rang in der Priorisierungsliste dar. Siehe hierzu auch die Darstellung der Inbetriebnahmezeitpunkte in Abbildung 1 und A 1.

Bei Szenario 1 startet im Jahr 2028 die Projektdauer der ersten zwei Großkläranlagen. Es fallen bereits in diesem Jahr Investitionskosten von 37 Millionen Euro an. Die kumulierten Gesamtinvestitionskosten betragen bis zum Jahr 2045 551 Millionen Euro und sind in Abbildung 9 dargestellt.

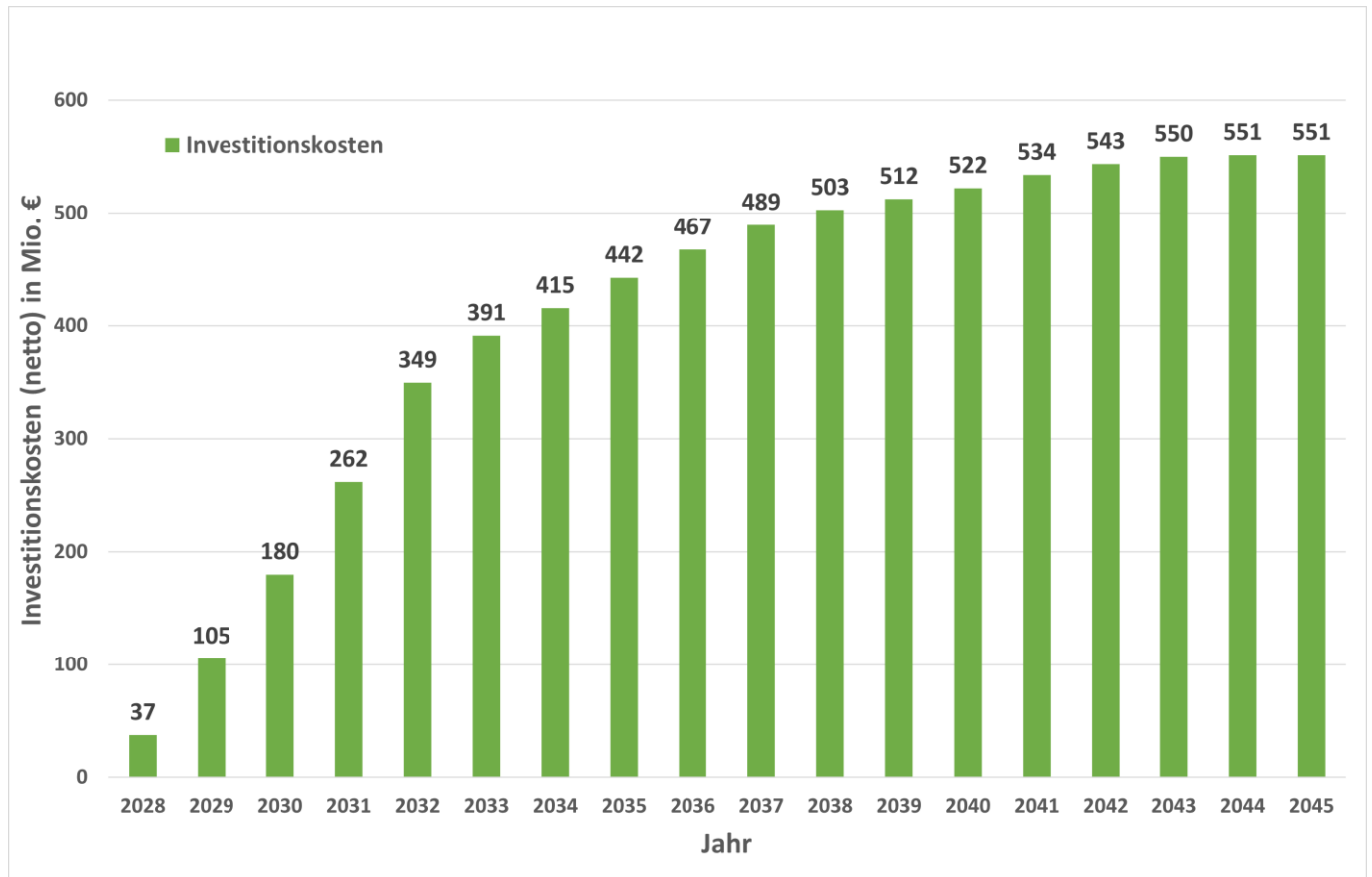


Abbildung 9: Kumulierte Netto-Investitionskosten Szenario 1

5.1.2 Szenario 2

Szenario 2 stellt die kumulative Entwicklung der Investitionskosten für die Inbetriebnahme der Kläranlagen entsprechend ihrem Rang in der Priorisierungsliste dar, mit der Veränderung, dass zwei der großen sächsischen Kläranlagen später in Betrieb gehen. Siehe hierzu auch die Darstellung der Inbetriebnahmezeitpunkte in Abbildung 2.

Im Szenario 2 fallen bis 2045 höhere Investitionskosten als im Szenario 1. Dies ist auf die Verschiebung der Fertigstellung von zwei der drei Großkläranlagen zurückzuführen. Im Szenario 2 startet die Projektdauer der zweiten und der dritten Großkläranlage 2034 bzw. 2040 und damit sechs bzw. zwölf Jahre später als in Szenario 1. Aufgrund des angesetzten kalkulatorischen Zinssatzes von 3 % pro Jahr erhöht sich damit die Investitionssumme um ca. 13 % im Vergleich zu Szenario 1. Die kumulierten Investitionskosten betragen bis zum Jahr 2045 623 Millionen Euro und sind in Abbildung 10 dargestellt.

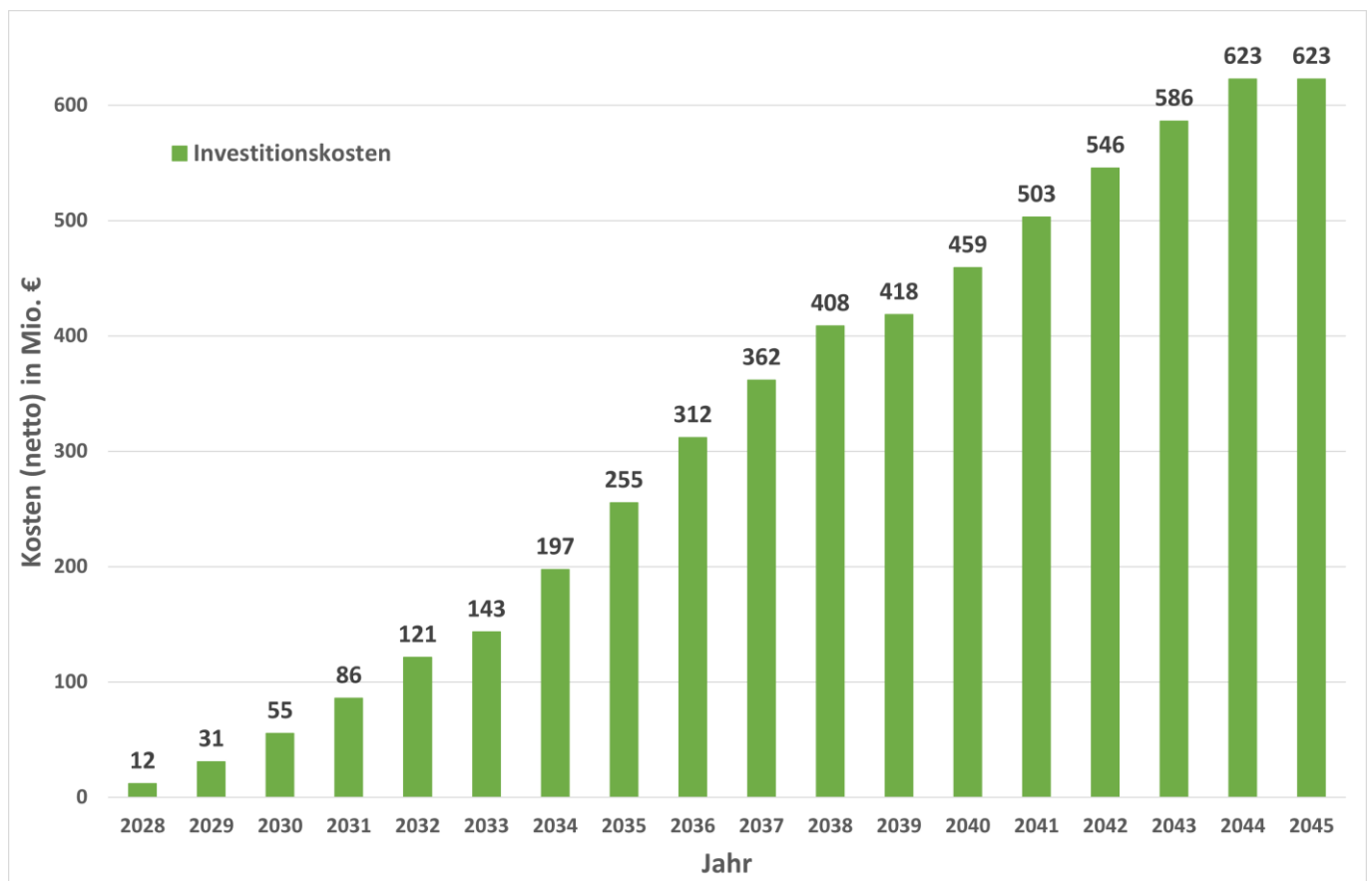


Abbildung 10: Kumulierte Netto-Investitionskosten Szenario 2

5.1.3 Szenario 1 mit erhöhter Dimensionierungswassermenge

Die kumulierten Investitionskosten für die mit einem Sicherheitsfaktor versehenen Dimensionierungswassermengen (siehe Erläuterungen in Kapitel 4.2.2) zeigen bis 2045 eine Erhöhung um ca. 4 % im Vergleich zu Szenario 1. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Investitionskosten der drei Großkläranlagen unverändert bleiben (Angaben der Aufgabenträger bzw. Betriebsführer der Anlagen). Die kumulierten Investitionskosten für diese Variante betragen bis zum Jahr 2045 574 Millionen Euro und sind in Abbildung 11 dargestellt.

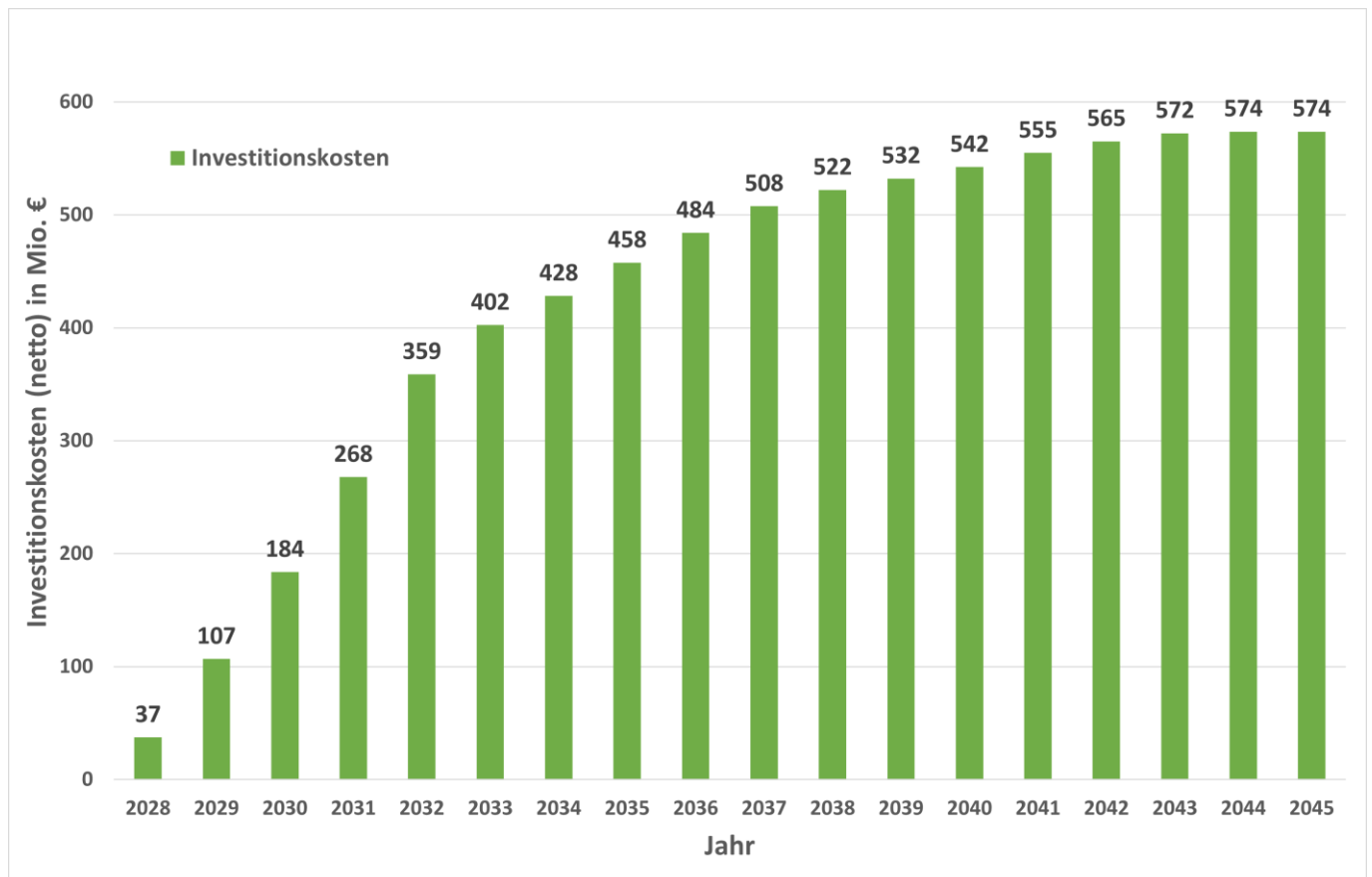


Abbildung 11: Kumulierte Netto-Investitionskosten Szenario 1 mit erhöhter Dimensionierungswassermenge

5.1.4 Szenario 2 mit erhöhter Dimensionierungswassermenge

Die Investitionskosten für das Szenario 2 mit erhöhten Dimensionierungswassermengen betragen bis zum Jahr 2045 645 Millionen Euro und sind in Abbildung 12 dargestellt. Im Vergleich zum ursprünglichen Szenario 2 liegen die Investitionskosten in dieser Variante ca. 4 % höher.

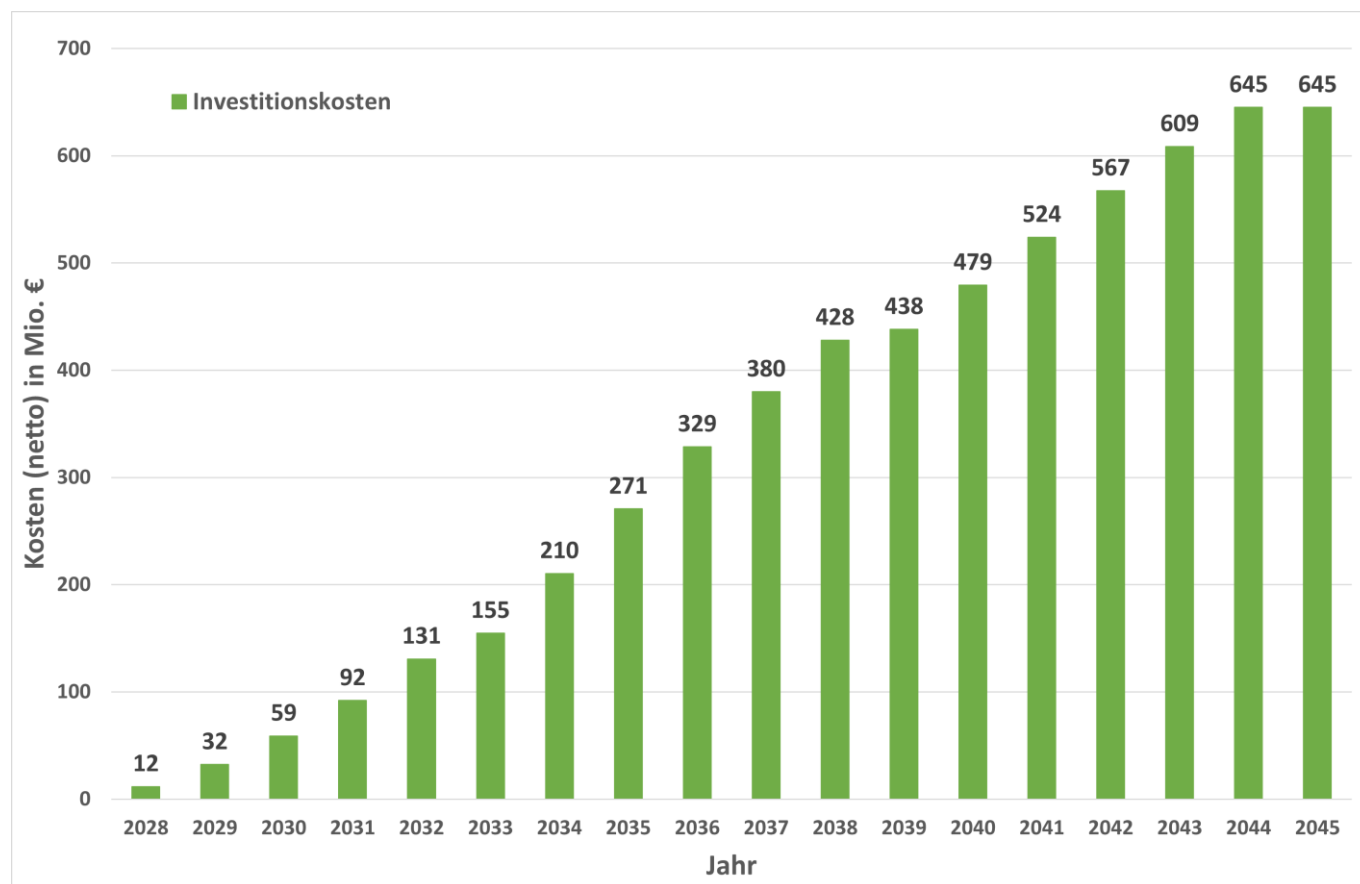


Abbildung 12: Kumulierte Netto-Investitionskosten Szenario 2 mit erhöhter Dimensionierungswassermenge

5.2 Betriebskosten

Die Betriebskosten setzen sich aus Kosten für Wartung, Betriebsmittel, Energie, Schlammmentsorgung, Personal und Abwasserabgabe zusammen. Die Wartungskosten wurden für die betrachteten Verfahren anhand prozentualer Anteile der Gesamtinvestitionskosten angesetzt. Für die Wartungskosten der Bau-technik wurden 1 % der Baukosten, für die Wartungskosten der Maschinentechnik 5 % der Kosten für Maschinen und Anlagentechnik und für die Wartungskosten der EMSR-Technik 2 % der Investitionskosten der EMSR-Technik berücksichtigt. Diese Ansätze sind für alle Verfahren gleich. Für die Schätzung der Betriebsmittel-, Energie-, Schlammmentsorgungs- und Personalkosten wurden Erfahrungswerte und Angaben aus den DWA-M 285-2, DWA-M 285-3, den Modulbeschreibungen der RWTH Aachen sowie weiterer Literatur verwendet (Mousel, Wieland, Keyzers, & Palmowski, 2018a-d). Mögliche Auswirkungen der vierten Reinigungsstufe auf die Höhe der Abwasserabgabe als Teil der Betriebskosten konnten nicht verlässlich geschätzt und daher nicht betrachtet werden.

