Universität Stuttgart

Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft

Untersuchungen zur Kombination von weitestgehender P-Elimination und Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen

Stufe 2

– Abschlussbericht –

September 2024

Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg

Eine Kooperation von

DWA Landesverband Baden-Württemberg • Hochschule Biberach • Universität Stuttgart

Abschlussbericht

zum Forschungsvorhaben

„Untersuchungen zur Kombination von weitestgehender P-Elimination und Spurenstoff-elimination auf kommunalen Kläranlagen Stufe 2“

Gefördert durch

Baden-Württemberg
Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft

Verbundpartner:

Hochschule Biberach	KOMS Kompetenzzentrum Spurenstoffe BW
Hochschule Biberach Institut für GEO und UMWELT	Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg

Projektbearbeitung:
Hochschule Biberach: Birgit Kornmann, Ulrike Zettl
KomS: Lilia Acosta, Marie Launay, Johanna Neef, Birthe Stricker, Vera Kohlgrüber

Danksagung:
Wir danken den Mitarbeiter*Innen der beteiligten Kläranlagen für die umfangreiche Unterstützung bei der Probenahme und Laboranalytik. Außerdem bedanken wir uns für die, zur Verfügung gestellten Daten. Ohne die Datenbasis wären die Erkenntnisse in diesem Umfang nicht möglich gewesen.

Stuttgart, im September 2024

Zitierung:
KomS (2024): Untersuchungen zur Kombination von weitestgehender P-Elimination und Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen Stufe 2 – Abschlussbericht, gefördert vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis I

Abbildungsverzeichnis III

Tabellenverzeichnis V

Abkürzungsverzeichnis VI

1. Veranlassung und Zielsetzung 1

2. Stand der Technik 2

3. Fragestellungen 7

4. Betrachtete Kläranlagen 8

4.1 Übersicht 8
4.2 Phosphorelimination 10
4.3 Filtrationsverfahren 12
4.4 Spurenstoffelimination 12
4.5 Online-Messtechnik 15

5. Untersuchungsprogramm 16

5.1 Betriebsdaten 16
5.2 Probenahmen des Intensivmonitorings 16
5.3 Analytik für Intensivmonitoring 17

6. Betrachtung der Betriebsdaten 18

6.1 Jahresabwassermenge 18
6.2 Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB) 19
6.3 Feststoffentnahme 21
6.4 Phosphorelimination 23
6.5 Überleitung zum Intensivmonitoring 26

7. Ergebnisse des 2 Wochen-Intensivmonitorings 27

7.1 Spurenstoffe 27
7.2 Phosphor 29
7.2.1 Übersicht 29
7.2.2 P-Elimination für Gesamtanlage 32
7.2.3 Phosphorfraktionen 34
7.3 Organische Summenparameter 39
7.3.1 Übersicht 39

7.3.2 CSB-Elimination 40
7.3.3 CSB-Fraktionen 42
7.3.4 TOC und DOC-Elimination der Gesamtanlagen 43
7.3.5 SAK_{254} 45
7.3.6 Zusammenhang zwischen den organischen Summenparametern 46
7.4 Feststoffreduktion 47
7.4.1 Abfiltrierbare Stoffe (AFS) 47
7.4.2 Trübung 47
7.4.3 Korrelation AFS und Trübung 50

8. Zusammenfassung und Fazit 51

9. Literaturverzeichnis 56

10. Anhang 58
10.1 Verfahrensschemata weitere Kläranlagen 58
10.2 Auswertung der Betriebsdaten hinsichtlich P_{ges} (2019 bis 2021) 60
10.3 Spurenstoffelimination in der biologischen Stufe in Abhängigkeit der Zuflussmenge (normiert) 62
10.4 P-Elimination in der nachgeschalteten Stufe 62
10.5 CSB-Fraktionen an unterschiedlichen Probenahmestellen 63

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Schematische Darstellung der P-Fraktionen im Abwasser (BAUMANN und JEDELE, 2019)..... 3
Abbildung 2-2: Schematische Darstellung der Verfahren zur Spurenstoffelimination (PAK, GAK, Ozon) in Gegenüberstellung der Verfahren zur Phosphorelimination und ihre potentiellen Synergieeffekte (KOHLGRÜBER ET AL. 2023) 5
Abbildung 4-1: Fließschema mit Probenahmestellen zum Vergleich der einzelnen Kläranlagen 8
Abbildung 6-1: Summenhäufigkeiten der normierten Jahresabwassermengen für die Jahre 2019, 2020 und 2021 für die betrachteten Kläranlagen 19
Abbildung 6-2: AFS-Konzentration im Ablauf von drei betrachteten Kläranlagen, dargestellt als Summenlinienkurve für die Jahre 2019 bis 2021 21
Abbildung 6-3: Trübung im Ablauf der acht betrachteten Kläranlagen, dargestellt als Summenlinienkurve für die Jahre 2019 bis 2021 22
Abbildung 6-4: Reduktion der Trübung in der nachgeschalteten Stufe dargestellt als Summenlinienkurven des Ablaufs der Nachklärung und des Ablaufs der Kläranlage 22
Abbildung 6-5: Reduktion der P_{ges}-Konzentration in der nachgeschalteten Stufe dargestellt als Summenlinienkurven (2019 bis 2021) des Ablaufs der Nachklärung und des Ablaufs der Kläranlage für vier ausgewählte Kläranlagen 24
Abbildung 7-1: Mittlere Elimination in der mechanisch-biologischen Stufe der acht untersuchten Klärwerke im Vergleich 28
Abbildung 7-2: Mittlere Elimination in der Stufe zur gezielten Spurenstoffelimination der acht untersuchten Klärwerke im Vergleich 28
Abbildung 7-3: Mittlere Elimination in der Filtrationsstufe der untersuchten Klärwerke im Vergleich 28
Abbildung 7-4: Zusammenhang zwischen Spurenstoffelimination und Verringerung des SAK_{254} in der Nachgeschalteten Stufe (Abl. NKB bis Abl. KA) 29
Abbildung 7-5: Summenkurven der P_{ges}-Konzentration im Zulauf der Kläranlagen 33
Abbildung 7-6: Summenkurven der P_{ges}-Konzentration im Zulauf der nachgeschalteten Stufe (gefüllte Symbole) und im Ablauf der Kläranlage/nachgeschalteten Stufe (ungefüllte Symbole) 33
Abbildung 7-7: Prozentuale P_{ges}-Eliminationsanteile über die Verfahrensstufen der Kläranlagen.... 34
Abbildung 7-8: P_{ges}-Konzentrationen im Ablauf Nachklärung, Zulauf und Ablauf Filter für die acht Kläranlagen im Vergleich 35
Abbildung 7-9: P_{Part}-Konzentrationen im Ablauf Nachklärung, Zulauf und Ablauf Filter für die acht Kläranlagen im Vergleich 35
Abbildung 7-10: $P_{gelöst}$-Konzentration im Ablauf Nachklärung, Zulauf und Ablauf Filter für die acht Kläranlagen im Vergleich 36
Abbildung 7-11: PO_4-P-Konzentrationen im Ablauf Nachklärung, Zulauf und Ablauf Filter für die acht Kläranlagen im Vergleich 36
Abbildung 7-12: P_{Org}-Konzentrationen im Ablauf Nachklärung, Zulauf und Ablauf Filter für die acht Kläranlagen im Vergleich 37
Abbildung 7-13: PO_4-P, P_{part} und P_{org} Konzentrationen mit dem Pges-Mittelwert im Ablauf der Nachklärung und Ablauf der Kläranlagen; graue Box = Teilstromverfahren..... 38
Abbildung 7-14: CSB-Konzentrationsspannen im Zulauf der untersuchten Kläranlagen..... 41
Abbildung 7-15: CSB-Konzentrationsspannen im Ablauf Nachklärbecken (ANK) und Ablauf der Kläranlage (AKA) mit Eliminationsgraden der CSB_{Rest}-Reduktion 41
Abbildung 7-16: Korrelation der CSB-Konzentrationen Ablauf Nachklärung und Ablauf Kläranlage sowie die daraus resultierende weitere CSB-Elimination..... 42
Abbildung 7-17: $CSB_{gelöst}$, $CSB_{partikulär}$ und der gemittelte CSB_{ges} im Ablauf Nachklärbecken, Zulauf Filter und Ablauf Kläranlage je Kläranlage 43

Abbildung 7-18: TOC-Konzentrationen im Ablauf Nachklärung, Zulauf und Ablauf Filter für die acht Kläranlagen im Vergleich 44
Abbildung 7-19: DOC-Konzentrationen im Ablauf Nachklärung, Zulauf und Ablauf Filter für die acht Kläranlagen im Vergleich 44
Abbildung 7-20: SAK_{254} im Ablauf Nachklärung, Zulauf und Ablauf Filter für die acht Kläranlagen im Vergleich 45
Abbildung 7-21: Zusammenhänge vom SAK_{254} und $CSB_{gelöst}$ mit dem DOC für die acht untersuchten Kläranlagen im Intensivmonitoring 46
Abbildung 7-22: AFS-Messwerte der acht beprobten Kläranlagen im Rahmen des Intensivmonitoring im Ablauf Nachklärbecken (links) und Ablauf Kläranlage (rechts= im Vergleich 47
Abbildung 7-23: Summenhäufigkeit der Trübungswerte im Zu- und Ablauf der nachgeschalteten Verfahrensstufen für Kläranlagen mit einem nachgeschalteten Raumfilter 48
Abbildung 7-24: Summenhäufigkeit der Trübungswerte Zu- und Ablauf der nachgeschalteten Verfahrensstufen für Kläranlagen mit einem nachgeschalteten Flächenfilter (* = Teilstrombetrieb) 49
Abbildung 7-25: Summenhäufigkeit der Trübungswerte Zu- und Ablauf der Adsorptionsstufe für Kläranlagen mit einem GAK-Absorber (* = Teilstrombetrieb) 49
Abbildung 7-26: Korrelation der Trübungs- und AFS-Werte im Rahmen des Intensivmonitoring 50
Abbildung 7-27: Ausschnitt der Datenkorrelation von Trübung und AFS-Messwerten im Rahmen des Intensivmonitorings 50
Abbildung 10-1: Verfahrensschema der Kläranlage Eriskirch 58
Abbildung 10-2: Verfahrensschema der Kläranlage Friedrichshafen 58
Abbildung 10-3: Verfahrensschema der Kläranlage Dagersheim-Darmsheim 58
Abbildung 10-4: Verfahrensschema der Kläranlage Immendingen-Geisingen 59
Abbildung 10-5: Verfahrensschema der Kläranlage Kressbronn-Langenargen 59
Abbildung 10-6: Verfahrensschema der Kläranlage Mannheim 59
Abbildung 10-7: Verfahrensschema der Kläranlage Wendlingen 60
Abbildung 10-8: Verfahrensschema der Kläranlage mittleres Glemstal (Leonberg) 60
Abbildung 10-9: P_{ges}-Konzentration im Ablauf der Nachklärung von vier Kläranlagen in den Jahren 2019 bis 2021 in Abhängigkeit der normierten Abwassermenge 60
Abbildung 10-10: P_{ges}-Konzentration im Ablauf der betrachteten Kläranlagen in den Jahren 2019 bis 2021 in Abhängigkeit der normierten Abwassermenge 61
Abbildung 10-11: Spurenstoffelimination in der biologischen Stufe in Abhängigkeit des normierten Zuflusses 62
Abbildung 10-12: Summenkurven der P_{ges}-Konzentration im Zulauf der nachgeschalteten Stufe (gefüllte Symbole)) und im Ablauf der Kläranlage/nachgeschalteten Stufe (ungefüllte Symbole) sortiert nach den Spurenstoffeliminationsverfahren 62
Abbildung 10-13: CSB_{ges}-Konzentrationen im Ablauf Nachklärung, Zulauf und Ablauf Filter für die acht Kläranlagen im Vergleich 63
Abbildung 10-14: $CSB_{gelöst}$-Konzentrationen im Ablauf Nachklärung, Zulauf und Ablauf Filter für die acht Kläranlagen im Vergleich 63
Abbildung 10-15: CSB_{part}-Konzentrationen im Ablauf Nachklärung, Zulauf und Ablauf Filter für die acht Kläranlagen im Vergleich 64

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Übersicht der europäischen und regionalen Anforderungen an die P-Elimination (EUROPÄISCHE UNION, 2024; UMBW, 2020; EUROPÄISCHE UNION, 1991; IGKB, 2005) 2
Tabelle 4-1: Übersicht über die betrachteten Kläranlagen mit Verfahrenstechnik, P- und Spurenstoffelimination und Filtrationstechnik ... 9
Tabelle 4-2: Übersicht Rahmenbedingungen ... 9
Tabelle 4-3: Detaillierte Darstellung der für die Phosphorelimination relevanten aktiven Verfahrenstechnik ... 11
Tabelle 4-4: Darstellung der relevanten Kenngrößen der Filtrationsstufen ... 13
Tabelle 4-5: Detaillierte Darstellung der Spurenstoffelimination auf den betrachteten Kläranlagen ... 14
Tabelle 4-6: Übersicht der Online-Messstellen für SAK_{254}, DOC, Trübung, P_{ges} und PO_4-P der acht untersuchten Kläranlagen ... 15
Tabelle 5-1: Probenahmestellen im Rahmen des Intensivmonitorings nach Kläranlage[1] ... 17
Tabelle 6-1: Mittlere Tageszuflüsse zu den betrachteten Kläranlagen in den Jahren 2019, 2020 und 2021 ... 18
Tabelle 6-2: CSB-Elimination und mittlere Konzentration im Ablauf Nachklärung (ANK) und Ablauf Kläranlage (AK) in den betrachteten Kläranlagen (2019 bis 2021) ... 20
Tabelle 6-3: P_{ges}-Elimination der betrachteten Kläranlagen (2019 bis 2021) ... 23
Tabelle 6-4: P_{ges} -Konzentrationen der betrachteten Kläranlagen (Jahresmittelwerte in 2019 bis 2021) ... 26
Tabelle 7-1: Mittelwert (MW), Standardabweichung (SD) und Anzahl Proben für die P-Fraktionen P_{ges}, $P_{partikulär}$, $P_{gelöst}$, PO_4-P, und P_{org} während des 2 Wochen Monitorings ... 30
Tabelle 7-2: Mittelwert (MW) und Standardabweichung (SD) des CSB_{ges} und $CSB_{gelöst}$ während des 2 Wochen Monitorings ... 39
Tabelle 7-3: Mittelwert (MW) und Standardabweichung (SD) des DOC und TOC während des 2 Wochen Monitorings (n = 14) ... 40

Abkürzungsverzeichnis

AFS ..... *Abfiltrierbare Stoffe*
AK ..... *Ablauf Kläranlage*
AKA ..... *Ablauf Kläranlage*
ANK ..... *Ablauf Nachklärung*
Bio-P ..... *vermehrte biologische P-Elimination*
CSB ..... *Chemischer Sauerstoffbedarf*
$CSB_{gelöst}$ ..... *Gelöste Anteil der CSB-Fraktion*
CSB_{ges} ..... *Gesamter CSB bestehend als gelöstem und pratikulören Anteil*
DAR ..... *Kläranlage Dagersheim-Darmsheim*
DOC ..... *Gelöster organischer Kohlenstoff (Dissolved Organic Carbon)*
ERI ..... *Kläranlage Eriskirch*
EW ..... *Einwohnerwert*
FRD ..... *Kläranlage Friedrichshafen*
GAK ..... *Granulierte Aktivkohle*
GUP ..... *Gelöster unreaktiver Phosphor (organischer Phosphor)*
IMM ..... *Kläranlage Immendingen-Geisingen*
JAM ..... *Jahresabwassermenge*
KA ..... *Kläranlage, Klärwerk*
KRE ..... *Kläranlage Kressbronn-Langenargen*
LEO ..... *Kläranlage Wendlingen*
MAN ..... *Kläranlage Mannheim*
MW ..... Mittelwert
NKB ..... *Nachklärbecken*
P *Phosphor*
PAK ..... *Pulveraktivkohle*
$P_{gelöst}$ ..... Gelöster Phosphor-Anteil
P_{ges} ..... *Gesamtphosphor*
PO_4-P ..... *Orthophosphat*
P_{org} ..... *Organischer Phosphor*
$P_{partikulär}$ ..... Partikulärer Phosphor-Anteil
SD ..... Standardabweichung
TOC ..... *Gesamt organischer Kohlenstoff (Total Organic Carbon)*
VKB ..... *Vorklärbecken*
WEN ..... *Kläranlage Wendlingen*
WRRL ..... *Wasserrahmenrichtlinie*

1. Veranlassung und Zielsetzung

Zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL)-Maßnahmen wurde in den zurückliegenden Jahren landesweit die P-Elimination auf den kommunalen Kläranlagen intensiviert. Bei vielen Gewässern zeigt sich, dass diese Maßnahmen nicht ausreichend sind (SLoPE-Phase 2) und für den Parameter Gesamtphosphor P_{ges} noch höhere Eliminationsleistungen anzustreben sind. Technisch lässt sich dies nur mithilfe einer Nachfällung erreichen, welche meist als Filtrationsstufe ausgebildet ist.

Zwischenzeitlich sind in Baden-Württemberg 30 Kläranlagen mit einer Stufe zur gezielten Spurenstoffelimination in Betrieb (Stand 04/2024), welche alle mit einer Filteranlage oder Granulierte-Aktivkohle-(GAK)-Adsorption ausgestattet sind. Bei Kläranlagen, welche ein nachgeschaltetes Pulveraktivkohle (PAK)-Verfahren betreiben, wird zur Abtrennung der PAK Fällmittel dosiert. Diese Anlagen zur Spurenstoffelimination weisen somit auch höhere Phosphor (P)-Eliminationsleistungen auf. Die Reinigungsziele P-Elimination und Spurenstoffelimination sind daher auch kombinierbar.

Ziel dieses Projektes ist es, verschiedene Verfahrenstechniken zur Spurenstoffelimination hinsichtlich ihrer Potenziale zur weitergehenden P-Elimination (herstellerunabhängig) zu bewerten, um anderen Betreibern damit Empfehlungen zu geben, mit welchen Verfahrenstechniken sich die weitestgehende P-Elimination und die Spurenstoffelimination sinnvoll kombinieren und ggf. auch schrittweise umsetzen lässt.

Ergänzend dazu sollen für bereits realisierte Anlagen zur Spurenstoffelimination die Potenziale für eine weitestgehende P-Elimination sowie für eine Verbesserung der CSB-(Rest)Elimination aufgezeigt werden. Die Wechselwirkungen der Prozesse zur Spurenstoffelimination, CSB-(Rest)Elimination und zur weitestgehenden P-Elimination in großtechnischen Anlagen sind aufzuzeigen und Empfehlungen zur Betriebsweise auszuarbeiten.

Im Rahmen einer ersten Projektstufe wurden Recherchen durchgeführt, Konzepte erstellt und ergänzende vorbereitende Arbeiten durchgeführt. Die Ergebnisse der ersten Stufe wurden in Form eines Abschlussberichtes veröffentlicht (KOMS, 2021). Der vorliegende Bericht ist Teil der zweiten Stufe des Forschungsberichts. In dieser Stufe wurden insgesamt acht ausgewählte Kläranlagen unterschiedlicher Größenklassen mit unterschiedlichen Verfahrensweisen der P-Elimination und Spurenstoffelimination im Rahmen eines zweiwöchigen Intensivmonitorings detailliert untersucht und die Ergebnisse vergleichend ausgewertet. Aufbauend auf die Ergebnisse der zweiten Stufe sollen in einer dritten Stufe konkrete Empfehlungen für Verfahrenskombinationen, sowie planerische und konzeptionelle Hinweise und Handlungsempfehlungen erarbeitet und an die Fachöffentlichkeit weitergegeben werden.

2. Stand der Technik

Die theoretischen Hintergründe zur P-Elimination und der Stand der Technik wurden ausführlich in Phase 1 recherchiert und im Abschlussbericht detailliert dargestellt (KOMS, 2021). Die wichtigsten Grundlagen zur P-Elimination, die für die Detailbetrachtung der acht Kläranlagen im Rahmen der Projekt Phase 2 relevant sind, werden an dieser Stelle kurz zusammengefasst.

Phosphor ist ein lebensrelevantes Spurenelement für Pflanzen und Lebewesen. Durch menschliche und tierische Ausscheidungen, den Einsatz in der Industrie und Düngung in der Landwirtschaft gelangt Phosphor direkt oder indirekt, z.B. bei Regenwasserentlastungen, in Kläranlagen und Gewässer. In zu hohen Konzentrationen fördert Phosphor Algenwachstum, das zu einer Eutrophierung führen kann. Daher ist Phosphor im Klärprozess dem Abwasser zu entnehmen, um Gewässer zu entlasten und die Wiedergewinnung des ressourcenlimitierten Phosphors aus Klärschlamm zu ermöglichen (UMBW, 2012).

Aufgrund der eutrophierenden Eigenschaften von Phosphor wurden die Grenzwerte für Gesamt-Phosphor P_{ges} über Jahre und je nach Region angepasst. Eine Übersicht der europäischen Vorgaben aus der Kommunalabwasserrichtlinie (Stand 1991 und Entwurf 2024) sowie die regional gültigen Vorgaben der Bodensee-Richtlinie und Vorgaben des Handlungskonzepts aus SLoPE Phase-2 sind in Tabelle 2-1 gezeigt. Es zeigt, dass die Vorgaben der Bodensee-Richtlinie und die angestrebten Zielwerte im Rahmen von SLoPE Phase-2 zum Erreichen der Ziele der Wasserrahmenrichtlinie deutlich geringer liegen als die geplanten Vorgaben der kommenden Kommunalabwasserrichtlinie.

Tabelle 2-1: Übersicht der europäischen und regionalen Anforderungen an die P-Elimination (EUROPÄISCHE UNION, 2024; UMBW, 2020; EUROPÄISCHE UNION, 1991; IGKB, 2005)

<table>
<tr><th rowspan="3">Kläranlagengröße [EW]</th><th colspan="4">Anforderungen für P_{ges} [mg/L] aus 24-h-Mischproben</th></tr>
<tr><th rowspan="2">Kommunalabwasserrichtlinie 1991 (91/271/EWG)</th><th rowspan="2">Kommunalabwasserrichtlinie 2024 (Entwurf)</th><th rowspan="2">Bodensee-Richtlinie 2005</th><th colspan="2">SLoPE Phase-2 ab 2025</th></tr>
<tr><th>Filtervariante</th><th>Fällungsvariante</th></tr>
<tr><td>< 1.000</td><td rowspan="3">-</td><td rowspan="3">-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td>≥ 1.000 – ≤ 5.000</td><td rowspan="2">1</td><td>0,5</td><td>0,5</td></tr>
<tr><td>> 5.000 – ≤ 10.000</td><td rowspan="4">0,2</td><td rowspan="4">0,3</td></tr>
<tr><td>> 10.000 – 40.000</td><td rowspan="2">2</td><td rowspan="3">0,7</td></tr>
<tr><td>> 40.000 – ≤ 100.000</td><td rowspan="3">0,3</td></tr>
<tr><td>> 100.000 – 150.000</td><td rowspan="2">1</td></tr>
<tr><td>> 150.000</td><td>0,5</td></tr>
</table>

Zur Einhaltung der Anforderungen ist die Zusammensetzung des P_{ges} und die Eliminierbarkeit einzelner P-Fraktionen zu betrachten (siehe auch BAUMANN und JEDELE, 2019). Phosphor liegt im Abwasser in gelöster, kolloidaler und partikulärer Form vor. Analytisch teilen sich die Phosphor-Fraktionen im Abwasser in gelöste und ungelöste Bestandteile. Während partikuläre und kolloidale Anteile durch Filtration eliminierbar sind, unterteilt sich der gelöste Anteil weiter

in PO_4-P und organischen Phosphor (auch GUP, gelöster unreaktiver Phosphor). Die Fraktionen sind in Abbildung 2-1 gezeigt. Im Abwasser überwiegen die gelösten Fraktionen, die sich auch in reaktive und nicht reaktive Fraktionen unterteilen lassen. Zu den reaktiven zählt Orthophosphat, das den größten Teil des gelösten Phosphors ausmacht, biologisch verwertbar und fällbar ist. Die nicht reaktiven beinhalten kondensierte Polyphosphate und organische Phosphate, die beide durch Hydrolysierung in der Natur langsam zu Orthophosphat umgewandelt werden, sowie Phosphonate, die als Komplexbildner insbesondere in der Industrie zum Einsatz kommen. Diese sind nicht biologisch abbaubar und können den Fällprozess stören, weshalb sie möglichst am Ort des Anfalls behandelt werden sollten.

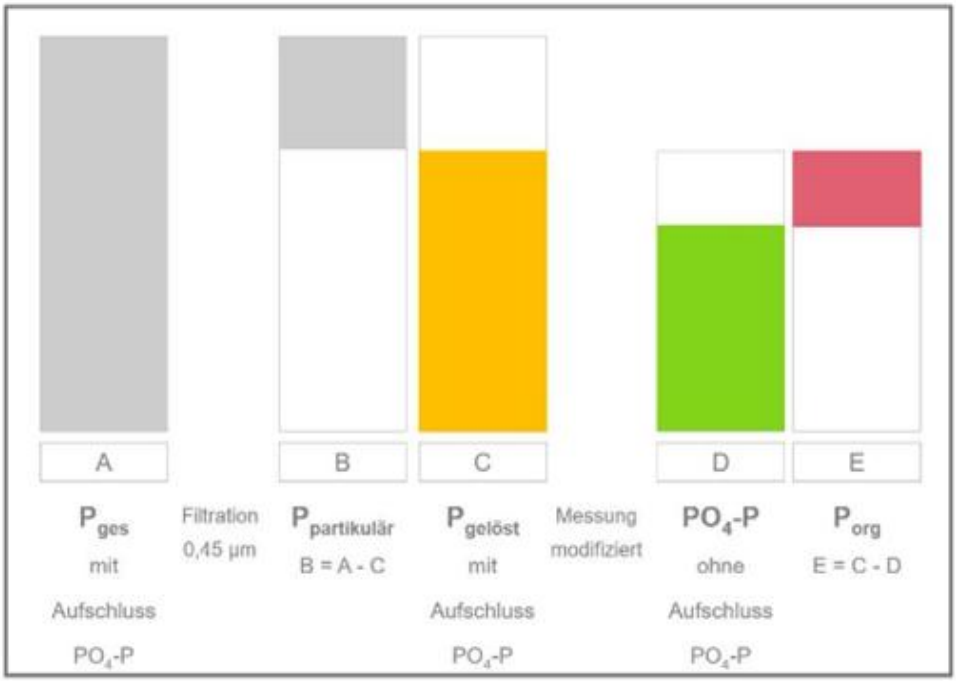


Abbildung 2-1: Schematische Darstellung der P-Fraktionen im Abwasser (BAUMANN und JEDELE, 2019)

Durch Entfernbarkeit der partikulären Anteile und des Orthophosphats ist die Reduktion von P_{ges} durch die gelösten, nicht reaktiven Fraktionen (P_{org}, GUP) limitiert. Diese bestimmen die minimale Ablaufkonzentration und kommen z.B. als Phosphonate vermehrt in industriellem Abwasser sowie in geringen Konzentrationen im Ablauf kommunaler Kläranlagen vor (ROTT, 2016; DWA, 2011)

Die Elimination von Phosphor kann **chemisch (P-Fällung)** oder **biologisch (Inkorporation in Biomasse bzw. Überschussschlamm und vermehrte biologische P-Elimination, Bio-P)** erfolgen. Im Bio-P-Verfahren wird Phosphat biologisch durch polyphosphat-akkumulierende Bakterien gebunden. Dieses Verfahren bedarf eines Wechsels zwischen anaeroben und aeroben Bedingungen, um die Phosphateinlagerung zu verstärken. Durch gute Prozesseinstellungen werden die gewünschten Bakterien gefördert.

Die chemische P-Elimination (Fällung) erfolgt durch die Zugabe von Fällmitteln (vorwiegend dreiwertige Metallsalze). Hierdurch entstehen flockige, suspendierte Metall-Phosphate und Metallhydroxide, die anschließend sedimentieren (GUJER, 2007). Durch die Metall-Hydroxide

können gleichzeitig Flockungsprozesse stattfinden, bei denen es zu einer Bildung von größeren Aggregaten kommt und ungelöste Stoffe mit eingebunden werden können (HAHN, 1987; BEVER et al., 2002).

Die Fällung kann als **Vor-, Simultan- oder Nachfällung** ausgeführt werden (DWA, 2011). Dabei unterscheiden sich die Chemikaliendosierorte und die Phosphatentnahmezeitpunkte über den Klärschlamm. Zusätzlich kann eine **Flockungsfiltration** als weiterer Fällschritt in Kombination mit den anderen Verfahren einsetzt werden (DWA, 2011).

Durch die Verwendung mehrerer Dosierstellen und einer bedarfsgerechten Dosierung je Dosierstelle, kann der Bedarf an Fällmittel reduziert werden. Zudem kann die Wirkung des Fällmittels besser ausgenutzt werden. Allerdings steigt der betriebliche Aufwand. Eine Möglichkeit ist eine **Mehrpunktfällung** in der Simultanfällung bspw. als Zweipunktfällung, bei dem eine Grunddosierung in der Biologie dosiert wird und das Fällmittel im Zulauf der Nachklärung nach Bedarf hinzugegeben werden. (BAUMANN und JEDELE, 2019)

Zusätzlich kann auch eine **mehrstufige Fällung** umgesetzt werden, indem neben der Simultanfällung auch eine Nachfällung in der gezielten Stufe zur Spurenstoffelimination oder als Flockungsfiltration nachgeschaltet umgesetzt wird.