Die Schätzung der anfallenden Betriebskosten für jede Kläranlage erfolgt analog zur Vorgehensweise bei den Investitionskosten. Aus zuvor berechneten spezifischen Betriebskosten der Untergruppen werden die Betriebskosten mit den jeweiligen gemittelten Jahresabwassermengen der einzelnen Kläranlagen ermittelt. Dabei wurde eine reduzierte Wassermenge angesetzt, die 70 % der Dimensionierungswassermenge entspricht. Diese Annahme berücksichtigt, dass die realistisch im Jahresmittel zu behandelnde Abwassermenge geringer ist als die Dimensionierungswassermenge, welche für die Auslegung der Bauwerke und Ausstattung der Anlagen zugrunde gelegt wird.

In Tabelle 13 sind die Ausgangswerte für die Betriebskosten zusammengefasst.

Tabelle 13: Ausgangswerte und spezifische Kosten für die Betriebskosten

| Kostenposition | Wert | Einheit |
|---|------|----------------------|
| Strompreis | 0,30 | €/kWh |
| Spezifischer Energiebedarf für PAK und GAK | 0,04 | kWh/m ³ |
| Spezifischer Energiebedarf Verfahren Ozon | 13 | kWh/kgO ₃ |
| Spezifischer Preis GAK | 1,85 | €/kg |
| Spezifischer Preis PAK | 2,1 | €/kg |
| Spezifischer Preis Sauerstoff | 0,2 | €/kg |
| Spezifischer Preis Klärschlammentsorgung | 130 | €/Tonne |
| Personalkosten | 39 | €/h |
| Dosierung PAK | 20 | mg/l |
| Wartungskosten (Anteil von Investitionskosten): | | |
| Bautechnik | 1% | €/a |
| Maschinentechnik | 5% | €/a |
| EMSR-Technik | 2% | €/a |

Werte aus Mousel, et. al. (2018a-d), DWA-M 285-2 und DWA-M 285-3; (Lugitsch und Partner Ziviltechniker GmbH, 2022)

5.2.1 Szenario 1

Szenario 1 stellt die kumulative Entwicklung der Betriebskosten für die Inbetriebnahme der Kläranlagen entsprechend ihrem Rang in der Priorisierungsliste dar. Siehe hierzu auch die Darstellung der Inbetriebnahmezeitpunkte in Abbildung 1 und A 1.

Die kumulierten Netto-Betriebskosten bis 2045 für das Szenario 1 sind in Abbildung 13 dargestellt. In den Jahren 2028 bis 2032 fallen keine Betriebskosten an. Die ersten acht Kläranlagen nach Szenario 1 gehen 2033 in Betrieb und verursachen in diesem Jahr Betriebskosten von insgesamt 12 Millionen Euro. Bis 2045 belaufen sich die Betriebskosten insgesamt auf 402 Millionen Euro.

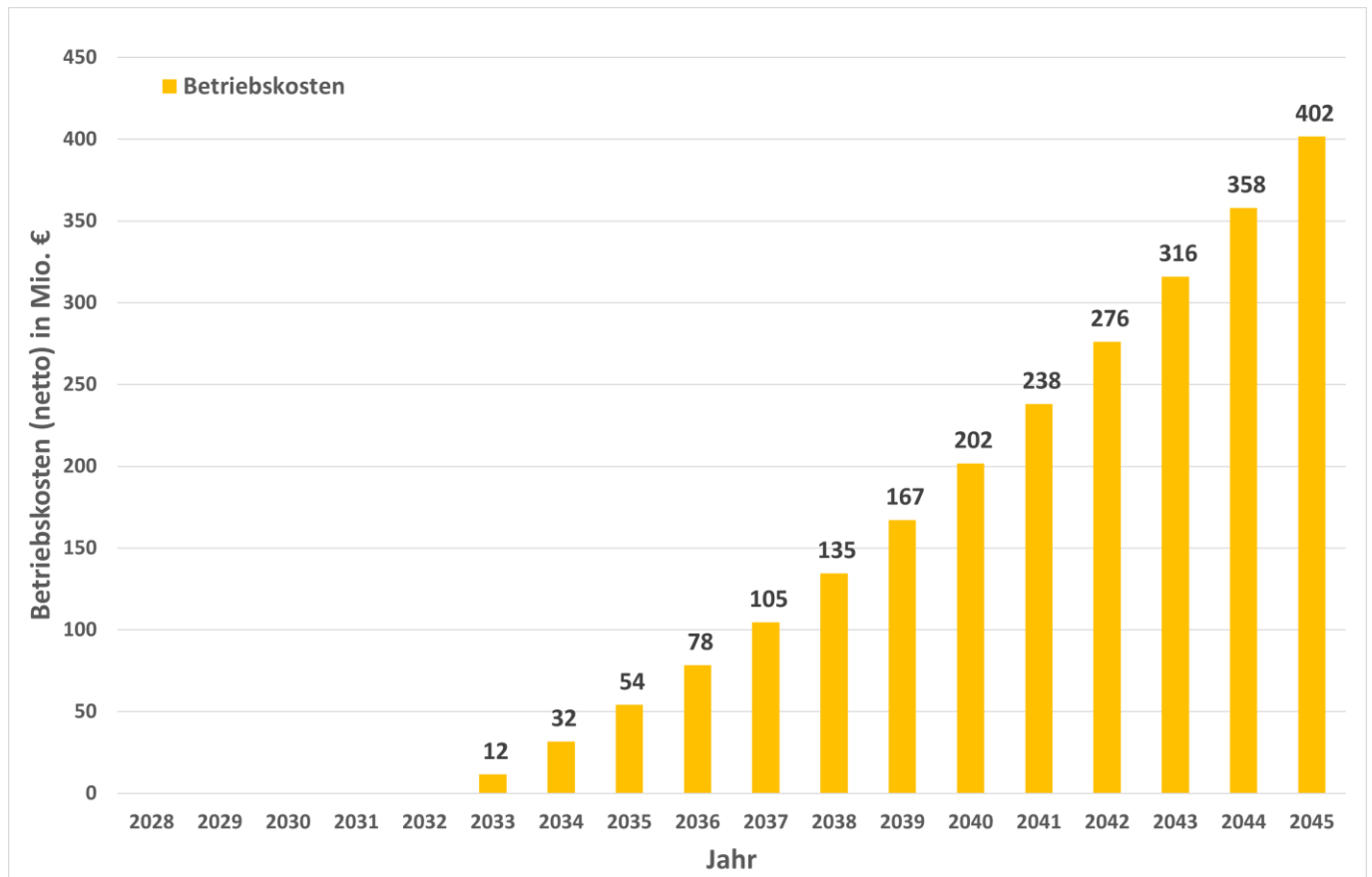


Abbildung 13: Kumulierte Netto-Betriebskosten Szenario 1

5.2.2 Szenario 2

Szenario 2 stellt die kumulative Entwicklung der Betriebskosten für die Inbetriebnahme der Kläranlagen entsprechend ihrem Rang in der Priorisierungsliste dar, mit der Veränderung, dass zwei der großen sächsischen Kläranlagen später in Betrieb gehen. Siehe hierzu auch die Darstellung der Inbetriebnahmezeitpunkte in Abbildung 2.

Im Szenario 2 sind aufgrund der späteren Fertigstellung von zwei der drei Großkläranlagen in den Jahren 2039 und 2045 insgesamt geringere Betriebskosten zu erwarten. Im Vergleich zu Szenario 1 fallen bis 2045 ca. 27 % geringere Betriebskosten an. Die kumulativen Netto-Betriebskosten für das Szenario 2 sind in Abbildung 14 dargestellt.

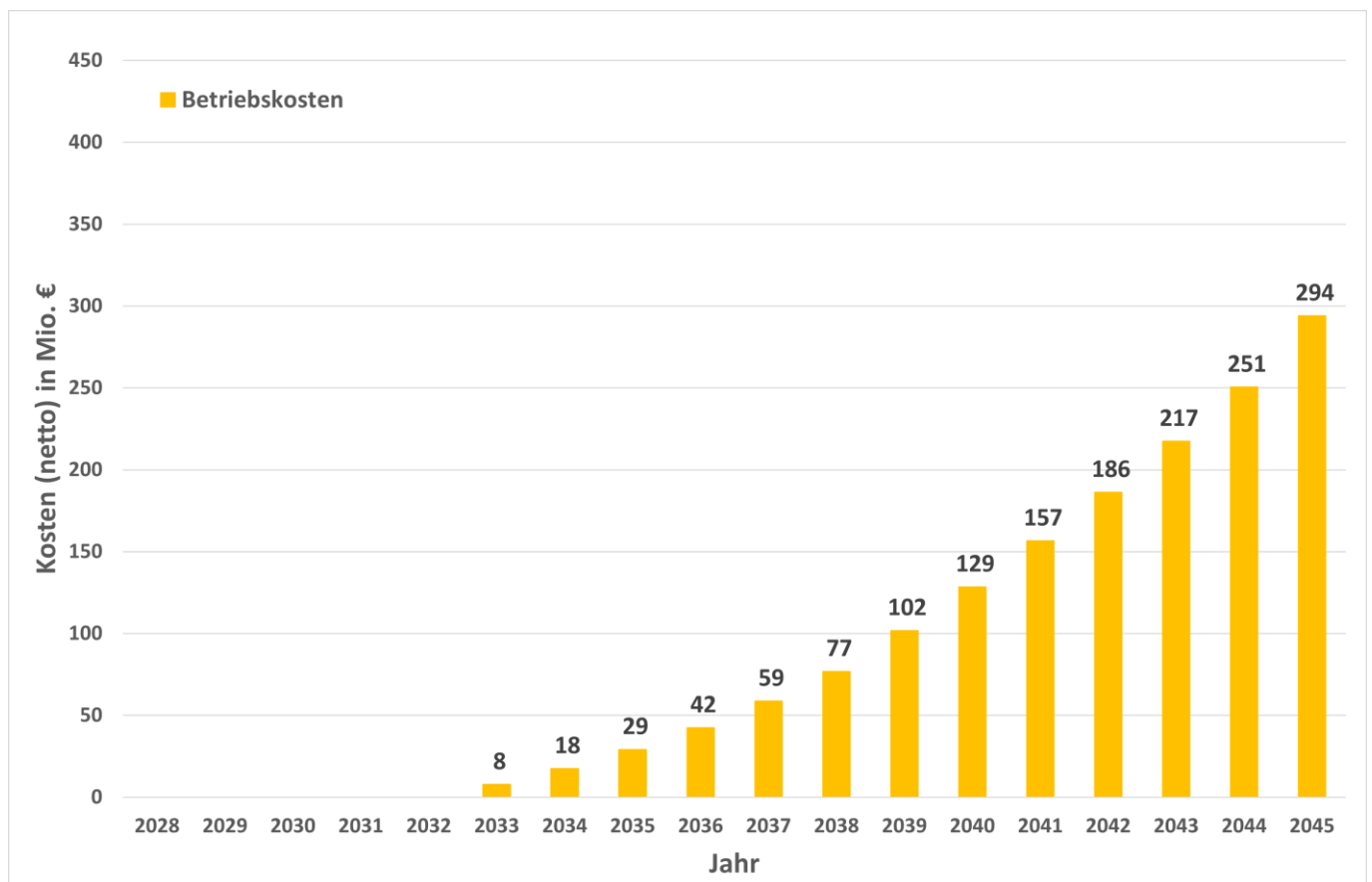


Abbildung 14: Kumulierte Netto-Betriebskosten Szenario 2

5.2.3 Szenario 1 mit erhöhter Dimensionierungswassermenge

Bei den erhöhten Dimensionierungswassermengen, bezogen auf die Inbetriebnahmezeitpunkte im Szenario 1, entstehen bis 2045 um ca. 8 % höhere Betriebskosten als in Szenario 1. Die kumulierten Betriebskosten für das Szenario 1 mit erhöhten Dimensionierungswassermengen sind in Abbildung 15 dargestellt.

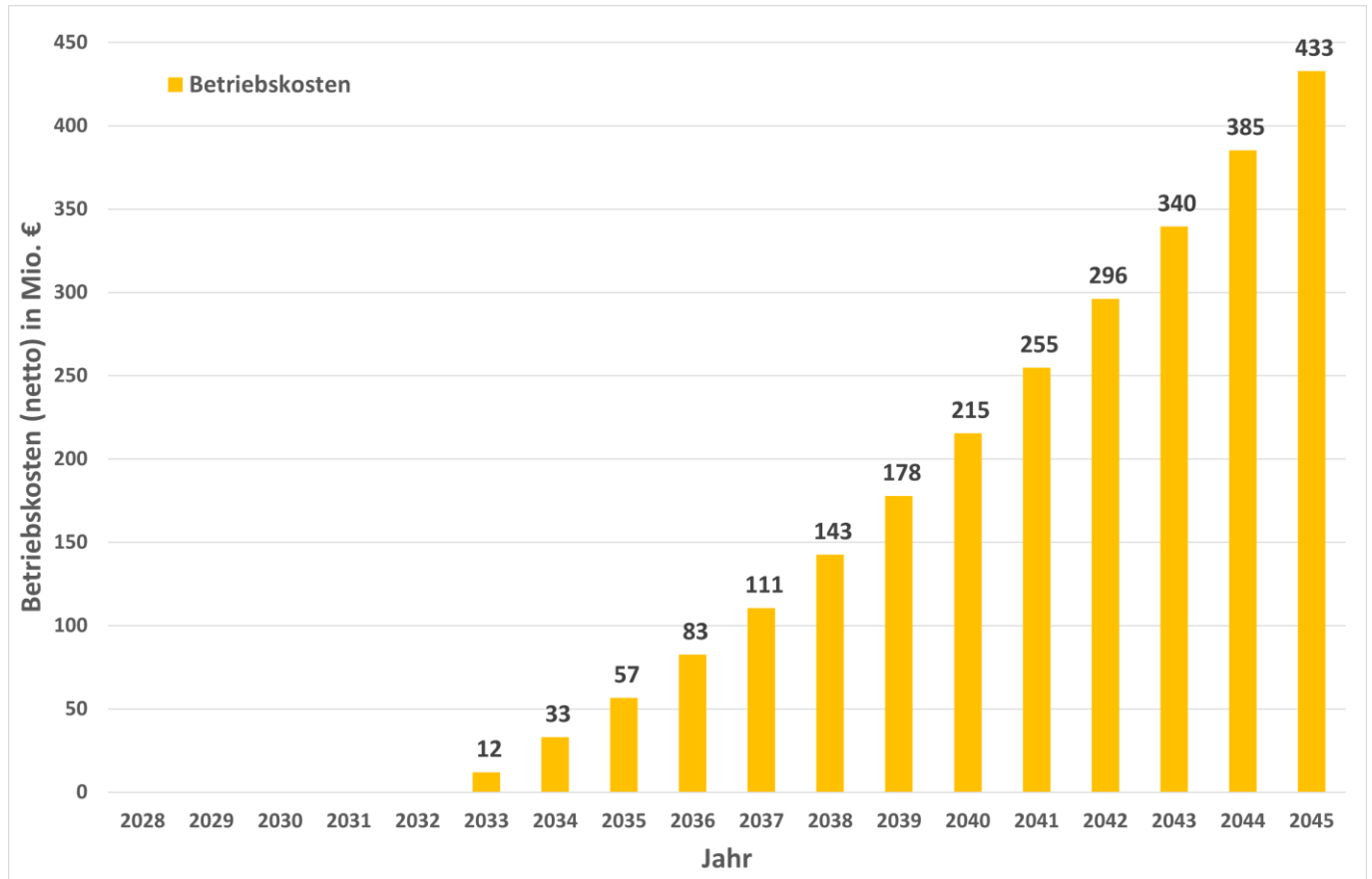


Abbildung 15: Kumulierte Netto-Betriebskosten Szenario 1 mit erhöhter Dimensionierungswassermenge

5.2.4 Szenario 2 mit erhöhter Dimensionierungswassermenge

Die Betriebskosten für Szenario 2 mit erhöhten Dimensionierungswassermengen verursachen ca. 10 % höhere Kosten als in Szenario 2. Die kumulierten Betriebskosten für das Szenario 2 mit erhöhten Dimensionierungswassermengen sind in Abbildung 16 dargestellt.

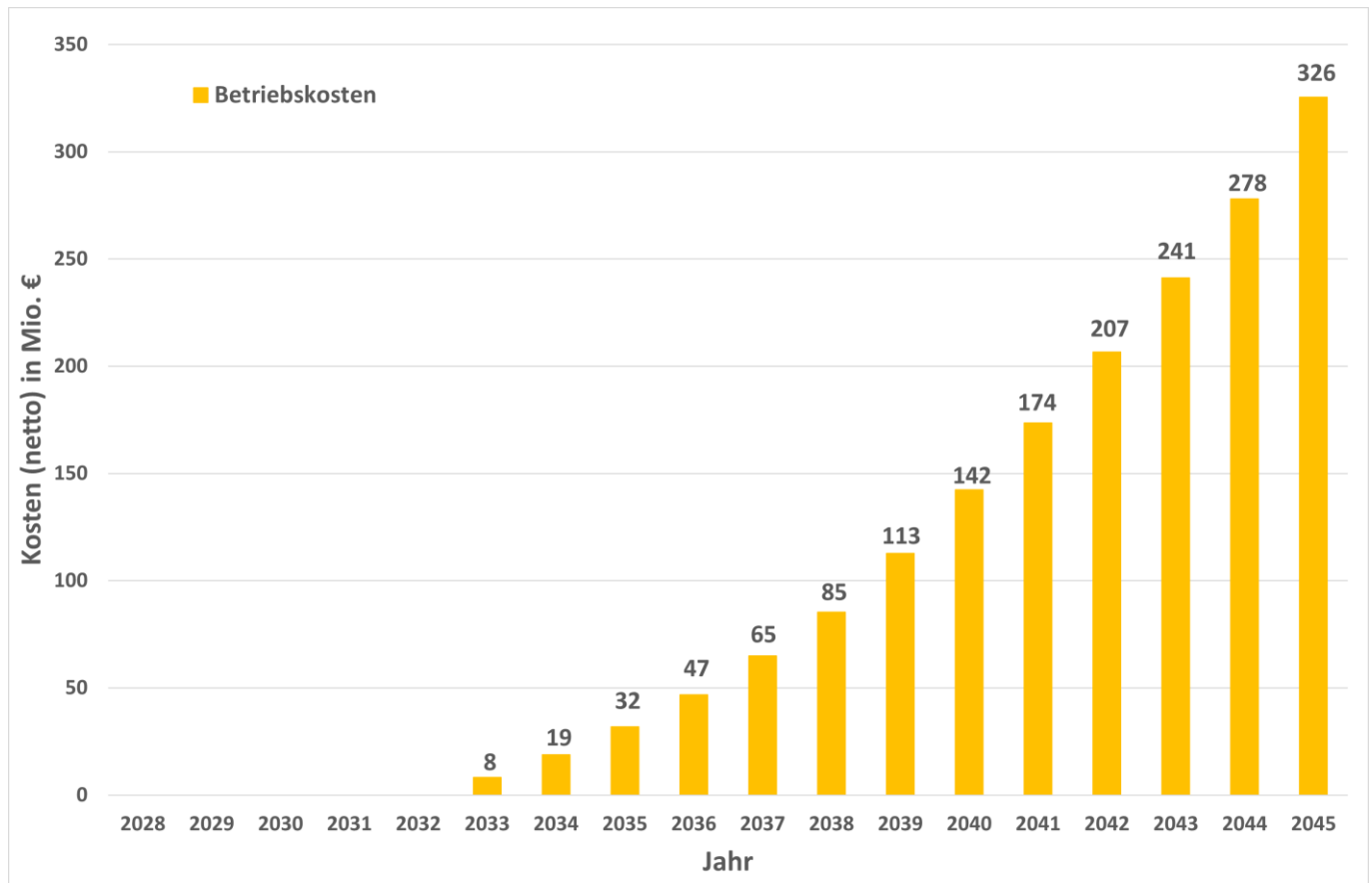


Abbildung 16: Kumulierte Netto-Betriebskosten Szenario 2 mit erhöhter Dimensionierungswassermenge

5.3 Finanzierungskosten

Die Kostenschätzung der Finanzierungskosten erfolgte nach den Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (DWA, 2012) und dem DWA-M 816 (DWA, 2021).

Für die Berechnung der Finanzierungskosten wurden die Investitionskosten jeder Kläranlage berücksichtigt. Es wurde eine 100 % Finanzierung der Investitionskosten und eine Finanzierungsdauer von 10 Jahren angenommen. Der kalkulatorische Zinssatz für die Finanzierung wurde mit 5 % angesetzt. Somit ergibt sich ein Annuitätsfaktor von 0,1295. Die Finanzierungskosten wurden für jede Kläranlage aus der Differenz der Annuitäten über einen Zeitraum von 10 Jahren und den Investitionskosten berechnet. Die so ermittelten Gesamtfinanzierungskosten wurden gleichmäßig auf 10 Jahre verteilt, beginnend ab dem ersten Planungsjahr. Somit fallen auch nach 2045 Finanzierungskosten an.

5.3.1 Szenario 1

Szenario 1 stellt die kumulative Entwicklung der Finanzierungskosten für die Inbetriebnahme der Kläranlagen entsprechend ihrem Rang in der Priorisierungsliste dar. Siehe hierzu auch die Darstellung der Inbetriebnahmezeitpunkte in Abbildung 1 und A 1.

Die kumulierten netto Finanzierungskosten für das Szenario 1 zeigt Abbildung 17. Aufgrund der Projektdauer von fünf Jahren fallen im Jahr 2028 lediglich Finanzierungskosten für die ersten beiden Großkläranlagen aus der Priorisierungsliste an.

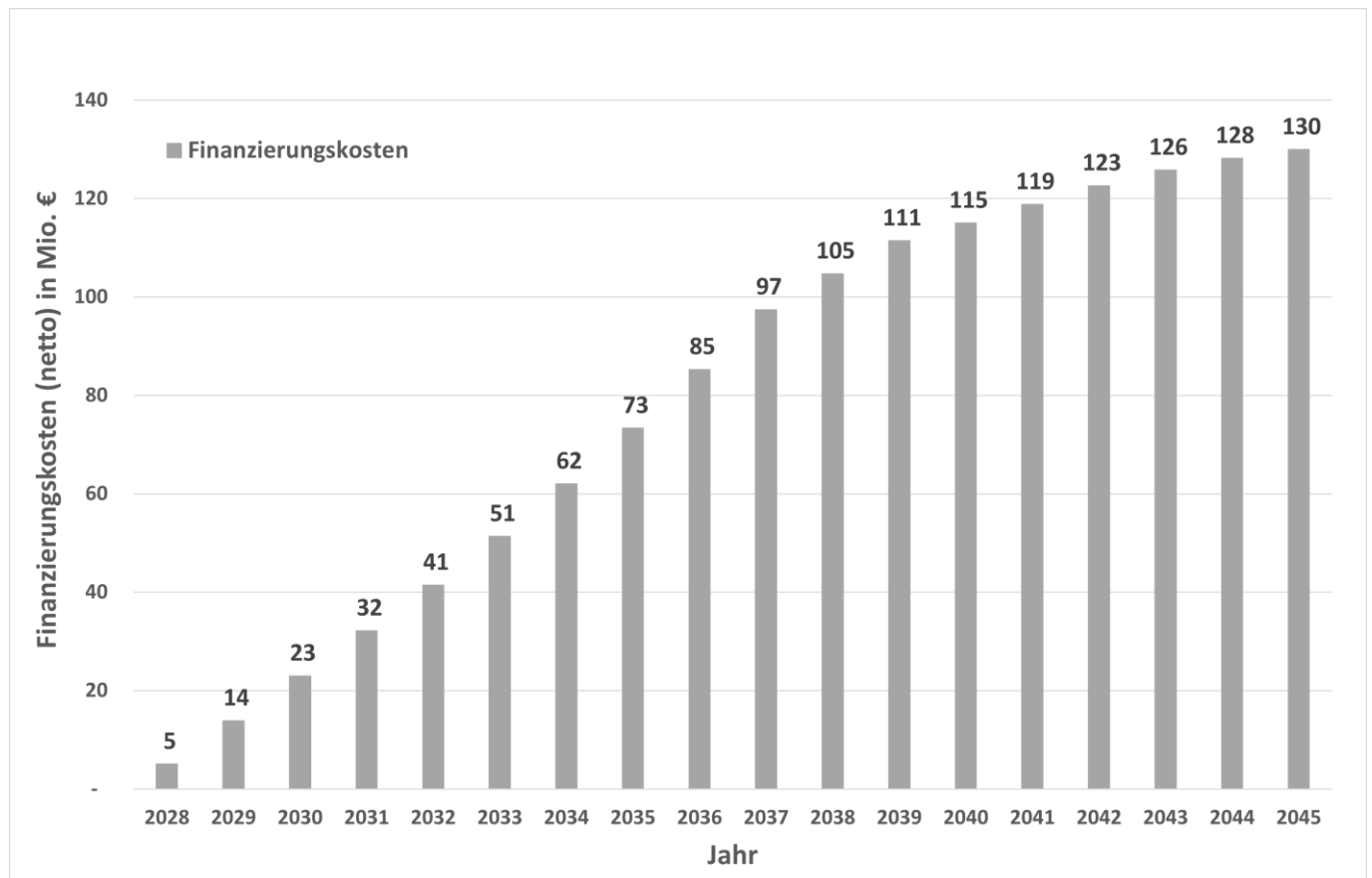


Abbildung 17: Kumulierte Netto-Finanzierungskosten Szenario 1

5.3.2 Szenario 2

Szenario 2 stellt die kumulative Entwicklung der Finanzierungskosten für die Inbetriebnahme der Kläranlagen entsprechend ihrem Rang in der Priorisierungsliste dar, mit der Veränderung, dass zwei der großen sächsischen Kläranlagen später in Betrieb gehen. Siehe hierzu auch die Darstellung der Inbetriebnahmezeitpunkte in Abbildung 2.

Szenario 2 weist geringere Finanzierungskosten im Vergleich zu Szenario 1 auf. Mit insgesamt 116 Millionen Euro liegen die Finanzierungskosten von Szenario 2 ca. 12 % unter denen von Szenario 1. Dies ist damit zu erklären, dass in diesem Szenario für zwei der besonders großen Kläranlagen bis 2045 nur teilweise bzw. keine Finanzierungskosten anfallen, da die Inbetriebnahmezeitpunkte in den Jahren 2039 bzw. 2045 liegen. Die kumulierten Finanzierungskosten für das Szenario 2 sind in Abbildung 18 dargestellt.

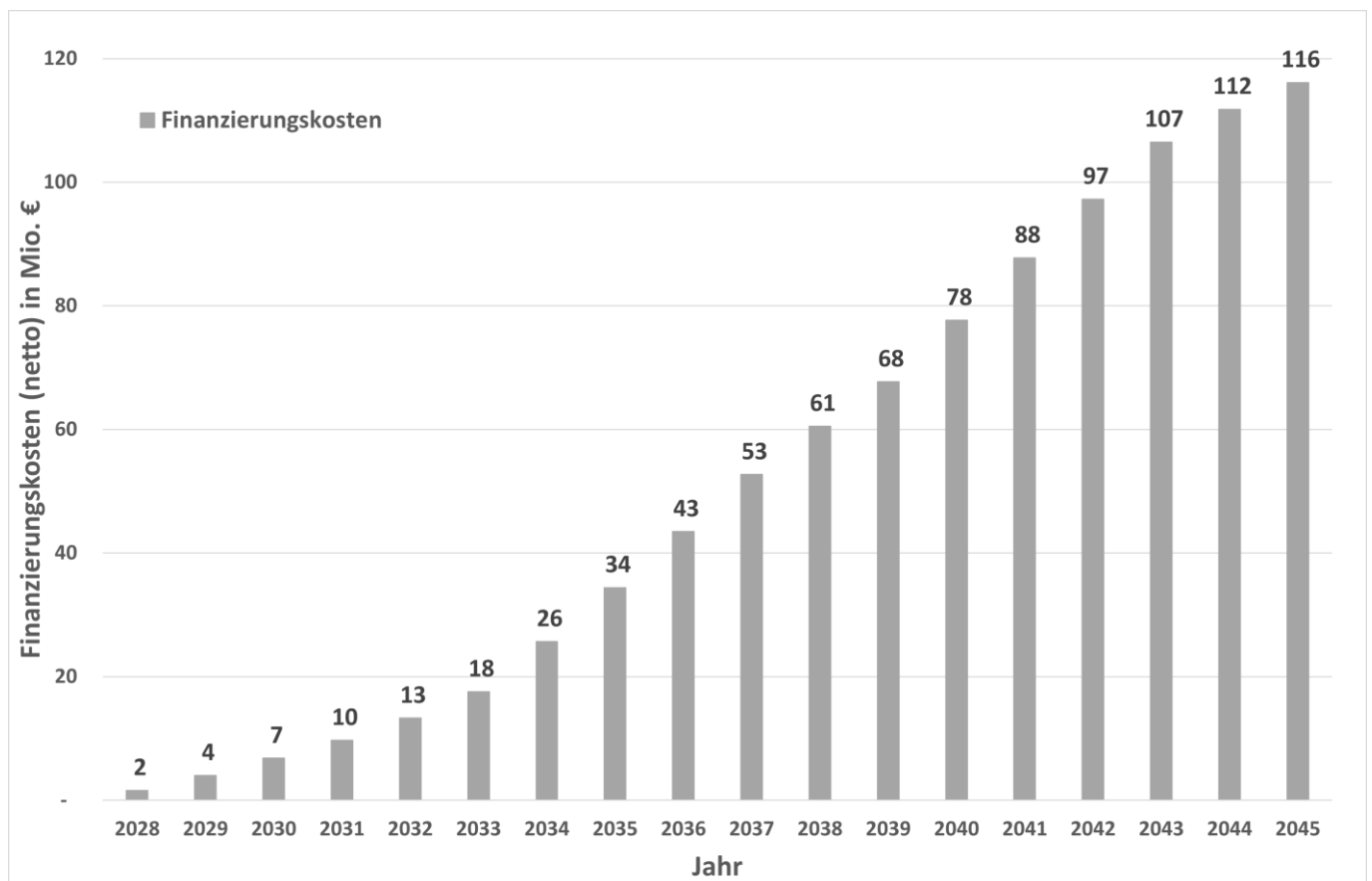


Abbildung 18: Kumulierte Netto-Finanzierungskosten Szenario 2

5.3.3 Szenario 1 mit erhöhter Dimensionierungswassermenge

Die Finanzierungskosten für das Szenario 1 mit erhöhten Dimensionierungswassermengen zeigen bis 2045 einen Anstieg von ca. 4 % im Vergleich zu Szenario 1. Dieser Anstieg der Kosten ist auf die höheren Investitionskosten zurückzuführen, die durch den Bau größerer Anlagen entstehen. Die Finanzierungskosten für diese Variante sind in Abbildung 19 dargestellt.

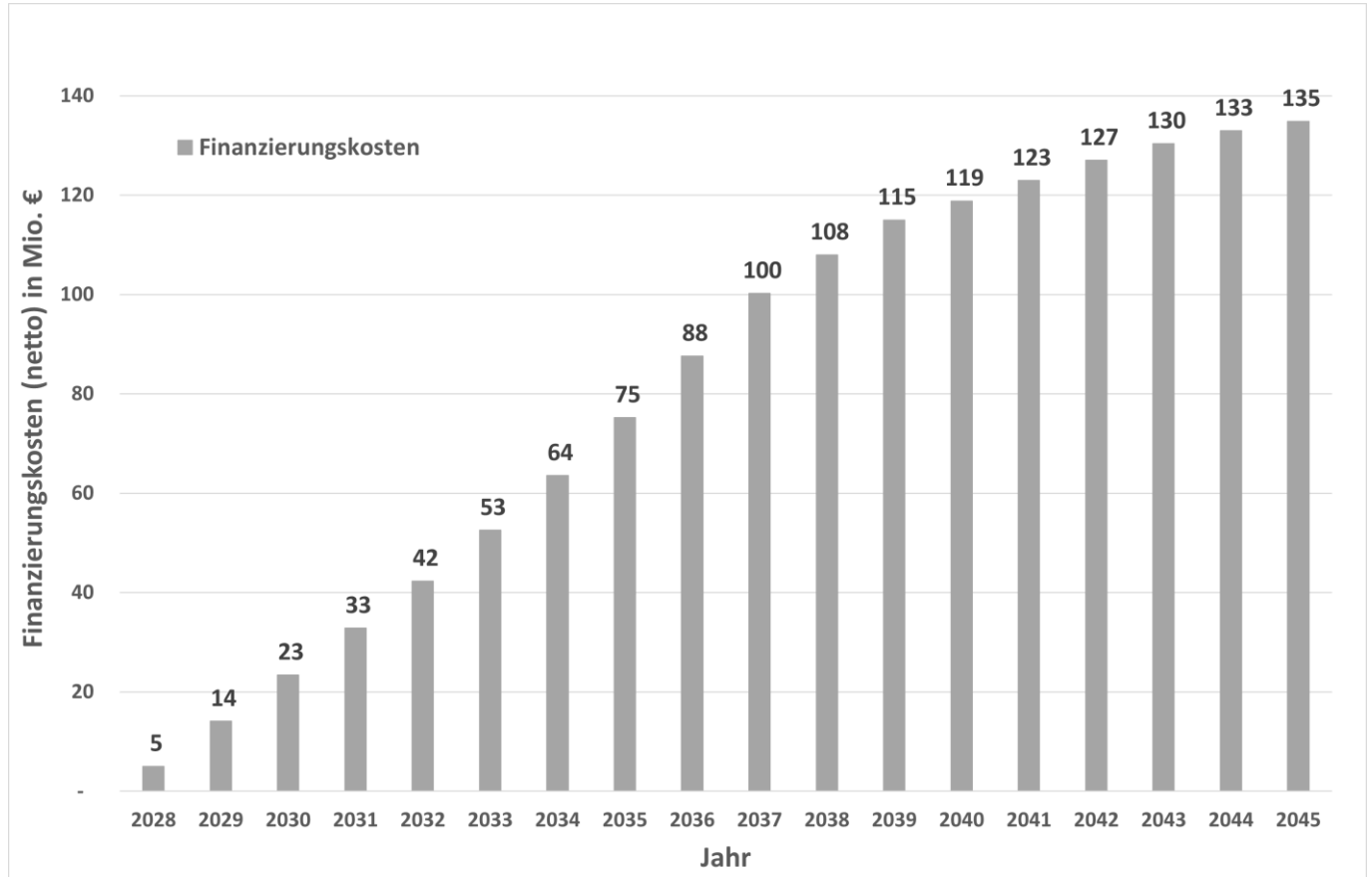


Abbildung 19: Kumulierte Netto-Finanzierungskosten Szenario 1 mit erhöhter Dimensionierungswassermenge

5.3.4 Szenario 2 mit erhöhter Dimensionierungswassermenge

Die Finanzierungskosten für das Szenario 2 mit erhöhten Dimensionierungswassermengen zeigen bis 2045 auch einen Anstieg von ca. 4 % im Vergleich zu Szenario 2. Die Finanzierungskosten für Szenario 2 mit erhöhten Dimensionierungswassermengen sind in Abbildung 20 dargestellt.