Zum Einhalten der o.g, Anforderungen bedarf es in der Regel der chemischen P-Fällung. Ein Überblick der P-Eliminationsverfahren in Gegenüberstellung der großtechnisch umgesetzten Verfahren zur Spurenstoffelimination (PAK, GAK, Ozon) mit ihren potentiellen Synergieeffekten ist in Abbildung 2-2 gezeigt.

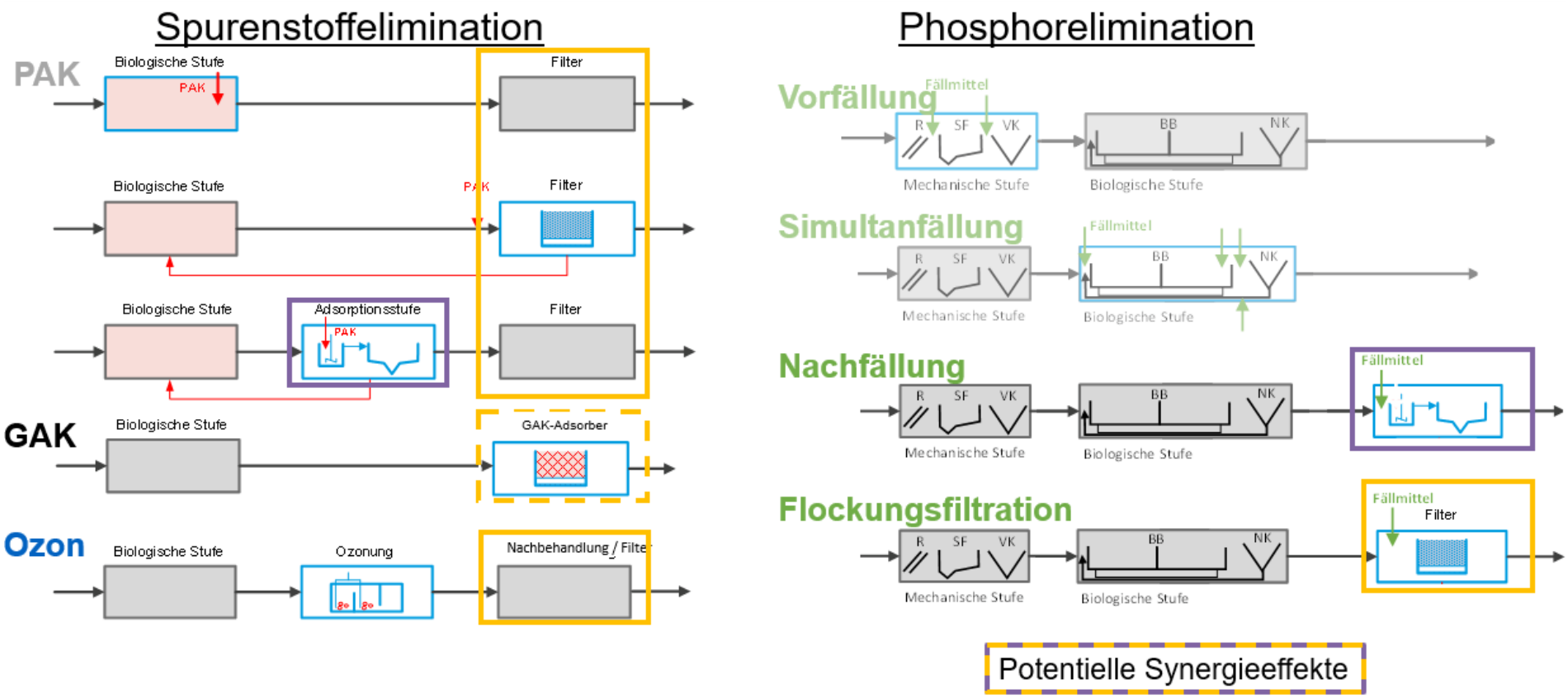


Abbildung 2-2: Schematische Darstellung der Verfahren zur Spurenstoffelimination (PAK, GAK, Ozon) in Gegenüberstellung der Verfahren zur Phosphorelimination und ihre potentiellen Synergieeffekte (KOHLGRÜBER ET AL. 2023)

Für Prozesse mit **Pulveraktivkohle (PAK)** bedarf es eines nachgeschalteten Filters zur Abtrennung der PAK. Um eine effektive PAK-Abscheidung zu gewährleisten, werden Fällungs- und Flockungsmittel dosiert, wodurch es einer Phosphat-Mitfällung kommt. Der Chemikalienbedarf für die PAK-Abscheidung ist geringer als für die P-Elimination in der Simultanfällung. Trotzdem kommt es durch die Fällmitteldosierung zur PAK-Abscheidung zu einer weiteren Reduktion an Phosphor (WUNDERLIN et al., 2019).

Granulierte Aktivkohle (GAK) kann als Festbettfilter oder kontinuierlich gespülter Filter eingesetzt werden. GAK adsorbiert keinen Phosphor. Durch die Filterwirkung kommt es jedoch zu einem Rückhalt partikulärer P-Fraktionen. Über die Filterbetthöhe werden Spurenstoffe bei gleichzeitiger Phosphorelimination adsorbiert (TELGMANN et al., 2020). Der Prozess kann mit Fällmittelzugabe oder einem vorgeschalteten Filter kombiniert werden. Somit trägt der GAK-Adsorber durch einen Feststoffrückhalt, analog zur Filtration bei den PAK-Verfahren oder der Ozonung, zur P-Reduktion bei (KOMS, 2021).

Einer **Ozonierung** muss eine biologisch aktive Nachbehandlung zum Abbau von Oxidationsnebenprodukten nachgeschaltet werden. Diese ist oft als ein einschichtiger oder mehrschichtiger, biologisch aktiver Filter ausgeführt. Dieser Schritt kann durch Flockungsfiltration für eine weitere Phosphorreduktion verwendet werden.

Neben der Phosphoreduktion gibt es durch die nachgeschalteten Filter bei PAK- und Ozon-Anlagen sowie durch die GAK-Adsorber weitere Synergieeffekte beim Feststoffrückhalt in Form von AFS (STAPF et al., 2017; SCHÖLZEL et al., 2023)

In der Projekt Phase 1 wurden neben einer Literaturrecherche die Daten von drei Kläranlagen mit Spurenstoffelimination durch PAK ausgewertet (siehe KOMS, 2021). Die Ergebnisse zeigen, dass eine Phosphor-Mitfällung durch die PAK-Abscheidung erzielt wird. Durch die zuflussproportionale Dosierung der Fällmittel in die PAK-Stufe ist der Wirkungsgrad jedoch begrenzt. Die Rückführung des Spülschlamms aus der Filterstufe in die Biologie steigert die Effizienz der Fällmitteldosierung durch Rückführung der als Hydroxide geflockten Fällmittel.

Zur weitestgehenden P-Elimination bedarf es generell einer guten Abstimmung der einzelnen Verfahrensschritte durch Automatisierungstechnik. Die Filtrationsstufe darf dabei nicht als „End-Of-Pipe“-Methode zum Einhalten der P_{ges}-Anforderungen gesehen werden. Stattdessen bedarf es einer stabilen Simultanfällung und eines hohen AFS-Rückhalts in der Nachklärung. Durch Fällmitteldosierung vor der Filterstufe kann die P-Restkonzentration noch weiter gesenkt werden. Um die tatsächliche P-Elimination in den jeweiligen Prozessschritten besser nachzuvollziehen, kann die Betrachtung der einzelnen P-Fraktionen weiterhelfen. Für Kläranlagen mit Teilstrombehandlung (Spurenstoffelimination und Filterstufe) ist zudem eine Mischungsrechnung zum Einhalten des Überwachungswertes durchzuführen.

3. Fragestellungen

Wie im Abschlussbericht der 1. Phase des Forschungsprojekts geschildert und in Kapitel 2 zusammengefasst, gibt es hinsichtlich der Kombination von Spurenstoffelimination und weitestgehender Phosphorelimination in einer kombinierten Verfahrensstufe große Potenziale, aber auch noch einige offene Fragen. Nachfolgend sollen deshalb, für acht kommunale Kläranlagen (vgl. Kapitel 4) auf Basis des in Kapitel 5 geschilderten Untersuchungsprogrammes die folgenden Fragestellungen beantwortet bzw. Projektziele erreicht werden.

- Verfahrenstechniken zur Spurenstoffelimination sollen hinsichtlich ihrer **Potenziale zur weitestgehenden Phosphorelimination bewertet** werden. Dabei sollen neben dem in Phase 1 betrachteten Verfahren mit PAK-Dosierung (Ulmer Verfahren) vor einen Raumfilter auch Flächenfilter, GAK-Adsorber, Ozon-Verfahren und Verfahren mit simultaner PAK-Dosierung in die biologische Stufe betrachtet werden.
- Neben der weitestgehenden Phosphorelimination soll die **CSB-, AFS- und PO_4-P-Eliminationsleistung** der einzelnen betrachteten Verfahren untersucht werden.
- Es sollen Aspekte herausgearbeitet werden, die bei einem **schrittweisen Ausbau** kommunaler Kläranlagen zu berücksichtigen sind, um langfristig beiden Reinigungszielen der Spurenstoffelimination und der weitestgehenden Phosphorelimination gerecht zu werden.
- Des Weiteren soll untersucht werden, wie **Automatisierungskonzepte** zur Fällmitteldosierung für die **Simultanfällung und Flockungsfiltration** ausgestaltet werden können und welchen Einfluss der Einsatz unterschiedlicher Fällmittel für die mehrstufige Fällung zeigt.
- Es soll aufgezeigt werden inwiefern sich die Auslegung der nachgeschalteten Stufe (**Teil- oder Vollstrom**) auf die Eliminationsleistung bzw. die Erreichbarkeit möglicher Zielwerte zur P-Elimination auswirkt. Dabei soll auch berücksichtigt werden, welche Rolle die **Abtrennleistung in der Nachklärung** spielt, um Zielwerte einhalten zu können.
- Auf Basis des umfangreichen Monitorings sollen **Hinweise zur Analytik** gegeben werden.

Zur Zielerreichung werden in den Kapiteln 6 die Betriebsdaten ausgewertet und die Ergebnisse des Intensivmonitorings in Kapitel 7 dargestellt und diskutiert. Die Gesamtzusammenfassung und die wichtigsten Erkenntnisse werden im Fazit dargestellt.

4. Betrachtete Kläranlagen

4.1 Übersicht

Im Rahmen der zweiten Phase des Forschungsprojekts „Untersuchungen zur Kombination von weitestgehender P-Elimination und Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen“ wurden insgesamt acht kommunale Kläranlagen in Baden-Württemberg betrachtet, die mit einer Stufe zur gezielten Spurenstoffelimination ausgestattet sind. Die Kläranlagen wurden basierend auf den unterschiedlichen Verfahren der vierten Reinigungsstufe (PAK, GAK, Ozon) in Kombination mit verschiedenen Filtertechniken (Raum-/Flächenfilter), wie folgt, ausgewählt:

- Untersuchungsprogramm auf Kläranlagen mit einer PAK-Dosierung in einer separaten Adsorptionsstufe und Sandfilter (Kläranlage Mannheim) als Vergleich zu den anderen Verfahrensvarianten. Nach diesem Verfahren wurde auch eine Kläranlage mit optimierter P-Fällung durch Automatisierungskonzepte und Fällmittelwahl (Kläranlage Kressbronn) betrachtet.
- Untersuchungsprogramm auf Kläranlagen mit einer nachgeschalteten PAK-Dosierung mit anschließender Tuchfiltration (Kläranlage Wendlingen) und direkter PAK-Dosierung in die Biologie und Tuchfiltration (Kläranlage Mittleres Glemstal, Leonberg)
- Untersuchungsprogramm auf Kläranlagen mit GAK-Adsorber; mit vorgeschaltetem Sandfilter (Kläranlage Dagersheim-Darmsheim) und ohne (Kläranlage Immendingen-Geisingen)
- Untersuchungsprogramm auf Kläranlagen mit Ozonung (Kläranlage Eriskirch; Kläranlage Friedrichshafen)

Eine tabellarische Aufstellung der ausgewählten Kläranlagen befindet sich in Tabelle 4-1. Ein Standardfließschema zum Vergleich der einzelnen Verfahrensvarianten ist in Abbildung 4-1 dargestellt. Die Fließbilder der einzelnen Kläranlagen befinden sich im Anhang 10.1.

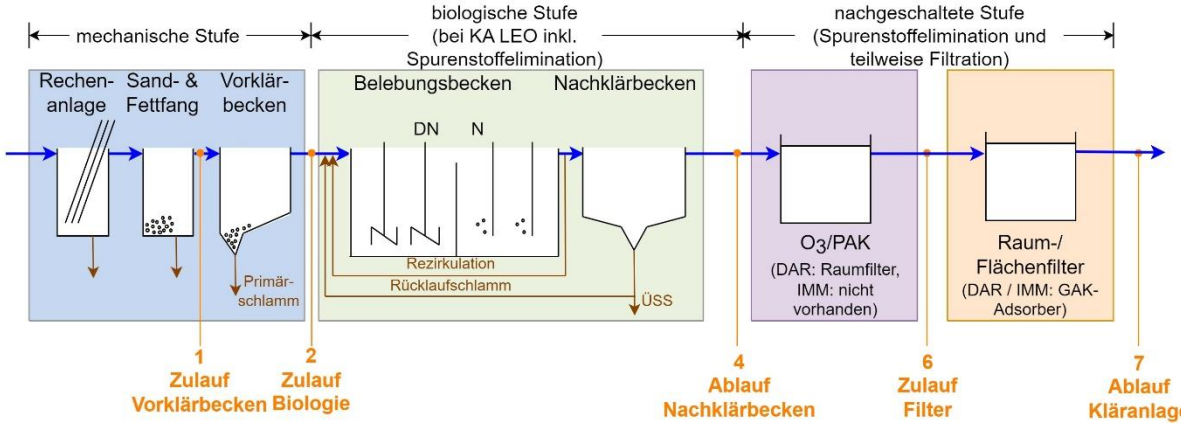


Abbildung 4-1: Fließschema mit Probenahmestellen zum Vergleich der einzelnen Kläranlagen

Tabelle 4-1: Übersicht über die betrachteten Kläranlagen mit Verfahrenstechnik, P- und Spurenstoffelimination und Filtrationstechnik

	Kläranlage	Abkürzung	Ausbaugröße [EW]	Verfahrenstechnik[1]	P-Elimination	Spurenstoffelimination	Filtration
1	**Eriskirch**	ERI	50.000	B + DV + PC + FI + OZ	Simultanfällung + Flockungsfiltration	O_3	Raum~
2	**Friedrichshafen**	FRD	87.000	B + DV + PC + FI + OZ	Simultanfällung + Flockungsfiltration	O_3	Raum~
3	**Immendingen-Geisingen**	IMM	25.500	B + DV + PC + AK	Simultanfällung	GAK	-
4	**Dagersheim-Darmsheim**	DAR	13.800	B + DV + DI + PBC + FI + AK	Simultanfällung	GAK	Vorgeschaltete Raum~
5	**Kressbronn-Langenargen**	KRE	24.000	B + DV + PC + FI + AK	Simultanfällung + Nachfällung + Flockungsfiltration	PAK	Raum~
6	**Mannheim**	MAN	725.000	B + DV + PC + FI + AK	Simultanfällung + Nachfällung + Flockungsfiltration	PAK	Raum~
7	**Wendlingen**	WEN	170.213	B + DV + PBC + FI + AK	Simultanfällung + Nachfällung	PAK	Flächen~
8	**Mittleres Glemstal (Leonberg)**	LEO	90.000	B + DV + DI + PC + AK (PAK_{sim}) + FK[2]	Simultanfällung + ab 2023 Flockungsfiltration	PAK_{sim}	Flächen~

[1] Aus „Ergebnisse des 49. Kommunalen Leistungsnachweises 2022“; [2] PAK_{sim} und FI ergänzt
B: Belebung; TK: Tropfkörper; BS: Belebung mit gemeinsamer Schlammstabilisierung; N: Nitrifikation; DV: Denitrifikation vorgeschaltet; DI: Denitrifikation intermittierend; DN: Denitrifikation nachgeschaltet; PB: Phosphorelimination biologisch (Anaerobbecken); PC: Phosphorelimination chemisch; PBC: Phosphorelimination biologisch + chemisch; FI: Filtration; AK: A-Kohledosierung; OZ: Ozonierung; PAK_{sim}: simultane PAK-Dosierung in die biologische Stufe

Die ausgewählten Kläranlagen unterscheiden sich neben dem angewandten Verfahren und der Größe auch in ihrer Lage in Baden-Württemberg. Der Standort bzw. das aufnehmende Gewässer wirkt sich auf die einzuhaltenden Anforderungen an die P-Elimination aus. In Tabelle 4-2 sind die Rahmenbedingungen der ausgewählten Klärwerke mit der durchschnittlichen Jahresabwassermengen (JAM), den maximalen Mischwasserzufluss Q_M, der Auslegungswassermenge für die Spurenstoffelimination $Q_{spur,max}$ und die Überwachungs- sowie Zielwerte für P_{ges} gezeigt.

Tabelle 4-2: Übersicht Rahmenbedingungen

	Kläranlage	JAM (Ø 2019-2021) [m³/a]	Q_M [l/s]	Spurenstoffelimination $Q_{spur,max}$ [l/s]	Überwachungswert P_{ges} [mg/l]	Zielwert P_{ges} [mg/l][1]
1	**ERI**	3,9 Mio	365	365	1,0	0,3
2	**FRD**	9,5 Mio	910	910	1,0	0,3[2]
3	**IMM**	2,1 Mio	236	150	0,6	0,3
4	**DAR**	0,9 Mio	110	60	0,5	0,3
5	**KRE**	2,6 Mio	252	265	1,0	0,3[2]
6	**MAN**	30 Mio	4.000	2.000	0,5	0,2
7	**WEN**	16,5 Mio	1.428	700	1,0 ab 2021: 0,8	0,3
8	**LEO**	5,4 Mio	570	-	1,0	0,5 ab 08/2023: 0,2[3]

[1] Einzuhalten in der 24h-Mischprobe als Jahresmittelwert;
[2] Ab 2025 verpflichtend 0,2 mg/l;
[3] Seit Inbetriebnahme der Nachfällung

4.2 Phosphorelimination

Die Phosphorelimination kann über eine vermehrte biologische Elimination (Bio-P) oder eine chemische Fällung (siehe Kapitel 2) erfolgen. Die ausgewählten Kläranlagen dosieren alle Fällungsmittel zur chemischen Fällung. Nur wenige der Anlagen verfügen über ein anaerob betriebenes Becken in der Biologie, in der eine vermehrte biologische P-Elimination stattfinden kann. Aufgrund jahreszeitlicher Temperaturschwankungen wird der Effekt der Bio-P weitestgehend mitgenommen, während der Fokus zur P-Elimination auf der chemischen Fällung liegt. Die chemische Fällung kann durch Vor-, Simultan- oder Nachfällung verfahrenstechnisch umgesetzt werden. Keine der Anlagen führt eine Vorfällung durch, während alle Anlagen die Simultanfällung in der Belebungsstufe durchführen. Dabei unterscheiden sich die Dosierstellen (siehe Tabelle 4-3). Bei den ausgewählten Anlagen mit einem GAK-Adsorber findet keine weitere Fällmitteldosierung (Nachfällung) statt. Beide Kläranlagen verfügen lediglich über eine Dosierstelle zur Simultanfällung.

Bei den Kläranlagen mit einer nachgeschalteten PAK-Adsorptionsstufe wird mit einhergehender Fällmitteldosierung zur PAK-Abtrennung gleichzeitig eine Nachfällung durchgeführt. Dies findet unabhängig vom Raum- oder Flächenfilter statt. Bei der Kläranlage mit einer simultanen PAK-Dosierung entfällt der Schritt der Nachfällung. Bei Kläranlagen mit einem nachgeschalteten Raum- oder Flächenfilter werden teilweise Fällmittel vor dem Filter dosiert, was zu einer Flockungsfiltration führt und ebenfalls einer Nachfällung entspricht. Diese Anlagen sind sowohl bei Ozon-Verfahren als auch bei PAK-Verfahren im Einsatz. Die ausgewählten Ozonverfahren weisen jeweils zwei Dosierstellen in der Biologie auf. Dies führt bei den ausgewählten Kläranlagen mit Ozon- oder nachgeschaltetem PAK-Verfahren zu jeweils drei Dosierorten für Fällmittel: Simultanfällung (zwei Dosierstellen) und Flockungsfiltration (Ozonverfahren) bzw. Simultan-, Nachfällung (in PAK-Stufe) und Flockungsfiltration (nachgeschaltete PAK). Die Kläranlage Kressbronn mit optimierter P-Elimination weißt mit vier Dosierstellen die meisten Dosierstellen auf. Ein Überblick der Dosierstellen und eigesetzten Chemikalien ist in Tabelle 4-3 gegeben. Die Kläranlagen ERI, FRI, KRE und WEN verfügen über eine Zweipunkt-Dosierung in der Belebungsstufe. Während IMM und DAR ausschließlich in der Belebungsstufe Fällmittel dosieren, verfügen alle anderen Kläranlagen über eine mehrstufige Fällung. In KRE und MAN erfolgt die Nachfällung dauerhaft in die PAK-Stufe und bedarfsabhängig vor der Flockungsfiltration.

Neben der Anzahl an Dosierstellen unterscheidet sich für die acht untersuchten Kläranlagen auch die Auswahl der Fällmittel. So wird in ERI und KRE an allen Dosierstellen mit Eisen-III-Chlorid-Lösungen gearbeitet. Diese wird auch in FRI an zwei von drei Dosierstellen eingesetzt. An der dritten wird hier mit einem anderen Fällmittel gearbeitet. Bei beiden Kläranlagen mit nachgeschalteten GAK-Adsorbern IMM und DAR sowie in LEO wird mit einem Aluminium-Eisen-Mischprodukt als Fällmittel gearbeitet. Die Kläranlagen nutzen jedoch nicht dieselbe Chemikalie. WEN nutzt in der Biologie ebenfalls ein Aluminium-Eisen-Mischprodukt, in die PAK-Stufe werden dagegen Eisen-III-Salze dosiert. In Mannheim wird als einzige der untersuchten Kläranlagen Eisen-II-Sulfat in die Biologie dosiert sowie nach Bedarf in den Überleitungsschacht zum Raumfilter. In der PAK-Stufe werden Aluminiumsalze verwendet.

Somit werden ganz unterschiedliche Fällmittel zur Simultanfällung, in der PAK-Stufe sowie zur Flockungsfiltration genutzt. In FRI, MAN und WEN werden zwei unterschiedliche Produkte in den verschiedenen Verfahrensstufen eingesetzt.

Tabelle 4-3: Detaillierte Darstellung der für die Phosphorelimination relevanten aktiven Verfahrenstechnik

	Anzahl Dosier punkte	Simultanfällung			Nachfällung			Flockungsfiltration		
		Dosier-stelle	Dosier-strategie	Fällmittel	Dosier-stelle	Dosier-strategie	Fällmittel	Dosier-stelle	Dosier-strategie	Fällmittel
ERI	3	A_VKB A_DV	k (A_DV)	Eisen-III-Chloridsulfat-Lsg. (FERRIFLOC, KRONOS)	-	-	-	VTB_FF	k	Eisen-III-Chloridsulfat-Lsg. (FERRIFLOC, KRONOS)
FRD	3	Z_BB	FW	*Bis 31.01.2020:* Aluminiumsulfat-Lsg. (Nutricon) *01.02.2020 -09.11-2021:* Aluminiumchlorid-Lsg. (Nutricon) *Ab 10.11.2021:* VTA 24 (VTA)	-	-	-	VTB_FF	k	Eisen-III-Chlorid-Lsg. (40 %, Nutricon)
		A_BB	k	Eisen-III-Chlorid-Lsg. (40 %, Nutricon)						
IMM	1	A_BB	k	Duophos-A-Lösung (Eisen-/Aluminiumchlorid-Lsg., Nutricon)	-	-	-	-	-	-
DAR	1	A_BB	FW + kSt	Aluminium-Eisen-III-Chlorid-Lsg. (SÜDFLOCK® K2, CLARIANT)	-	-	-	-	-	-
KRE	4	A_VK VTB_Z_NK	k	Eisen-III-Chloridsulfat-Lsg. (FERRIFLOC, KRONOS)	A_U	-	Eisen-III-Chloridsulfat-Lsg. (FERRIFLOC, KRONOS)	Z_FF	k	Eisen-III-Chloridsulfat-Lsg. (FERRIFLOC, KRONOS)
MAN	4	A_BB	FW + k_Rg	Eisen-II-Sulfat (QUICKFLOC, KRONOS)	A_KR A_U	PQ	Aluminiumchloridhydroxidsulfat (VTA 51, VTA)	Z_FF_nB	K_Rg	Eisen-II-Sulfat (QUICKFLOC, KRONOS)
WEN	3	Z_DV BB	k_Rq	*Bis 2020:* Eisen-III-Chloridsulfat-Lsg. (41 %, Nutricon) *Ab 2021:* Aluminium- Eisen-III-Chlorid-Lsg. (SÜDFLOCK® K2, CLARIANT)	Z_KR	PQ	Eisen-III-Chlorid-Lsg. (KEMIRA PIX-111, Kemira); *Nach Lieferengpass:* Eisen-III-Chloridsulfat-Lsg. (41 %, Nutricon)	-	-	-
LEO	2	BB *Bis 2022:* DV_nB	k	Polyaluminiumhydroxidchlorid-Lsg. mit Eisen (PAC-F 33, Nutricon)	-	-	-	*Ab 2023:* A_NK	k	Polyaluminiumhydroxidchlorid-Lsg. mit reaktivem Eisen (PAC-F 33, Nutricon)

Dosierstellen: Z_Zulauf; A_Ablauf; VKB: Vorklärung; BB: Belebung; DV: Denitrifikation vorgeschaltet; VTB: Verteilerbauwerk; FF: Flockungsfilter; NK: Nachklärung; U: Ulmer Verfahren; KR: Kontaktreaktor;
Dosierstrategien: FW: Festwert; PQ: proportional Durchfluss; St: Steuerung; Rg: Regelung; k: konzentrationsabhängig; fp frachtproportional; nB: nach Bedarf
Hersteller: CLARIANT Produkte (Deutschland) GmbH; Kemira Germany Sales GmbH; KRONOS INTERNATIONAL Inc; Nutricon Umweltschutztechnik GmbH; VTA Austria GmbH

4.3 Filtrationsverfahren

Als nachgeschaltetes Filtrationsverfahren überwiegen die Raumfilter bei den betrachteten Kläranlagen. Nur zwei Kläranlagen werden mit einem Tuchfilter als Flächenfilter betrieben. In DAR ist ein Raumfilter dem GAK-Adsorber vorgeschaltet, während IMM nur einen GAK-Adsorber und keine weitere Filterstufe nutzt. Alle betrachteten Raumfilter sind gefüllt mit Anthrazit und Quarzsand.

Durch Variation in Betrieb und Auslegungsvolumenstrom (Voll-/Teilstrom) unterscheiden sich die Filteranlagen vor allem durch Anzahl der Kammern und Höhe bzw. Fläche des Filters. Die Betriebsdaten inklusive Betriebsweise und Spülregime sind in Tabelle 4-4 für alle betrachteten Kläranlagen aufgezeigt.

4.4 Spurenstoffelimination

Die betrachteten Kläranlagen unterscheiden sich nicht nur in der Wahl des Filters, sondern auch in der angewandten Verfahrensvariante zur Spurenstoffelimination. Je nach Verfahren (PAK, GAK, Ozon) sind unterschiedliche Parameter relevant zur Beschreibung und zum Vergleich des Verfahrens. In Tabelle 4-5 sind die betrachteten acht Kläranlagen entsprechend des Spurenstoffeliminationsverfahrens sortiert und mit den für den Prozess relevanten Parametern aufgeführt.