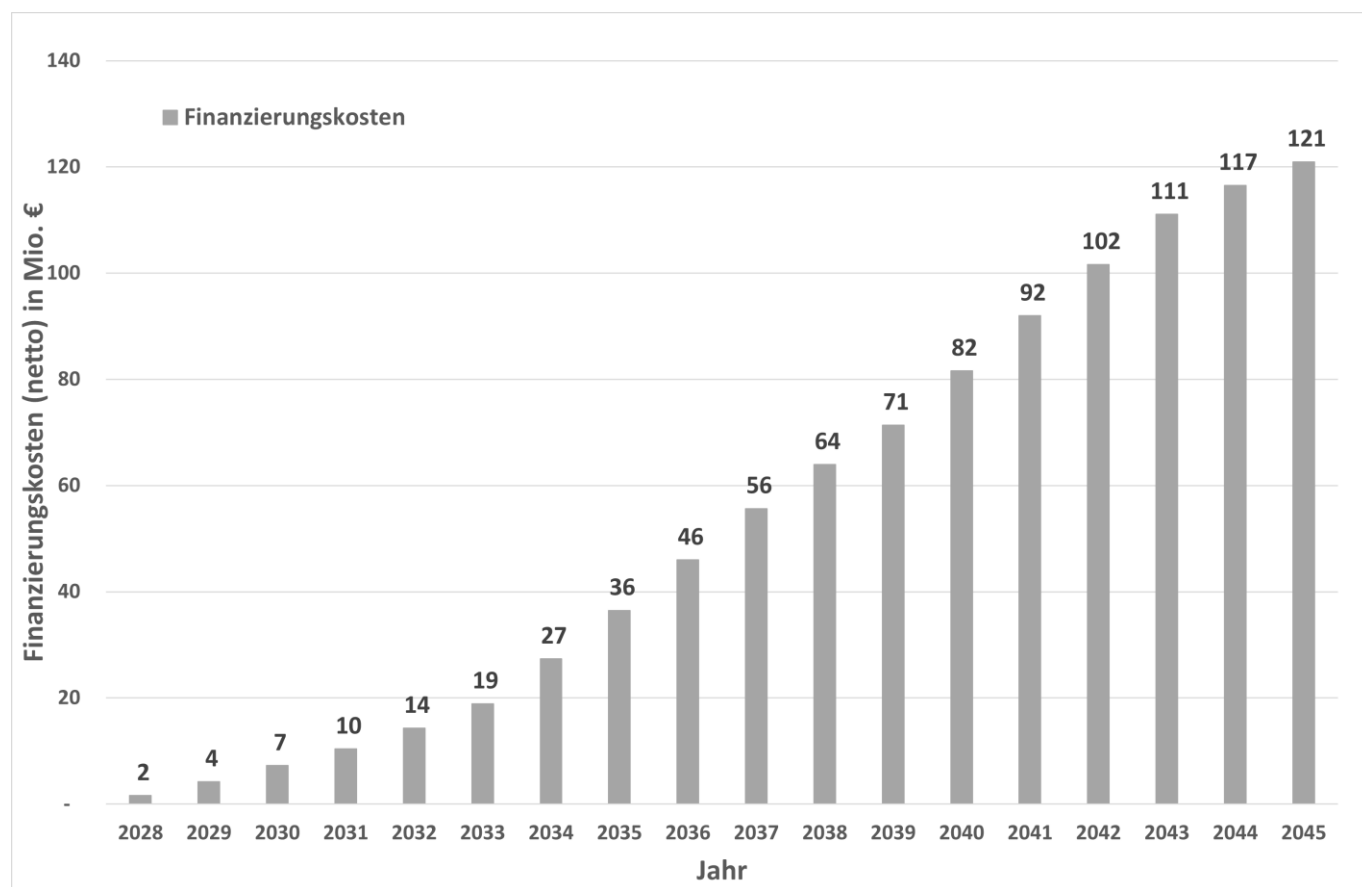


Abbildung 20: Kumulierte Netto-Finanzierungskosten Szenario 2 mit erhöhter Dimensionierungswassermenge

5.4 Kumulierte Gesamtkosten

5.4.1 Szenario 1

Szenario 1 stellt die kumulative Entwicklung der Gesamtkosten für die Inbetriebnahme der Kläranlagen entsprechend ihrem Rang in der Priorisierungsliste dar. Siehe hierzu auch die Darstellung der Inbetriebnahmezeitpunkte in Abbildung 1 und A 1.

Abbildung 21 zeigt die kumulierten Gesamtkosten für das Szenario 1. Bis 2045 betragen die Kosten insgesamt 1.083 Millionen Euro.

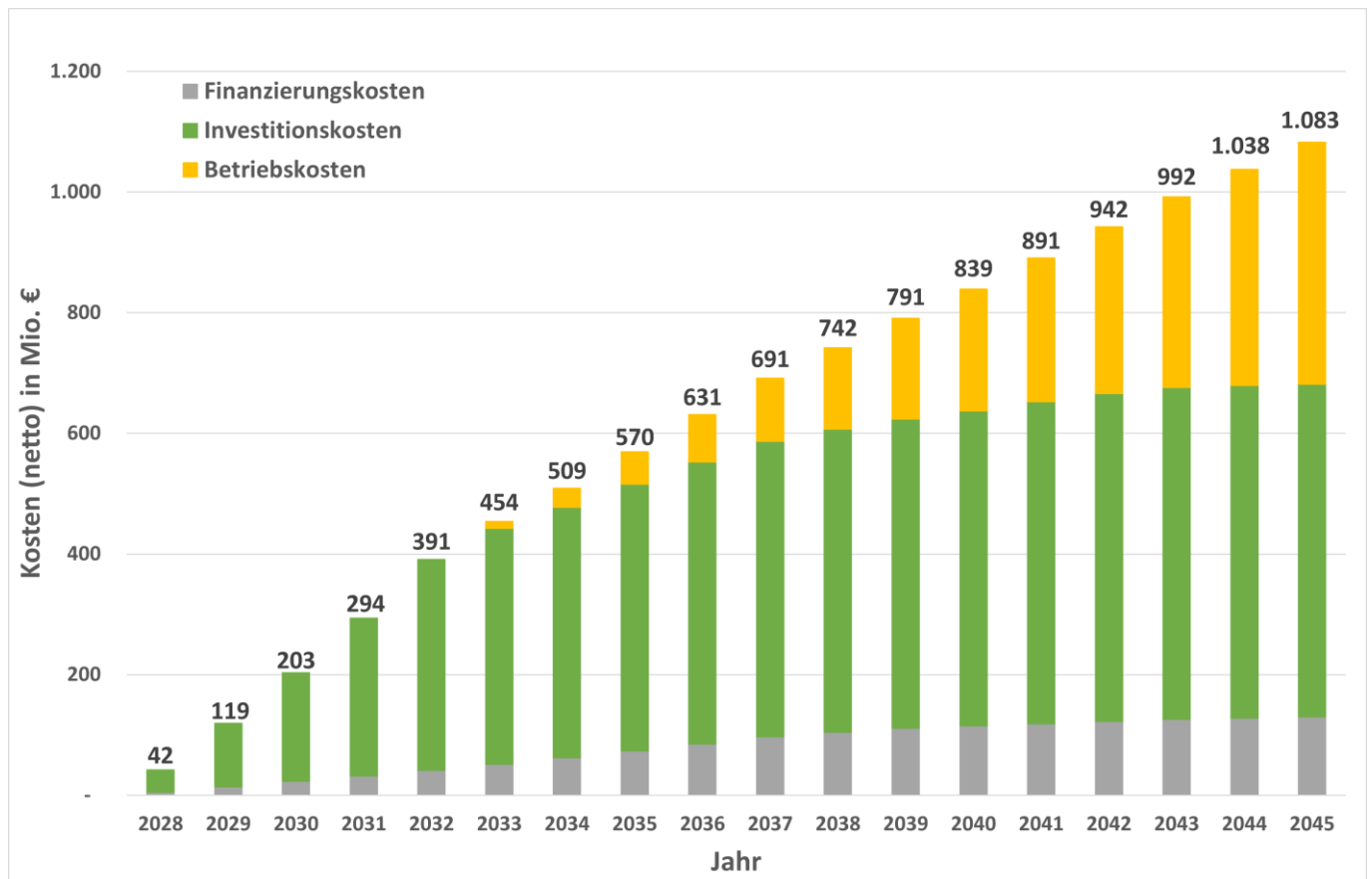


Abbildung 21: Kumulierte Netto-Gesamtkosten Szenario 1

5.4.2 Szenario 2

Szenario 2 stellt die kumulative Entwicklung der Gesamtkosten für die Inbetriebnahme der Kläranlagen entsprechend ihrem Rang in der Priorisierungsliste dar, mit der Veränderung, dass zwei der großen sächsischen Kläranlagen später in Betrieb gehen. Siehe hierzu auch die Darstellung der Inbetriebnahmezeitpunkte in Abbildung 2.

Abbildung 22 zeigt die kumulierten Gesamtkosten für das Szenario 2. Durch die Verschiebung der Fertigstellungen von zwei der drei Großkläranlagen auf die Jahre 2039 und 2045 verringern sich die Gesamtkosten um ca. 5 % von 1.083 auf 1.033 Millionen Euro.

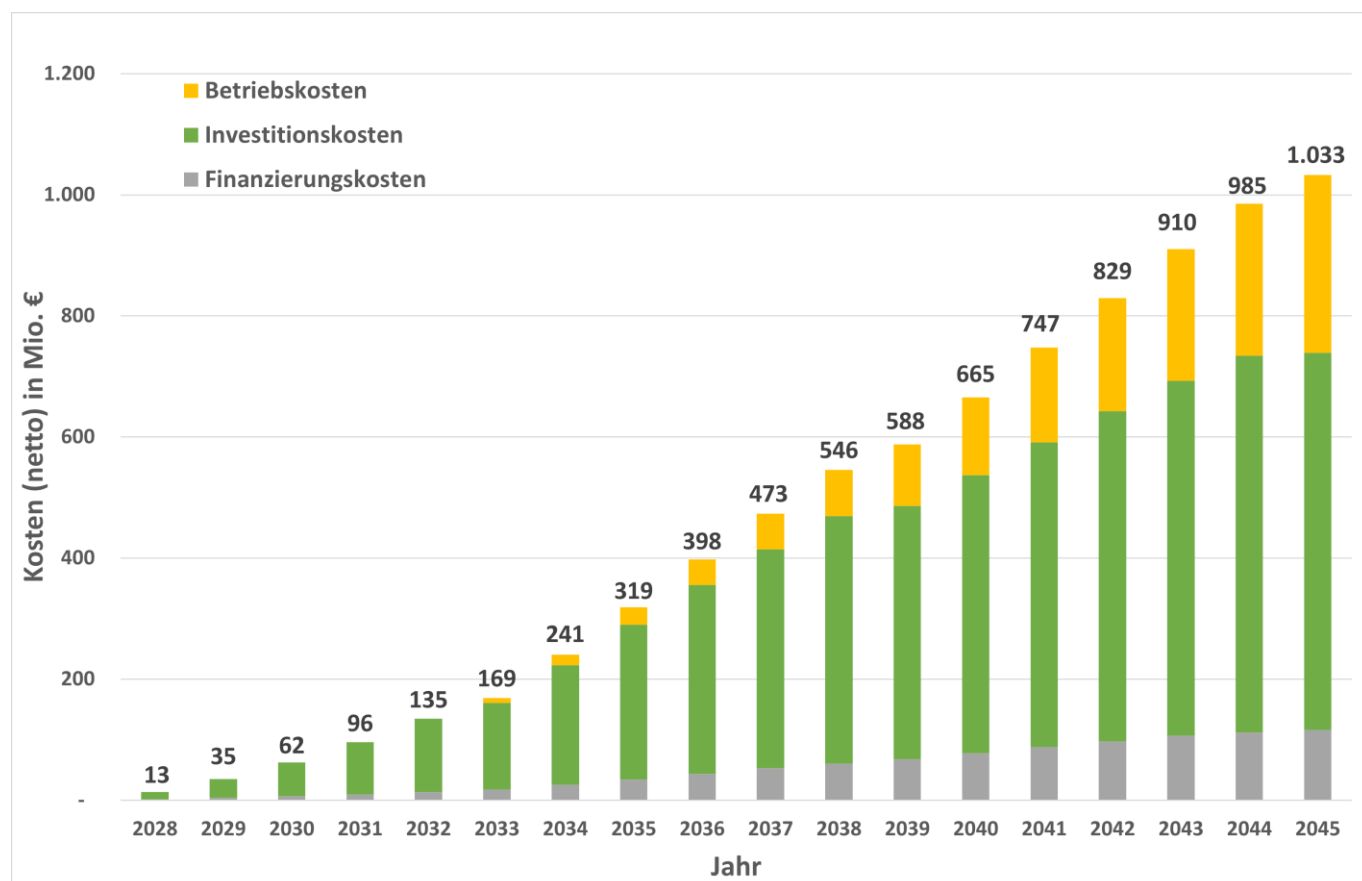


Abbildung 22: Kumulierte Netto-Gesamtkosten Szenario 2

5.4.3 Szenario 1 mit erhöhter Dimensionierungswassermenge

In Abbildung 23 sind die kumulierten Kosten für das Szenario 1 mit den erhöhten Dimensionierungswassermengen dargestellt. Insgesamt führt die Erhöhung der Dimensionierungswassermenge bis zum Jahr 2045 zu um ca. 5 % höheren Gesamtkosten.

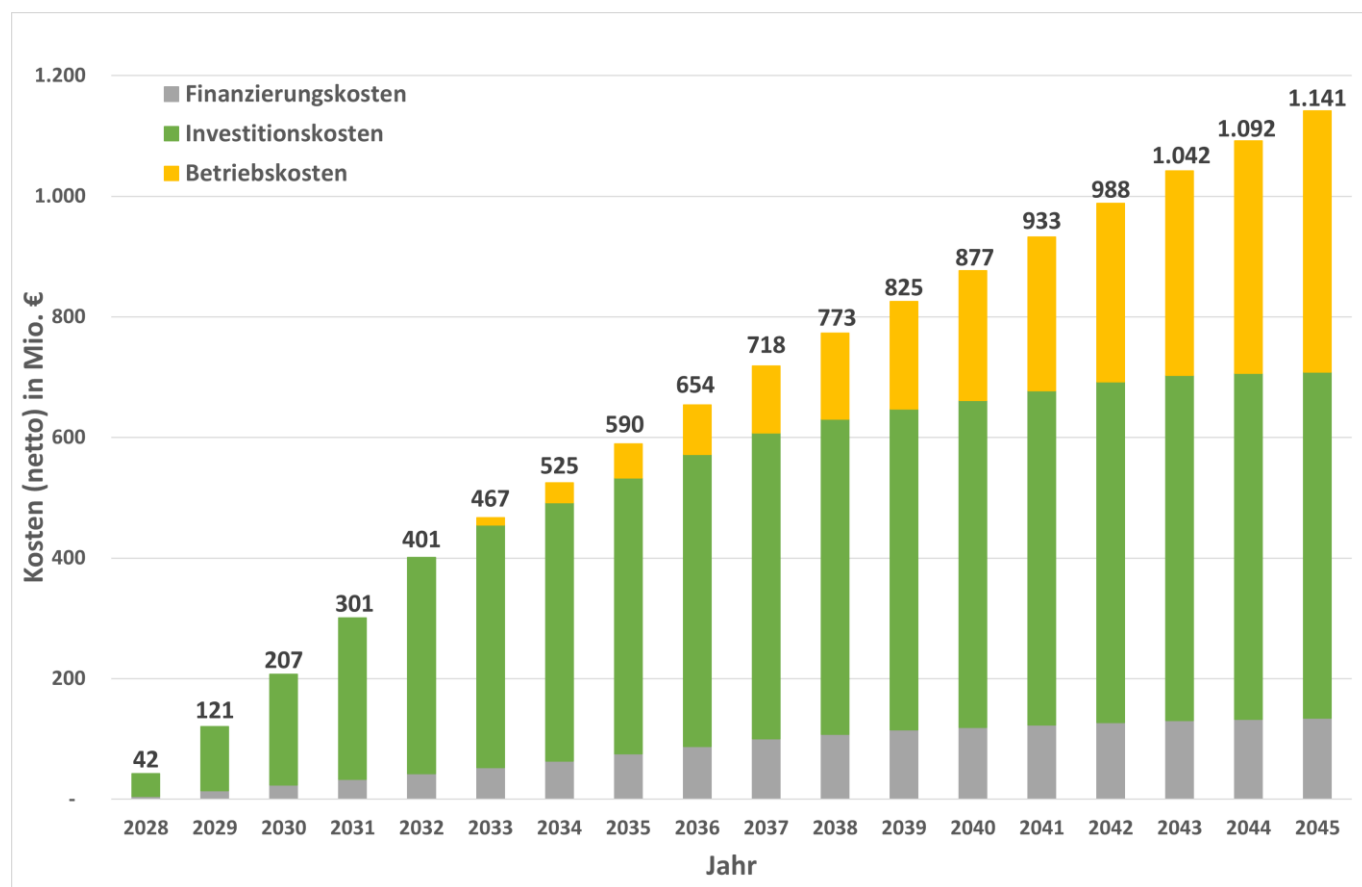


Abbildung 23: Kumulierte Netto-Gesamtkosten Szenario 1 mit erhöhter Dimensionierungswassermenge

5.4.4 Szenario 2 mit erhöhter Dimensionierungswassermenge

Die kumulierten Kosten für Szenario 2 mit erhöhten Dimensionierungswassermengen sind in Abbildung 24 dargestellt. Das Szenario 2 mit erhöhten Dimensionierungswassermengen weist ca. 6 % höhere Gesamtkosten auf als das Szenario 2.

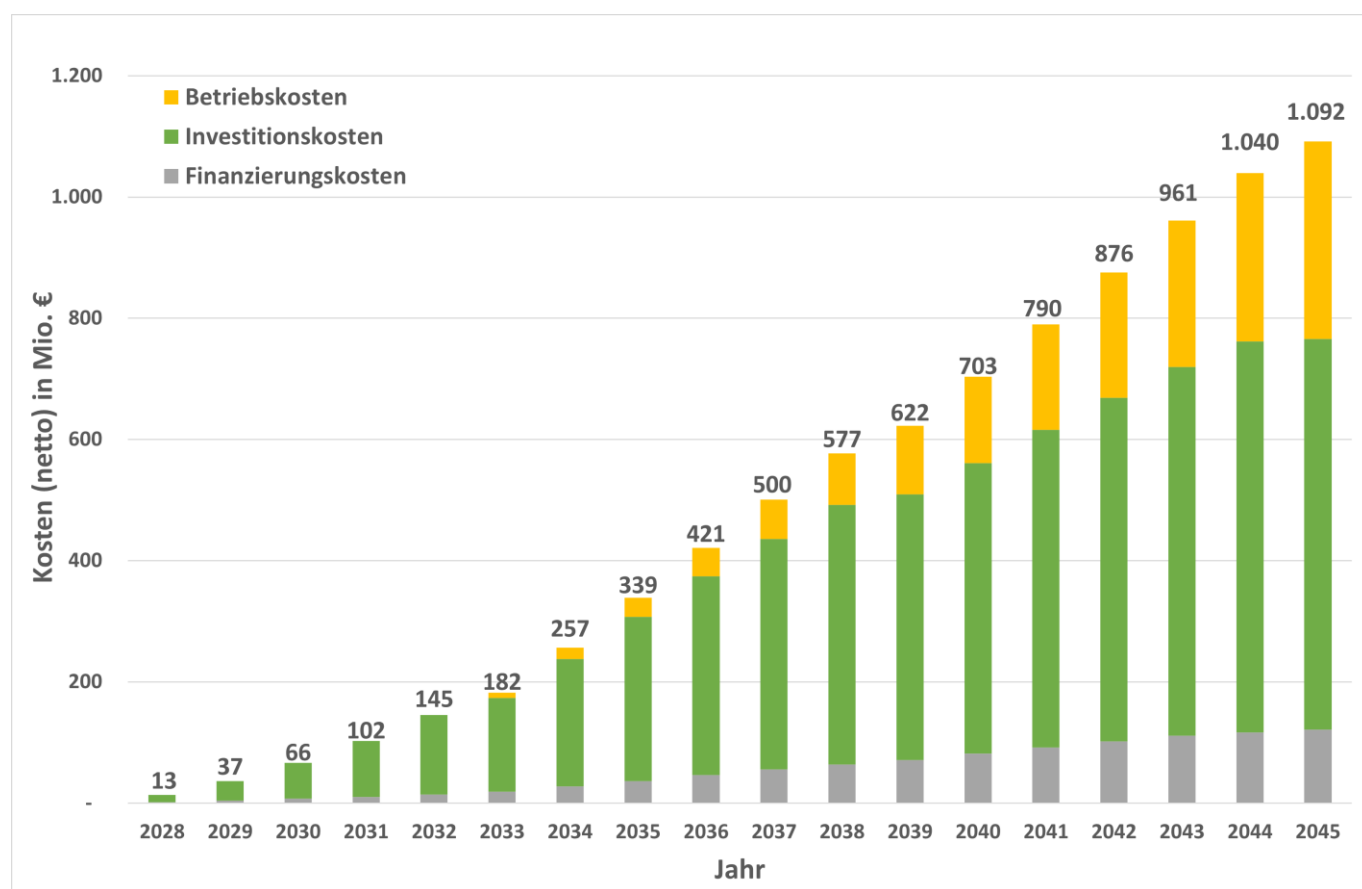


Abbildung 24: Kumulierte Netto-Gesamtkosten Szenario 2 mit erhöhter Dimensionierungswassermenge

5.5 Jährliche Gesamtkosten

In Kapitel 5.4 sind die Gesamtkosten, bestehend aus Investitions-, Betriebs- und Finanzierungskosten, kumuliert, d. h. Jahr für Jahr aufsummiert, dargestellt. Die in diesem Kapitel gewählte Darstellungsform zeigt die von 2028 bis 2045 jährlich im Freistaat Sachsen zu erwartenden Gesamtkosten für die Errichtung und den Betrieb der 61 Anlagen für die vierte Reinigungsstufe.