Tabelle 4-4: Darstellung der relevanten Kenngrößen der Filtrationsstufen

	Filtertyp (Raum~/ Flächen~/ GAK-Adsorber)	Auslegung (Voll-/Teil-strom), Auslegungs wasser-menge [l/s]	Durch-strömung (abwärts/ aufwärts)	Zeitpunkt der Inbetrieb-nahme	Konfigura-tion (Anzahl Kammern/ Filter)	Betriebs-weise (Abschalt-ungen etc.)	Filtermaterial mit Körnung[2]	Filterbetthöhe / Filterfläche	Max. Filterge-schwindigkeit v_F [m/h]	Spülregime und Steuerung
ERI	Raum~	Vollstrom 365 l/s	abwärts	1994	7		Anthrazit Quarzsand	850 mm 650 mm	10,0	Diskont. t = 35 h (min. 5 h Pause); ΔH = 98 %
FRD	Raum~	Vollstrom 911 l/s	abwärts	Material-tausch: 2016	10	2 bis 10 Kammern; gleichverteilt	Anthrazit Quarzsand	1400 mm 700 mm	10,2	Diskont. t_{Stand} 6 h; t = 30 - 45 h
IMM[1]	GAK-Adsorber	Teilstrom 150 l/s	abwärts	2021	6	Diskont.	GAK (8x30 mesh)	2800 mm	8,0	ΔH oder t
DAR	Raum~	Vollstrom 90 l/s	abwärts	1979 Saniert: 2002/2003 2021	4	-	Anthrazit Quarzsand	900 mm 7600 mm	10,8	1 Filter pro Tag (TW) und ΔH
	GAK-Adsorber	Teilstrom 60 l/s	abwärts	2020	3	-	GAK (8x30 mesh)		14,7	Ca. 2 Monate
KRE	Raum~	Vollstrom 252 l/s	abwärts	Material-tausch: 2017	6	2 bis 6 Kammern; rotierend	Anthrazit Quarzsand	700 mm 700 mm	7,8	Diskont., t = 48 h; selten ΔH
MAN	Raum~	Vollstrom 4.000 l/s	abwärts	Material-tausch: 2016	16	Bis 2.000 L/s 8 Zellen, bis 4.000 L/s 16 Zellen	Anthrazit Quarzsand	400 mm 600 mm	11,8	Diskont., ΔH oder t = 48 h
WEN	Flächen~	Teilstrom 700 l/s	abwärts	2017	4	-	Polstoff OptiFiber® PES-14 (15 x 5 m², ⌀ 2,1 m)	75 m²	8,4	Diskont., ΔH
LEO	Flächen~	Vollstrom 570 l/s	abwärts	Inbetrieb-nahme: 2018 Erweitert: 2020	6	-	Polstoff Standard (18 x 5 m², ⌀ 2,1 m)	90 m²	5,3	Diskont., ΔH

[1] Filter in IMM gleichzeitig vierte Reinigungsstufe, siehe Tabelle 4-5; [2] Körnung Anthrazit: 1,4 – 2,5 mmm und Quarzsand: 0,71 – 1,25 mm)
Filtertyp: Raumfilter, Flächenfilter, GAK-Adsorber; **Durchströmung**: aufwärts, abwärts; **Filtermaterial:** Anthrazit, Quarzsand, GAK, Tuch; **Spülung:** diskontinuierlich und kontinuierlich; **Steuerung**: Füllstand (ΔH), Zeitintervalle

Tabelle 4-5: Detaillierte Darstellung der Spurenstoffelimination auf den betrachteten Kläranlagen

	Ozonanlagen									
	Vollstrom/ Teilstrom	**Inbetriebnahme**	**Straßen**	**Eintragssystem**	**Reaktor-tiefe[3]**	**Reaktortyp und -ausbau**	**Hydraul. Aufenthalts-zeit**	**Ozon-Dosierung**	**Spez. Ozon-dosierung**	**Dosierregime**
ERI	Vollstrom	2019	2	Diffusoren	6,2	6 Kompartimente (vertikale) 2 Begasungszonen	20 min	2,0 mg_{O3}/l	0,5 mg_{O3}/mg_{DOC}[3]	Zulaufproportional bis Q_{max} = 250 l/s
FRD	Vollstrom	2021	1	Diffusoren	6,3	6 Kompartimente (horizontal) 1 Begasungszone	> 20 min	4,0 - 5,0 mg_{O3}/l[5]	~0,4 mg_{O3}/mg_{DOC}	Unterschiedliche im Versuchszeitraum
	GAK-Anlagen									
	Vollstrom/ Teilstrom	**Inbetriebnahme**	**Reaktoren**	**GAK-Volumina**	**GAK-Oberfläche**	**Betriebsweise**	**Leerbett-kontaktzeit,**	**GAK-Austausch**		**Spülregime**
IMM	Teilstrom	2021	6	225 m^3 (1 GAK mit 8x30 mesh)	81 m^2	Diskontinuierlich	25 min	Noch kein Austausch bei bislang 30.000 Bettvolumen[3]		Abhängig vom Bettvolumen
DAR	Teilstrom	2020	3[1]**	15 m^3 (3 GAK mit 8x30 mesh)	4,9 m^2	Druckfilter, abwärts, parallel betrieben	> 12 min	Basierend auf Gesamtelimination; nach ca. 20.000 Bettvolumen		Alle 8 – 10 Wochen
	PAK-Anlagen									
	Vollstrom/ Teilstrom	**Inbetriebnahme**	**Straßen**	**Kontaktreaktor**		**Sedimentation**		**PAK-Dosierung**		**Dosierregime**
				Beckenvolumina	**Aufenthalt**	**Beckenvolumina**	**Aufenthalt**			
KRE	Vollstrom	2011	1	3 x 184 m^3	> 35 min	2.540 m^3	> 2,6 h	7 mg_{PAK}/l		Zulaufproportional
MAN	Teilstrom	2016	5	5 x 740 m^3	> 30 min	5 x 2.350 m^3	> 2,2 h	Zwischen 6 – 10 mg_{PAK}/l		Zulaufproportional
WEN	Teilstrom	2018	2	3 x 210 m^3	> 30 min	5.100 m^3	> 2 h	5 – 8 mg_{PAK}/l		Zulaufproportional
LEO	Vollstrom, PAK_{sim}	2021	2[2]	-	-	-	-	18 mg_{PAK}/l		< 170 l/s mengen-proportional, darüber Festwert

[1] ein vierter steht für den Filteraustausch mit einer Be-/Entsorgungslieferung zur Verfügung; [2] Dosiereinrichtungen/Straßen; [3] Voraussichtlich Austausch für 2 von 6 Filtern in 2024

4.5 Online-Messtechnik

Im Rahmen der Betriebsüberwachung werden bei allen Kläranlagen 24--Mischproben genommen und auf eine Vielzahl von Parametern (CSB, P_{ges}, AFS, etc.) analysiert. Zusätzlich gibt es für unterschiedliche Parameter Online-Messungen. Ein Überblick über die für dieses Projekt relevanten Online-Messungen von SAK_{254}, DOC, Trübung, P_{ges} und PO_4-P sind in Tabelle 4-6 gezeigt.

Tabelle 4-6: Übersicht der Online-Messstellen für SAK_{254}, DOC, Trübung, P_{ges} und PO_4-P der acht untersuchten Kläranlagen

	1 - Zulauf	**2 – Ablauf VK**	**Anderer Messort: in/nach BB**	**4 - Ablauf NK**	**6 – Zulauf Filter**	**7 – Ablauf Filter/Ablauf Kläranlage**
ERI			PO_4-P	DOC SAK_{254}	SAK_{254}	P_{ges} PO_4-P Trübung
FRD			PO_4-P	SAK_{254} Trübung	SAK_{254}	P_{ges} PO_4-P Trübung
IMM			PO_4-P			
DAR			Feststoffgehalt PO_4-P		Trübung	SAK_{254}
KRE			PO_4-P	SAK_{254}	-	Trübung P_{ges} SAK_{254}
MAN		P_{ges}				P_{ges} Trübung
WEN			PO_4-P	PO_4-P SAK_{254} Trübung	Trübung	PO_4-P SAK_{254} Trübung
LEO	PO_4-P SAK (CSB)		PO_4-P			P_{ges} PO_4-P SAK (CSB) Trübung

5. Untersuchungsprogramm

5.1 Betriebsdaten

Zur Einschätzung der betrachteten Kläranlage wurden jeweils die Betriebsdaten der Jahre 2019 – 2021 ausgewertet. Dafür wurden die Daten aus der Eigenüberwachung genutzt. Diese resultieren entweder aus Online-Messtechnik und/oder 24-h-Mischproben, die volumenproportional genommen und im Labor der jeweiligen Kläranlagen z.B. über Küvettentests analysiert werden. Die Daten sind statistisch ausgewertet und über Summenkurven und statistische Kenngrößen dargestellt. Die gemessenen Parameter und Orte der Probenahme im Prozess unterscheiden sich für die betrachteten Kläranlagen und Verfahrensschemata. Auf Basis der Erkenntnisse aus der Betriebsdatenauswertung wurde das Intensivmonitoring konzipiert.

5.2 Probenahmen des Intensivmonitorings

Daten und Messparameter, wie die P-Fraktionierung, die im Rahmen der Eigenüberwachung nicht abgedeckt werden können, sind Teil des 2-wöchigen Intensivmonitoringprogramms, dass für jede Kläranlage durchgeführt wurde. Zudem wurden ergänzende Probenahmestellen zum Vergleich der Verfahren und Kläranlagen miteinander im Intensivmonitoring beprobt.

Während des Intensivmonitorings wurden an den acht betrachteten Kläranlagen täglich 24-h-Mischproben über einen Zeitraum von zwei Wochen genommen. Für die Beprobung wurden jeweils die gleichen Probenahmestellen gewählt, um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Exemplarische Probenahmestellen sind in Abbildung 4-1 gezeigt. Es wurden bis zu fünf Probenahmestellen auf den Kläranlagen beprobt. Eine Ausnahme stellt die Kläranlage LEO dar, an der aufgrund der Simultandosierung von Pulveraktivkohle in die Biologie nur drei Probenahmestellen verwendet wurden. Da die Kläranlage IMM über ein einstufiges Nachbehandlungsverfahren (GAK-Adsorber) verfügt, wurden hier nur vier Probenahmestellen betrachtet. Detaillierte Angaben zur Positionierung der Probenahmestellen sind den Verfahrensschemata in Anhang 10.1 zu entnehmen.

Der Zu- und Ablauf der Vorklärbecken sowie Ablauf des Nachklärbeckens und des Filters (Ablauf der Kläranlage) wurden in vielen Kläranlagen bereits in der Betriebsüberwachung beprobt. Der Zulauf des Filters wurde für einige Kläranlagen als zusätzliche Probenahmestelle im Rahmen des Intensivmonitorings etabliert. Ein Überblick der Probenahmestellen je Kläranlage ist in Tabelle 5-1 gezeigt.

Tabelle 5-1: Probenahmestellen im Rahmen des Intensivmonitorings nach Kläranlage[1]

	Intensiv-monitoring	1 - Zulauf	2 - Ablauf VK	3 - Zulauf NK	4 - Ablauf NK	5 - Ablauf Kontakt-reaktor	6 - Zulauf Filter	7 - Ablauf Filter/Ablauf Kläranlage
ERI	08.05.2022 – 21.05.2022	x	x	-	x	-	x	x
FRD	24.06.2022 – 09.07.2022	x	x	-	x	-	x	x
IMM	24.08.2023 – 06.09.2023	x	x	-	x[4]	-	-	x
DAR	17.7.2022 – 30.07.2022	x	x	-	Zulauf Filter: x (IM)	-	Ablauf Filter: x	x
KRE	06.11.2022 – 19.11.2022	x	x	-	x	-	x (IM)	x
MAN	07.11.2022 – 20.11.2022	x	x	-	x	-	x	x
WEN	14.06.2023 – 27.06.2023	x	x	-	x	-	x (IM)[3]	x
LEO	30.06.2023 – 13.07.2023[1]	x	-		x	-	-	x

[1] Probenahmestellen mit IM wurden im Rahmen des Intensivmonitorings zusätzlich beprobt; [2] aus organisatorischen Gründen keine Beprobung am 12./13.07.23; [3] Onlinemesstechnik in Wendlingen vorhaben, keine Probenahme; [4] Zulauf Filter (GAK) entspricht Ablauf der Nachklärung

Üblicherweise wurden an allen gezeigten Probenahmestellen über 14 Tage 24-h-Mischproben genommen. Lediglich für die Messung der Spurenstoffe wurden abweichend 48-h-Mischproben aus je zwei 24-h-Mischproben hergestellt. Während des jeweils zweiwöchigen Intensivmonitorings wurden je Kläranlage vier 48-h-Mischproben zur Spurenstoffanalytik entnommen. Somit sind acht der 14 Tage des Intensivmonitorings abgedeckt. Die Proben wurde bevorzugt bei Trockenwetter gezogen, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen.

5.3 Analytik für Intensivmonitoring

Die Analyse der einzelnen Parameter wurde mit folgenden Geräten und Verfahren durchgeführt:

- pH – Messgerät, pH-Wert, DIN 38404-5
- Leitfähigkeitsmessgerät, Leitfähigkeit, DIN EN 27888
- DOC, DIN EN 1484
- Trübung, DIN EN ISO 7027-1 (Turbimetrie)
- AFS (Membranfilter mit 0,45 µm Porenweite)
- Spurenstoffe nach DIN EN ISO 17294-2, Liste B des KomS
- CSB_{ges}, CSB_{mf}, P_{ges}, PO_4-P, $P_{gelöst}$, SAK_{254}, Küvettentests und Analyse mit UV VIS Spektralphotometer

Die Filtration von membranfiltrierten Proben für die Küvettentests erfolgte durch Einsatz von Membranfiltern mit 0,45 µm Porenweite.

6. Betrachtung der Betriebsdaten

6.1 Jahresabwassermenge

Die Jahresabwassermengen der untersuchen Klärwerken (KA) unterscheiden sich nach Klärwerksgröße und Jahr. Ein Überblick mit Mittelwert, Mindest- und Maximalzufluss ist in Tabelle 6-1 gezeigt. Aus den Daten ist ersichtlich, dass 2021 das „nasseste“ Jahr mit den größten Zuflussmengen der drei betrachteten Jahre war. 2020 war dagegen das Jahr mit den geringsten Zuflussmengen. Eine Ausnahme gibt es nur bei der Kläranlage DAR, bei der das Jahr 2019 die geringsten Zuflussmengen zeigte und die Unterschiede zwischen den einzelnen Jahren generell gering ausfallen.

Tabelle 6-1: Mittlere Tageszuflüsse zu den betrachteten Kläranlagen in den Jahren 2019, 2020 und 2021

		ERI	FRD	IMM	DAR	KRE	MAN	WEN	LEO
2019	Min.	2.413	11.400	2.167	1.111	3.443	49.945	16.777	8.600
	Mittel	**10.456**	**25.569**	**6.315**	**2.280**	**7.327**	**89.399**	**39.521**	**14.397**
	Max.	41.890	82.410	17.159	6.907	21.158	314.012	119.807	54.660
2020	Min.	4.650	11.000	1.931	1.167	1.453	43.153	16.368	8.780
	Mittel	**9.711**	**23.734**	**5.013**	**2.479**	**6.018**	**87.623**	**36.618**	**14.581**
	Max.	29.764	76.290	17.535	7.481	20.777	287.112	117.033	45.750
2021	Min.	4.054	10.820	2.310	1.209	3.646	51.006	19.712	7.410
	Mittel	**12.470**	**28.991**	**6.558**	**2.425**	**7.993**	**91.626**	**43.295**	**15.103**
	Max.	33.570	76.610	20.772	9.432	21.371	289.587	122.977	44.260

Die Verteilung der Zulaufmengen ist als Summenhäufigkeit in Abbildung 6-1 normiert auf den maximalen Zulauf zusammengefasst dargestellt. Die Summenhäufigkeitskurven zeigen ebenfalls die höchsten Zuflussmengen im Jahr 2021 für alle Kläranlagen, erkennbar durch den flacheren Kurvenverlauf. Für 2020 zeigen sich tendenziell die geringsten Zuflussmengen was durch einen eher steilen Kurvenverlauf und das enge zusammenliegen der Kurven gekennzeichnet ist. Insgesamt zeigen das Jahr 2019 und 2021 im Vergleich die meisten Unterschiede zwischen den untersuchten Kläranlagen. Die Unterschiede können durch ungleiche Niederschlagsmengen und das lokale Auftreten von Gewitter- und Regenereignissen in den verschiedenen Regionen Baden-Württembergs erklärt werden. Zusätzlich beeinflussen die Einzugsgebietsgrößen, unabhängig von der Größenklasse, den Verlauf der Summenhäufigkeitskurven. Die drei betrachteten Betriebsjahre zeigen die im Realbetrieb auftretenden Fluktuationen durch Wettereinflüsse gut auf, wie auch in Abbildung 6-1 zu sehen.

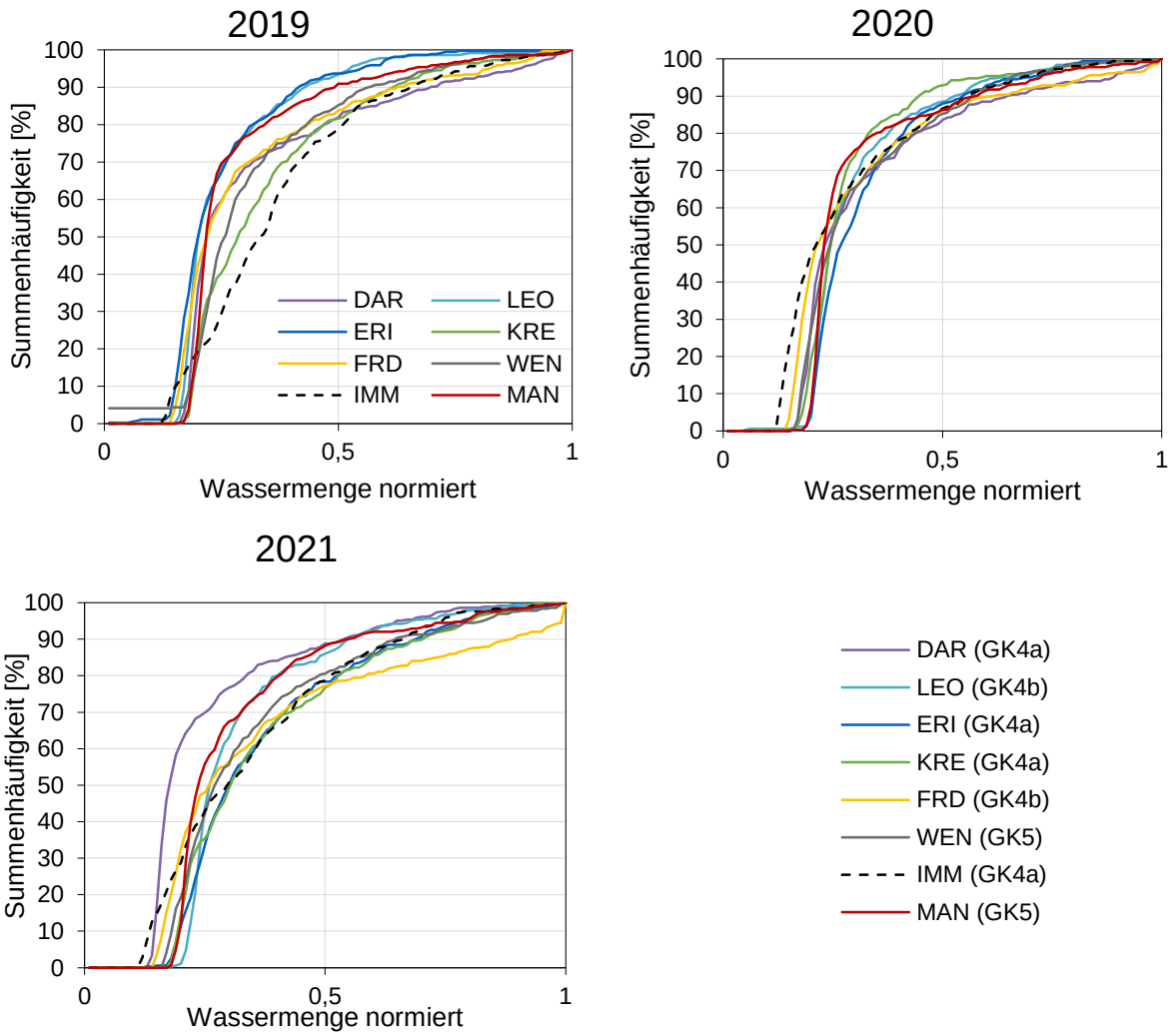


Abbildung 6-1: Summenhäufigkeiten der normierten Jahresabwassermengen für die Jahre 2019, 2020 und 2021 für die betrachteten Kläranlagen

6.2 Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)

In Tabelle 6-2 sind die in den Jahren 2019 bis 2021 erreichten Eliminationsgrade für die CSB-Reduktion in den einzelnen Stufen der Kläranlagen gezeigt. Zusätzlich sind die CSB-Konzentrationen im Ablauf Nachklärung bzw. Zulauf der nachgeschalteten Spurenstoffelimi-nationsstufe und die Konzentration im Ablauf der Kläranlage angegeben. Die untersuchten Kläranlagen zeigen eine mittlere CSB-Reduktion von 94 – 98 %. Dabei ist es zu einer konstanten Reinigungsleistung in den verglichenen Betriebsjahren gekommen, die auf eine stabile Reinigung hinweisen. Die Hauptreduktion erfolgt in der biologischen Reinigungsstufe mit 85 – 95 %. Durch die nachgeschaltete Verfahrenstechnik kann eine Rest-CSB-Reduktion um weitere 20 bis 47 % stattfinden, was zu den genannten hohen Gesamtreduktionsleistungen führt. Dies entspricht einer Reduktion um ca. 4 mg/l CSB oder ca. 3 – 3,5 mg/l TOC (für MAN). Ausnahme ist WEN, hier kommt es in der nachgeschalteten Stufe zu einer CSB-Restreduktion von ca. 10 mg/l. Die mittleren CSB-Ablaufkonzentrationen liegen alle zwischen 10 und 24 mg/l. Für DAR liegt die CSB-Elimination mit 87 bis 91 % niedriger, seit Inbetriebnahme des GAK-Adsorbers in 2021 ist die Eliminationsleistung gestiegen.

Im Intensivmonitoring wurde die Beprobung aller acht Kläranlagen erweitert, um bei allen Rückschlüssen auf die CSB-(Rest)Elimination in der nachgeschalteten Verfahrenstechnik ziehen zu können. Dies ist anhand der Betriebsdaten so nicht möglich. Detaillierter wird daher im Kapitel 7.3 auf die Reduktion organischer Stoffe in den verschiedenen Stufen der Kläranlage eingegangen. Genauere Hinweise auf die CSB-Fraktionierung sind aus den gegebenen Betriebsdaten ebenso nicht zu entnehmen, weshalb im Intensivmonitoring sowohl CSB_{ges} als auch $CSB_{gelöst}$ gemessen wurden. Zudem wurde entschieden weitere organische Summenparameter wie der gesamte organische Kohlenstoff TOC und der gelöste organische Kohlenstoff DOC im Intensivmonitoring mit aufzunehmen, da diese Paramater nur in einigen Kläranlagen und nicht über alle Probenahmestellen hinweg bestimmt werden.

Tabelle 6-2: CSB-Elimination und mittlere Konzentration im Ablauf Nachklärung (ANK) und Ablauf Kläranlage (AK) in den betrachteten Kläranlagen (2019 bis 2021)

		Vorklärung [%][1]	**Biolog. Reiniung [%][2]**	**Nachgesch. Verfahrens-technik [%][3]**	**Gesamte Kläranlage [%][4]**	**Mittler. Konz. ANK [mg/l]**	**Mittler. Konz. AK [mg/l]**
ERI	2019	38 (n=51)	-	-	94 (n=180)	-	20
	2020	46 (n=52)	-	-	96 (n=183)	-	14
	2021	43 (n=50)	-	-	95 (n=177)	-	15
FRD	2019	33 (n=359)	91 (n=199)	22 (n=198)	95 (n=361)	19	16
	2020	36 (n=354)	-	-	95 (n=357)	15	17
	2021	33 (n=348)	90 (n=217)	29 (n=215)	95 (n=359)	17	12
IMM	2019	33 (n=92)	91 (n=92)	-	94 (n=92)	-	16
	2020	38 (n=91)	92 (n=91)	-	95 (n=91)	-	18
	2021	35 (n=91)	90 (n=63)	47 (n=64)	95 (n=91)	-	11
DAR	2019	38 (n=50)	83 (n=50)		90 (n=50)	-	21
	2020	32 (n=53)	81 (n=52)		87 (n=52)	-	24
	2021	29 (n=52)	85 (n=52)[6]		91 (n=52)	-	18
KRE	2019	54 (n=50)	93 (n=50)	20 (n=49)	97 (n=49)	13	9,8
	2020	47 (n=53)	93 (n=53)	23 (n=45)	97 (n=46)	15	11
	2021	50 (n=51)	92 (n=51)	20 (n=44)	97 (n=49)	13	9,7
MAN[5]	2019	25 (n=358)	95 (n=353)	34 (n=353)	98 (n=357)	*9,2*	*6,1*
	2020	28 (n=362)	95 (n=355)	38 (n=354)	98 (n=360)	*9,3*	*5,8*
	2021	29 (n=342)	94 (n=340)	36 (n=304)	97 (n=345)	*9,8*	*6,3*
WEN	2019	35 (n=253)	86 (n=74)	30 (n=94)	95 (n=258)	22	13
	2020	30 (n=259)	86 (n=82)	40 (n=108)	95 (n=261)	24	14
	2021	30 (n=258)	87 (n=126)	37 (n=136)	94 (n=262)	20	14
LEO	2019	48 (n=40)	91 (n=51)		96 (n=53)	-	24
	2020	31 (n=50)	93 (n=55)		95 (n=54)	-	22
	2021	30 (n=53)	95 (n=54)		96 (n=54)	-	17

[1] Zulauf Kläranlage zu Ablauf Vorklärung; [2] Ablauf Kläranlage bis Ablauf Nachklärung; [3] Ablauf Nachklärung bis Ablauf Kläranlage; [4] Zulauf Kläranlage bis Ablauf Kläranlage; [5] Bezogen auf TOC-Messungen anstelle von CSB-Messungen; [6] Inkl. GAK-Adsorber

6.3 Feststoffentnahme

AFS-Konzentrationen wurden nur in drei der acht Kläranlagen regelmäßig gemessen. Dabei lagen für Eriskirch 136, für Friedrichshafen 285 und für Kressbronn 36 Messwerte des AFS vor. Die Werte im Ablauf der Kläranlagen der Jahre 2019 bis 2021 sind als Summenhäufigkeit in Abbildung 6-2 gezeigt. Für die drei Anlagen zeigt sich eine vergleichbare Verteilung mit überwiegend geringen AFS-Werten im Ablauf. Die Bestimmungsgrenze von AFS liegt bei 2,0 mg/L, sodass 50 bis 70 % die gemessenen Daten unterhalb der Bestimmungsgrenze liegen.

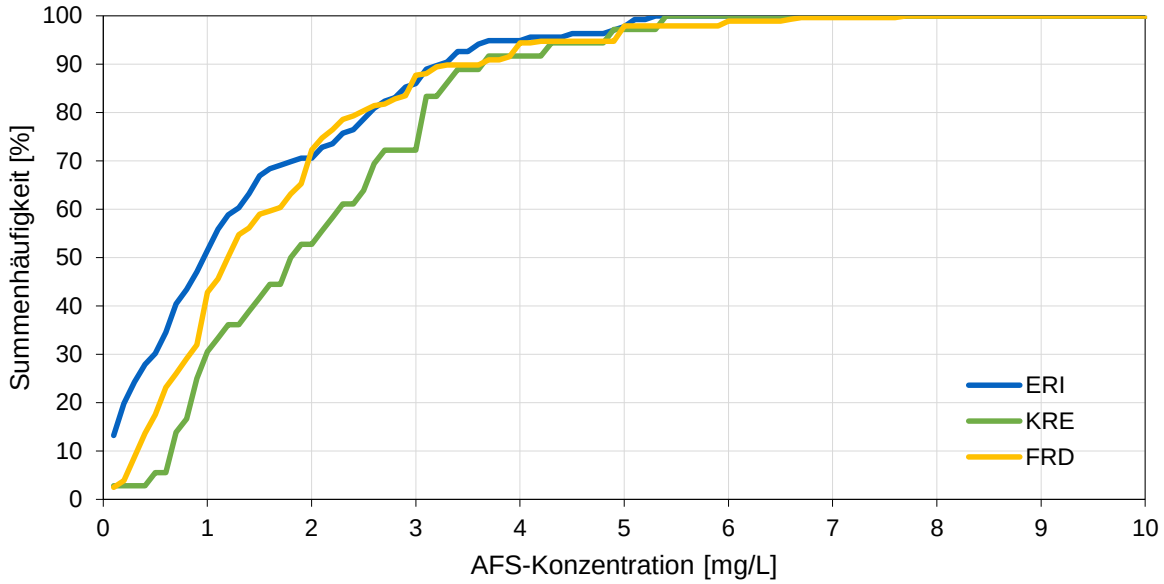


Abbildung 6-2: AFS-Konzentration im Ablauf von drei betrachteten Kläranlagen, dargestellt als Summenlinienkurve für die Jahre 2019 bis 2021

Im Gegensatz zum AFS wurde in allen acht Kläranlagen die Trübung im Ablauf gemessen. Die Daten sind in Abbildung 6-3 dargestellt. Für alle acht Kläranlagen liegen die Trübungswerte kontinuierlich vor und die Trübungen im Ablauf der Klärwerke liegen in einem sehr niedrigen Bereich mit 90 % der Werte < 5 FNU.

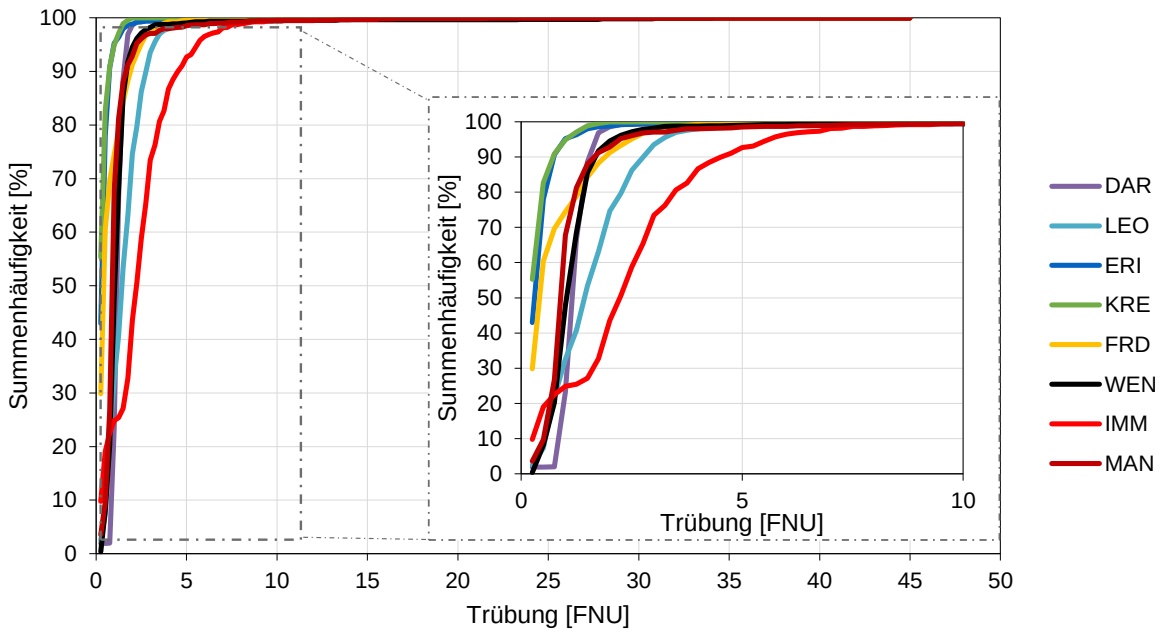


Abbildung 6-3: Trübung im Ablauf der acht betrachteten Kläranlagen, dargestellt als Summenlinienkurve für die Jahre 2019 bis 2021

Für zwei Kläranlagen sind zudem Trübungswerte im Ablauf der Nachklärung erfasst. Die Summenhäufigkeiten der Trübung sind für ein Ozon- und ein PAK-Verfahren (Ulmer Verfahren) für den Ablauf Nachklärung und Ablauf Klärwerk in Abbildung 6-4 dargestellt. Für beide Verfahren kann eine Reduktion der Feststoffe über die nachgeschaltete Stufe gezeigt werden. Zusätzlich zeigt sich, dass sich eine höhere Trübung im Zulauf der nachgeschalteten Stufe auch den Ablauf der nachgeschalteten Stufe tendenziell beeinflussen kann. Um dies genauer zu untersuchen, wurde die Feststoffreduktion im Intensivmonitoring für alle acht Kläranlagen genauer betrachtet (siehe Kapitel 7.4). Dabei wurden neben der Trübung auch die AFS-Konzentrationen im Ablauf der Nachklärung (NKB) und im Ablauf der Kläranlage gemessen, um zusätzlich Aussagen zur AFS-Reduktion im nachgeschalteten Verfahren zu erlangen.

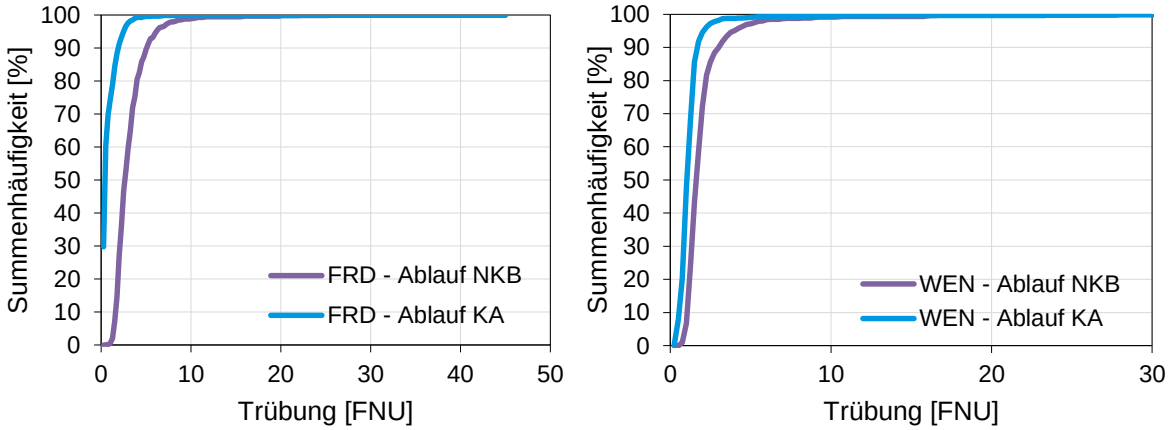


Abbildung 6-4: Reduktion der Trübung in der nachgeschalteten Stufe dargestellt als Summenlinienkurven des Ablaufs der Nachklärung und des Ablaufs der Kläranlage

6.4 Phosphorelimination

Die P_{ges}-Eliminationsleistungen der Jahre 2019, 2020 und 2021 sind in Tabelle 6-3 für die einzelnen Verfahrensschritte und untersuchten Kläranlagen gezeigt. In der biologischen Stufe findet in allen Klärwerken die größte Reduktion statt zwischen 61 und 98 % - je nach Anlage und Jahr. In der nachgeschalteten Verfahrenstechnik kommt es zu einer weiteren Reduktion zwischen 36 und 81 %. Die Gesamtreduktion kann dadurch weiter gesteigert werden. In IMM und DAR wurden im Laufe von 2021 bzw. Ende 2020 die GAK-Adsorber in Betrieb genommen. Mit nachgeschalteter Verfahrenstechnik lagen die Gesamteliminationsleistungen bei > 85 %. In vielen Anlagen wurden Eliminationsleistungen von bis zu 98 % erreicht.

Tabelle 6-3: P_{ges}-Elimination der betrachteten Kläranlagen (2019 bis 2021)

		Vorklärung [%][1]	**Biologische Reinigung [%][2]**	**Nachgeschaltete Verfahrenstechnik [%][3]**	**Gesamte Kläranlage [%][4]**
ERI	2019	11 (n=51)	91 (n=50)	k.a.	95 (n=179)
	2020	18 (n=52)	91 (n=51)	k.a.	98 (n=183)
	2021	12 (n=50)	87 (n=49)	k.a.	97 (n=177)
FRD	2019	14 (n=359)	88 (n=197)	64 (n=198)	96 (n=358)
	2020	19 (n=354)	k.a.	k.a.	97 (n=354)
	2021	17 (n=346)	90 (n=217)	70 (n=215)	97 (n=349)
IMM	2019	16 (n=92)	79 (n=92)	k.a.	82 (n=92)
	2020	20 (n=91)	82 (n=91)	k.a.	85 (n=91)
	2021	15 (n=91)	82 (n=63)	36 (n=64)	85 (n=91)
DAR	2019	12 (n=50)	98 (n=49)		98 (n=49)
	2020	9,5 (n=53)	97 (n=52)		97 (n=52)
	2021	9,3 (n=52)	98 (n=52)[5]		98 (n=52)
KRE	2019	-	92 (n=50)	72 (n=49)	98 (n=49)
	2020	-	95 (n=52)	63 (n=45)	99 (n=46)
	2021	-	90 (n=51)	81 (n=44)	98 (n=49)
MAN	2019	9 (n=350)	97 (n=346)	59 (n=353)	99 (n=354)
	2020	9 (n=361)	97 (n=357)	49 (n=344)	99 (n=360)
	2021	15 (n=350)	94 (n=349)	54 (n=313)	98 (n=356)
WEN	2019	21 (n=54)	61 (n=14)	46 (n=49)	89 (n=49)
	2020	18 (n=53)	82 (n=23)	61 (n=45)	95 (n=46)
	2021	18 (n=56)	79 (n=28)	66 (n=44)	93 (n=49)
LEO	2019	22 (n=40)	93 (n=51)		94 (n=53)
	2020	15 (n=50)	93 (n=55)		94 (n=54)
	2021	10 (n=53)	94 (n=54)		95 (n=54)

[1] Zulauf Kläranlage zu Ablauf Vorklärung; [2] Ablauf Kläranlage bis Ablauf Nachklärung; [3] Ablauf Nachklärung bis Ablauf Kläranlage; [4] Zulauf Kläranlage bis Ablauf Kläranlage; [5] Inkl. GAK-Adsorber

In fünf Kläranlagen (je 2 Ozon- und 3 PAK-Anlagen) wurden die P_{ges}-Konzentrationen auch im Ablauf der Nachklärung gemessen. Diese Daten sind als Summenhäufigkeiten mit dem Ablauf der Kläranlage zusammen in Abbildung 6-5 dargestellt. Für alle Verfahren zeigt sich eine deutliche, gleichmäßige weitere Reduktion des P_{ges} in den nachgeschalteten Verfahren (Stufe zur gezielten Spurenstoffelimination und Filterstufe). Synergieeffekte der P-Elimination mit der Spurenstoffelimination können also verfahrensunabhängig erreicht werden. Tendenziell sind für die Vollstromanlagen (ERI, KRE und FRD) und der Teilstromanlage (MAN), die jeweils über einen Raumfilter verfügen, niedrigere Ablaufwerte erkennbar als für die Kläranlage KRE (Teilstrombehandlung und Flächenfilter).

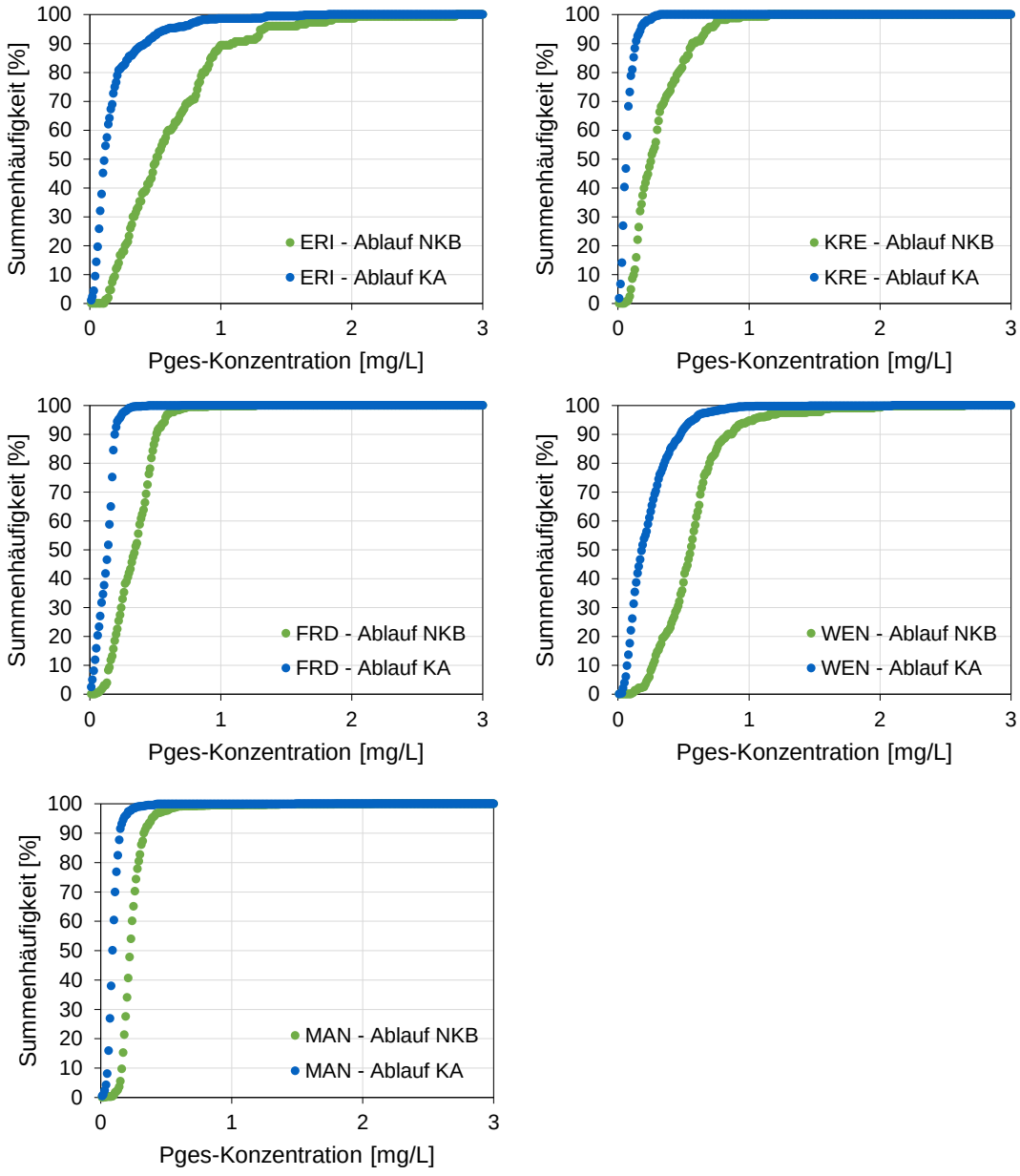


Abbildung 6-5: Reduktion der P_{ges}-Konzentration in der nachgeschalteten Stufe dargestellt als Summenlinienkurven (2019 bis 2021) des Ablaufs der Nachklärung und des Ablaufs der Kläranlage für vier ausgewählte Kläranlagen

Für die Reduktion von P_{ges} sind nicht allein die Eliminationsleistungen relevant, sondern vor allem das Einhalten der in Tabelle 4-2 aufgeführten Überwachungs- und Zielwerte. Die Zielwerte der Eigenkontrolle liegen je nach Verfahren und Prozess bei 0,2 bis 0,5 mg/L P_{ges}. Dabei beziehen sich die genannten Zielwerte auf die Klärprozesse ab Inbetriebnahme der nachgeschalteten Verfahren und sind daher so nicht geltend für die Anlagen, bei denen eine Inbetriebnahme erst im Zeitraum der Datenbetrachtung stattgefunden hat (z.B. IMM im Jahr 2021). In Tabelle 6-4 sind die mittleren P_{ges}-Konzentrationen der einzelnen Verfahrensschritten gezeigt. Für alle Kläranlagen wurden die jeweiligen Zielwerte mit nachgeschaltetem Verfahren eingehalten oder sogar deutlich unterschritten. P_{ges}-Konzentrationen im Ablauf der Nachklärung und im Ablauf der Kläranlage in Abhängigkeit der normierten, behandelten Abwassermenge sind in Anhang 10.2 dargestellt.

Die Betriebsdaten zeigen, dass im Rahmen der Betriebsüberwachung viele Daten zur P-Elimination erhoben werden. Die Probenahmestellen unterscheiden sich aber zwischen den Kläranlagen, sodass nicht für alle Anlage die P-Elimination für die einzelnen Prozessschritte betrachtet werden können. Darüber hinaus können keine Aussagen über die P-Fraktionierung getroffen werden. Beide Aspekte wurden bei der Zusammenstellung des Intensivmonitorings berücksichtigt und integriert.

Tabelle 6-4: P_{ges} -Konzentrationen der betrachteten Kläranlagen (Jahresmittelwerte in 2019 bis 2021)

		P_{ges} Zulauf KA [mg/L]	**P_{ges} Ablauf NKB [mg/L]**	**P_{ges} Ablauf KA [mg/L]**
ERI	2019	8,6	0,63	0,29
	2020	9,2	0,54	0,12
	2021	7,9	0,69	0,15
FRD	2019	5,5	0,42	0,16
	2020	5,8	0,21	0,15
	2021	4,9	0,29	0,09
IMM	2019	4,2	k.a.	0,63
	2020	5,6	k.a.	0,66
	2021	3,7	0,45[1]	0,39[1]
DAR	2019	k.a.	k.a.	0,10
	2020	k.a.	k.a.	0,16
	2021	k.a.	k.a.	0,12
KRE	2019	k.a.	0,33	0,10
	2020	k.a.	0,25	0,08
	2021	k.a.	0,35	0,05
MAN	2019	14,3	0,27	0,10
	2020	10,3	0,25	0,11
	2021	10,3	0,40	0,10
WEN	2019	4,7	0,63	0,25
	2020	5,6	0,62	0,21
	2021	5,6	0,54	0,22
LEO	2019	6,2	k.a.	0,33
	2020	6,1	k.a.	0,29
	2021	5,6	k.a.	0,26

[1] Inbetriebnahme des GAK-Adsorbers in 2021

6.5 Überleitung zum Intensivmonitoring

Insgesamt zeigt die Auswertung der Betriebsdaten, dass bereits viele Daten in der Betriebsüberwachung erhoben werden. Dennoch zeigen sich Datenlücken, die den Vergleich der Kläranlagen bezüglich der P-Elimination und der CSB-(Rest)Elimination in den einzelnen Verfahrensschritten und unterschiedlichen Verfahren der gezielten Spurenstoffelimination einschränken. Darüber hinaus können keine Aussagen zu den P- und den CSB-Fraktionen getroffen werden. Auch bedarf es mehr Daten, um den Feststoffrückhalt in der nachgeschalteten Stufe zu beurteilen. Diese Aspekte bilden die Grundlage des 14-tägigen Intensivmonitorings. Die Ergebnisse des Intensivmonitorings werden nachfolgend in Kapitel 7 aufgeführt und diskutiert.

7. Ergebnisse des 2 Wochen-Intensivmonitorings

7.1 Spurenstoffe

Die im Intensivmonitoring gemessenen Spurenstoffeliminationen in der mechanisch-biologischen Stufe, in der Stufe zur gezielten Spurenstoffelimination und in der Filterstufe sind in Abbildung 7-1, Abbildung 7-2 und Abbildung 7-3 dargestellt. Es sind die Mittelwerte der Eliminationsleistungen für Carbamazepin, Diclofenac, Metoprolol, Hydrochlorothiazid, Irbesartan, Benzotriazol und Tolytriazol gezeigt. Die Probenahmen umfassen sowohl Regen- als auch Trockenwettertage, sodass nicht für alle Messwerte die Anforderungen aus der KomS Handlungsempfehlung greifen (KOMS, 2020b). In der mechanisch-biologischen Stufe wurde im Mittel aller betrachteten Klärwerke eine Elimination von 34 % erreicht, was in einem erwartbaren Rahmen liegt (GÖTZ et al., 2015). Die höchste Elimination wurde in LEO erzielt, wo PAK in die Belebung dosiert wird und damit die biologische Stufe der Hauptwirkraum der gezielten Spurenstoffelimination ist. Die Eliminationsleistung variiert je nach Spurenstoff und Kläranlage und wird auch durch einzugsgebietsspezifische Randbedingungen, wie Fremd- und Regenwasseranteil mit beeinflusst. Die Korrelation der biologischen Spurenstoffelimination von der normierten Zulaufmenge ist in 10.3 dargestellt. Auch jahreszeitliche Schwankungen in der biologischen Spurenstoffelimination können nicht ausgeschlossen werden. Die Probenahmen des Intensivmonitorings wurden nicht zur exakt gleichen Zeit durchgeführt. Da hier Vergleichsdaten zu anderen Jahreszeiten jedoch fehlen, können keine genauen Aussagen hierzu getroffen werden.

Der Hauptteil der Elimination erfolgt in der Stufe zur gezielten Spurenstoffelimination mit einem Mittelwert aller Klärwerke für diese Stufe von 73 % (für die gemessenen Spurenstoffe). Diese Stufe entspricht bei der Ozonung, der Anwendung von GAK und der Anwendung von PAK (Ulmer Verfahren) dem Hauptwirkraum der Spurenstoffelimination. In der Filtrationsstufe wurde im Mittel eine weitere Elimination von 10 % erreicht, die aufgrund der Analyse aus der filtrierten Probe nicht auf einen Partikelrückhalt zurückgeführt werden kann. Die höchste Elimination in der Filterstufe von 30 % wurde in FRD erzielt. Hier liegt vermutlich eine spezielle Biozönose im Filter vor. Außerdem wird der nachgeschalteten Raumfilter in FRD weniger häufig gespült (siehe Tabelle 4-4), sodass es zu einer weiteren biologischen Reduktion von Spurenstoffen nach der Ozonung kommen kann. Erkennbar ist insgesamt deutlich, dass die Filtrationsverfahren im Rahmen der Verfahrenstechniken zur gezielten Spurenstoffreduktion vornehmlich dem PAK-Rückhalt, der biologischen Nachbehandlung (Ozonung), oder dem Schutz des nachgeschalteten GAK-Adsorbers dienen und selbst keinen großen Einfluss auf die Spurenstoffelimination haben.

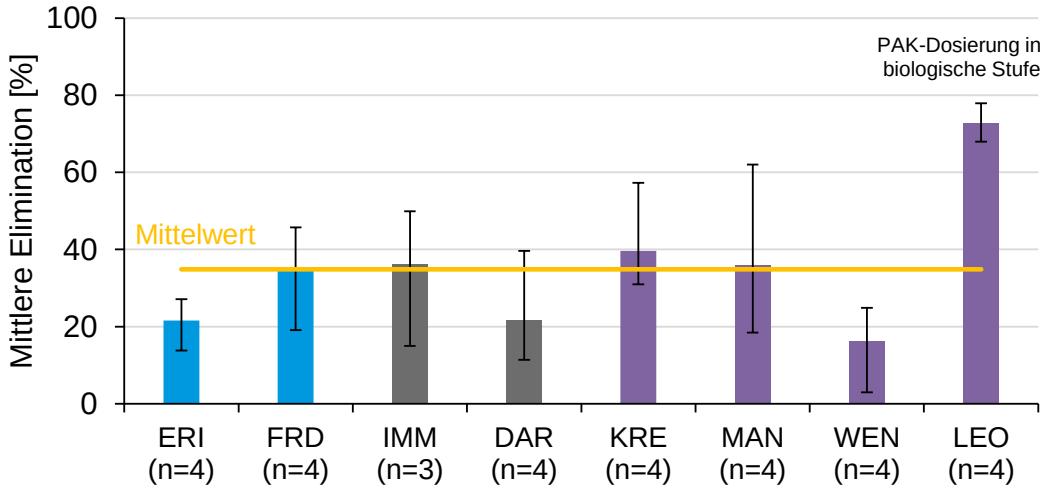


Abbildung 7-1: Mittlere Elimination in der mechanisch-biologischen Stufe der acht untersuchten Klärwerke im Vergleich

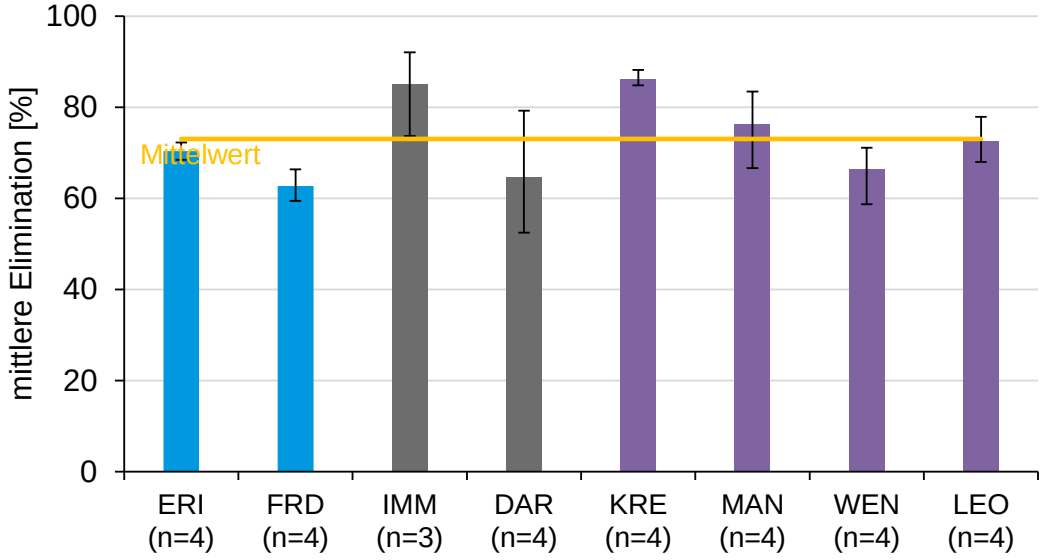


Abbildung 7-2: Mittlere Elimination in der Stufe zur gezielten Spurenstoffelimination der acht untersuchten Klärwerke im Vergleich

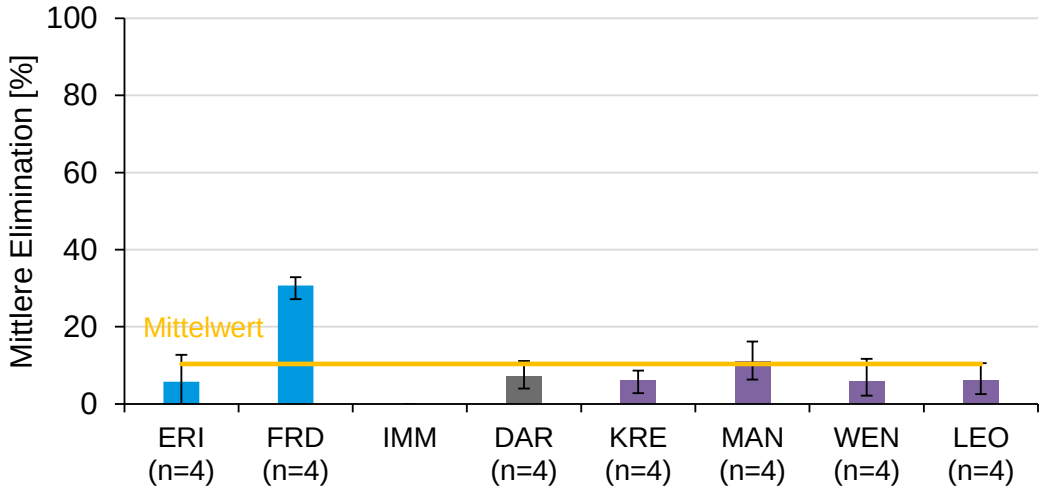


Abbildung 7-3: Mittlere Elimination in der Filtrationsstufe der untersuchten Klärwerke im Vergleich

Die Messung von Spurenstoffen ist aufwändig, kostenintensiv und nicht kontinuierlich möglich. Um die Funktionalität der Spurenstoffelimination auf Kläranlagen zu überwachen, werden deshalb Surrogatparameter eingesetzt. Zur Überwachung der Spurenstoffelimination kann die prozentuale Abnahme des spektralen Absorptionskoeffizienten bei 254 nm (SAK_{254}) herangezogen werden (DWA, 2019; WUNDERLIN et al., 2019). In Abbildung 7-4 ist die Spurenstoffelimination in der nachgeschalteten Stufe (Spurenstoffelimination + Filtration) mit der Verringerung des SAK_{254} korreliert. Für alle Anlagen zeigt sich unabhängig von der Verfahrensweise der Zusammenhang beider Parameter. Dabei lässt sich aber keine einheitliche Korrelation über alle Anlagen festhalten, sondern eine individuelle Betrachtung je Anlage ist nötig.

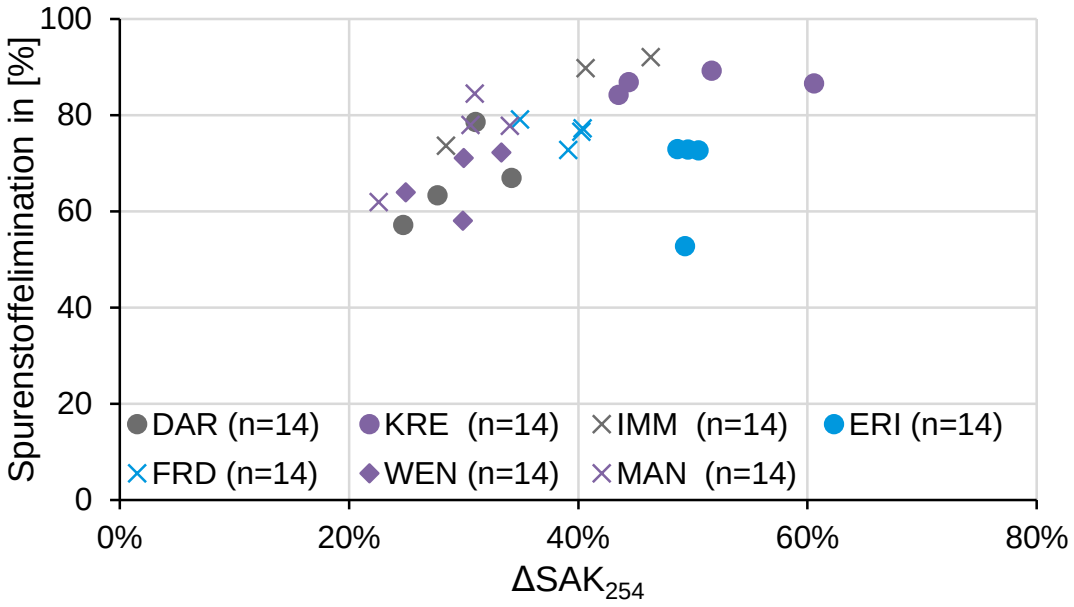


Abbildung 7-4: Zusammenhang zwischen Spurenstoffelimination und Verringerung des SAK_{254} in der Nachgeschalteten Stufe (Abl. NKB bis Abl. KA)

7.2 Phosphor

7.2.1 Übersicht

Im Rahmen des Intensivmonitorings wurden neben P_{ges} und PO_4-P auch die weiteren P-Fraktionen, wie in Abbildung 2-1 gezeigt, gemessen bzw. berechnet. Ziel ist es ein besseres Verständnis über die die Verteilung der P-Fraktionen und deren Eliminationsprozesse zu erhalten, wie in Kapitel 6.5 beschrieben.