5.5.1 Szenario 1

Szenario 1 stellt die zu erwartenden jährlichen Gesamtkosten bei Inbetriebnahme der Kläranlagen entsprechend ihrem Rang in der Priorisierungsliste dar. Siehe hierzu auch die Darstellung der Inbetriebnahmezeitpunkte in Abbildung 1 entsprechend der Rangfolge, siehe Darstellung in A 1.

Es fallen besonders in den ersten fünf Jahren bis 2032 hohe Gesamtkosten von bis zu ca. 97 Millionen Euro in einem Jahr an. Danach ist jährlich mit durchschnittlich 50 bis 60 Millionen Euro zu rechnen. Die zu erwartenden jährlich entstehenden Kosten im Szenario 1 sind in Abbildung 25 dargestellt.

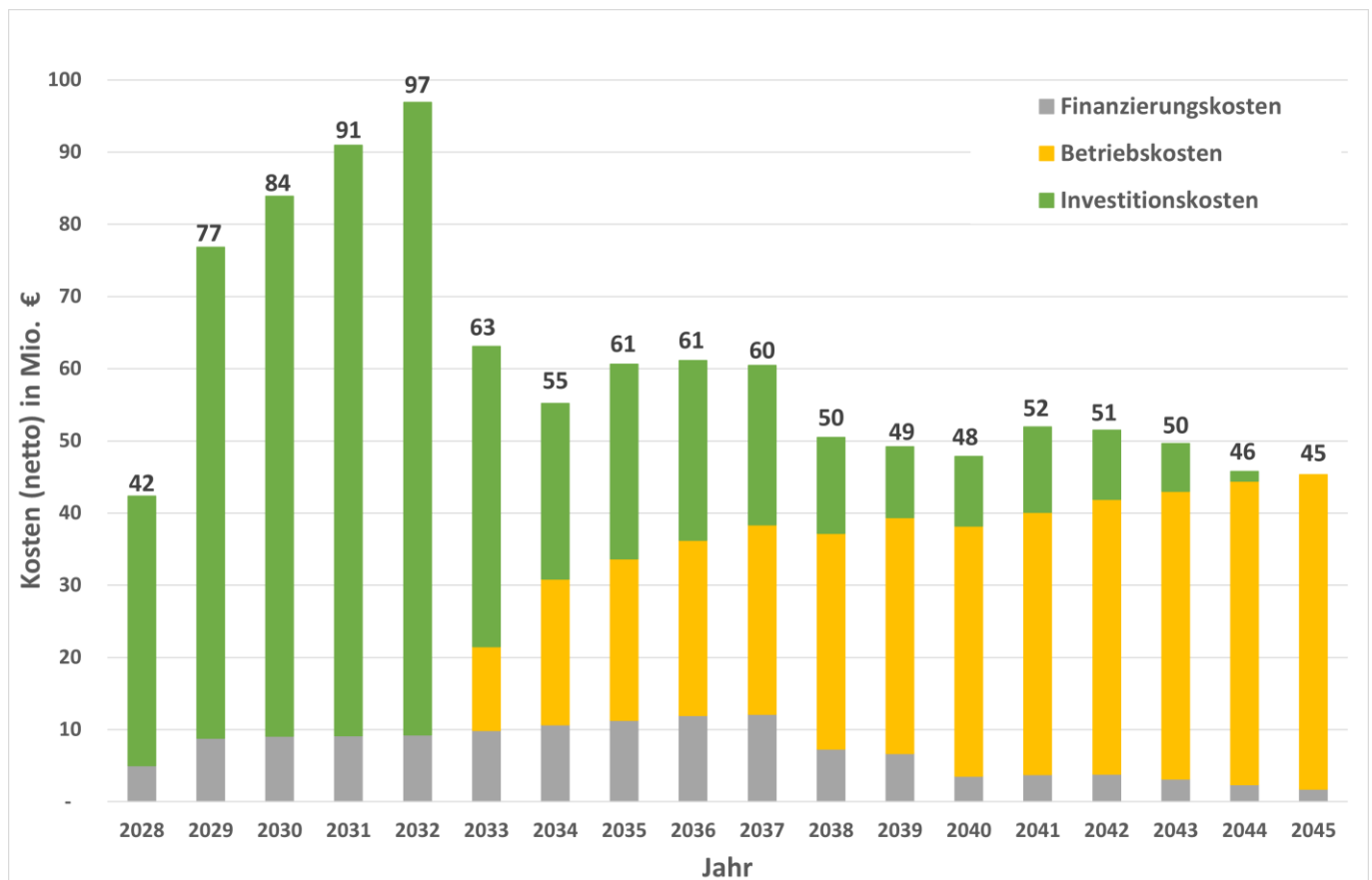


Abbildung 25: Jährliche Netto-Gesamtkosten Szenario 1

5.5.2 Szenario 2

Szenario 2 stellt die zu erwartenden jährlichen Gesamtkosten bei Inbetriebnahme der Kläranlagen entsprechend ihrem Rang in der Priorisierungsliste dar, mit der Veränderung, dass zwei der großen sächsischen Kläranlagen erst 2039 bzw. 2045 in Betrieb gehen. Siehe hierzu auch die Darstellung der Inbetriebnahmezeitpunkte in Abbildung 2.

Aufgrund der vergleichsweise sehr hohen Investitionskosten dieser beiden großen Kläranlagen entstehen höhere jährliche Gesamtkosten ab etwa 2034 bis 2038 sowie ab 2040 bis 2044. Die jährlichen Kosten im Szenario 2 sind in Abbildung 26 dargestellt.

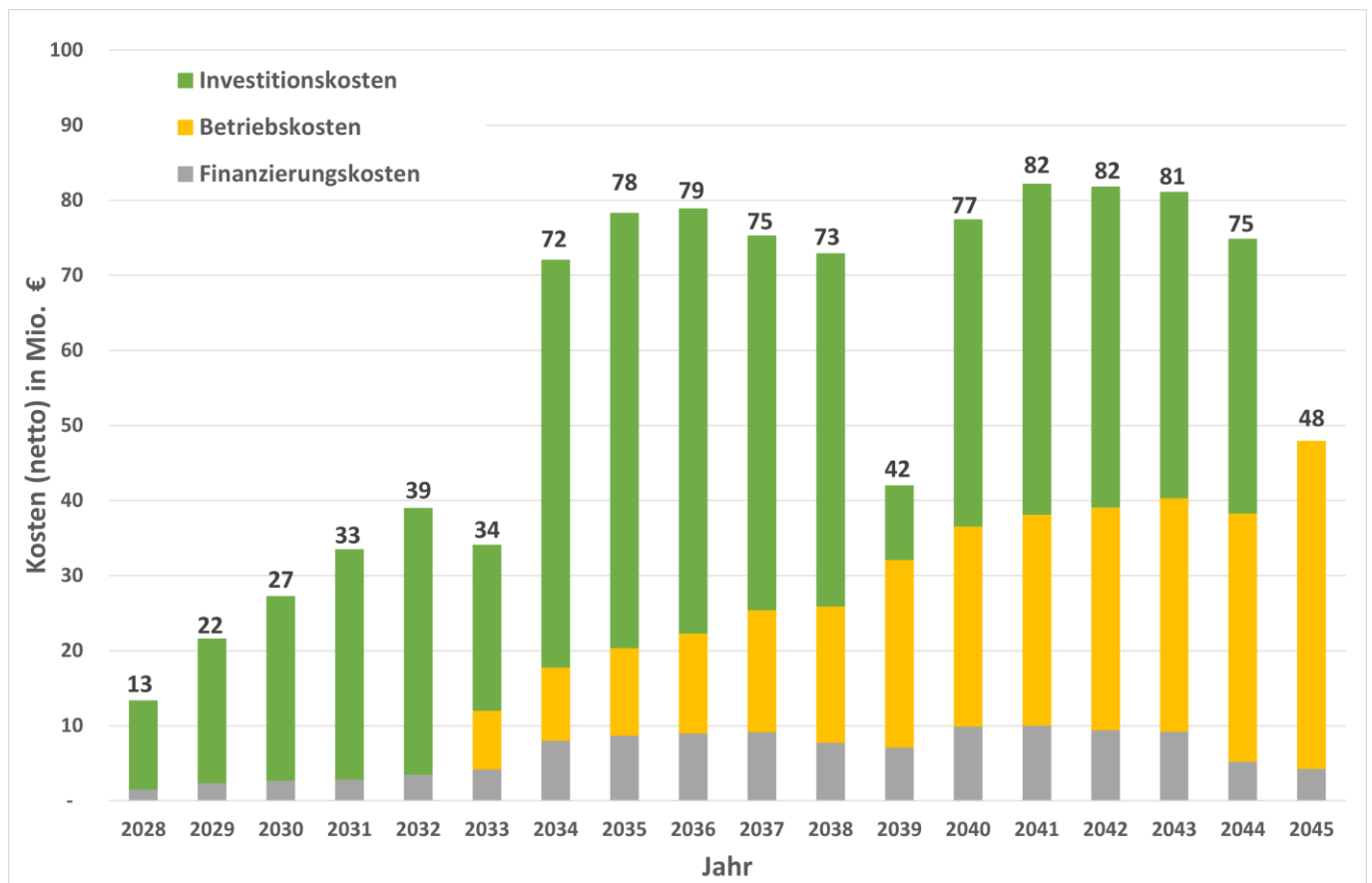


Abbildung 26: Jährliche Netto-Gesamtkosten Szenario 2

5.5.3 Szenario 1 mit erhöhter Dimensionierungswassermenge

Die zu erwartenden jährlichen Gesamtkosten bei Erhöhung der Dimensionierungswassermengen zeigen einen ähnlichen Verlauf wie im Szenario 1, jedoch um bis zu ca. 5 Millionen Euro in einem Jahr höher. Die jährlichen Kosten für das Szenario mit erhöhten Dimensionierungswassermengen sind in Abbildung 27 dargestellt.

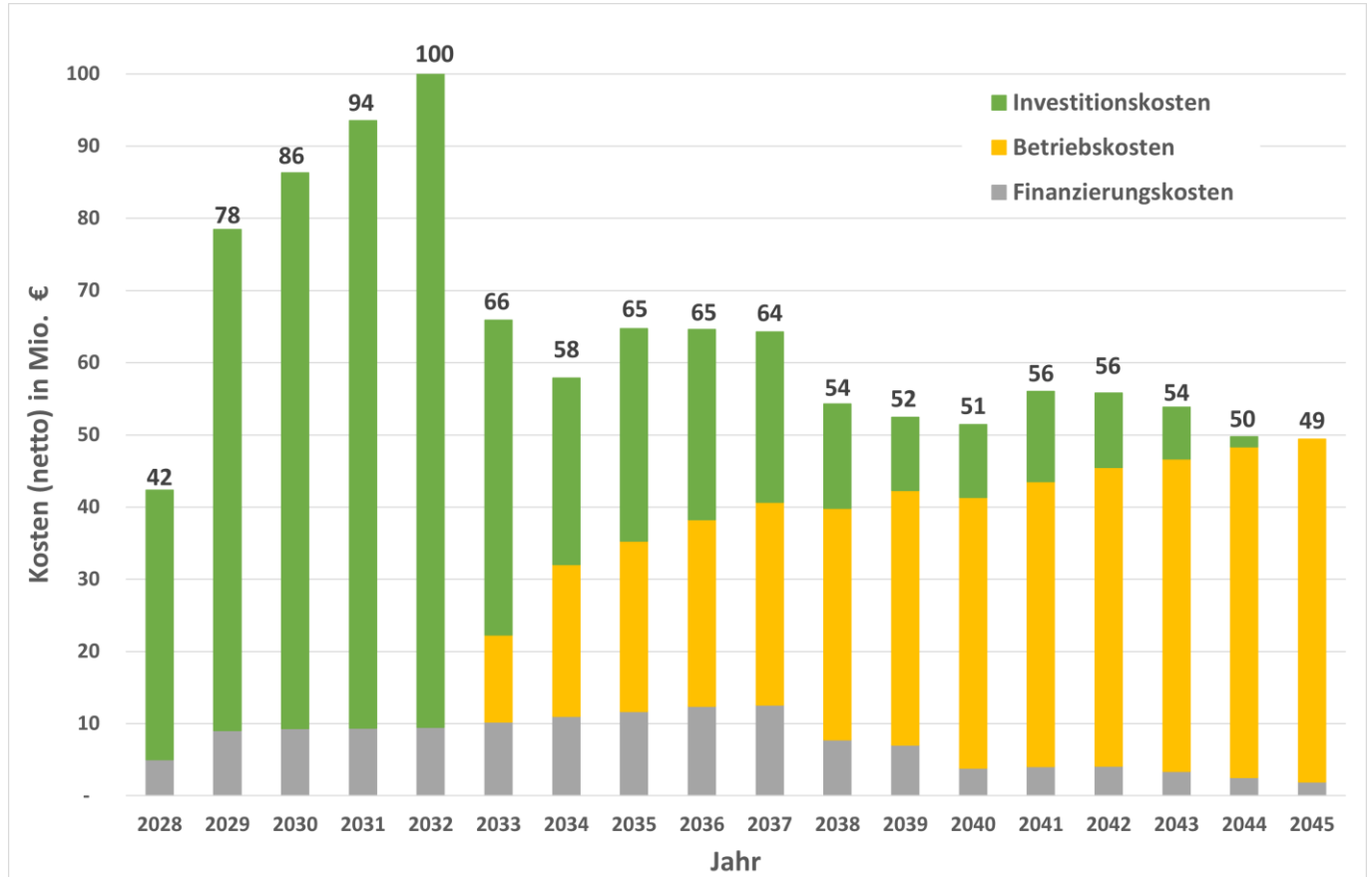


Abbildung 27: Jährliche Netto-Gesamtkosten Szenario 1 mit erhöhter Dimensionierungswassermenge

5.5.4 Szenario 2 mit erhöhter Dimensionierungswassermenge

Für das Szenario 2 mit erhöhten Dimensionierungswassermengen sind die jährlichen Gesamtkosten in Abbildung 28 dargestellt. In diesem Szenario entstehen in einem Jahr bis zu ca. 4 Millionen Euro höhere Gesamtkosten als in Szenario 2.

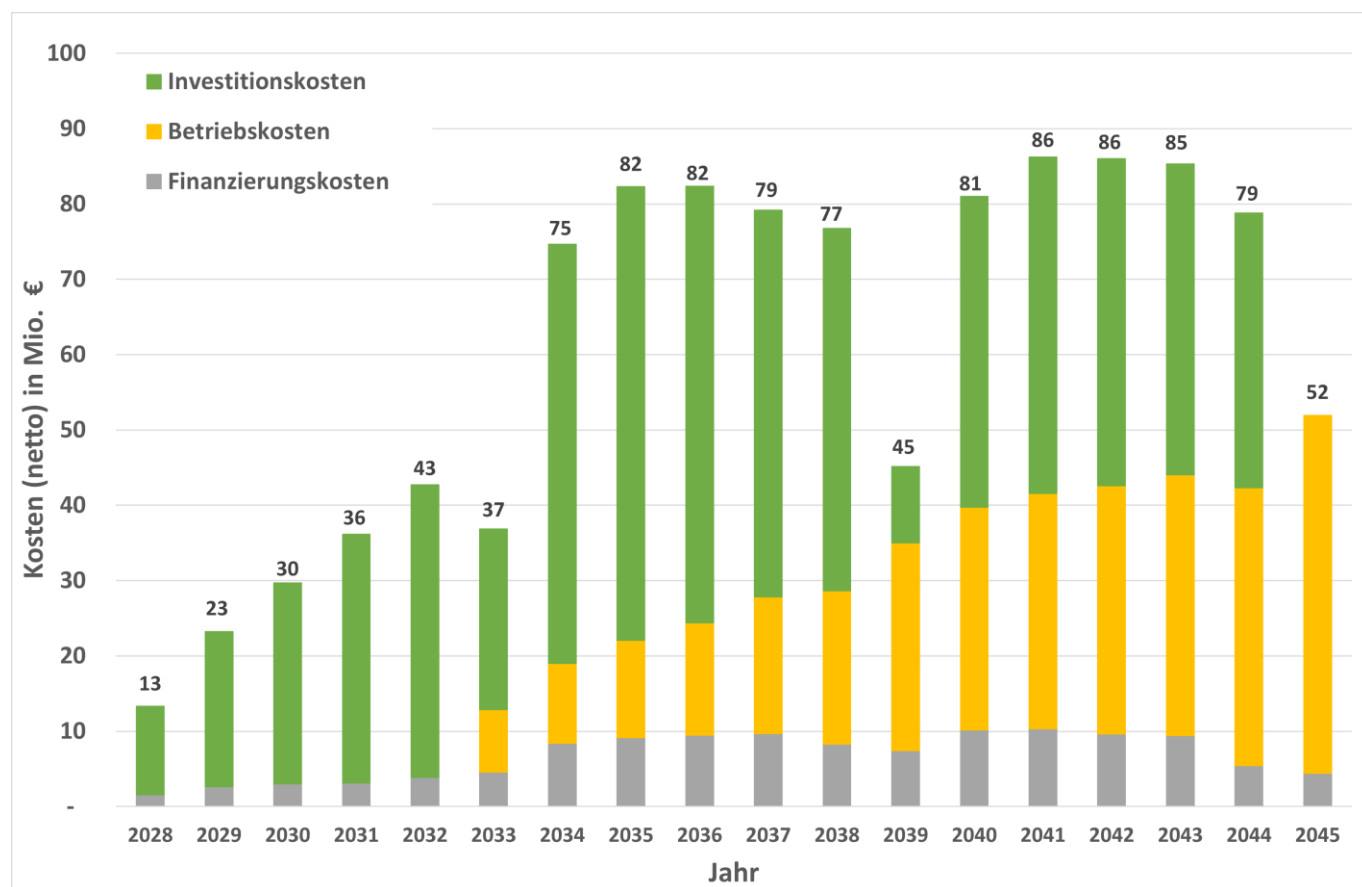


Abbildung 28: Jährliche Netto-Gesamtkosten Szenario 2 mit erhöhter Dimensionierungswassermenge

5.6 Spezifische Kosten

Wie bereits in den Kapiteln 5.1 und 5.2 beschrieben, erfolgte für alle Größenklassen-Untergruppen die Abschätzung spezifischer Investitions- und Betriebskosten bezogen auf die in der vierten Reinigungsstufe behandelte Abwassermenge. Als Eingangswerte dienen die Mittelwerte der Jahresabwassermenge für jede Untergruppe, die in Tabelle 7 dargestellt sind.