Ein Überblick der Mittelwerte, Standardabweichung und Anzahl Proben ist für alle acht untersuchten Anlagen in Tabelle 7-1 dargestellt. Dabei wurden je nach Kläranlagen alle oder ein Teil der Fraktionen im Zulauf des Vorklärbeckens und Biologie gemessen. Für den Ablauf Nachklärung, Zulauf Filter und Ablauf Kläranlagen wurden alle Fraktionen bestimmt, so diese Probenahmestelle für das jeweilige Verfahren gegeben waren.

Tabelle 7-1: Mittelwert (MW), Standardabweichung (SD) und Anzahl Proben für die P-Fraktionen P_{ges}, $P_{partikulär}$, $P_{gelöst}$, PO_4-P, und P_{org} während des 2 Wochen Monitorings

		Zul. VKB			Zul. Bio			Abl. NKB			Zul. Filter			Abl. KA		
		MW [mg/l]	SD [mg/L]	n [-]	MW [mg/l]	SD [mg/L]	n [-]	MW [mg/l]	SD [mg/L]	n [-]	MW [mg/l]	SD [mg/L]	n [-]	MW [mg/l]	SD [mg/L]	n [-]
ERI	P_{ges}	10	2,6	11	11	2,8	11	0,27	0,08	11	0,25	0,08	10	0,09	0,03	11
	PO_4-P[1]	5,8	3,0	5	6,4	2,2	5	0,16	0,08	11	0,16	0,06	10	0,08	0,03	9
	$P_{gelöst}$	-	-	-	-	-	-	0,23	0,09	11	0,23	0,08	10	0,08	0,03	11
	$P_{partikulär}$	-	-	-	-	-	-	0,04	0,05	11	0,02	0,11	10	0,01	0,01	11
	$P_{org.}$	-	-	-	-	-	-	0,07	0,02	11	0,07	0,03	10	0,01	0,03	9
FRD	P_{ges}	4,7	1,7	14	3,6	1,3	14	0,28	0,06	14	0,28	0,07	14	0,11	0,02	14
	PO_4-P	2,3	0,86	14	2,1	0,83	14	0,17	0,03	14	0,17	0,03	14	0,09	0,02	14
	$P_{gelöst}$	-	-	-	-	-	-	0,21	0,04	14	0,21	0,04	14	0,11	0,02	14
	$P_{partikulär}$	-	-	-	-	-	-	0,08	0,03	14	0,08	0,04	14	0,01	0,01	14
	$P_{org.}$	-	-	-	-	-	-	0,04	0,01	14	0,03	0,01	14	0,02	0,01	14
IMM	P_{ges}	3,3	1,8	14	2,7	1,2	14	0,43	0,20	14	-	-	-	0,22	0,05	14
	PO_4-P	1,5	0,82	14	1,4	0,83	14	0,19	0,04	14	-	-	-	0,20	0,03	14
	$P_{gelöst}$	1,6	1,0	14	1,6	0,95	14	0,30	0,14	14	-	-	-	0,21	0,04	14
	$P_{part.}$	1,7	0,94	14	1,2	0,42	14	0,13	0,08	14	-	-	-	0,01	0,02	14
	$P_{org.}$	0,08	0,26	14	0,14	0,38	14	0,11	0,11	14	-	-	-	0,02	0,01	14
DAR	P_{ges}	8,4	3,0	14	6,9	2,1	14	0,14	0,05	14	0,08	0,02	14	0,15	0,18	14
	PO_4-P	4,4	1,7	14	4,5	1,6	14	0,04	0,02	14	0,02	0,01	14	0,03	0,01	14
	$P_{gelöst}$	4,1	1,4	14	4,5	1,6	14	0,07	0,02	14	0,06	0,01	14	0,07	0,01	14
	$P_{partikulär}$	4,3	1,7	14	2,4	0,59	14	0,07	0,04	14	0,01	0,01	14	0,07	0,18	14
	$P_{org.}$	- 0,25	0,58	14	0,01	0,38	14	0,04	0,02	14	0,04	0,01	14	0,04	0,01	14

		Zul. VKB			Zul. Bio			Abl. NKB			Zul. Filter			Abl. KA		
		MW [mg/l]	SD [mg/L]	n [-]	MW [mg/l]	SD [mg/L]	n [-]	MW [mg/l]	SD [mg/L]	n [-]	MW [mg/l]	SD [mg/L]	n [-]	MW [mg/l]	SD [mg/L]	n [-]
KRE	P_{ges}	5,3	1,1	14	3,9	0,68	14	1,5	0,15	14	0,33	0,09	14	0,06	0,03	14
	PO_4-P	2,2	0,47	14	2,1	0,44	14	0,78	0,10	14	0,16	0,05	14	0,04	0,03	14
	$P_{gelöst}$	-	-	-	-	-	-	0,81	0,10	14	0,18	0,06	14	0,06	0,03	14
	$P_{part.}$	-	-	-	-	-	-	0,68	0,09	14	0,15	0,04	14	0,01	0,01	14
	$P_{org.}$	-	-	-	-	-	-	0,03	0,01	14	0,02	0,01	14	0,01	0,01	14
MAN	P_{ges}	10	3,8	14	8,2	3,1	14	0,36	0,07	14	0,31	0,09	14	0,15	0,04	14
	PO_4-P	5,4	2,3	14	5,4	2,4	14	0,07	0,03	14	0,06	0,02	14	0,05	0,03	14
	$P_{gelöst}$	5,1	2,1	14	4,9	2,2	14	0,17	0,06	14	0,15	0,05	14	0,12	0,03	14
	$P_{part.}$	5,1	2,1	14	3,2	1,0	14	0,19	0,09	14	0,16	0,10	14	0,04	0,03	14
	$P_{org.}$	- 0,35	0,21	14	-0,43	0,28	14	0,10	0,04	14	0,09	0,04	14	0,06	0,02	14
WEN	P_{ges}	5,8	1,2	14	5,4	0,71	14	0,47	0,19	14	0,20	0,07	14	0,15	0,04	14
	PO_4-P	2,6	0,48	14	3,2	0,65	14	0,32	0,18	14	0,08	0,04	14	0,07	0,03	14
	$P_{gelöst}$	3,0	0,48	14	3,6	0,69	14	0,40	0,19	14	0,13	0,06	14	0,12	0,03	14
	$P_{part.}$	2,8	1,1	14	1,8	0,56	14	0,07	0,04	14	0,07	0,06	14	0,03	0,03	14
	$P_{org.}$	0,40	0,09	14	0,46	0,14	14	0,08	0,01	14	0,05	0,02	14	0,05	0,01	14
LEO	P_{ges}	6,8	2,0	12	-	-	-	0,19	0,04	12	-	-	-	0,19	0,04	12
	PO_4-P	3,1	0,67	12	-	-	-	0,08	0,03	12	-	-	-	0,12	0,03	12
	$P_{gelöst}$	3,4	0,79	12	-	-	-	0,14	0,04	12	-	-	-	0,16	0,04	12
	$P_{part.}$	3,3	1,5	12	-	-	-	0,05	0,04	12	-	-	-	0,03	0,03	12
	$P_{org.}$	0,33	0,31	12	-	-	-	0,07	0,03	12	-	-	-	0,03	0,03	12

[1] Messungen wurden in Zweitlabor wiederholt, da die ursprünglichen Werte nicht passten. Daher wurden diese Messungen an einem anderen Tag durchgeführt als die Messung von P_{ges} und $P_{gelöst}$; diese Daten fließen auch in die nachfolgenden Grafiken ein

7.2.2 P-Elimination für Gesamtanlage

Die Probenahmen des Intensivmonitorings haben im Realbetrieb unter Einhaltung der jeweiligen (unterschiedlichen) behördlichen Vorgaben stattgefunden. Die Eliminationsleistungen entsprechen daher den Realbetrieb-Bedingungen und nicht der maximal möglichen Leistung des Prozesses.

Die gemessenen P_{ges}-Konzentrationen im Intensivmonitoring im Zulauf der Kläranlagen sind als Summenhäufigkeiten in Abbildung 7-5 dargestellt. Die Zulaufkonzentrationen unterscheiden sich für die jeweilige Kläranlagen. Die höchsten Zulaufkonzentrationen wurde für ERI, MAN und DAR gemessen, die geringsten für IMM. In Abbildung 7-6 sind die Summenhäufigkeiten für die P_{ges}-Konzentrationen im Ablauf Nachklärbecken (gefüllte Symbole) und Ablauf Kläranlage (ungefüllte Symbole) gezeigt. Eine alternative Darstellung findet sich im Anhang in 10.4. Für alle Kläranlagen findet die Hauptreduktion des P_{ges} durch Simultanfällung in der Biologie statt. Je nach Dosierungskonzept (bzw. Automatisierung) können so bereits im Ablauf der Nachklärung niedrige P_{ges}-Konzentrationen erreicht werden.

Für die beiden Kläranlagen mit Ozonung liegen die Konzentrationen so bereits im Ablauf der Nachklärung < 0,4 mg/L und werden in der nachgeschalteten Stufe auf < 0,2 mg/L P_{ges} reduziert. Bei den Verfahren mit GAK-Adsorber liegen die Werte von IMM höher als bei DAR. In DAR werden mit der Kombination aus chemischer P-Fällung und Bio-P während des Intensivmonitorings stabil niedrige Konzentrationen von um die 0,2 mg/L P_{ges} im Ablauf Nachklärung erreicht. In Sandfilter und GAK-Adsorber wird P_{ges} dann weiter auf Konzentrationen < 0,2 mg/L reduziert. In IMM wird P_{ges} durch chemische Simultanfällung in der Biologie reduziert. Durch den nachgeschalteten GAK-Absorber kann der Zielwert von < 0,3 mg/L P_{ges} erreicht werden. In den PAK-Verfahren kann in allen Verfahrensfahrweisen eine P_{ges}-Konzentration von < 0,2 mg/L im Ablauf der Kläranlage erreicht werden. In LEO mit simultaner PAK-Dosierung in die Biologie ist die Konzentrationen im Ablauf des Nachklärbecken (ANK) bereits am geringsten. WEN und MAN reduzieren einen großen Anteil des P_{ges} durch Simultanfällung, lasten diese aber nicht komplett aus, sondern nutzen den Synergieeffekt des P-Elimination in der nachgeschalteten PAK-Stufe. Bei KRE liegt die P_{ges}-Konzentration im Ablauf Nachklärbecken dagegen am höchsten und ein Großteil der P-Elimination findet in der nachgeschalteten Stufe statt. Diese Verfahrensfahrweise wurde bewusst in KRE gewählt und führt ebenfalls zu einer weitestgehenden P-Elimination.

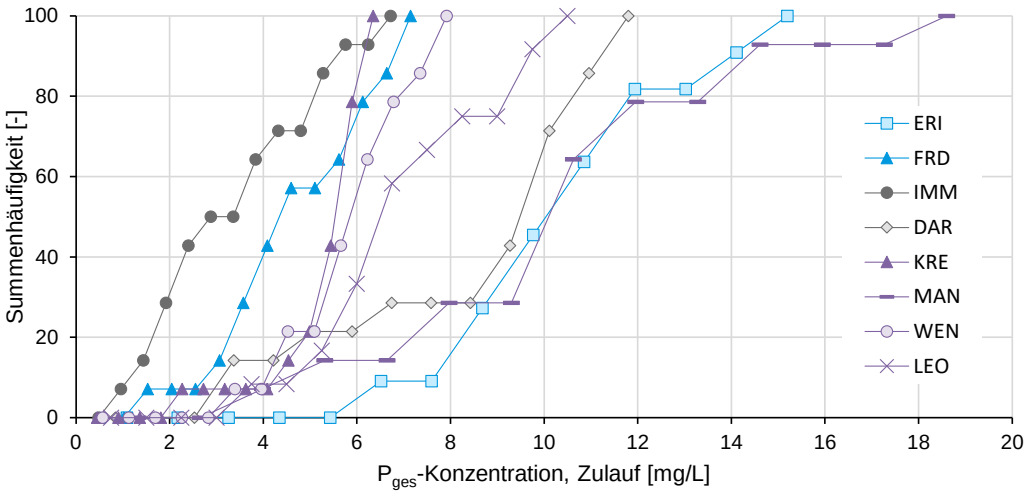
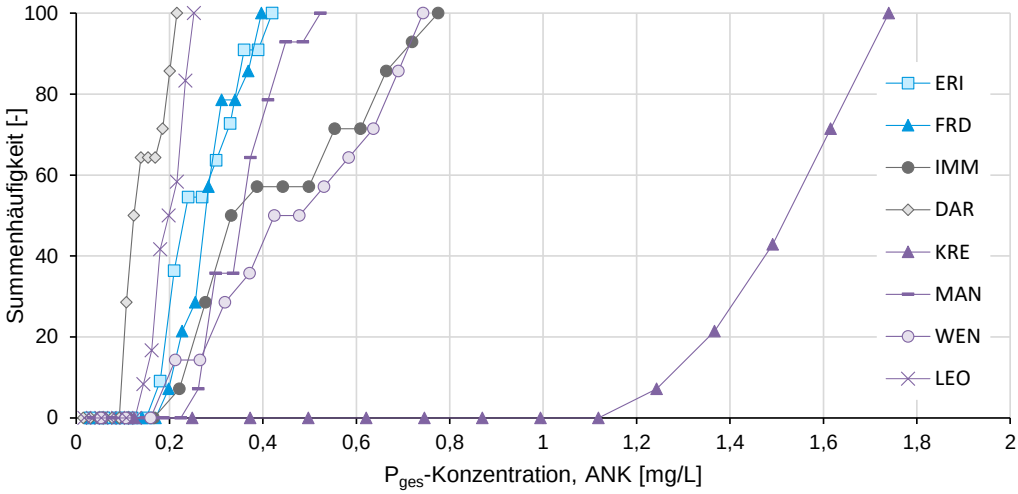


Abbildung 7-5: Summenkurven der P_{ges}-Konzentration im Zulauf der Kläranlagen



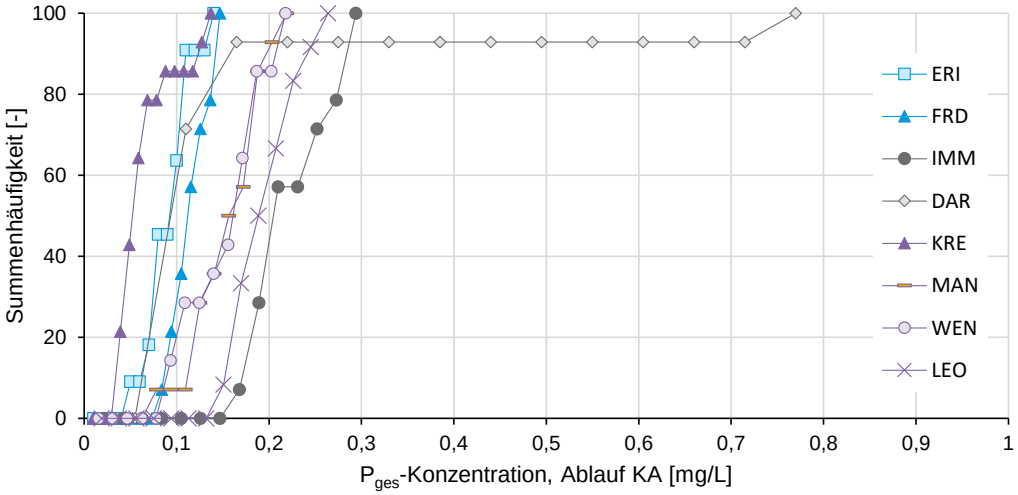


Abbildung 7-6: Summenkurven der P_{ges}-Konzentration im Zulauf der nachgeschalteten Stufe (gefüllte Symbole) und im Ablauf der Kläranlage/nachgeschalteten Stufe (ungefüllte Symbole)

Die Eliminationsleistungen der einzelnen Verfahrensstufen sind im Vergleich für die acht Klärwerke in Abbildung 7-7 gezeigt. In allen Kläranlagen findet die P_{ges}-Elimination, wie bereits beschrieben, überwiegend in der mechanisch-biologischen Stufe statt (> 70 %). In den beiden Ozon-Anlagen ERI und FRD (blau) kommt es zu einer weiteren Reduktion in der Filtrationsstufe, dagegen zeigt die Stufe der gezielten Spurenstoffelimination keinen entscheidenden Anteil. Bei den GAK-Verfahren (grau) kommt es durch die gezielte Stufe der Spurenstoffelimination zu einer weiteren Reduktion. In den Verfahren mit nachgeschalteter PAK-Stufe (violett) kommt es je nach Klärwerk und Verfahrensführung (Dosierungsstrategie, Automatisierungskonzept) zu einer weiteren Reduktion von P_{ges} sowohl in der Stufe zur gezielten Spurenstoffelimination als auch in der Filterstufe. In KRE ist ein Teil der P_{ges} Reduktion auf die Stufe der gezielten Spurenstoffelimination verlagert. In LEO findet die P_{ges} Elimination fast ausschließlich in der mechanisch-biologischen Stufe statt.

Alle Verfahrensvarianten führen zu einer weitestgehenden P_{ges}-Elimination von > 97 %. Mit allen Verfahrensvarianten können somit Synergieeffekte zwischen weitestgehender P-Elimination und gezielter Spurenstoffelimination genutzt werden.

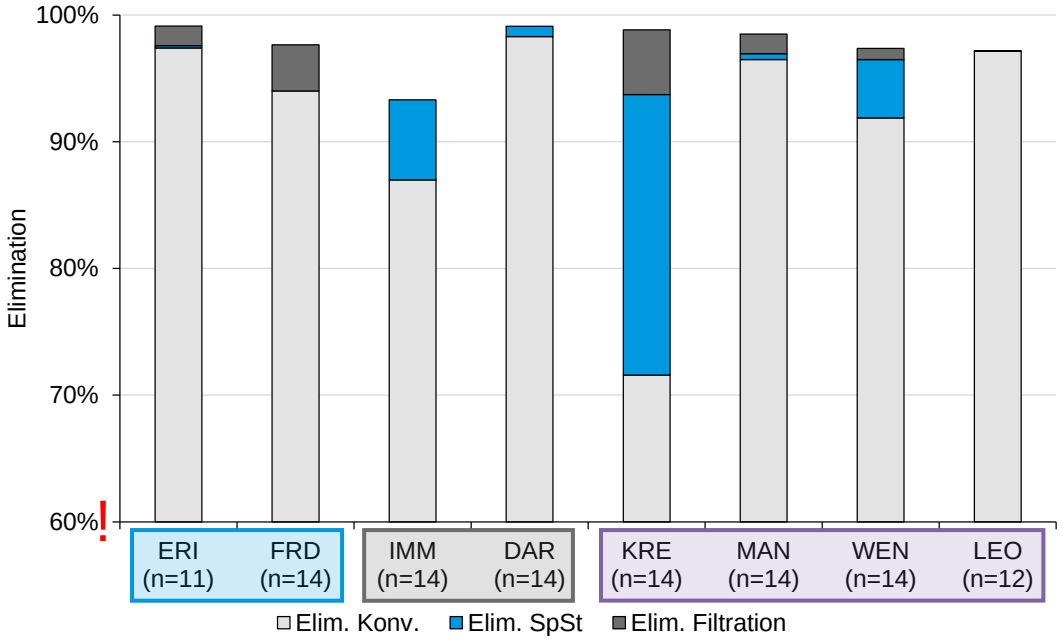


Abbildung 7-7: Prozentuale P_{ges}-Eliminationsanteile über die Verfahrensstufen der Kläranlagen

7.2.3 Phosphorfraktionen

Nach der Auswertung der P_{ges}-Eliminationsleistungen werden nachfolgend die einzelnen P-Fraktionen, wie in Kapitel 2 (Abbildung 2-1) beschrieben, betrachtet. Die gemessenen Konzentration für P_{ges} und die einzelnen P-Fraktionen P_{part} und $P_{gelöst}$, was sich wiederum in PO_4-P und P_{org} teilt, sind für den Ablauf des Nachklärbeckens (ANK), sowie Zulauf der Filtrationsverfahren und den Ablauf der Kläranlage in Abbildung 7-8, Abbildung 7-9, Abbildung 7-10, Abbildung 7-11 und Abbildung 7-12 gezeigt. Die Ergebnisse der einzelnen Kläranlagen unterscheiden sich etwas, wobei zu beachten ist, dass das Intensivmonitoring der Kläranlagen nicht zum gleichen Zeitpunkt durchgeführt wurde.

Wie in Kapitel 2 beschrieben, wird P_{part} in erster Linie durch Sedimentation und Filtrationsprozess aus dem Abwasser entfernt, während PO_4-P vor allem durch chemische Fällung aus dem Abwasser entnommen wird. Die Entnahme von PO_4-P durch gezielte Bio-P findet bei den betrachteten Kläranlagen nur nebensächlich statt und wird daher nicht weiter betrachtet. Der Anteil P_{org} bestimmt die minimale Ablaufkonzentration.

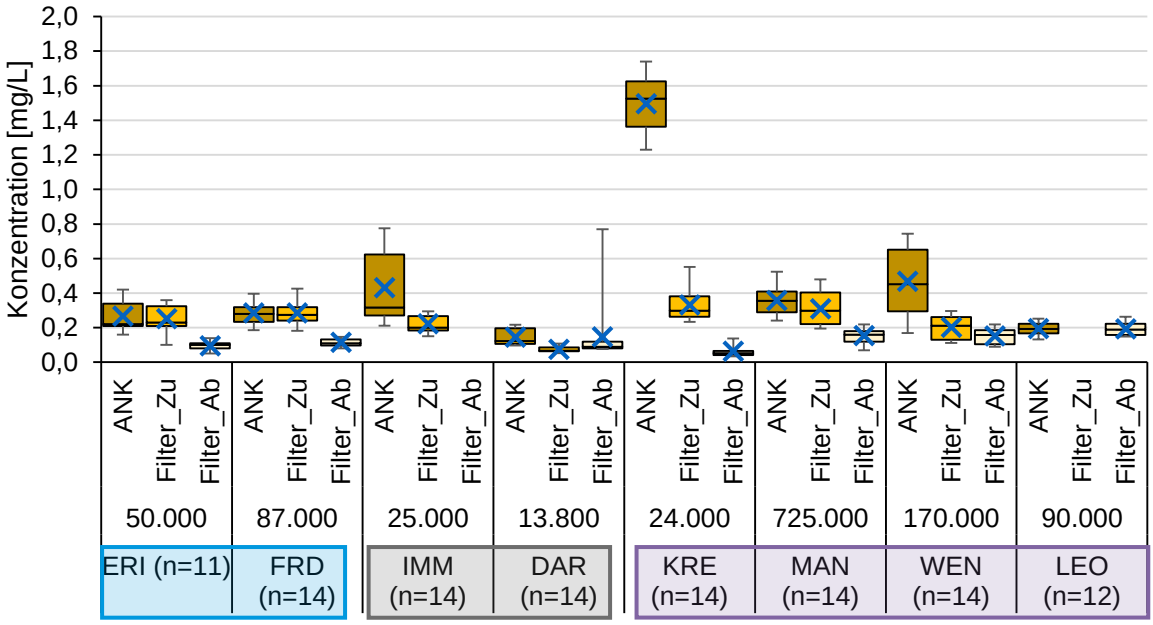


Abbildung 7-8: P_{ges}-Konzentrationen im Ablauf Nachklärung, Zulauf und Ablauf Filter für die acht Kläranlagen im Vergleich

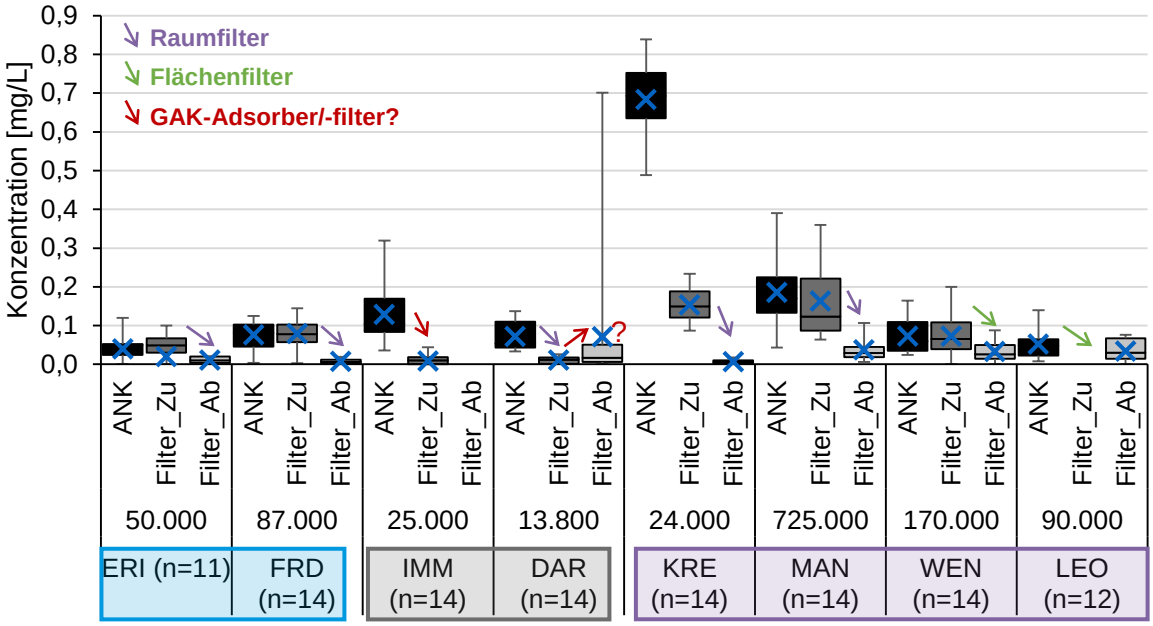


Abbildung 7-9: P_{Part}-Konzentrationen im Ablauf Nachklärung, Zulauf und Ablauf Filter für die acht Kläranlagen im Vergleich

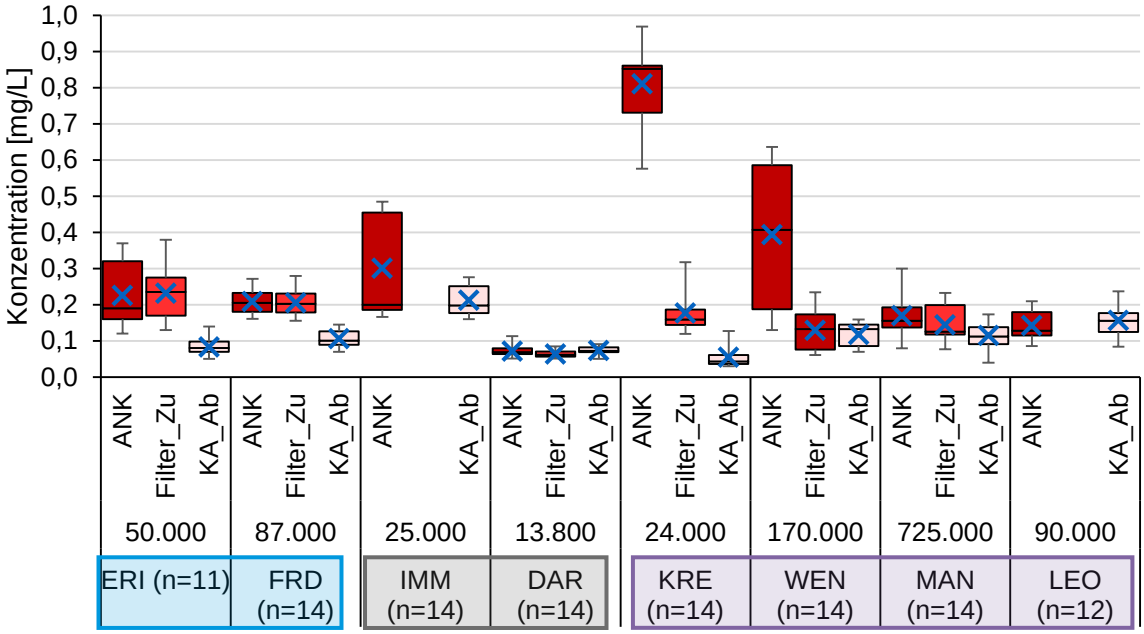


Abbildung 7-10: $P_{gelöst}$-Konzentration im Ablauf Nachklärung, Zulauf und Ablauf Filter für die acht Kläranlagen im Vergleich

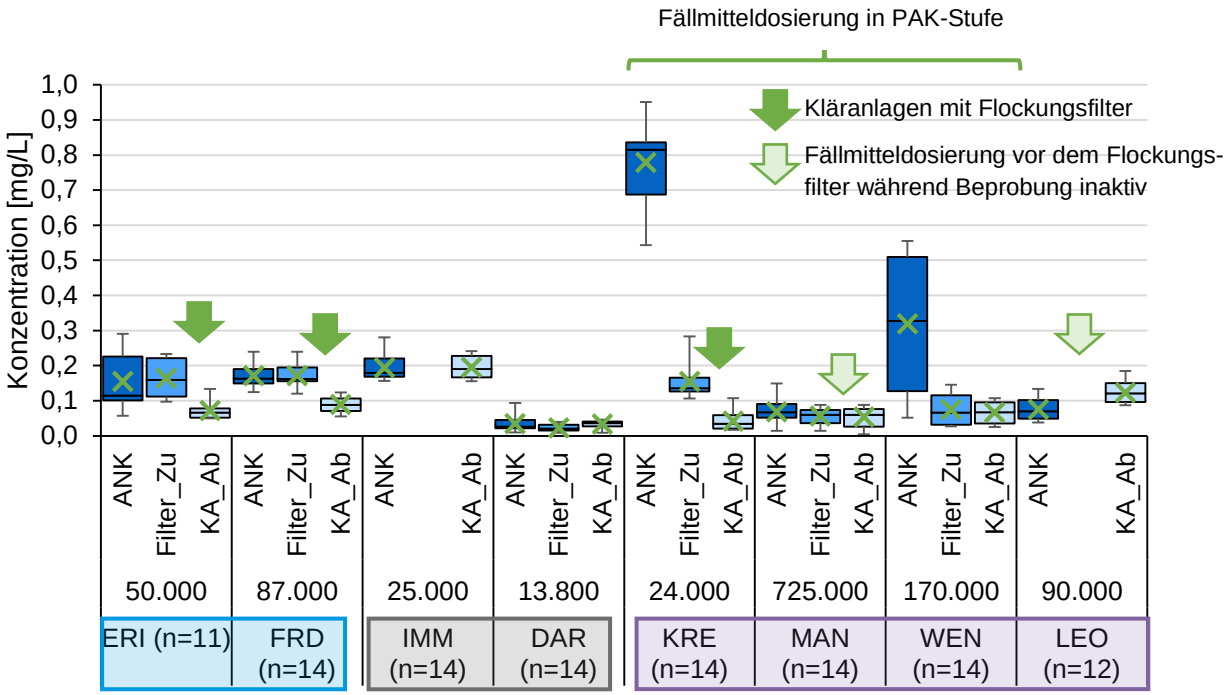


Abbildung 7-11: PO_4-P-Konzentrationen im Ablauf Nachklärung, Zulauf und Ablauf Filter für die acht Kläranlagen im Vergleich

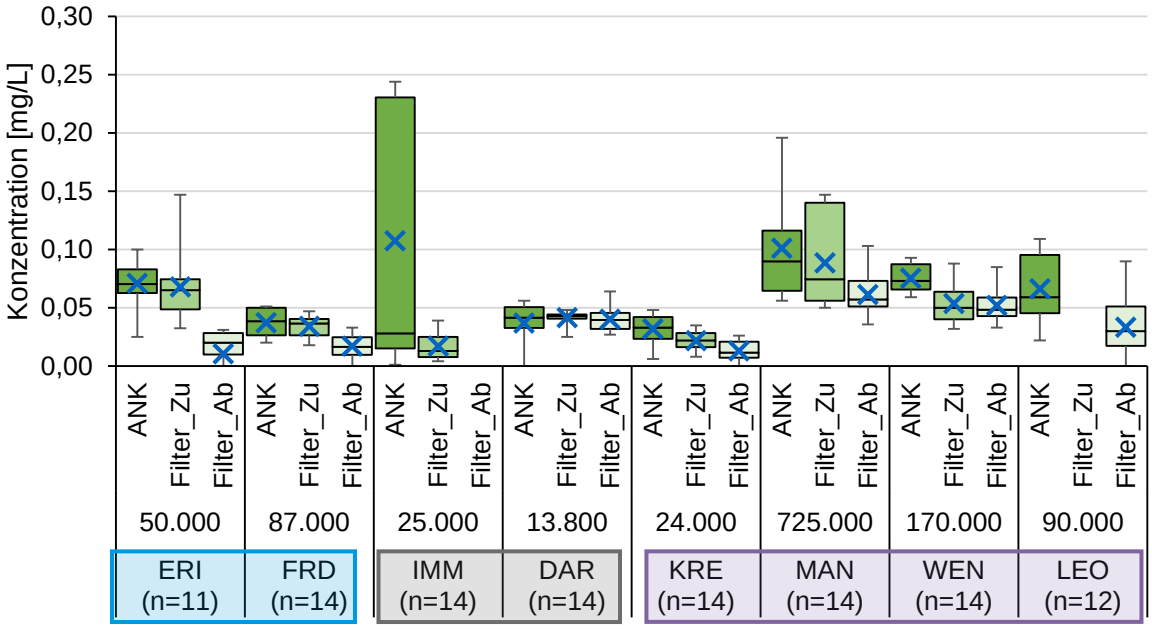


Abbildung 7-12: P_{Org}-Konzentrationen im Ablauf Nachklärung, Zulauf und Ablauf Filter für die acht Kläranlagen im Vergleich

Bei Betrachtung nach Technologien für die Stufe zur gezielten Spurenstoffelimination zeigen sich für die beiden Anlagen mit nachgeschalteter Ozonung (ERI und FRD) und Flockungsfilter mit kontinuierlicher Fällmitteldosierung vergleichbare P_{ges}-Konzentrationen. Die $P_{gelöst}$-, PO_4-P und P_{org}-Konzentrationen lagen in ERI während des Intensivmonitorings (etwas) höher als in FRD. P_{part} lag für ERI etwas geringer als bei FRD, was bei vergleichbarem P_{ges} einerseits durch die Abwassermatrix andererseits durch die Analytik per Differenzmethode zurückzuführen ist.

Bei den GAK-Adsorber-Verfahren liegen die Werte für IMM für alle Probenahmestellen etwas höher als für DAR, wobei der generelle Verlauf beider Kläranlagen vergleichbar ist. Lediglich die Konzentrationsspannweiter bei P_{org} liegt für IMM deutlich höher. Die Ursache ist hierfür unbekannt. In IMM erzielt der GAK-Adsorber eine weitestgehende Reduktion von P_{part}.

Die Ergebnisse der vier PAK-Verfahren unterscheiden sich etwas. Wie in 7.2.2 erläutert ist in KRE die P_{ges}-Elimination vermehrt auf die nachgeschalteten Stufen verlagert. Dies erklärt die durchgehend höheren Konzentrationen in KRE. Nur für P_{org} zeigt sich eine Ausnahme. Für KRE liegt P_{org} bereits im Ablauf Nachklärung niedriger als bei den anderen drei PAK-Verfahren, was auf die Abwasserzusammensetz oder ggfs. die Berechnung mittels Differenzmethode zurückgeführt werden kann. Bei den anderen zwei PAK-Verfahren (MAN und WEN) mit nachgeschalteter PAK-Stufe kommt es je nach Konzentration im Ablauf der Nachklärung zu einer weiteren Reduktion in der Stufe der gezielten Spurenstoffelimination und im nachgeschalteten Filter für alle analysierten P-Fraktionen. Durch die simultane PAK-Dosierung in der Belebung anstelle einer nachgeschalteten Stufe in LEO kommt es hier wie zu erwarten zu geringsten Änderungen der P-Fraktionen zwischen Ablauf der Nachklärung und Ablauf der Kläranlage.

Zusammenfassen lässt sich für die P-Fraktionen, dass sobald im nachgeschalteten Verfahren eine Fällmitteldosierung stattfindet z.B. in der Flockungsfiltration (ERI/FRD) oder in der PAK-

Stufe (KRE/MAN/WEN), eine weitere Reduktion des PO_4-P in den nachgestalteten Stufen erzielt werden.

P_{part} wird durch Differenzenmethode aus $P_{ges} – P_{gelöst}$ ermittelt. Der Verlauf der Ergebnisse ist daher basierend auf den Abbildung 7-8 und Abbildung 7-9 zu erwarten. Die Fraktion P_{part} wird vor allem durch den nachgeschalteten Filter weiter reduziert. Dabei wird durch alle Filtertechniken P_{part} auf < 0,1 mg/L oder deutlich geringer gesenkt. Die Verfahren mit nachgeschaltetem Raumfilter zeigen etwas geringere Konzentrationen als Verfahren mit Flächenfilter. Insgesamt wird eine weitestgehende Reduktion an P_{part} erreicht.

Die organische Phosphor P_{org} wird sowohl in der spezifischen Stufe zur Spurenstoffelimination als auch in der Filterstufe etwas reduziert. Hier zeigen sich leichte Unterschiede bei den acht untersuchten Kläranlagen. Die Mechanismen hinter der beobachteten Reduktion konnten nicht festgestellt werden.

Als Zusammenfassung sind die mittleren Konzentrationen der P-Fraktionen PO_4-P, P_{part} und P_{org} und P_{ges} aller acht Kläranlagen in Abbildung 7-13 gemeinsam dargestellt. Die Kläranlagen IMM, DAR, MAN und WEN betreiben die Spurenstoffelimination als Teilstromverfahren (Raumfilter in MAN im Vollstrom), während ERI, FRD, KRE und LEO im Vollstrom betrieben werden.

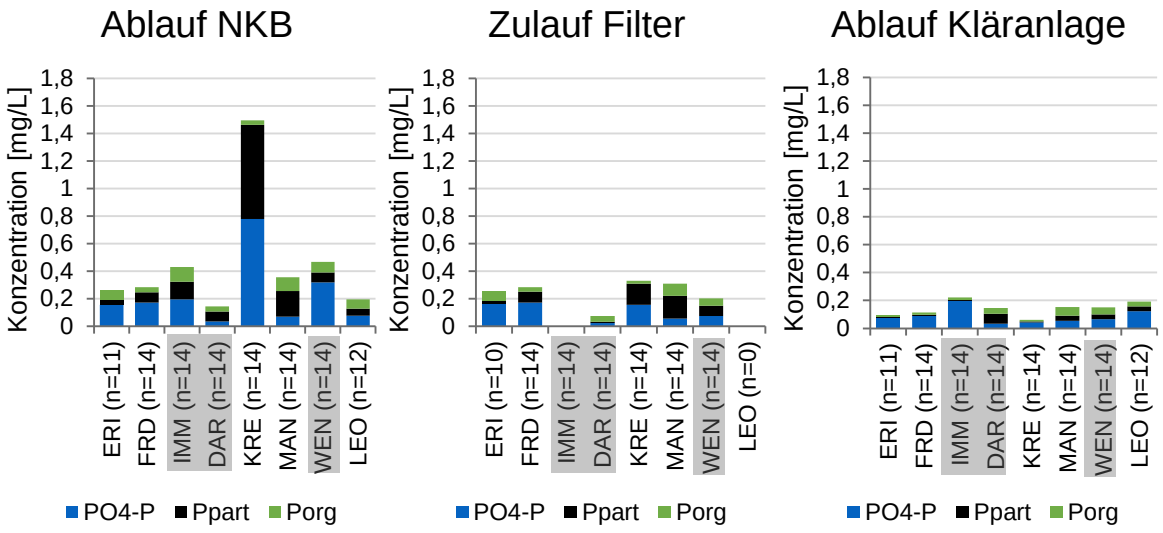


Abbildung 7-13: PO_4-P, P_{part} und P_{org} Konzentrationen mit dem Pges-Mittelwert im Ablauf der Nachklärung und Ablauf der Kläranlagen; graue Box = Teilstromverfahren

Mit der Ausnahme der Kläranlage KRE, bei der die P-Elimination in die nachgeschaltete PAK-Stufe mit Raumfiltration verschoben ist, zeigen sich im Ablauf der Nachklärbecken bereits niedrige P-Konzentrationen mit P_{ges} < 0,5 mg/L. Durch alle nachgeschalteten Verfahren lassen sich die P-Fraktionen weiter reduzieren, sodass hier der Synergieeffekt mit den Verfahren zur Spurenstoffelimination erkennbar ist. Eine Differenzierung der Eliminationsleistung nach Teil- und Vollstrom ist aufgrund der Datenlage nicht möglich.

7.3 Organische Summenparameter

7.3.1 Übersicht

Im Intensivmonitoring wurden sowohl die organischen Summenparameter CSB_{ges} und $CSB_{gelöst}$ als auch die Parameter gesamtorganischer Kohlenstoff (TOC) und gelöster organischer Kohlenstoff (DOC) gemessen. Tabelle 7-2 zeigt die Mittelwerte und Standardabweichungen der CSB-Messergebnisse aller acht untersuchten Kläranlagen im Zulauf der Vorklärung, Zulauf der biologischen Stufe, Ablauf der Nachklärung, Zulauf des Filters und Ablauf der Kläranlage. Die Ergebnisse der TOC und DOC Messungen sind nachfolgend in Tabelle 7-3 dargestellt.

Tabelle 7-2: Mittelwert (MW) und Standardabweichung (SD) des CSB_{ges} und $CSB_{gelöst}$ während des 2 Wochen Monitorings

		Zul. VKB		**Zul. Bio**		**Abl. NKB**		**Zul. Filter**		**Abl. KA**	
		[mg/L]		**[mg/L]**		**[mg/L]**		**[mg/L]**		**[mg/L]**	
		MW	**SD**	**MW**	**SD**	**MW**	**SD**	**MW**	**SD**	**MW**	**SD**
ERI (n=14)	CSB_{ges}	680	215	465	90,1	22,0	4,3	19,4	4,7	13,5	4,0
	$CSB_{gelöst}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FRD (n=14)	CSB_{ges}	347	130	189	63,1	18,0	3,0	16,9	3,1	12,2	2,1
	$CSB_{gelöst}$	100	43	85	34	18,6	4,3	18,0	4,4	14,8	3,8
DAR (n=14)	CSB_{ges}	753	314	401	99,1	24,9	2,3	20,8	2,5	18,2	3,9
	$CSB_{gelöst}$	212	67,9	196	65,5	24,1	1,9	21,1	2,0	17,7	3,1
IMM (n=14)	CSB_{ges}	189	90,1	122	54,5	11,4	2,1	-	-	7,4	2,0
	$CSB_{gelöst}$	42,6	34,3	49	46,5	9,1	2,0	-	-	6,5	1,9
KRE (n=14)	CSB_{ges}	341	85,8	180	27,2	31,2	4,8	10	3,9	7,9	3,2
	$CSB_{gelöst}$	108	25,3	7	11,5	14,3	3,0	8,7	3,2	7,3	2,4
MAN (n=14)	CSB_{ges}	783	289	628	224	29,8	3,5	24,8	3,8	18,3	4,5
	$CSB_{gelöst}$	276	120	287	142	22,2	4,2	16,6	3,2	15,9	4,0
WEN (n=14)	CSB_{ges}	413	78,6	276	68,5	24,5	3,8	19,7	5,1	18,9	2,9
	$CSB_{gelöst}$	90,0	16,9	105	26,8	21	3,4	15,7	4,6	16,7	2,7
LEO (n=12)	CSB_{ges}	420	113	-	-	21,5	1,8	-	-	18,1	1,9
	$CSB_{gelöst}$	102	29,5	-	-	19,8	2,0	-	-	16,4	1,8

Tabelle 7-3: Mittelwert (MW) und Standardabweichung (SD) des DOC und TOC während des 2 Wochen Monitorings (n = 14)

		Zul. VKB		Zul. Bio		Abl. NKB		Zul. Filter		Abl. KA	
		[mg/L]		[mg/L]		[mg/L]		[mg/L]		[mg/L]	
		MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD
ERI	TOC	-	-	112	51,6	8,6	1,6	8,1	0,9	6,4	1,1
	DOC	-	-	43,9	20,9	7,9	1,0	7,4	0,7	6,0	0,9
FRD	TOC	-	-	32,7	12,5	6,7	1,3	6,1	1,1	4,6	0,9
	DOC	-	-	18,9	7,2	5,7	1,2	5,2	1,0	4,4	0,9
DAR	TOC	148	73,5	75,3	27,4	9,4	1,2	8,1	0,8	7,1	1,2
	DOC	40,0	13,3	39,7	12,8	8,4	0,6	7,5	0,7	6,6	1,0
IMM	TOC	56,6	66,0	27,5	17,9	5,5	3,0	-	-	3,2	0,9
	DOC	11,7	4,5	12,9	4,9	3,3	0,9	-	-	2,3	0,6
KRE	TOC	-	-	31,9	11,3	8,4	1,7	3,9	0,6	3,2	0,6
	DOC	20,7	6,9	16,9	3,5	5,4	0,5	3,5	0,4	3,0	0,5
MAN	TOC	289	90,7	203	76,8	10,1	1,6	7,7	1,4	6,3	1,5
	DOC	103	54,5	101	53,4	8,3	1,7	6,5	1,1	5,9	1,4
WEN	TOC	79,1	32,9	60,4	17,9	9,2	1,5	7,3	1,7	7,1	1,4
	DOC	23,6	4,2	26,9*	9,4	7,9	1,1	6,0	1,1	6,2	1,3
LEO	TOC	96,7	39,9	-	-	8,0	0,7	-	-	7,0	0,6
	DOC	35,4	25,7	-	-	7,0	0,9	-	-	6,2	0,7
*n=13											

7.3.2 CSB-Elimination

Die CSB-Konzentrationen im Zulauf von Kläranlagen variiert basierend auf der Abwasserzusammensetzung und -herkunft. Die Konzentrationsbereiche der untersuchten acht Kläranlagen sind in Abbildung 7-14 gezeigt und unterscheiden sich in Höhe und Variation der Messdaten. In Abbildung 7-15 sind die Konzentrationsbereich im Ablauf der Nachklärung (ANK) und im Ablauf der Kläranlage (AKA) gezeigt. Zusätzlich sind ist die Elimination des CSB in den nachgeschalteten Verfahrensschritten als CSB-(Rest)Elimination dargestellt.

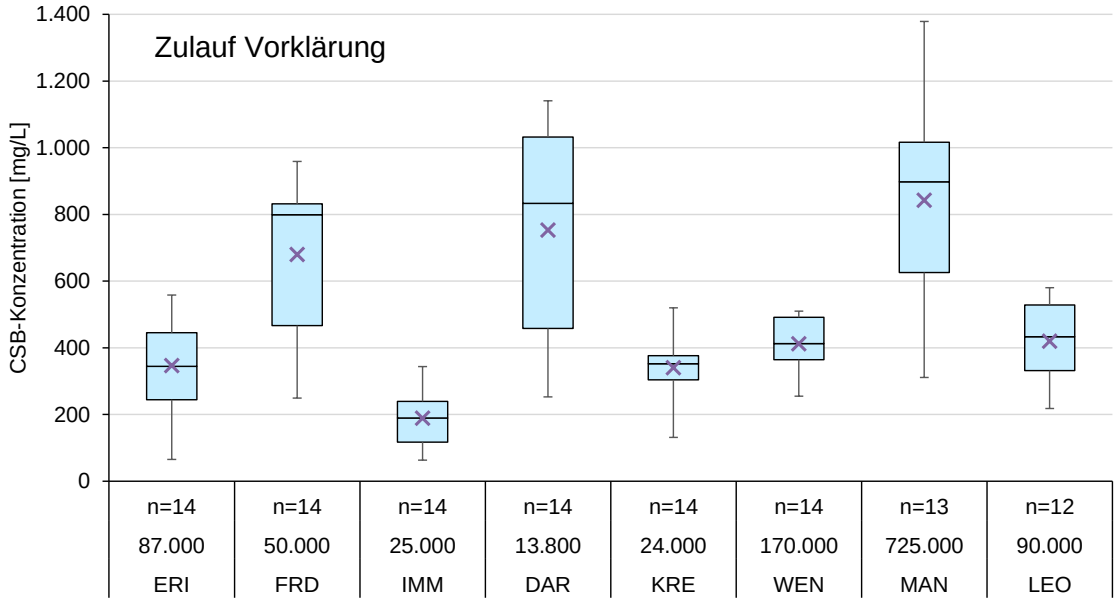


Abbildung 7-14: CSB-Konzentrationsspannen im Zulauf der untersuchten Kläranlagen

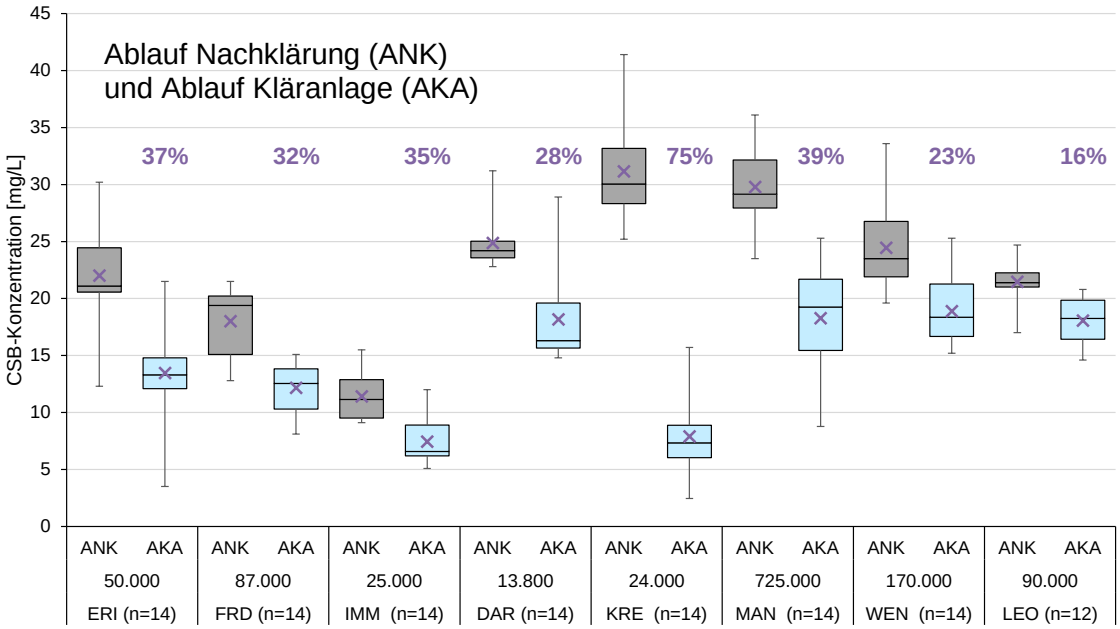


Abbildung 7-15: CSB-Konzentrationsspannen im Ablauf Nachklärbecken (ANK) und Ablauf der Kläranlage (AKA) mit Eliminationsgraden der CSB_{Rest}-Reduktion

Unabhängig von den Zulaufkonzentrationen wird der CSB zu großem Anteil in der biologischen Stufe reduziert. Die mittleren CSB_{ges}-Eliminationsleistungen aller Kläranlagen lagen für die mechanisch-biologischen Stufe (Zulauf Kläranlage bis Ablauf Nachklärung) in einem vergleichbaren Rahmen zwischen 90 und 96 %. In der nachgeschalteten Stufe kommt es zu einer weiteren Reduktion von > 20 %. Eine Ausnahme ist LEO mit im Mittel 16 %, da hier die Nachbehandlung nur aus einer Filtration besteht (simultane PAK-Dosierung in die Biologie). Die Ablaufkonzentrationen in LEO liegen dennoch in einem vergleichbaren Rahmen zu den

anderen Kläranlagen. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse keine Abhängigkeit der weiteren CSB-Reduktion von der Technologie zur spezifischen Spurenstoffelimination und Filtration.

Die Korrelation zwischen CSB-Konzentration im Ablauf Nachklärung und Ablauf Kläranlage ist in Abbildung 7-16 dargestellt. Der Großteil der Ergebnisse liegt über 20 % CSB-Restelimination und viele Ergebnisse liegen bei über 30 % Elimination. Eine klare Abweichung ist für KRE zu erkennen, was auf einen hohen partikulären CSB-Anteil zurückzuführen ist, siehe Abbildung 7-17 nachfolgend.

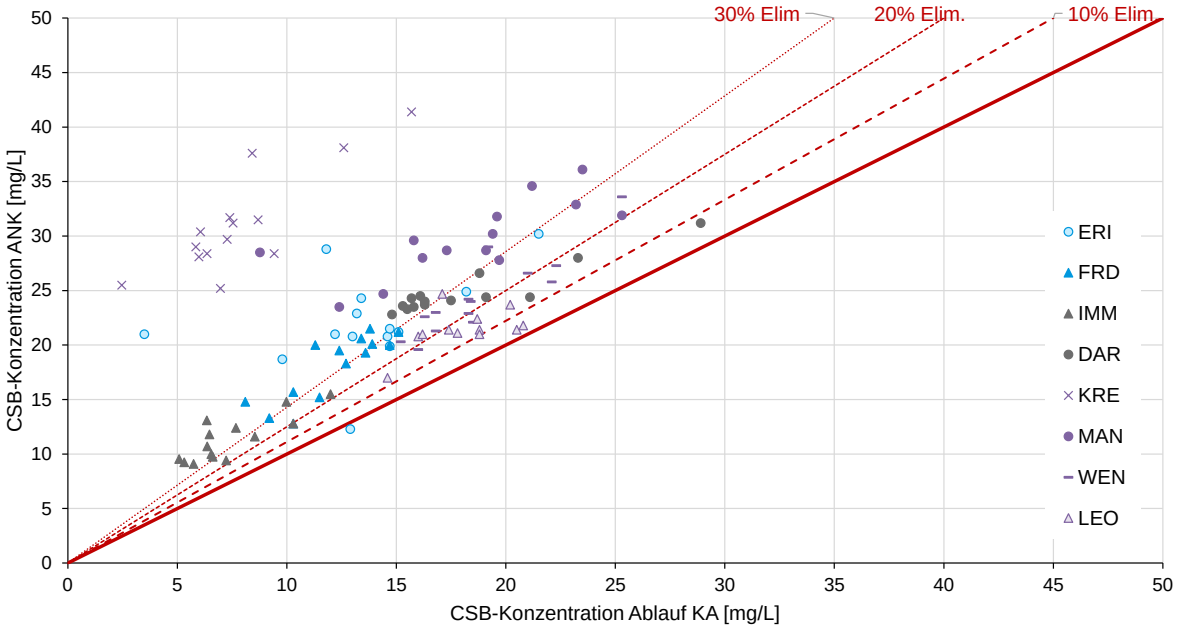


Abbildung 7-16: Korrelation der CSB-Konzentrationen Ablauf Nachklärung und Ablauf Kläranlage sowie die daraus resultierende weitere CSB-Elimination

In den nachgeschalteten Verfahrensschritten kommt es neben den Synergieeffekten der P-Elimination bei der Spurenstoffelimination auch zu einer weiteren CSB-Reduktion durch alle nachgeschalteten Technologien.

7.3.3 CSB-Fraktionen

Die CSB-Fraktionen $CSB_{gelöst}$ und $CSB_{partikulär}$ sind mit dem CSB_{ges} Mittelwert in Abbildung 7-17 für die Probenahmestellen Ablauf Nachklärbecken (NKB), Zulauf Filter und Ablauf der Kläranlage dargestellt. Die Konzentrationsbereiche je Verfahrensschritt und Kläranlage sind jeweils für CSB_{ges} und die Fraktionen $CSB_{gelöst}$ und $CSB_{partikulär}$ separat im Anhang in Abbildung 10-13, Abbildung 10-14 und Abbildung 10-15 gezeigt.

Die CSB-Konzentrationen und Zusammensetzung unterscheidet sich im Ablauf NKB. Während KRE ca. 50 % und MAN ca. 25 % CSB_{part} aufweisen, ist der Anteil an CSB_{part} bei allen anderen Anlagen deutlich geringer, was für eine hohe Abscheideleistung von Feststoffen in der Nachklärung spricht. Die höchsten CSB_{ges}-Konzentrationen zeigen ERI und KRE, die geringsten IMM. In der Stufe zur gezielten Spurenstoffeliminationen wird CSB_{ges} weiter

reduziert. Dabei kommt es vor allem zu einer Reduktion des $CSB_{gelöst}$. Für die mittlere $CSB_{gelöst}$-Elimination wurde eine Spannbreite zwischen 76 und 93 % Elimination ermittelt, mit Ausnahme von IMM, wo die Elimination von $CSB_{gelöst}$ nur bei 40 % lag. In IMM lagen allerdings auch die geringsten Zulaufkonzentrationen an CSB_{ges} und $CSB_{gelöst}$ vor.

In KRE, wo noch hohe Konzentrationen an CSB_{part} im Ablauf der Nachklärung vorhanden sind, wird auch dieser deutlich reduziert. Durch die Filtrationsstufe wird sowohl CSB_{part} als auch $CSB_{gelöst}$ weiter reduziert. Durch die weitere Reduktion an CSB in der nachgeschalteten Stufe können beide CSB-Fraktionen weiter gesenkt werden.