Zu erkennen sind in Abbildung 29 die vergleichsweise hohen spezifischen Investitionskosten für das Kombinationsverfahren Ozon+GAK-Filter für die Untergruppen 4A (10.000 – 19.999 EW) und 4B (20.000 – 49.999 EW). Ab der Untergruppe 4C (50.000 EW und mehr) nähern sich die spezifischen Kosten des Kombinationsverfahrens den anderen Verfahren an. Über alle Größenklassen-Untergruppen hinweg weist das reine Ozonverfahren die geringsten spezifischen Investitionskosten auf.

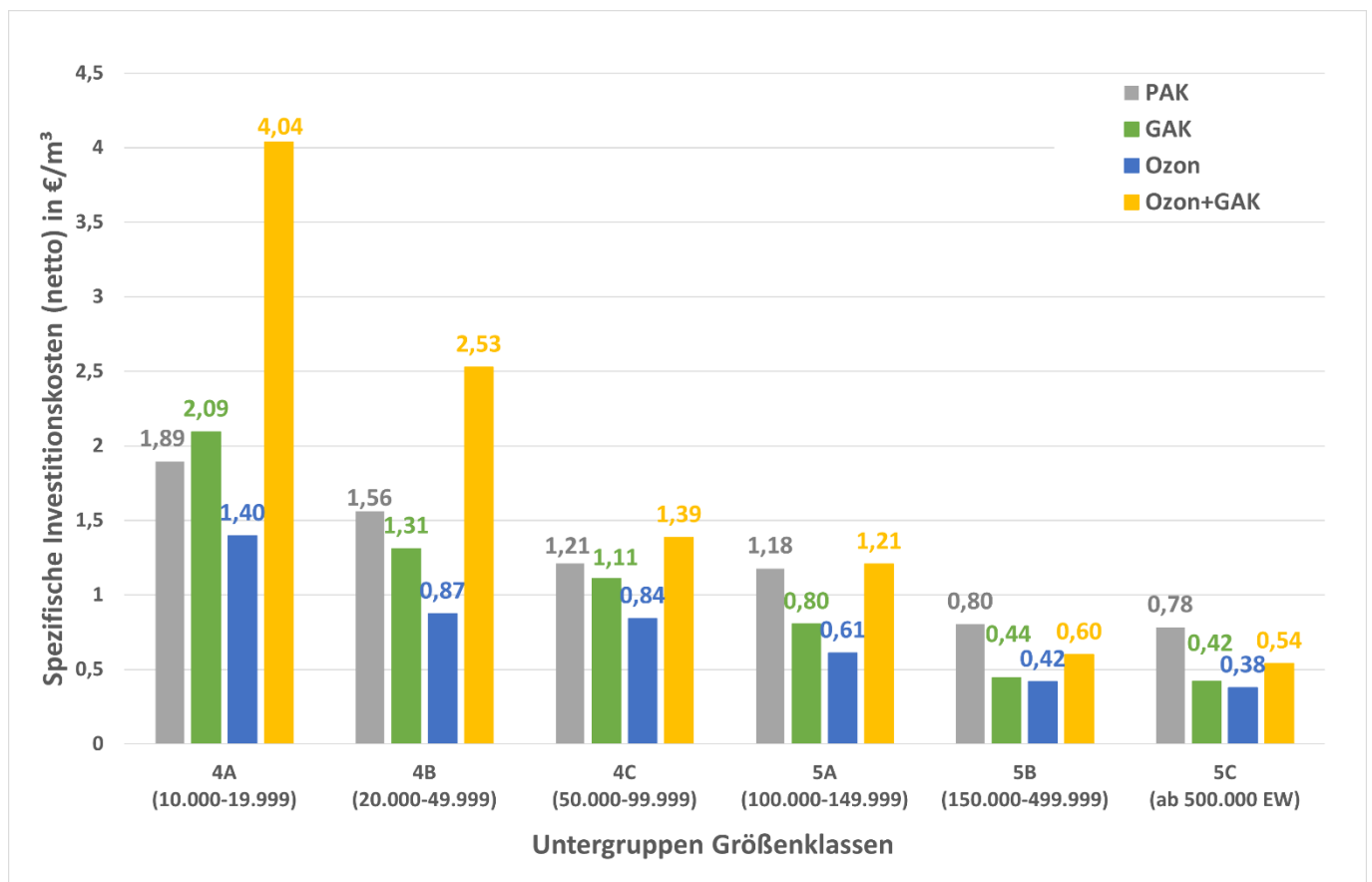


Abbildung 29: Spezifische Netto-Investitionskosten bezogen auf die behandelte Abwassermenge

Die spezifischen Betriebskosten wurden ebenso für die Untergruppen und die ausgewählten Verfahren ermittelt. Diese sind in Abbildung 30 dargestellt.

Es wird deutlich, dass auch die spezifischen Betriebskosten für das reine Ozonverfahren über alle Größenklassen-Untergruppen hinweg sich als niedriger im Vergleich zu den Aktivkohleverfahren erweisen. Von den Verfahren mit Verwendung von Aktivkohle stellt sich das PAK-Verfahren als das günstigste dar.

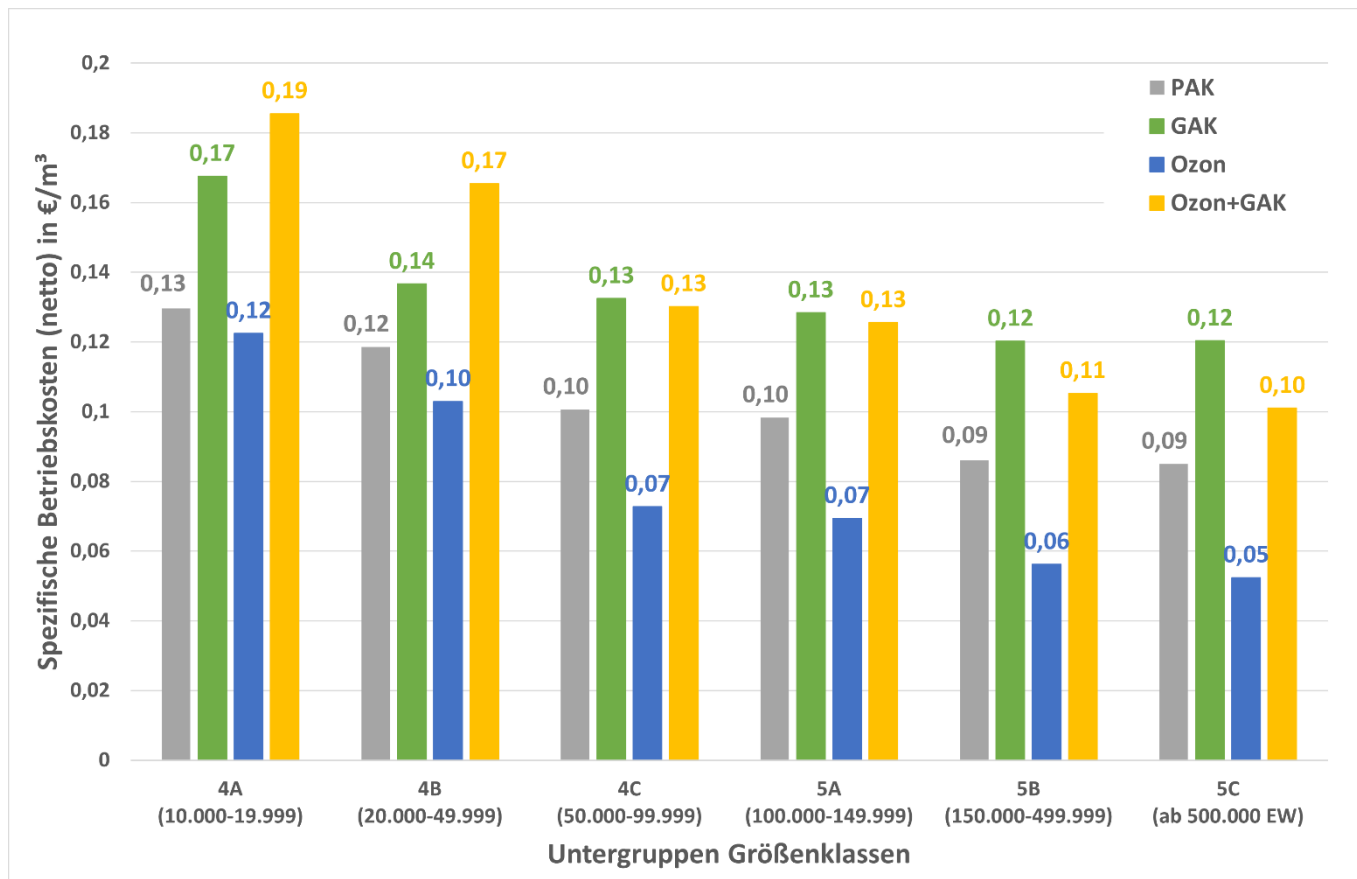


Abbildung 30: Spezifische Netto-Betriebskosten bezogen auf die behandelte Abwassermenge

VKU-Studie (Verband kommunaler Unternehmen e.V., 2024)

In der Aufgabenstellung zu dieser vorliegenden Ausarbeitung wurde unter anderem auf eine Veröffentlichung des Verbands kommunaler Unternehmen (VKU) mit dem Titel „Erweiterte Herstellerverantwortung und Kosten der Viertbehandlung“ verwiesen. Diese Veröffentlichung kann auf der Internetseite des VKU² abgerufen werden.

Diese Studie geht für die Bundesrepublik Deutschland von einem Investitionsaufwand bis 2045 von 8,7 Mrd. Euro aus, beruhend auf der Annahme, dass 570 Kläranlagen mit einer Viertbehandlung auszustatten sind. Die Autoren der Fichtner Management Consulting AG gelangen über eine Clusterung (Größenklassenzuordnung) der Kläranlagen und je Clustergröße mit spezifischen Investitions- und Betriebskosten entsprechend der gewählten Technologie zu einer zeitlichen Staffelung bis 2045 (jährliche Kosten) bei stufenweiser Ausrüstung der betroffenen Kläranlagen sowie zu kumulierten Gesamtausgaben.

² <https://www.vku.de/themen/preise-und-gebuehren/artikel/herstellerverantwortung-was-kostet-die-pflicht-zur-vierten-reinigungsstufe/>

Für die vorliegende Ausarbeitung sollte für Sachsen eine ähnliche Darstellung wie in der VKU-Studie gewählt werden. Reinvestitionskosten sollten ebenso wie in der VKU-Studie unberücksichtigt bleiben. Somit wird die Vergleichbarkeit der Kostenansätze und damit der Ergebnisse gewahrt.

Ein Vergleich der sächsischen Ausarbeitung mit den Ergebnissen der VKU-Studie kommt zu nachfolgenden Ergebnissen: Sowohl die spezifischen Investitionskosten als auch die spezifischen Betriebskosten zeigen einen ähnlichen Verlauf der ermittelten spezifischen Kosten. Sie beziehen sich jeweils auf die behandelte Abwassermenge (€/m^3). Dabei ist zu berücksichtigen, dass die spezifischen Investitionskosten nur einmal anfallen, die Betriebskosten jedoch jährlich.

Die spezifischen Investitionskosten der adsorptiven Verfahren für die Untergruppe 4A liegen in der vorliegenden sächsischen Ausarbeitung bei $1,89 \text{ €/m}^3$ bis $2,09 \text{ €/m}^3$ und damit ca. $0,60 \text{ €/m}^3$ unter den entsprechenden Werten der VKU-Studie. Für die anderen Untergruppen und für das Verfahren der Ozonung sind die spezifischen Investitionskosten mit den Werten der VKU-Studie vergleichbar.

Bei den spezifischen Betriebskosten zeigen sich jedoch deutlichere Unterschiede. In der VKU-Studie liegen die spezifischen Betriebskosten der adsorptiven Verfahren zwischen $0,05 \text{ €/m}^3$ und $0,09 \text{ €/m}^3$. Die in der sächsischen Ausarbeitung ermittelten spezifischen Betriebskosten für die adsorptiven Verfahren liegen zwischen $0,09 \text{ €/m}^3$ und $0,17 \text{ €/m}^3$ und damit etwa doppelt so hoch. Die spezifischen Betriebskosten in der VKU-Studie für Ozon liegen im Bereich zwischen $0,02 \text{ €/m}^3$ und $0,07 \text{ €/m}^3$. Die in der sächsischen Ausarbeitung ermittelten spezifischen Betriebskosten liegen im Bereich zwischen $0,05 \text{ €/m}^3$ und $0,12 \text{ €/m}^3$ und damit ebenfalls etwa doppelt so hoch.

Dem Verfasser der vorliegenden sächsischen Ausarbeitung liegen keine weiteren Informationen über die Details der Kostenabschätzung in der VKU-Studie vor. Daher ist eine detailliertere Analyse der unterschiedlichen Ergebnisse nicht möglich.

5.7 Berücksichtigung der erweiterten Herstellerverantwortung

Um die aus der erweiterten Herstellerverantwortung resultierenden Auswirkungen auf die Gesamtkosten darzustellen, werden die Netto Investitions- und Betriebskosten für das Szenario 1 und das Szenario 2 um 80 % reduziert.

5.7.1 Szenario 1

Unter Berücksichtigung einer erweiterten Herstellerverantwortung belaufen sich die kumulierten Gesamtkosten auf bis zu 217 Millionen Euro. Sie sind in Abbildung 31 dargestellt.

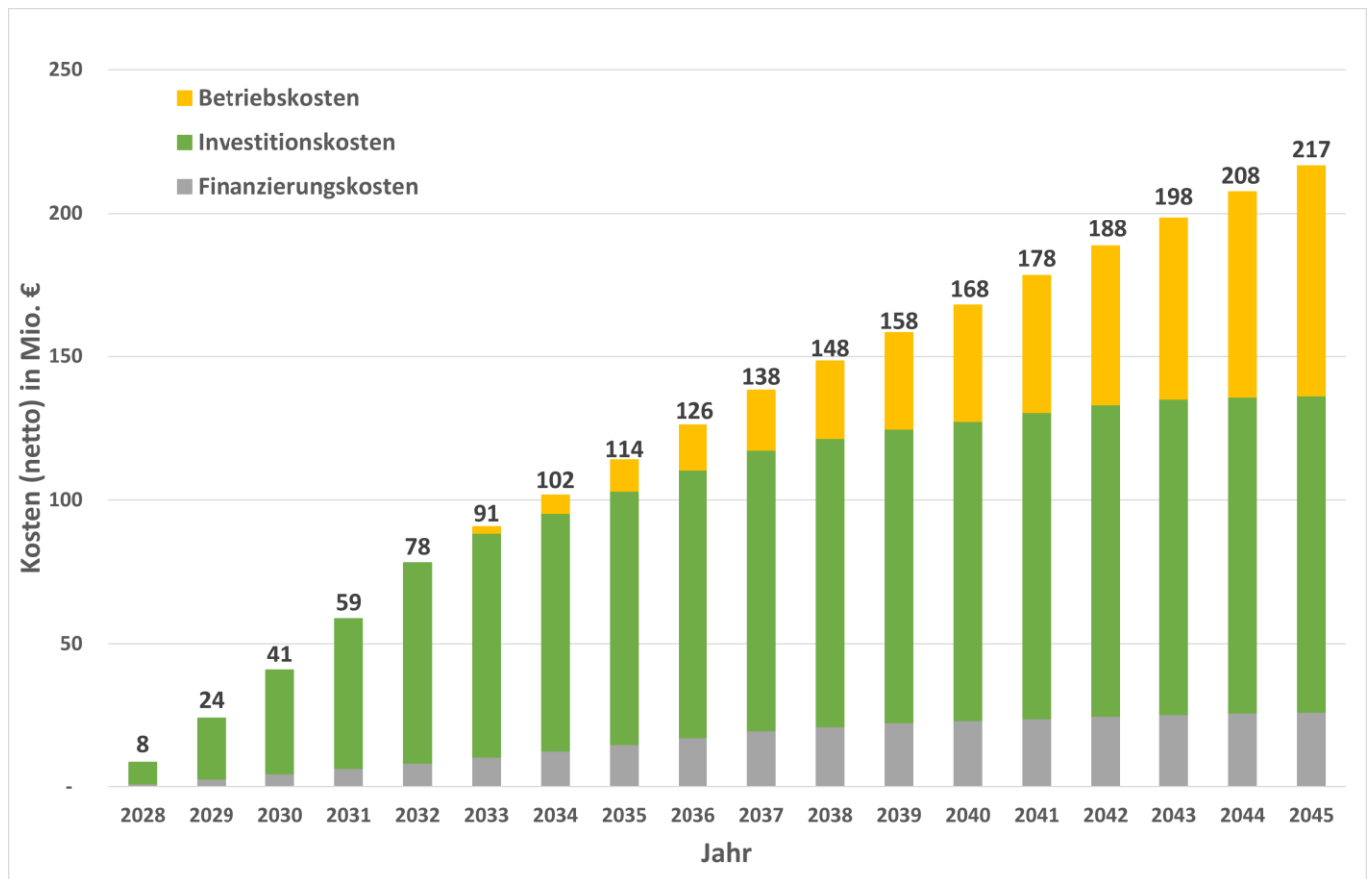


Abbildung 31: Kumulierte Netto-Gesamtkosten Szenario 1 unter Berücksichtigung der erweiterten Herstellerverantwortung

Ebenso wurden die jährlichen Gesamtkosten unter Berücksichtigung der erweiterten Herstellerverantwortung ermittelt. Im Jahr mit den höchsten Ausgaben, 2032, liegen diese bei ca. 19 Millionen Euro. Im selben Jahr wurden im Szenario 1 ohne Berücksichtigung der erweiterten Herstellerverantwortung Kosten von 97 Millionen Euro ermittelt.