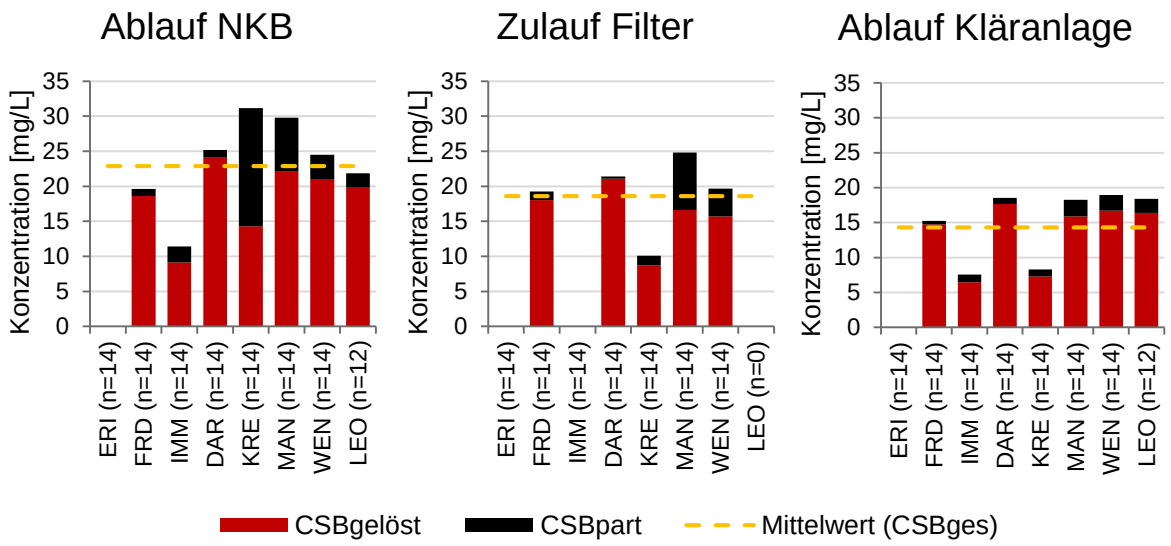


Abbildung 7-17: $CSB_{gelöst}$, $CSB_{partikulär}$ und der gemittelte CSB_{ges} im Ablauf Nachklärbecken, Zulauf Filter und Ablauf Kläranlage je Kläranlage

7.3.4 TOC und DOC-Elimination der Gesamtanlagen

Die TOC-Konzentrationsbereiche im Ablauf des Nachklärbeckens (ANK), Zulauf des Filters und Ablauf der Kläranlage für alle acht Kläranlagen sind in Abbildung 7-18 dargestellt. Äquivalent sind die Daten des DOCs in Abbildung 7-19 dargestellt.

Unabhängig von dem nachgeschalteten Verfahren werden die TOC-Konzentrationen über die Stufe zur spezifischen Spurenstoffentfernung und dem Filter weiter reduziert. Dies entspricht den Erwartungen und ähnelt den CSB-Verläufen (siehe Anhang). Der Verlauf der DOC-Konzentrationen entspricht dem TOC-Verlauf. Damit wird der DOC in den nachgeschalteten Stufen weiter reduziert.

Je nach Prozess wird eine höhere Reduktion in der Stufe zur Spurenstoffelimination erreicht (eher die PAK-Verfahren) oder im Filter (eher die Ozon-Verfahren). Der generelle Trend ist jedoch verfahrensunabhängig.

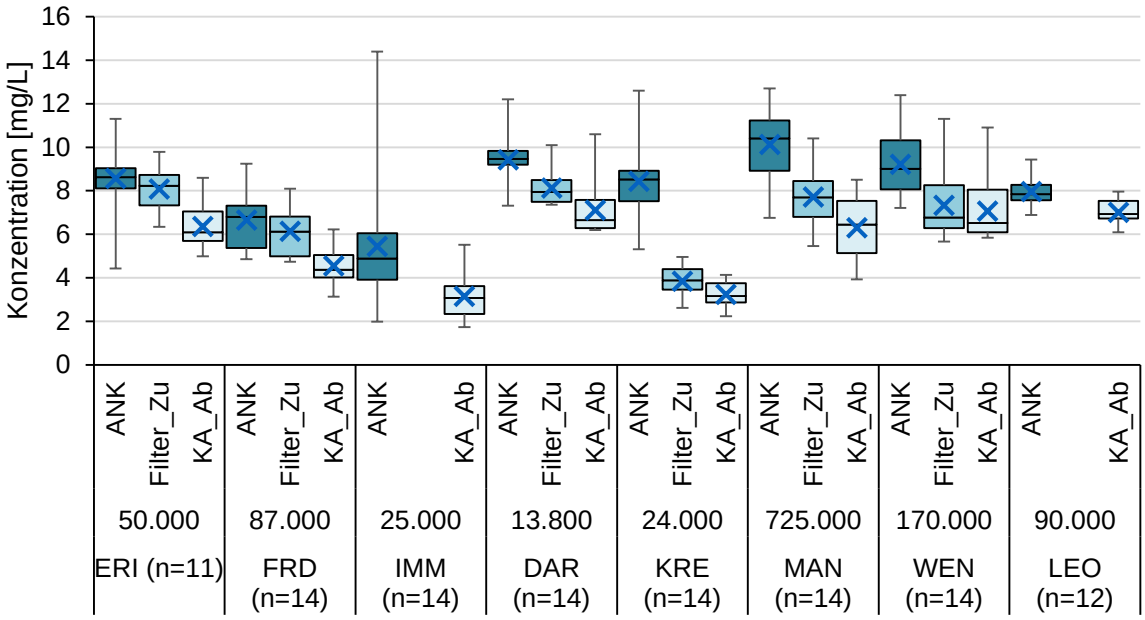


Abbildung 7-18: TOC-Konzentrationen im Ablauf Nachklärung, Zulauf und Ablauf Filter für die acht Kläranlagen im Vergleich

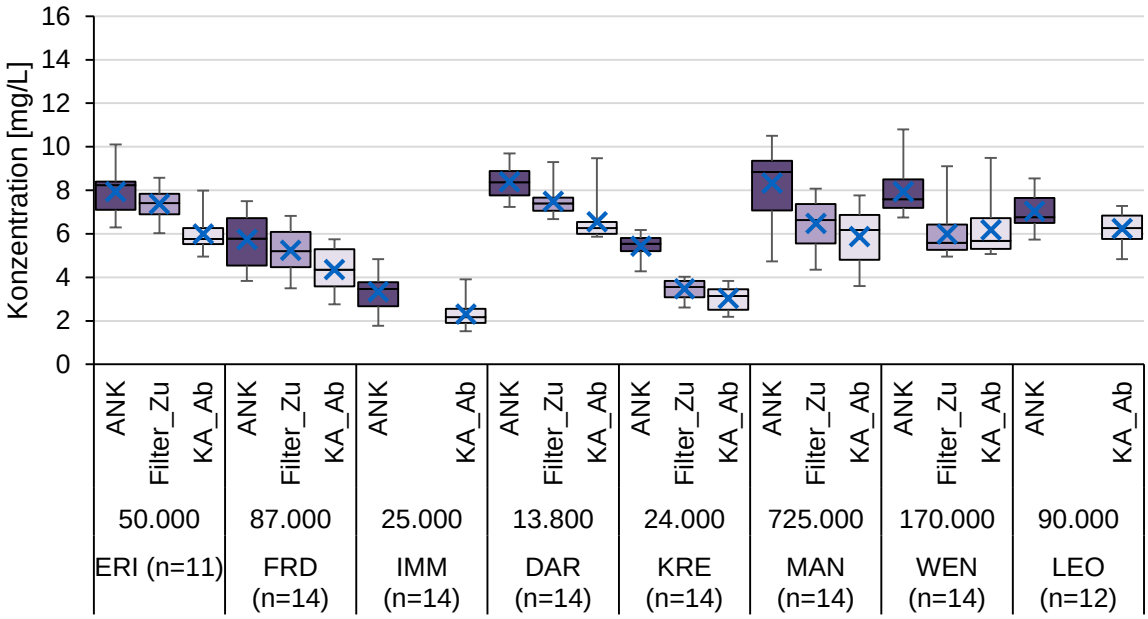


Abbildung 7-19: DOC-Konzentrationen im Ablauf Nachklärung, Zulauf und Ablauf Filter für die acht Kläranlagen im Vergleich

7.3.5 SAK_{254}

Der spektrale Adsorptionskoeffizient bei 254 nm (SAK_{254}) ist ebenfalls ein Summenparamater für die organische Belastung des Abwassers und eignet sich als Surrogatparameter für die Spurenstoffelimination (siehe Kapitel 7.1 Abbildung 7-4). Die Ergebnisse für SAK_{254} im Ablauf der Nachklärung, Zulauf des Filters und Ablauf der Kläranlage sind in Abbildung 7-20 dargestellt.

In allen Verfahren kommt es in der Stufe der gezielten Spurenstoffelimination zu einer deutlichen Reduktion des SAK_{254}. Hierbei ist zu beachten, dass in DAR der Raumfilter vor den GAK-Adsorber geschaltet ist, sodass auch für diesen Prozess die getroffene Aussage gilt. Durch die Filterstufe kommt es bei den meisten Verfahren nur zu einer geringeren weiteren Reduktion. In der simultanen PAK-Dosierung in der Biologie in LEO kommt es daher nur zu einer geringen Reduktion vom SAK_{254}, da die nachgeschaltete Stufe nur die Filterstufe umfasst. In allen nachgeschalteten Spurenstoffeliminationen kommt es unabhängig von der Verfahrensweise zu einer Reduktion des SAK_{254}.

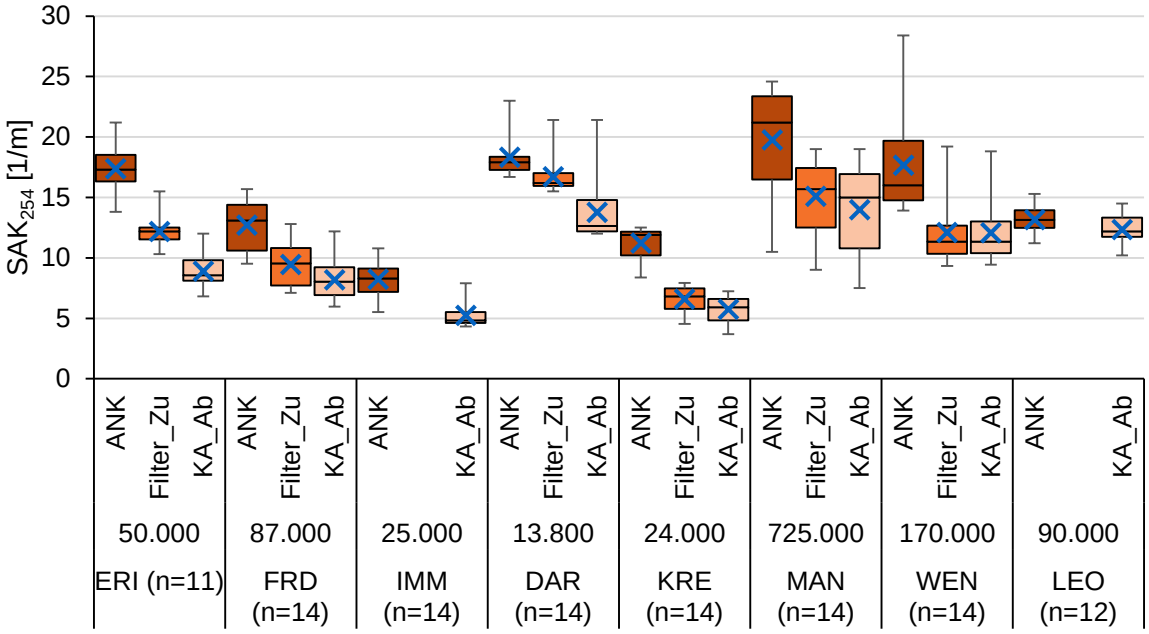


Abbildung 7-20: SAK_{254} im Ablauf Nachklärung, Zulauf und Ablauf Filter für die acht Kläranlagen im Vergleich

7.3.6 Zusammenhang zwischen den organischen Summenparametern

Der Zusammenhang der SAK_{254} Reduktion und der Spurenstoffelimination wurde bereits in Kapitel 7.1 gezeigt. Der Zusammenhang zwischen den verschiedenen Summenparamatern für die organischen Abwasserinhaltsstoffe ist in Abbildung 7-21 gezeigt. Ungefüllte Punkte markieren Tage, die durch einen Ausfall der Fällmitteldosierung beeinflusst wurden.

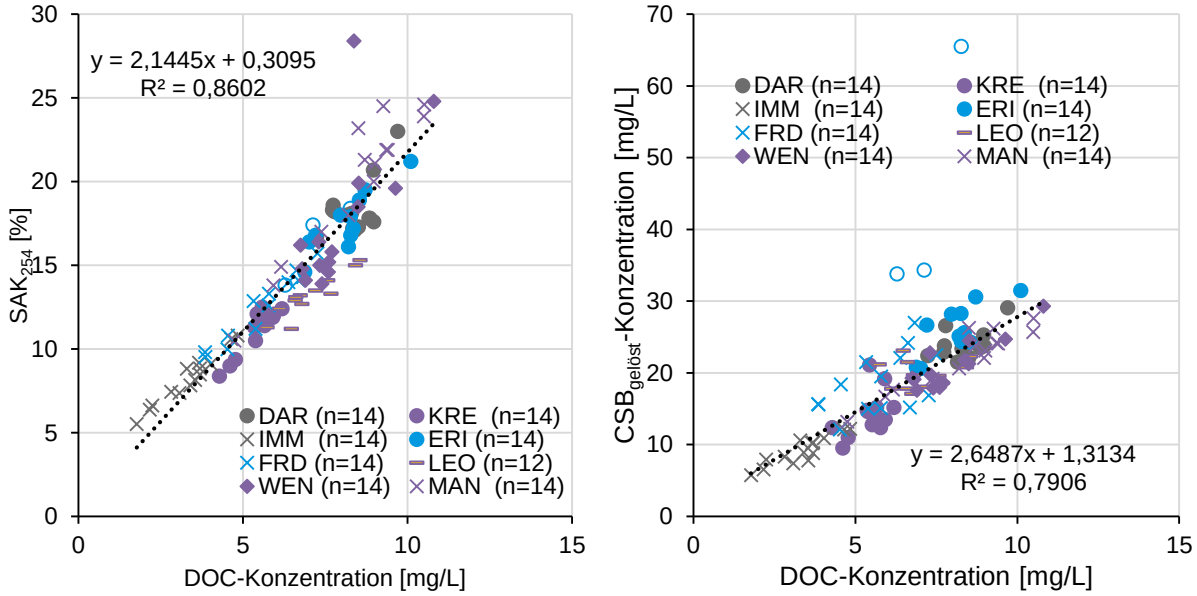


Abbildung 7-21: Zusammenhänge vom SAK_{254} und $CSB_{gelöst}$ mit dem DOC für die acht untersuchten Kläranlagen im Intensivmonitoring

Verfahrensunabhängig zeigen sich eindeutige Korrelationen zwischen dem SAK_{254} und dem DOC sowie dem $CSB_{gelöst}$ und dem DOC.

7.4 Feststoffreduktion

7.4.1 Abfiltrierbare Stoffe (AFS)

Die AFS-Messwerte für die acht beprobten Kläranlagen sind in Abbildung 7-22 für den Ablauf Nachklärbecken und Ablauf Kläranlage über die 14 Tage Intensivmonitoring gezeigt. Es konnte nicht an allen Kläranlagen AFS-Messungen durchgeführt werden, wodurch es zu Datenlücken in der Darstellung kommt. Alle Messwerte in grün beschreiben die Messwerte über der Bestimmungsgrenze der AFS-Methode von 2,0 mg/L. Alle anderen Daten liegen unterhalt der Bestimmungsgrenze.

Ablauf Nachklärbecken

ERI	FRD	DAR	IMM	KRE	MAN	WEN	LEO
	2,7			22	5	5	4,8
	2,3			30	4	5,6	4
	4,9			29	8,7	11	4,4
	4,8			32	9	4,2	4,4
	2,8			37	6	7,2	3,6
	5,9			33	5,8	4	2,6
	4,5			19	5,3	5	2,6
	2,5			33	4,6	3	
	1,7	3		29	4,3	0	
	3,9	3		36	7,5	7,4	2
	2,7	4		37	8,3	4,4	1,6
	5,9			34	11	3,6	6,2
	3,7			33	13	8,8	0,4
	4,2			38	9	-0,6	1,2

Ablauf Kläranlage

ERI	FRD	DAR	IMM	KRE	MAN	WEN	LEO
	0,2			-4	0,8	5,6	1,4
	0,3			-7	0,6	5,4	2,6
	0,9			-1	1,2	4,6	2,4
	0,4			-8	1,8	5	0,4
	1			0,5	0,4	6,8	1,8
	0,7			-2	8,9	4	2,8
	0,3			-0	0,6	2	1,6
	0,3			3	1,2	2,6	
	2,1	2		0,9	0,8	1	
	0,4	1		1,5	1,3	1,6	0,2
	0,3	1		0,4	1,5	7,6	0,4
	0,2			3,5	3,7	3,4	1
	1,1			0,2	3	4,2	-1
	0,4			0,5	1,4	-1	-1

Abbildung 7-22: AFS-Messwerte der acht beprobten Kläranlagen im Rahmen des Intensivmonitoring im Ablauf Nachklärbecken (links) und Ablauf Kläranlage (rechts= im Vergleich

Insgesamt wurden 71 Messdaten jeweils im Ablauf der Nachklärung und im Ablauf der Kläranlage erfasst. Im Ablauf der Nachklärbecken lagen davon 6 Messungen unterhalb der Bestimmungsgrenze. Dies entspricht 8 %. Bei dem Ablauf der Kläranlagen lagen mit 51 Messwerten insgesamt 72 % der Daten unterhalb der Bestimmungsgrenze. Die Messung des Feststoffgehalts im Ablauf der Kläranlage (mit Filtration) über den AFS ist daher nur eingeschränkt möglich. Es bedarf eines alternativen Messverfahrens mit geringerem Personalaufwand als bei den AFS-Messungen und für Proben mit einer AFS-Konzentration von < 2 mg/L. Als ein mögliche Surrogatparameter könnte Trübung in Frage kommen. Dies wird im Folgenden genauer betrachtet (siehe Kapitel 7.4.3).

7.4.2 Trübung

Neben der AFS-Messung wurden für alle acht untersuchten Anlagen Trübungsmessungen durchgeführt. Die Ergebnisse sind nach Filtertyp sortiert nachfolgenden als Summenhäufigkeit im Ablauf Nachklärung (als Zulauf der nachgeschalteten Stufe bezeichnet) und im Ablauf der nachgeschalteten Stufe/Kläranlage dargestellt. Die Ergebnisse für Raumfilter sind in

Abbildung 7-23, für Flächenfilter in Abbildung 7-24 und für GAK-Adsorber in Abbildung 7-25 dargestellt.

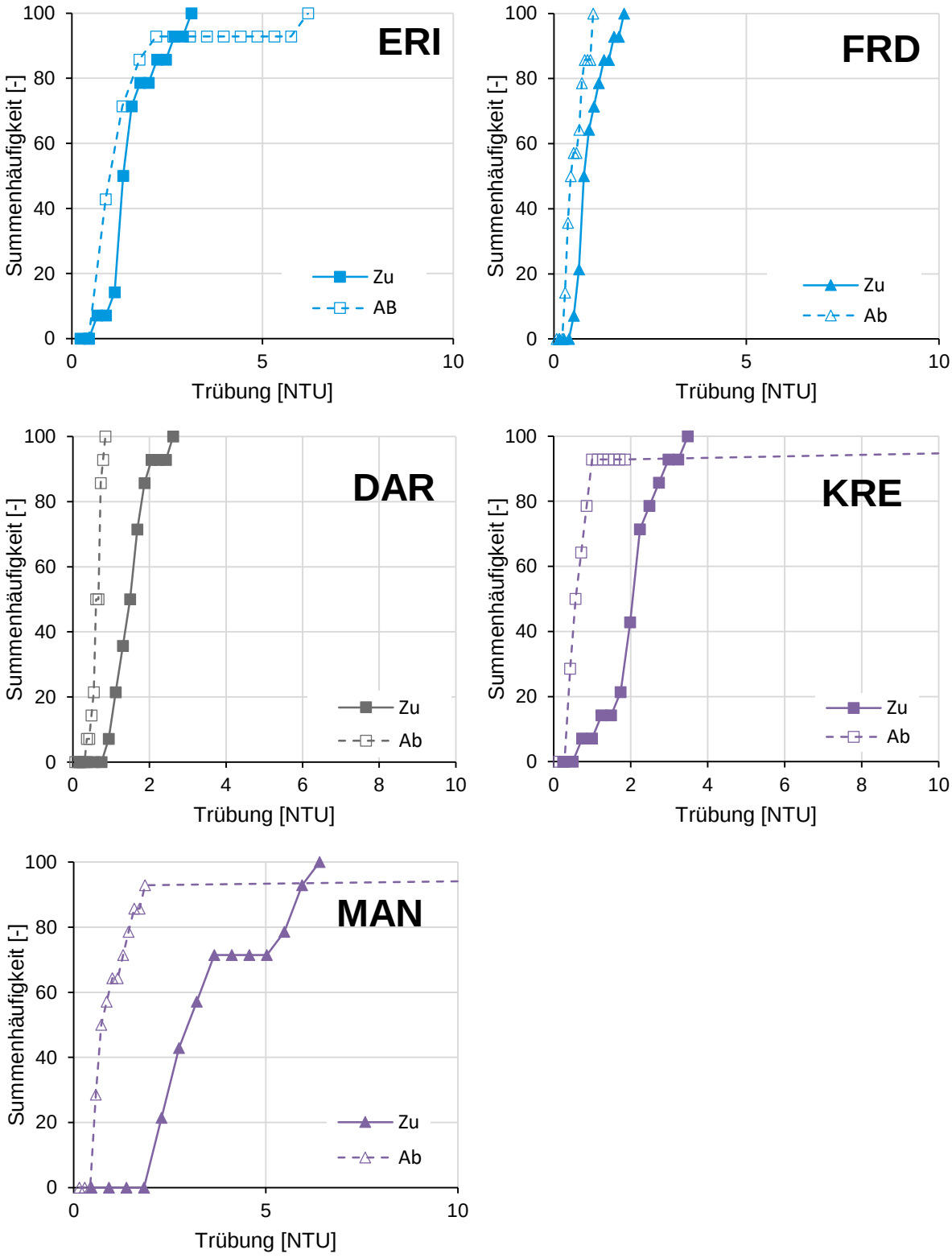


Abbildung 7-23: Summenhäufigkeit der Trübungswerte im Zu- und Ablauf der nachgeschalteten Verfahrensstufen für Kläranlagen mit einem nachgeschalteten Raumfilter

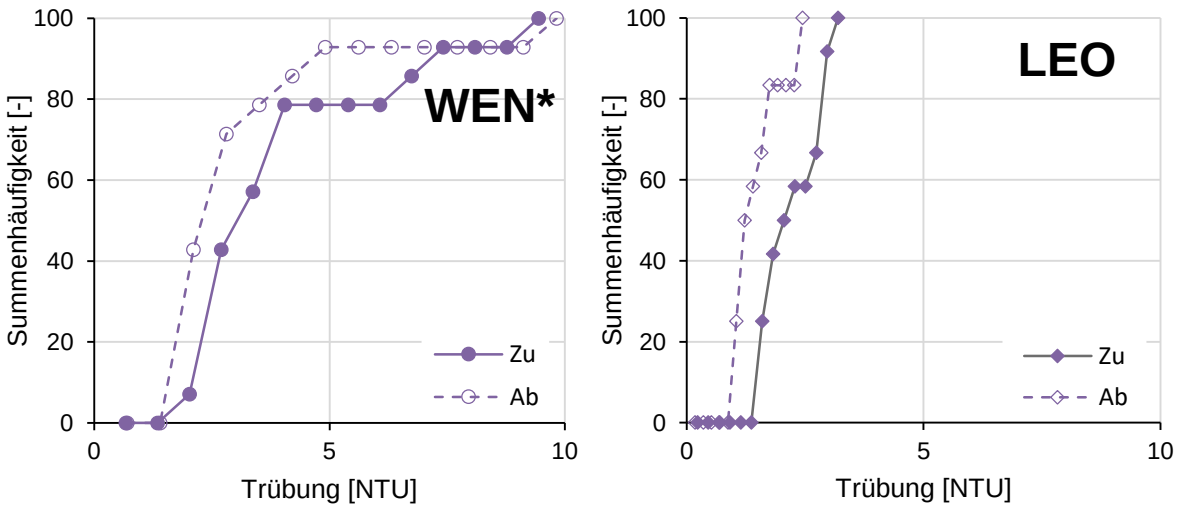


Abbildung 7-24: Summenhäufigkeit der Trübungswerte Zu- und Ablauf der nachgeschalteten Verfahrensstufen für Kläranlagen mit einem nachgeschalteten Flächenfilter (* = Teilstrombetrieb)

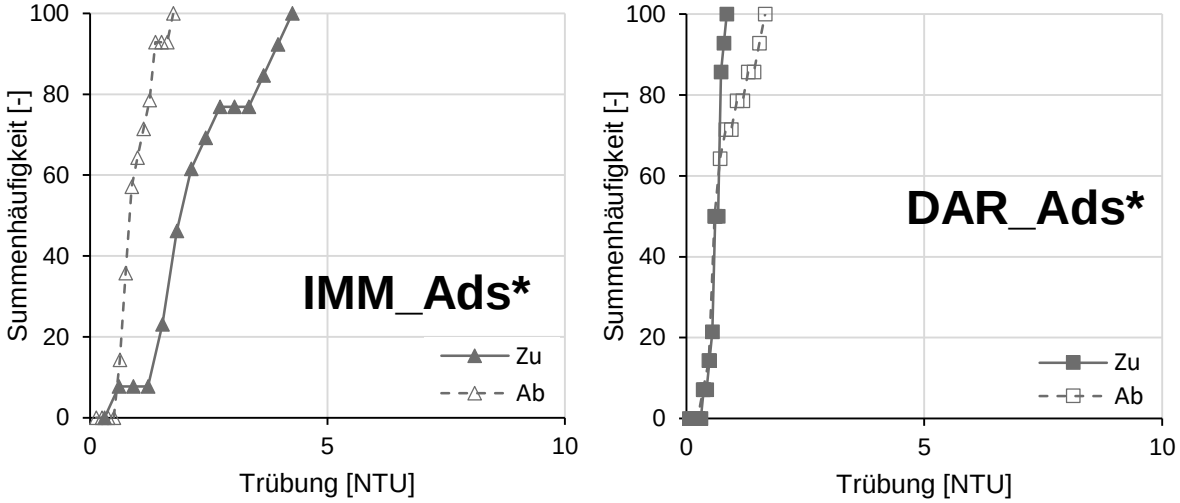


Abbildung 7-25: Summenhäufigkeit der Trübungswerte Zu- und Ablauf der Adsorptionsstufe für Kläranlagen mit einem GAK-Absorber (* = Teilstrombetrieb)

Unabhängig von der Filtertechnik kann in allen Verfahren in Abhängigkeit der Trübung im Zulauf der nachgeschalteten Stufe die Trübung weiter reduziert werden. Dabei liegen die Ablaufwerte der Raumfilter überwiegend bei < 2 NTU. Für Flächenfilter liegen die Trübungsablaufwerte etwas höher, meist aber bei < 3 NTU. Im GAK-Adsorber der Kläranlage IMM können vergleichbare Ergebnisse wie bei den Raumfiltern erzielt werden mit < 2 NTU. Im GAK-Adsorber der Kläranlage DAR kam es zu einer geringen Trübungszunahme im Adsorber. Die Ursache ist unbekannt. Auf Grund der durch den vorgeschalteten Raumfilter bereits sehr niedrigen Werte von < 2 NTU kann dies als unproblematisch eingestuft werden.

7.4.3 Korrelation AFS und Trübung

Zur Überprüfung in wieweit die Messung der Trübung eine Alternativmethode darstellt, wurden die im Rahmen des Intensivmonitorings gemessenen Trübungswerte den AFS-Werten gegenübergestellt. Die Datenkorrelation ist in Abbildung 7-26 und ein vergrößerter Ausschnitt in Abbildung 7-27 gezeigt.