Die jährlichen Kosten unter Berücksichtigung einer erweiterten Herstellerverantwortung sind in Abbildung 32 dargestellt.

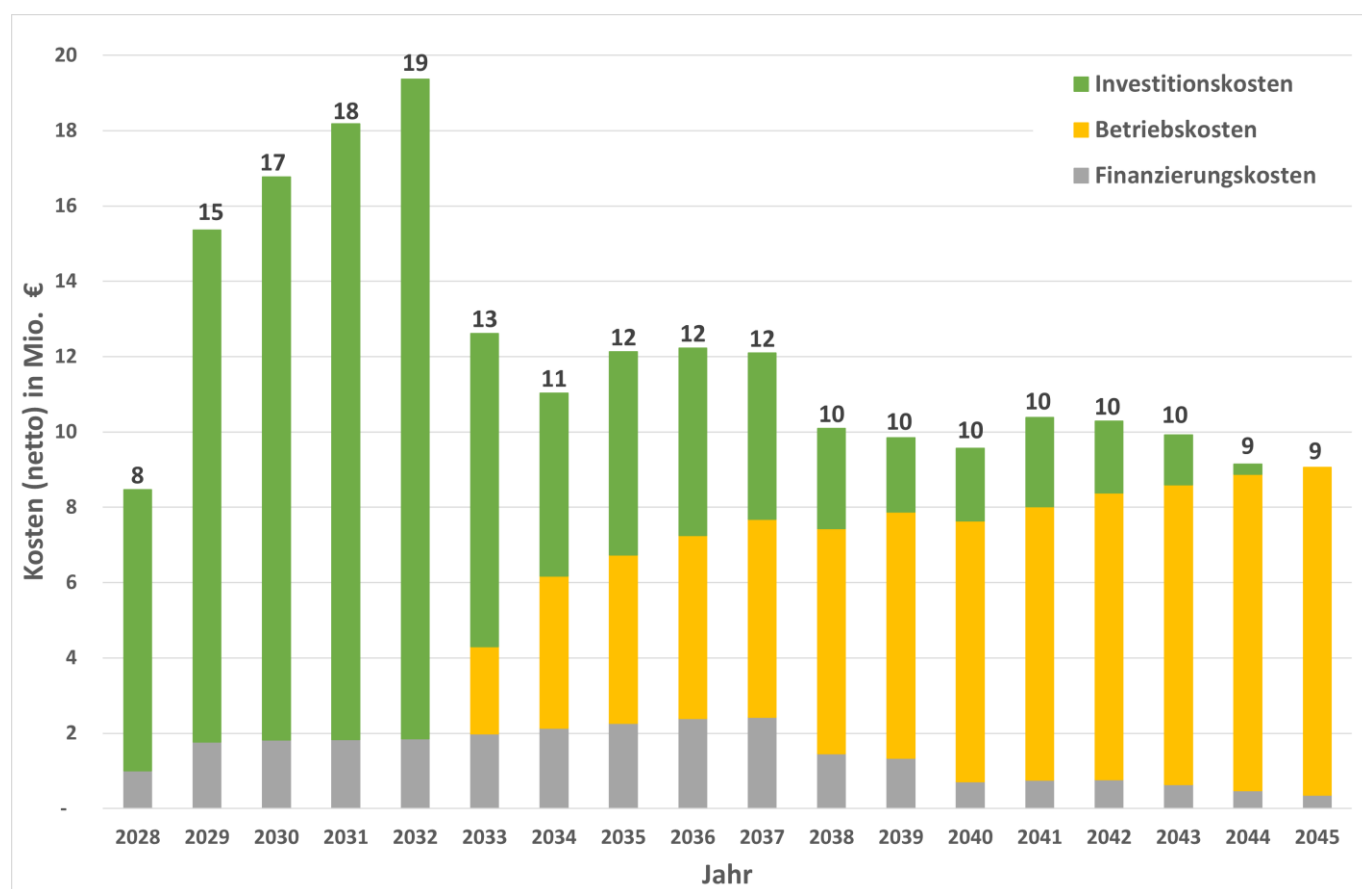


Abbildung 32: Jährliche Netto-Gesamtkosten Szenario 1 unter Berücksichtigung der erweiterten Herstellerverantwortung

5.7.2 Szenario 2

Für das Szenario 2 ergeben sich unter Berücksichtigung der erweiterten Herstellerverantwortung kumulierte Gesamtkosten von bis zu 207 Millionen Euro. Damit liegen die Kosten ca. 5 % unter denen von Szenario 1. Die kumulierten Gesamtkosten unter Berücksichtigung der erweiterten Herstellerverantwortung für das Szenario 2 sind in Abbildung 33 dargestellt.

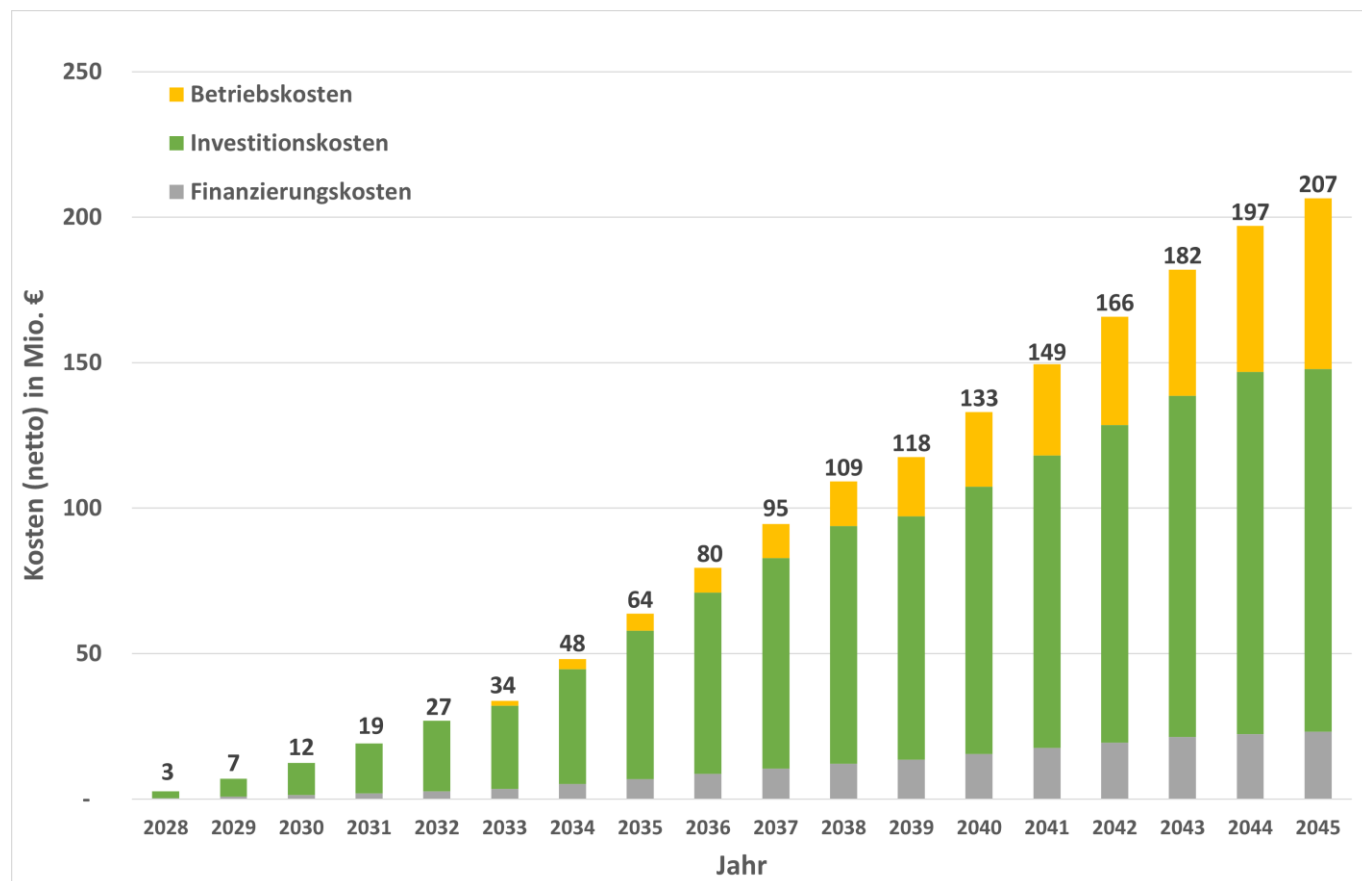


Abbildung 33: Kumulierte Netto-Gesamtkosten Szenario 2 unter Berücksichtigung der erweiterten Herstellerverantwortung

Im Szenario 2 unter Berücksichtigung der erweiterten Herstellerverantwortung liegen die jährlichen Kosten in den Jahren mit den höchsten Ausgaben zwischen 2034 und 2038 sowie zwischen 2040 und 2044, bei bis zu 16 Millionen Euro. Im Szenario 2 ohne Berücksichtigung der erweiterten Herstellerverantwortung steigen die Ausgaben im selben Zeitraum auf bis zu 86 Millionen Euro. Die jährlichen Gesamtkosten für Szenario 2 unter Berücksichtigung der erweiterten Herstellerverantwortung sind in Abbildung 34 dargestellt.

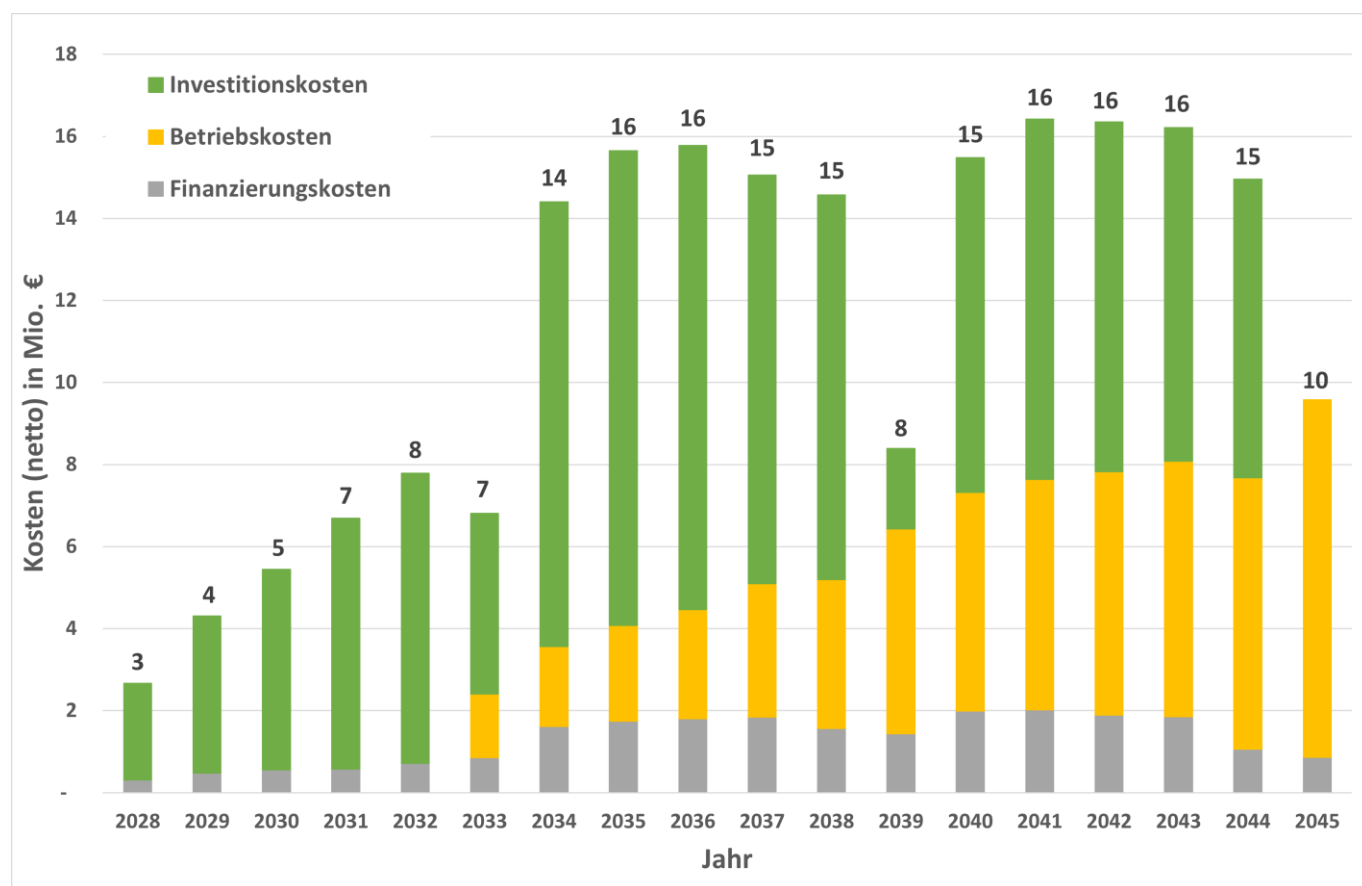


Abbildung 34: Jährliche Netto-Gesamtkosten Szenario 2 unter Berücksichtigung der erweiterten Herstellerverantwortung

6 Betrachtung weiterer Aspekte

Neben der wirtschaftlichen Bewertung und der technischen Eignung der Verfahren zur vierten Reinigungsstufe sind auch ökologische Fragestellungen, Ressourcenschutz und die Zukunftsfähigkeit der eingesetzten Technologien von großer Bedeutung. In diesem Kapitel werden daher ergänzend zur Kostenschätzung Umweltaspekte der ausgewählten Verfahren zur vierten Reinigungsstufe betrachtet.

Aktivkohle

Aktivkohle wird aus kohlenstoffhaltigen Materialien wie Holz, Kohle oder Kokosnussschalen hergestellt, die einer Behandlung bei hohen Temperaturen unterzogen werden. Dieser Prozess ist nicht nur energieintensiv, sondern trägt auch zur Freisetzung von Treibhausgasen bei. Für die Herstellung von einem Kilogramm Aktivkohle werden etwa 3 bis 5 kg Kohle benötigt (Palmowski, Mousel, & Wieland, 2018).

Granulierte Aktivkohle kann nach der Nutzung regeneriert werden, was ökologische und ökonomische Vorteile bietet. Pulveraktivkohle hingegen wird nach dem Einsatz mit dem Klärschlamm entfernt, wodurch zusätzlich 5 bis 10 % mehr Überschussschlamm entsteht und die Entsorgungskosten steigen (Mousel, Ehm, & Keyzers, A1 Modulbeschreibungen Pulveraktivkohle im Überstau von Sandfiltern, 2018d).

Ein wesentlicher Vorteil von Pulveraktivkohle liegt in ihrer flexiblen Dosierbarkeit. Aufgrund der direkten Zugabe in den Abwasserstrom kann die Menge an Pulveraktivkohle bedarfsgerecht an die jeweilige Abwasserzusammensetzung angepasst werden, im Unterschied zu GAK-Filtern, die konstant betrieben werden. Dadurch lässt sich der Aktivkohleeinsatz optimieren, was sowohl Ressourcen spart als auch Betriebskosten senken kann. Zudem ermöglicht die flexible Dosierung eine schnelle Reaktion auf schwankende Belastungen (Mousel, Ehm, & Palmowski, A1 Modulbeschreibungen Filtration über granulierte Aktivkohle, 2018b).

Zukünftig könnte die verstärkte Nutzung regenerativer Aktivkohle aus nachhaltigen biogenen Rohstoffen zur Verbesserung der Umweltbilanz beitragen.

Ozon

Die Erzeugung von Ozon erfolgt vor Ort aus Luft oder reinem Sauerstoff und ist ebenfalls energieintensiv. Neben dem Energieeinsatz sind auch mögliche Nebenprodukte zu beachten. Ozon bietet Vorteile wie eine hohe Reinigungsleistung, kurze Reaktionszeiten und auch die Möglichkeit, das Verfahren flexibel an die Belastung des Abwassers anzupassen. In Kombination mit anderen Verfahren kann Ozon auch als Teilverfahren einer vierten Reinigungsstufe realisiert werden. Zukünftige Entwicklungen zielen darauf ab, die Energieeffizienz zu steigern und die Integration in bestehende Anlagen zu erleichtern (Brückner, 2021).

7 Zusammenfassung

Am 1. Januar 2025 ist die KARL in Kraft getreten. Sie ist von den Mitgliedstaaten bis zum 31. Juli 2027 in nationales Recht umzusetzen.

Artikel 8 Absatz 1 KARL verpflichtet die Mitgliedstaaten, kommunale Abwasserbehandlungsanlagen mit einer Abwasserfracht von 150.000 EW und mehr gestuft bis zum Jahr 2045 mit einer vierten Reinigungsstufe auszustatten. Gleiches gilt für kommunale Abwasserbehandlungsanlagen, die kommunales Abwasser aus Siedlungsgebieten mit 10.000 EW und mehr einleiten, sofern sie sich in einem der von den Mitgliedstaaten auszuweisenden Gebiete befinden, in denen die Konzentration von Mikroschadstoffen aus Abwasserbehandlungsanlagen ein Risiko für die Umwelt oder die menschliche Gesundheit darstellt (sogenannte Risikobetrachtung nach Artikel 8 Absatz 2 KARL). Diese Risikobetrachtung kann für den Freistaat Sachsen erst erfolgen, wenn die dafür maßgeblichen bundeseinheitliche Bewertungskriterien festgelegt wurden.

| Jahr | Prozentsatz bezogen auf Anzahl der Kläranlagen 10.000 bis < 150.000 EW | Prozentsatz bezogen auf Anzahl der Kläranlagen ab 150.000 EW |
|-------------|--|---|
| 2033 | 10% | 20% |
| 2036 | 30% | |
| 2039 | 60% | 60% |
| 2045 | 100% | 100% |

Die entsprechend der vorstehenden Fristen gestaffelte Einführung der vierten Reinigungsstufe soll sicherstellen, dass ein breites Spektrum der nach der Erst-, Zweit- und Drittbehandlung verbliebenen Mikroschadstoffe aus dem kommunalen Abwasser entfernt wird.

Zur Vorbereitung der Umsetzung des aufgrund von Artikel 8 KARL zu erlassenden Bundes- und Landeswasserrechtes hat das Ingenieurbüro Dr. Born – Dr. Ermel Ingenieure GmbH im Auftrag des LfULG eine Kostenschätzung der mit der Einführung der vierten Reinigungsstufe im Freistaat Sachsen verbundenen Gesamtkosten (Investitions-, Betriebs- sowie Finanzierungskosten) erarbeitet. Diese soll eine fundierte Grundlage für rechtliche, fachliche und politische Entscheidungen bieten, um eine effiziente und sozialverträgliche Einführung der vierten Reinigungsstufe zu ermöglichen.

Grundlage für die Kostenschätzung ist eine vom LfULG nach fachlichen Kriterien erstellte Priorisierungsliste mit insgesamt 61 kommunalen Kläranlagen, für welche die Ausrüstung mit einer vierten Reinigungsstufe in Betracht kommt.

Für die 61 Kläranlagen wurden unter Berücksichtigung der von der KARL vorgegebenen Fristen die folgenden Szenarien berechnet: Inbetriebnahme entsprechend der Priorisierungsliste (Szenario 1) sowie – nur insoweit abweichend von der Priorisierungsliste – Inbetriebnahme der drei großen Kläranlagen in

den Jahren 2033, 2039 und 2045 (Szenario 2). Für beide Szenarien wurden zusätzlich zwei Varianten betrachtet: eine Erhöhung der Dimensionierungswassermenge (Variante 1) sowie die Berücksichtigung der erweiterten Herstellerverantwortung gemäß Artikel 9 KARL (Variante 2). Letztere verpflichtet die Mitgliedstaaten, bis spätestens 31. Dezember 2028 die Hersteller, welche Humanarzneimittel und kosmetische Mittel in Verkehr bringen, zu mindestens 80 % an den Gesamtkosten der vierten Reinigungsstufe (einschließlich Investitions- und Betriebskosten) zu beteiligen.

Im Ergebnis der Kostenschätzung ergeben sich im Freistaat Sachsen für den Zeitraum von 2028 bis 2045 die folgenden Netto-Gesamtkosten (in Mio. EUR):

| | Szenario 1 | Szenario 2 |
|--|-------------------|-------------------|
| Gesamtkosten | 1.083 | 1.033 |
| Variante 1: Gesamtkosten mit erhöhter Dimensionierungswassermenge | 1.141 | 1.092 |
| Variante 2: Gesamtkosten unter Berücksichtigung der erweiterten Herstellerverantwortung | 217 | 207 |

Literaturverzeichnis

- (VSA), V. S.-u. (Juli 2015). Dimensionierungswassermenge und Redundanzen von Stufen zur Elimination von Mikroverunreinigungen.
- ABEGGLEN, C., & SIEGRIST, H. (2012). Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser. Bundesamt für Umwelt (BAFU).
- ARGE Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW. (September 2016). Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination.
- BENSTÖM, F. (2017). Granulierte Aktivkohle zur Elimination organischer Spurenstoffe aus kommunalem Abwasser.
- BRÜCKNER, I. (2021). Evaluierungen der Auswirkungen einer Ozonanlage und Quantifizierung des Nutzens für das Gewässer.
- DWA. (2003). ATV-DVWK-A 198 Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen.
- DWA. (2012). Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinien).
- DWA. (2018). Betriebserfahrungen mit Aktivkohleanlagen. Betriebs-Info Informationen für das Betriebspersonal von Abwasseranlagen.
- DWA. (2021). DWA-M 816 - Projektbewertung betrieblicher Ersatz- und Erneuerungsinvestitionen auf Basis der dynamischen Kostenvergleichsrechnung – eine Arbeitshilfe für die Praxis.
- DWA. (September 2021). Merkblatt DWA-M 285-2. Spurenstoffentfernung auf kommunalen Kläranlagen - Teil 2: Einsatz von Aktivkohle - Verfahrensgrundsätze und Bemessung. DWA Regelwerk.
- DWA. (Oktober 2021). Merkblatt DWA-M 816 Projektbewertung betrieblicher Ersatz- und Erneuerungsinvestitionen auf Basis der dynamischen Kostenvergleichsrechnung- eine Arbeitshilfe für die Praxis.
- DWA. (2024). Merkblatt DWA-M 285-3. Spurenstoffentfernung auf kommunalen Kläranlagen - Teil 3: Ozonung - Verfahrensgrundsätze und Bemessung (GD).
- HILLENBRAND, T., & Umweltbundesamt. (Juni 2016). Maßnahmen zur Verminderung des Eintrages von Mikroschadstoffen in die Gewässer - Phase 2.
- HUNZIKER BETATECH AG. (2024). Auswertung der Energie- und Kostenkennzahlen von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen in ARA.
- Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg. (03 2018). Handlungsempfehlungen für die Vergleichskontrolle und den Betrieb von Verfahrenstechniken zur gezielten Spurenstoffelimination.
- KRAHNSTÖVER, T. (2019). Betriebliche Herausforderungen bei PAK-Verfahren zur MV-Elimination. Isle Utilities GmbH.

- Lugitsch und Partner Ziviltechniker GmbH. (2022). Machbarkeitsstudie 4. Reinigungsstufe AWW - Feldbach Mittleres Raabtal.
- Ministerium für Umwelt, K. u.-W. (2018). Arbeitspapier Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen in Baden-Württemberg.
- MOUSEL, D., EHM, J.-H., & KEYSERS, C. (2018c). A1 Modulbeschreibungen Pulveraktivkohle im AFSF-Verfahren. In Entwicklung und Integration innovativer Kläranlagentechnologien für den Transformationsprozess in Richtung Technikwende (S. 369 - 384).
- MOUSEL, D., EHM, J.-H., & KEYSERS, C. (2018d). A1 Modulbeschreibungen Pulveraktivkohle im Überstau von Sandfiltern. In Entwicklung und Integration innovativer Kläranlagentechnologien für den Transformationsprozess in Richtung Technikwende (S. 357 - 368).
- MOUSEL, D., EHM, J.-H., & PALMOWSKI, L. (2018b). A1 Modulbeschreibungen Filtration über granulierte Aktivkohle. In Entwicklung und Integration innovativer Kläranlagentechnologien für den Transformationsprozess in Richtung Technikwende (S. 339 - 356).
- MOUSEL, D., WIELAND, A., KEYSERS, C., & PALMOWSKI, L. (2018a). A1 Modulbeschreibungen Ablaufozonung. In Entwicklung und Integration innovativer Kläranlagentechnologien für den Transformationsprozess in Richtung Technikwende - E-Klär (S. 385 - 395).
- PALMOWSKI, L., MOUSEL, D., & WIELAND, A. (2018). Spurenstoffelimination und Desinfektion. In Entwicklung und Integration innovativer Kläranlagentechnologien für den Transformationsprozess in Richtung Technikwende (S. 231 - 254).
- PINNEKAMP, J., MOUSEL, D., KREBBER, K., PALMOWSKI, L., BOLLE, F.-W., GREDIGK-HOFFMANN, S., THÖLE, D. (2015). Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffe, Phase II. Abschlussbericht zum gleichnamigen Forschungsprojekt, gefördert durch das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes NRW.
- PROF. DR. ING. DREWES, J. (20. 06 2025). Vortrag "Dynamik von Spurenstoffen im Rohabwasser und deren Entfernung in der weitergehenden Abwasserbehandlung". AMELAG Sonderkolloquium "Spurenstoffe im Rohabwasser".
- Richtlinie (EU) 2024/3019 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. November 2024 über die Behandlung von kommunalem Abwasser. (2024).
- Verband kommunaler Unternehmen e.V. (2024). Erweiterte Herstellerverantwortung und Kosten der Viertbehandlung.
- VSA Plattform Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen. (04. 06 2025a). *VSA Ozon Verfahrensführung*. Von <https://micropoll.ch/verfahren/ozon/ozon-verfahrensfuehrung/> abgerufen

VSA Plattform Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen. (04. 06 2025b). GAK-Filtration Verfahrensführung. Von <https://micropoll.ch/verfahren/aktivkohle/gak-verfahrensfuehrungen/> abgerufen

VSA Plattform Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen. (04. 06 2025c). *PAK Verfahrensführungen*. Von <https://micropoll.ch/verfahren/aktivkohle/pak-verfahrensfuehrungen/> abgerufen

VSA Plattform Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen. (04. 06 2025d). Von <https://micropoll.ch/verfahren/weitere-verfahren/verfahrenskombination/> abgerufen

VSA; Hunziker Betatech AG. (2024). Auswertung der Energie- und Kostenkennzahlen von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen in ARA. VSA.

Anhang

A 1 Kläranlagenliste mit Rangfolge (Szenario 1)

Hinweis: Kläranlagen 1, 2 und 10 teilweise mit Angaben der Aufgabenträger bzw. Betriebsführer

Kläranlage Nr. 1: Angaben zu Größenklasse und Menge aus Kommunalabwasserdatenbank (Bestandsdaten, nicht genutzt zur Abschätzung spezifischer Investitions- und Betriebskosten); Auslegungsgröße 4. Reinigungsstufe nicht bekannt; Kostenangaben Quelle: Präsentation eins Energie Kläranlagenbetrieb bei Dresdener Abwassertagung Mai 2025 (geschätzte Kosten 4. Reinigungsstufe, Verfahren Ozon+GAK-Filter als eine Variante, Verfahren noch nicht festgelegt)

Kläranlage Nr. 2: Angaben kommunale Wasserwerke Leipzig, Information von 06.06.2025, Stand Mai 2023 (Auslegungsdaten 4. Reinigungsstufe, Verfahren PAK noch nicht festgelegt)

Kläranlage Nr. 10: Ausbaugröße Kläranlage (EW) Stand 2025, Angabe Jahresmenge und Kosten: eigene Kalkulation der Stadtentwässerung Dresden GmbH für die Prognose 2035, Stand Mai 2025 (Auslegungsdaten 4. Reinigungsstufe und Verfahren PAK noch nicht festgelegt)

| KA Rang | Clustering (EW) | Mittelwert JAM (m³/a) | Q _{M,JAM} (m³/h) | Unter- gruppe | Verfahren | Investit.- Kosten (€) | Betriebs- kosten (€/Jahr) |
|------------|--------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------|-----------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 | 400.000 | 29.261.231 | 3.340 | 5B | Ozon+GAK | 53.700.000 | 4.000.000 |
| 2 | 870.000 | 46.971.899 | 18.700 | 5C | PAK | 117.000.000 | 3.000.000 |
| 3 | 95.000-99.999 | 3.532.006 | 403 | 4C | Ozon | 2.973.572 | 207.965 |
| 4 | 75.000-79.999 | 2.749.578 | 314 | 4C | Ozon | 2.314.851 | 160.401 |
| 5 | 30.000-34.999 | 3.178.091 | 363 | 4B | GAK | 2.583.476 | 255.418 |
| 6 | 100.000-104.999 | 4.964.184 | 567 | 5A | GAK (SF) | 3.993.268 | 455.911 |
| 7 | 140.000-144.999 | 3.488.402 | 398 | 5A | Ozon | 2.130.576 | 214.030 |
| 8 | 95.000-99.999 | 9.825.070 | 1.122 | 4C | Ozon+GAK | 13.617.976 | 842.898 |
| 9 | 100.000-104.999 | 6.100.653 | 696 | 5A | PAK | 7.179.434 | 417.964 |
| 10 | 787.000 | 80.300.000 | 9.167 | 5C | PAK | 100.000.000 | 5.100.000 |
| 11 | 105.000-109.999 | 5.716.601 | 653 | 5A | Ozon | 3.491.471 | 289.187 |
| 12 | 95.000-99.999 | 2.934.168 | 335 | 4C | GAK | 2.242.949 | 349.843 |
| 13 | 45.000-49.999 | 1.792.522 | 205 | 4B | PAK | 2.797.311 | 174.465 |
| 14 | 40.000-44.999 | 982.949 | 112 | 4B | PAK | 1.533.935 | 88.597 |
| 15 | 35.000-39.999 | 2.074.105 | 237 | 4B | GAK (SF) | 2.718.855 | 214.565 |
| 16 | 10.000-14.999 | 472.988 | 54 | 4A | PAK | 896.284 | 41.967 |
| 17 | 75.000-79.999 | 3.254.827 | 372 | 4C | Ozon | 2.740.216 | 178.503 |
| 18 | 60.000-64.999 | 8.530.538 | 974 | 4C | GAK (SF) | 9.458.959 | 657.053 |
| 19 | 40.000-44.999 | 1.811.889 | 207 | 4B | PAK | 2.827.533 | 141.399 |
| 20 | 140.000-144.999 | 6.830.914 | 780 | 5A | Ozon | 4.172.049 | 346.075 |
| 21 | 15.000-19.999 | 935.539 | 107 | 4A | Ozon | 1.306.268 | 84.556 |
| 22 | 20.000-24.999 | 920.316 | 105 | 4B | PAK | 1.436.194 | 98.236 |
| 23 | 45.000-49.999 | 2.077.114 | 237 | 4B | GAK | 1.688.490 | 228.399 |
| 24 | 30.000-34.999 | 1.877.570 | 214 | 4B | Ozon | 1.640.817 | 151.487 |
| 25 | 90.000-94.999 | 2.133.142 | 244 | 4C | Ozon | 1.795.877 | 139.558 |
| 26 | 45.000-49.999 | 2.684.886 | 306 | 4B | Ozon+GAK | 6.787.613 | 259.174 |
| 27 | 35.000-39.999 | 2.930.664 | 335 | 4B | Ozon | 2.561.122 | 175.179 |
| 28 | 25.000-29.999 | 1.390.127 | 159 | 4B | GAK (SF) | 1.822.258 | 132.314 |
| 29 | 140.000-144.999 | 13.176.930 | 1.504 | 5A | Ozon+GAK | 15.899.593 | 1.101.523 |
| 30 | 20.000-24.999 | 2.081.427 | 238 | 4B | GAK | 1.691.996 | 189.712 |
| 31 | 15.000-19.999 | 1.023.465 | 117 | 4A | Ozon+GAK | 4.133.999 | 103.882 |
| 32 | 30.000-34.999 | 1.449.890 | 166 | 4B | PAK | 2.262.618 | 105.163 |
| 33 | 85.000-89.999 | 4.915.779 | 561 | 4C | Ozon+GAK | 6.813.485 | 437.014 |
| 34 | 30.000-34.999 | 1.184.921 | 135 | 4B | GAK (SF) | 1.553.262 | 114.722 |
| 35 | 25.000-29.999 | 1.551.535 | 177 | 4B | GAK | 1.261.246 | 190.772 |

| KA Rang | Clustering (EW) | Mittelwert JAM (m³/a) | Q _{M,JAM} (m³/h) | Unter- gruppe | Verfahren | Investit.- Kosten (€) | Betriebs- kosten (€/Jahr) |
|------------|--------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------|-----------|-----------------------------|---------------------------------|
| 36 | 95.000-99.999 | 5.473.228 | 625 | 4C | PAK | 6.630.842 | 356.636 |
| 37 | 70.000-74.999 | 5.351.427 | 611 | 4C | Ozon+GAK | 7.417.312 | 487.675 |
| 38 | 45.000-49.999 | 1.525.709 | 174 | 4B | Ozon | 1.333.325 | 118.519 |
| 39 | 45.000-49.999 | 1.707.649 | 195 | 4B | GAK | 1.388.151 | 185.302 |
| 40 | 45.000-49.999 | 1.649.977 | 188 | 4B | PAK | 2.571.742 | 162.590 |
| 41 | 40.000-44.999 | 1.653.405 | 189 | 4B | Ozon | 1.444.918 | 153.179 |
| 42 | 25.000-29.999 | 1.412.772 | 161 | 4B | Ozon | 1.234.628 | 111.820 |
| 43 | 25.000-29.999 | 1.396.645 | 159 | 4B | PAK | 2.179.527 | 115.701 |
| 44 | 20.000-24.999 | 1.232.594 | 141 | 4B | PAK | 1.923.518 | 109.889 |
| 45 | 20.000-24.999 | 982.390 | 112 | 4B | GAK | 798.587 | 92.702 |
| 46 | 20.000-24.999 | 731.681 | 84 | 4B | GAK (SF) | 959.130 | 87.219 |
| 47 | 20.000-24.999 | 771.584 | 88 | 4B | Ozon+GAK | 1.950.628 | 96.810 |
| 48 | 20.000-24.999 | 601.717 | 69 | 4B | PAK | 939.007 | 48.642 |
| 49 | 15.000-19.999 | 879.720 | 100 | 4A | Ozon | 1.228.330 | 94.386 |
| 50 | 15.000-19.999 | 1.997.281 | 228 | 4A | Ozon | 2.788.749 | 171.164 |
| 51 | 15.000-19.999 | 1.109.881 | 127 | 4A | GAK | 1.441.520 | 124.317 |
| 52 | 15.000-19.999 | 259.935 | 30 | 4A | PAK | 492.562 | 29.266 |
| 53 | 15.000-19.999 | 1.863.676 | 213 | 4A | Ozon | 2.602.201 | 145.078 |
| 54 | 15.000-19.999 | 562.222 | 64 | 4A | GAK (SF) | 1.177.523 | 64.259 |
| 55 | 15.000-19.999 | 2.032.107 | 232 | 4A | GAK (SF) | 4.256.066 | 215.375 |
| 56 | 15.000-19.999 | 1.624.343 | 185 | 4A | Ozon | 2.268.026 | 126.530 |
| 57 | 15.000-19.999 | 1.579.683 | 180 | 4A | GAK | 2.051.702 | 176.939 |
| 58 | 10.000-14.999 | 414.175 | 47 | 4A | PAK | 784.838 | 48.330 |
| 59 | 10.000-14.999 | 378.907 | 43 | 4A | PAK | 718.007 | 34.389 |
| 60 | 10.000-14.999 | 450.628 | 51 | 4A | GAK | 943.799 | 67.732 |
| 61 | 10.000-14.999 | 458.156 | 52 | 4A | Ozon | 639.711 | 43.462 |

Herausgeber

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: +49 351 2612-0; Telefax: +49 351 2612-1099
E-Mail: Poststelle.LfULG@lfulg.sachsen.de
www.lfulg.sachsen.de

Autor

Dr. Tobias Rocktäschel, Pablo Brambila
Dr. Born – Dr. Ermel Ingenieure GmbH
Schachtstraße 1, 01705 Freital
Telefon: +49 351 64987 - 0; Telefax: +49 351 64987 - 99
E-Mail: dresden@born-ermel.de

Redaktion

Annette Mallon
Abteilung Wasser, Boden, Kreislaufwirtschaft /Referat Siedlungswasserwirtschaft, Grundwasser
Zur Wetterwarte 11, 01109 Dresden
Telefon: +49 351 8928 4301; Telefax: +49 351 8928 4099
E-Mail: annette.mallon@lfulg.sachsen.de

Bildnachweis

Kläranlage Dresden-Kaditz, Grottker (S. 1)

Redaktionsschluss

29.10.2025

Bestellservice

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei heruntergeladen werden aus der Publikationsdatenbank des Freistaates Sachsen (<https://publikationen.sachsen.de>).

Hinweis

Diese Publikation wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit vom LfULG (Geschäftsbereich des SMUL) kostenlos herausgegeben. Sie ist nicht zum Verkauf bestimmt und darf nicht zur Wahlwerbung politischer Parteien oder Gruppen eingesetzt werden.

Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.

Täglich für ein gutes Leben.

www.lfulg.sachsen.de