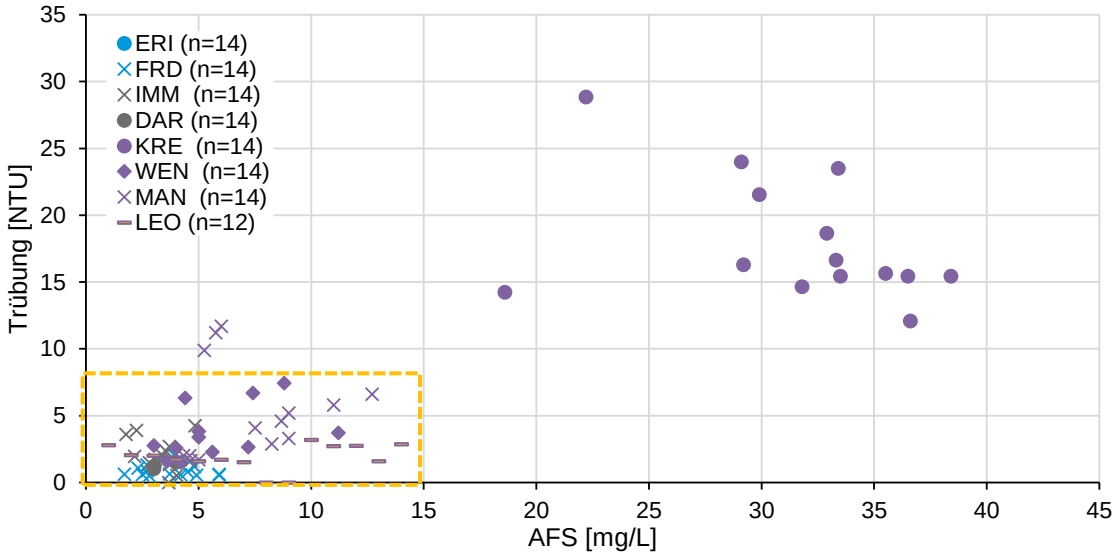


Abbildung 7-26: Korrelation der Trübungs- und AFS-Werte im Rahmen des Intensivmonitoring

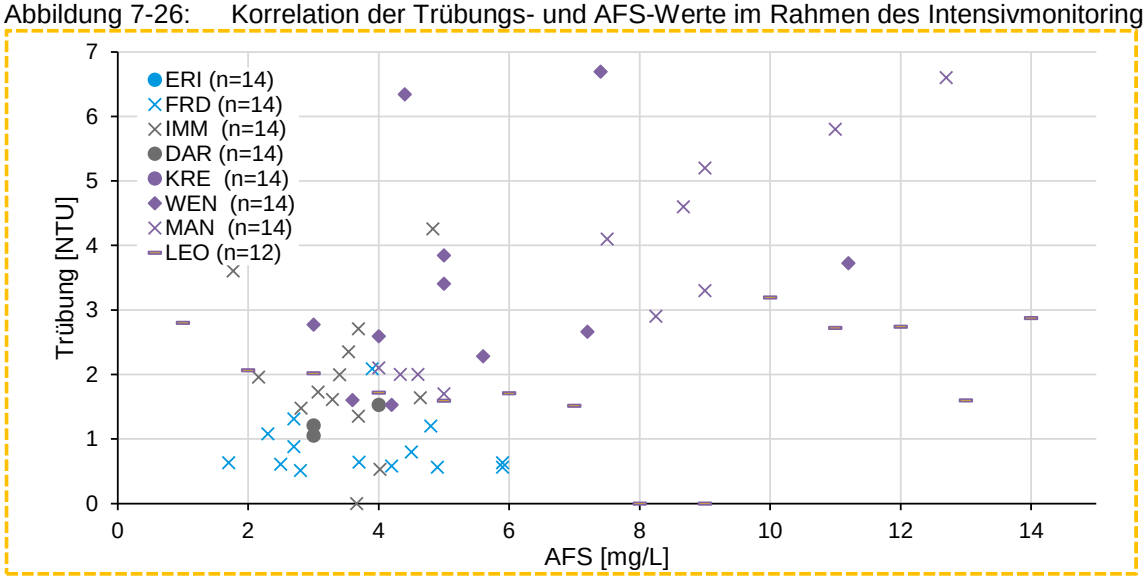


Abbildung 7-27: Ausschnitt der Datenkorrelation von Trübung und AFS-Messwerten im Rahmen des Intensivmonitorings

Die Daten zeigen sowohl bei niedrigen als auch bei hohen AFS-Konzentrationen und Trübungswerten Streuung für alle betrachteten Kläranlagen. Es kann keine direkte Korrelation zwischen AFS und Trübung festgestellt werden. Daher kann der Parameter Trübung den Parameter AFS nicht direkt als Surrogatparameter ersetzen. Dennoch bleibt die Trübung ein hilfreicher Parameter, um einen Eindruck über den Kläranlagenablauf zu erlangen und Störungen oder starke Abweichungen schneller detektieren zu können. Es sind weitere Untersuchungen durchzuführen, um einen geeigneten Alternativparameter für AFS zu finden, der weniger Personalaufwand bedarf und für sehr niedrige AFS-Werte (< 2 mg/L) geeignet ist.

8. Zusammenfassung und Fazit

Ziel des Projekts „Untersuchungen zur Kombination von weitergehender P-Elimination und Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen – Stufe 2“ ist es die Synergieeffekte und Wechselwirkungen der Spurenstoffelimination mit der weitergehenden P-Elimination und der CSB-(Rest)Elimination im laufenden Betrieb kommunaler Kläranlagen mit gezielter Spurenstoffelimination (verfahrensunabhängig) zu untersuchen. Im Rahmen des Projektes wurden die Betriebsdaten (2019 – 2021) acht kommunaler Kläranlagen betrachtet. Dabei wurden die Spurenstoffeliminationsverfahren PAK (inkl. PAK_{sim}), GAK und Ozon in Kombination mit den Filtertechnologien Raumfilter und Flächenfilter untersucht. Basierend auf den Betriebsdaten wurde ein 14-tägiges Intensivmonitoringprogramm aufgestellt, indem bei allen Kläranlagen die gleichen Abwasserparameter an den gleichen Probenahmestellen bestimmt wurden.

Anhand der Betriebsdaten zeigt sich, dass in allen Kläranlagen eine hohe P_{ges}-Elimination von 85 – 98 % erzielt wird. Nur für vier Kläranlagen lagen separate Daten für die nachgeschalteten Verfahren vor, die zeigen, dass es zu einer weiteren P_{ges}-Reduktion kommt. Im Intensivmonitoring wurden für alle acht Kläranlagen mehrere Probenahmestellen untersucht und die P-Fraktionen bestimmt. Hier zeigt sich, dass **verfahrensunabhängig eine P_{ges}-Elimination** von > 97 % erreicht werden kann. In Abhängigkeit der Dosierungs- und Automatisierungsstrategien (bspw. Mehrstufenfällung) verteilt sich der Anteil der P_{ges}-Elimination unterschiedlich auf die einzelnen Prozessschritte (Biologie, Spurenstoffelimination, Filtration). Generell erfolgt der Großteil der P_{ges}-Elimination über eine Simultanfällung in der Biologie. Dadurch können bereits niedrige P_{ges}-Werte im Ablauf der Nachklärung erreicht werden. In einigen PAK-Anlagen (WEN und MAN) wird die Simultanfällung in der Biologie nicht komplett ausgeschöpft, sondern der Synergieeffekt der weitergehende P-Elimination in der nachgeschalteten Stufe ausgenutzt. In KRE wird dabei sogar ein größerer Anteil der P-Elimination im Rahmen der Mehrstufenfällung bewusst auf die PAK-Stufe verlagert. Alle Kläranlagen können ihre Überwachungs- und Zielwerte trotz unterschiedlicher Verfahren und Dosierungsstrategien einhalten.

Die **P-Fraktionierung** zeigt, dass in allen Verfahren, die in der nachgeschalteten Stufe ein Fällmittel dosieren eine weitere Reduktion von PO_4-P erzielt werden kann. In den PAK-Verfahren kann es so sowohl in der PAK-Stufe als auch im Filter zu einer Reduktion kommen. Bei den Anlagen mit Ozon erfolgt die Reduktion nur im Filter. Die Reduktion der P_{part} erfolgt in allen Verfahren über den eingesetzten Filter auf Werte < 0,1 mg/l. Die Anlagen mit Raumfilter zeigten dabei etwas geringere P_{part}-Ablaufwerte als die Anlagen mit Flächenfiltern. Auch bei GAK-Adsorbern ohne Fällmittelzugabe wird der P_{part} deutlich reduziert. Der P_{org} konnte sowohl in der Spurenstoffeliminationsstufe als auch in der Filterstufe reduziert werden. Die Ergebnisse variierten über die betrachteten Kläranlagen, wobei der Reduktionsmechanismus nicht bekannt ist.

Neben der weitergehenden P-Elimination können andere Synergieeffekte in der Spurenstoffelimination genutzt werden. Während auch die CSB-Reduktion hauptsächlich in der (mechanisch-)biologischen Stufe stattfindet (Betriebsdaten: 87 - 98 %; Intensivmonitoring:

90 – 97 %), konnten die nachgeschalteten Verfahren hier eine weitere **CSB-(Rest)Reduktion** von 20 – 47 % (Betriebsdaten) bzw. **min. 20 %** (Intensivmonitoring) erzielen. Die Verfahren weisen keine eindeutigen Unterschiede auf Basis der Technologie auf. Lediglich das PAK_{sim}-Verfahren zeigt eine geringere CSB-(Rest)Elimination, da hier die nachgeschaltete Stufe nur die Filterstufe umfasst. Die Betrachtung der CSB-Fraktionierung im Intensivmonitoring zeigte, dass sowohl $CSB_{gelöst}$ als auch CSB_{part} in der nachgeschalteten Stufe reduziert werden. Das Verhältnis beider Fraktionen ist kläranlagen- und abwasserspezifisch. Analog zum CSB werden sowohl TOC als auch DOC in der nachgeschalteten Stufe gesenkt. Tendenziell erfolgt die Reduktion in den PAK-Stufen oder den Filtern, eine Reduktion konnte aber verfahrensunabhängig gezeigt werden. Damit kann ein Synergieeffekt der nachgeschalteten Stufe zur weiteren CSB-Reduktion um mindestens 20 % genutzt werden.

Weitere Synergieeffekte konnten für den **Feststoffrückhalt** ermittelt werden. In den Betriebsdaten lagen für alle Kläranlagen Trübungswerte vor, aber nur für drei Anlagen AFS-Daten. Für zwei Kläranlagen konnte anhand der Trübungswerte die Feststoffreduktion in der nachgeschalteten Stufe betrachtet und gezeigt werden. Im Intensivmonitoring konnte AFS für sechs Kläranlagen gemessen werden. Im Ablauf der Kläranlagen lagen 72 % der erhobenen Daten unterhalb der Bestimmungsgrenze, sodass keine Aussagen zur Feststoffreduktion anhand dieses Parameters getroffen werden können. Hier bedarf es eines Alternativparameters. Bei allen Anlagen wurde die Trübung erfasst. Diese kann in allen Verfahren, unabhängig vom Filtertyp, in Abhängigkeit der Zulaufkonzentration reduziert werden. Bei den Raumfiltern konnten Ablaufwerte von < 2 NTU und bei den Flächenfiltern < 3 NTU erzielt werden. Bei den GAK-Adsorbern kam es bei IMM zu einer Reduktion bis auf < 2 NTU, während es bei DAR zu einer geringen Trübungszunahme aufgrund der sehr geringen Zulaufwerte (< 2 NTU) durch den vorgeschalteten Sandfilter kam. Diese wird als unproblematisch eingestuft. Anhand der Trübung kann gezeigt werden, dass es zu einer Feststoffreduktion als Synergieeffekt in der nachgeschalteten Stufe kommt. Eine Quantifizierung ist anhand dieses Parameters nicht möglich. Es konnte keine Korrelation zwischen Trübung und AFS festgestellt werden, sodass die Trübung keinen geeigneten Surrogatparameter für AFS darstellt.

Im Rahmen des Intensivmonitorings wurden vier 48-h-Mischproben auf Spurenstoffe untersucht. Wie erwartet, findet die Hauptelimination der untersuchten Spurenstoffe in der nachgeschalteten Stufe statt. Eine Ausnahme ist das PAK_{sim}-Verfahren, hier findet die **Spurenstoffelimination** simultan in der biologischen Stufe statt. Die Filtrationsstufe hat nur einen geringen Einfluss auf die Gesamtelimination. Eine Ausnahme stellt hier FRD dar, in dessen Raumfilter eine vermutlich speziell ausgebildete Biozönose zu einer besseren zusätzlichen Spurenstoffelimination im Vergleich zu den anderen Filtern sorgt. Da Spurenstoffmessungen teuer und aufwendig sind, wurde auch **SAK_{254}** in allen Proben gemessen. Eine verfahrensunabhängige Reduktion konnte gezeigt werden. Auch hier kommt es in der Filtrationsstufe nur zu einer geringen Reduktion. Die Korrelation zwischen SAK_{254} und der Spurenstoffeliminationsleistung ist bekannt und konnte auch in diesem Projekt anlagenspezifisch gezeigt werden. Dagegen bestehen **Korrelationen** zwischen der SAK_{254}-Reduktion und DOC sowie zwischen $CSB_{gelöst}$ und DOC verfahrensunabhängig.

Zusammenfassend konnte verfahrensunabhängig eine CSB-(Rest)Elimination von 20 % in der nachgeschalteten Stufe, eine P_{ges}-Elimination von > 97 % und eine Trübungsreduktion auf < 3 NTU als Synergieeffekte erzielt werden. Die im Realbetrieb untersuchten Kläranlagen nutzen unterschiedliche Verfahrenskonzepte zur Spurenstoffelimination (PAK-Dosierung in Belebung PAK_{sim}, PAK-Dosierung nach dem Ulmer Verfahren vor Raumfilter und vor Flächenfilter, GAK-Adsorber und Ozon-Verfahren). Mit allen untersuchten Verfahrenskombinationen werden im Kläranlagenablauf niedrige P_{ges}-Konzentrationen zwischen 0,09 bis 0,29 mg/l im Jahresmittel erreicht. Die untersuchten Kläranlagen müssen aufgrund wasserrechtlicher Vorgaben bereits deutlich niedrigere P-Ablaufkonzentrationen einhalten als zukünftig europaweit aus den Anforderungen nach KARL hervorgeht. Die hohen Eliminationsleitungen wurden im Rahmen des zweiwöchigen Intensivmonitorings (ebenfalls im Realbetrieb) bestätigt. Die Spurenstoffe der KomS-Liste B wurden zuverlässig um mindestens 80 % reduziert.

Folgende **ergänzende Erkenntnisse** konnten im Projekt gewonnen werden:

Es fiel auf, dass bei fast allen untersuchten Kläranlagen die hohen Anforderungen an die P-Elimination bereits im Ablauf der Nachklärung eingehalten werden. Auf einer der Kläranlagen wurde infolge einer temporär höheren Fällmitteldosierung auch eine Verbesserung der CSB- und AFS-Konzentrationen im Kläranlagenablauf beobachtet (Betriebsdaten, ERI). Wesentlich ist auch eine hohe Abscheideleistung der abfilterierbaren Stoffe AFS in der Nachklärung, insbesondere wenn die Spurenstoffelimination mit GAK-Adsorbern oder Ozonungsanlagen erfolgt. Eine hohe Feststoff-Abtrennleistung in der Nachklärung erlaubt längere Spülzyklen der GAK-Adsorber bzw. eine geringere Ozonzehrung sowie längeren Spülzyklen der biologisch aktivierten Raumfilter.

Obwohl die P-Elimination weitestgehend in der Belebungsstufe erfolgt, trägt die nachfolgende Filterstufe (sowohl Raum- und Flächenfilter als auch GAK-Adsorber und biologisch aktivierter Filter) zu einem weiteren Senken der P-Konzentrationen bei, wenn auch nur in geringem Maße. Im Wesentlichen erfolgt die P-Reduktion durch die Feststoffentnahme in der Filterstufe und kann durch Fällmitteldosierung vor dem Filter erhöht werden (Flockungsfiltration, Fällung PO_4-P). Die Auslegung und der Betrieb der Filterstufe sind demnach an die Belange zur Spurenstoffelimination auszurichten.

Eine Ausnahme dazu stellt die PAK-Dosierung nach dem Ulmer Verfahren dar. Hier werden Fäll- und Flockungshilfsmittel in den PAK-Reaktor zudosiert, um im folgendem Sedimentationsbecken eine hohe PAK-Abscheideleistung zu erzielen. Infolge der verfahrensbedingten benötigten Fällmitteldosierung erhöht sich die P-Abscheidung in der vierten Stufe gegenüber den anderen Verfahrenskombinationen.

Während bei der simultanen P-Elimination in der Belebungsstufe die P-Fällung im Vordergrund steht, liegt bei der Filtration der Fokus auf der Flockung. Somit sind unterschiedliche Fällmittel verwendbar und angepasste Dosierstrategien umzusetzen. Um die Synergieeffekte zwischen Spurenstoffelimination und weitestgehender P-Elimination effizient zu nutzen, aber auch die Wechselwirkungen zwischen den verfahrenstechnisch sehr unterschiedlichen Prozessen angemessen zu beachten, ist ein komplexes Automationskonzept zu entwickeln, das

individuell an die Verfahrenskombination, die ggf. verschiedenen Fäll- und Flockungsmittel, die örtlichen Randbedingungen und die Besonderheiten des Einzugsgebiets angepasst ist.

Grundsätzlich können mit allen Verfahren sowohl die Ziele der Spurenstoffelimination als auch zur weitestgehenden P-Elimination eingehalten werden. Für die **Umsetzung der weitestgehenden P-Elimination** zeigt sich, dass die Hauptreduktion über die Simultanfällung sinnvoll ist. Ein Limit für die P-Ablaufwerte stellt vor allem der P_{org} dar, der abwasserspezifisch vorliegt und durch die gewählten Verfahren nicht gezielt reduziert werden kann. Der Feststoffrückhalt sollte in erster Linie in der mechanisch-biologischen Stufe stattfinden (guter Rückhalt in der Nachklärung). Die nachgeschalteten Verfahren können die Qualität des Kläranlagenablaufs noch weiter aufwerten.

Für eine **schrittweise Umsetzung** ist es daher sinnvoll, zunächst ein geeignetes Verfahrenskonzept für die Spurenstoffelimination zu entwickeln. Dabei fließen zum einen die Abwassermatrix des Einzugsgebiets sowie die wasserrechtlichen Anforderungen ein, zum andern die örtlichen bau- und verfahrenstechnischen Randbedingungen der bestehenden Abwasserbehandlungsanlagen (beispielsweise verfügbare Flächen, Wasserspiegelhöhenlagen, Modernisierungsbedarf, Baugrund, etc.). Empfehlungen zur Vorgehensweise sind dem Leitfaden „Machbarkeitsstudien zur Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen (KOMS, 2020a) zu entnehmen. Da jede der untersuchten Verfahrenskombinationen auch zur weitestgehenden P-Elimination geeignet ist, lässt sich die P-Elimination in einem weiteren Schritt gezielt in das Verfahrenskonzept zur Spurenstoffelimination integrieren. Es konnte gezeigt werden, dass sich die Anforderungen an eine weitgehende P-Elimination bereits mit einer mehrstufigen Simultanfällung in der Belebungsstufe und einer hohen AFS-Abscheideleistung in der Nachklärung einhalten lassen. Die Filtrationsstufe trägt durch ihren Feststoffrückhalt und ggf. auch durch Fällung zwar zu einem weiteren Senken der P-, AFS- und CSB-Ablaufkonzentration bei, dient aber vorrangig der Spurenstoffelimination.

Bei einigen der untersuchten Kläranlagen war infolge der Anforderungen aus der Bodenseerichtlinie bereits eine Filtrationsstufe zur weitergehenden P-Elimination vorhanden. Diese wurde in das Ausbaukonzept zur Spurenstoffelimination integriert.

Bei drei der untersuchten Kläranlagen ist die Spurenstoffelimination für den Teilstrom ausgelegt. Anhand der ausgewerteten Betriebsdaten kann gezeigt werden, dass auch diese Kläranlagen die Anforderungen an die weitestgehende P-Elimination (24h-Mischproben im Jahresmittel) einhalten. Während des zweiwöchigen Intensivmonitoring traten nur vereinzelt Regenwettertage auf, sodass sich daraus keine belastbaren Aussagen ableiten lassen. Sofern die weitestgehende P-Elimination mithilfe der Simultanfällung in der Belebungsstufe und einer hohen AFS-Abscheideleistung in der Nachklärung bereits umgesetzt ist, wird der Teilstrombetrieb der vierten Stufe als nicht problematisch eingestuft. Dennoch sollte für die Planung von **Teilstromverfahren** eine Mischungsrechnung durchgeführt werden, um das Einhalten des Überwachungswertes in der qualifizierten Stichprobe nachzuweisen sowie die Schaltwerte für das Automationskonzept abzuschätzen.

Im Rahmen des zweiwöchigen Intensivmonitorings konnten folgende Erkenntnisse zur **Analytik** gewonnen werden:

Die Korrelation zwischen SAK_{254} und der Spurenstoffeliminationsleistung konnte auch in diesem Projekt anlagenspezifisch gezeigt werden. Dagegen bestehen Korrelationen zwischen der SAK_{254}-Reduktion und DOC sowie zwischen $CSB_{gelöst}$ und DOC verfahrensunabhängig.

Die AFS-Konzentrationen liegen bereits im Ablauf der Nachklärung teilweise unter der Bestimmungsgrenze von 2 mg/l, im Ablauf des Filters ist eine verlässliche Messung kaum möglich. Die Laborausstattung ist für die Filtration zu ergänzen (Druckfiltration, Präzisionswaage). Insbesondere im Ablauf des Flockungsfilters sind überwiegend sehr kleine Partikel vorhanden, die den Analysefilter zur AFS-Bestimmung schnell verblocken, was zu sehr langen Filtrationszeiten führen kann. Während sich die AFS-Messung im Ablauf der Nachklärung im Kläranlagenlabor (gerade) noch durchführen lässt, ist die AFS-Messung im Ablauf von Filterstufen sehr herausfordernd und sollte besser in einem zertifizierten Analyselabor mit mehreren Litern Probenvolumen durchgeführt werden.

Ähnliches gilt für die Probenvorbehandlung, um die P-Fraktionen oder auch $CSB_{gelöst}$ und DOC zu bestimmen. Zudem liegen die Ablaufkonzentrationen im unteren Messbereich der Küvettentests, was in Verbindung mit der Probenvorbehandlung (Filtration) trotz sorgfältiger Arbeitsabläufe (z.B. Pipettieren) infolge der Messungenauigkeiten (Küvettentests oder Analyseverfahren) zu unplausiblen Messwerten führen kann. Hier handelt es sich keinesfalls um eine Routineanalytik für das Kläranlagenlabor.

Zur Prozessautomation muss Online-Messtechnik eingesetzt werden. Messbereich und Messgenauigkeit müssen passend zur Probenahmestelle und den Automationszielen gewählt werden. Zudem sind deren hohe Messgenauigkeit und -präszision durch regelmäßige Vergleichsmessungen zu kontrollieren. Dies gilt sowohl für den PO_4-P-Analyser als auch für die Trübungs- und SAK-Sonden.

Es konnte keine Korrelation zwischen Trübung und AFS festgestellt werden, sodass die Trübung keinen geeigneten Surrogatparameter für AFS darstellt.

Nach DIN EN ISO 17294-2 können die Parameter P_{ges} und $P_{gelöst}$ auch mit einem Massenspektrometer mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP) bestimmt werden. Das ICP-Verfahren „knackt“ zuerst sämtliche komplexe chemische Verbindungen[1] in ihre Einzelteile auf und misst anschließend als Phosphat. Dafür werden die Proben zuerst durch einen Aufschluss aufbereitet. Dieses Verfahren ist zu aufwendig für ein Labor auf einer Kläranlage, denn es erfordert sowohl spezielle Gerätschaften als auch chemisches Fachpersonal. Die schwer aufzuschließenden P-haltigen Verbindungen bleiben mit den Küvettentests unerkannt und die P-Messwerte werden somit unterbewertet. Vergleichsmessungen haben aufgezeigt, dass im Abwasser P-haltige Verbindungen enthalten sind, die mit Hilfe der Küvettentests unzureichend erfasst werden. Im Rahmen dieses Intensivmonitorings waren die P_{ges} (ICP)-Konzentrationen im Kläranlagenablauf deutlich höher als die P_{ges} (Küvette)-Konzentrationen.

[1] Diese schwer aufzuschließenden Verbindungen werden z. B. in Galvanikbetrieben eingesetzt.

9. Literaturverzeichnis

BAUMANN, P., JEDELE, K. (Hrsg.) 2019: Phosphorelimination, Optimierung auf Kläranlagen Praxisleitfaden für den Betrieb von Kläranlagen, DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL. 2. Auflage, Stand Juni 2019. Aufl. DWA Landesverband Baden-Württemberg, Stuttgart. ISBN 9783887218157.

BEVER, J. G., STEIN, A., TEICHMANN, H. (Hrsg.) 2002: Weitergehende Abwasserreinigung. 4. Auflage. Aufl. Oldenbourg Industrieverlag, München. ISBN 9783486265279.

DWA (Hrsg.) 2011: Arbeitsblatt DWA-A 202 - Chemisch-physikalische Verfahren zur Elimination von Phosphor aus Abwasser, Hennef.

DWA (Hrsg.) 2019: Aktivkohleeinsatz auf kommunalen Kläranlagen zur Spurenstoffentfernung Verfahrensvarianten, Reinigungsleistung und betriebliche Aspekte. 1. Auflage. Aufl., Hennef (DWA-Themen, 2019, T1). ISBN 9783887217983.

EUROPÄISCHE UNION 1991: Richtlinie des Rates vom 21. Mai 1991 über die Behandlung von kommunalem Abwasser 91/271/EWG.

EUROPÄISCHE UNION 2024: RICHTLINIE (EU) 2024/3019 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 27. November 2024 über die Behandlung von kommunalem Abwasser Richtlinie (EU) 2024/3019, vom Neufassung. Fundstelle: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202403019.

GÖTZ, C., OTTO, J., SINGER, H. 2015: Überprüfung des Reinigungseffekts Auswahl geeigneter organischer Spurenstoffe. Aqua & Gas (2), S. 34–40.

GUJER, W. 2007: Siedlungswasserwirtschaft. 3. Aufl. Springer, Berlin Heidelberg New York. ISBN 978-3-540-34329-5.

HAHN, H. H. 1987: Wassertechnologie Fällung, Flockung, Separation. Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN 9783540179672.

IGKB (Hrsg.) 2005: Bodensee-Richtlinien 2005 mit VwV zu ihrer Einführung in Baden-Württemberg., IGKB INTERNATIONALE GEWÄSSERSCHUTZKOMMISSION FÜR DEN BODENSEE.

KOHLGRÜBER, V., ACOSTA, L., KORNMANN, B., ZETTL, U., LAUNAY, M. A. 2023: Phosphorelimination und Spurenstoffelimination - Zwei Herausforderungen eine Lösung? DWA Landesverbandstagung Baden-Württemberg, Pforzheim, 2023.

KOMS (Hrsg.) 2020a: Leitfaden Machbarkeitsstudien zur Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen. Hg. v. KOMPETENZZENTRUM SPURENSTOFFE BADEN-WÜRTTEMBERG.

KOMS (Hrsg.) 2020b: Spurenstoffe im Abwasser Eine Handlungsempfehlung für Kommunen. Hg. v. KOMPETENZZENTRUM SPURENSTOFFE BADEN-WÜRTTEMBERG. Stuttgart.

KOMS (Hrsg.) 2021: Untersuchungen zur Kombination von weitestgehender P-Elimination und Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen Stufe 1. Hg. v. KOMPETENZZENTRUM SPURENSTOFFE BADEN-WÜRTTEMBERG, KOMPETENZZENTRUM SPURENSTOFFE BADEN-WÜRTTEMBERG.

ROTT, E. 2016: Untersuchungen zur Elimination von Phosphor aus phosphonathaltigen Industrieabwässern. Dissertation, UNIVERSITÄT STUTTGART Stuttgart. Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwitschaft.

SCHÖLZEL, S., REISER, B., ALT, K., SOUFIANE, F., BENSTÖM, F., PALMOWSKI, L., WINTGENS, T. 2023: Empfehlungen zur Dimensionierung von GAK-Filtern in Bezug auf deren Feststoffbeladung Ergebnisse des Forschungsprojekts SOLIDUS. Korrespondenz Abwasser, Abfall. 70 (6), S. 443–448.

STAPF, M., SCHUMANN, P., VÖLKER, J., MIEHE, U. 2017: Studie über Effekte und Nebeneffekte bei der Behandlung von kommunalem Abwasser mit Ozon, KOMPETENZZENTRUM WASSER BERLIN GGMBH.

TELGMANN, U., BOROWSKA, E., FELMEDEN, J., FRECHEN, F.-B. 2020: The locally resolved filtration process for removal of phosphorus and micropollutants with GAC. Journal of Water Process Engineering. 35. DOI: 10.1016/j.jwpe.2020.101236.

UMBW (Hrsg.) 2012: Phosphor-Rückgewinnungsstrategie Baden-Württemberg. Hg. v. MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT BADEN-WÜRTTEMBERG. Stuttgart.

UMBW (Hrsg.) 2020: Handlungskonzept Abwasser Vorgezogene Öffentlichkeitsbeteiligung. Hg. v. MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT BADEN-WÜRTTEMBERG.

WUNDERLIN, P., MEIER, A., GRELOT, J. 2019: Pulveraktivkohle: Verfahren und Abtrennstufen. Hg. v. VSA, VSA PLATTFORM "VERFAHRENSTECHNIK MIKROVERUNREINIGUNG".

10. Anhang

10.1 Verfahrensschemata weitere Kläranlagen

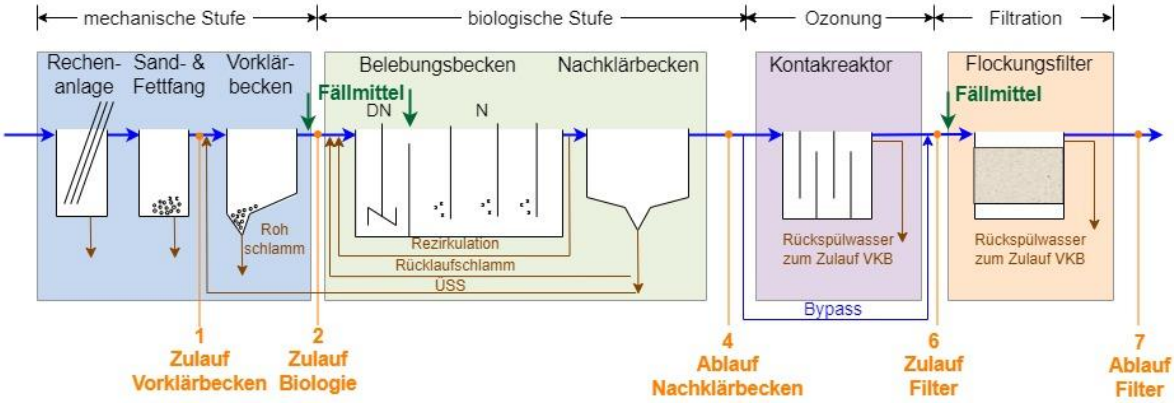


Abbildung 10-1: Verfahrensschema der Kläranlage Eriskirch

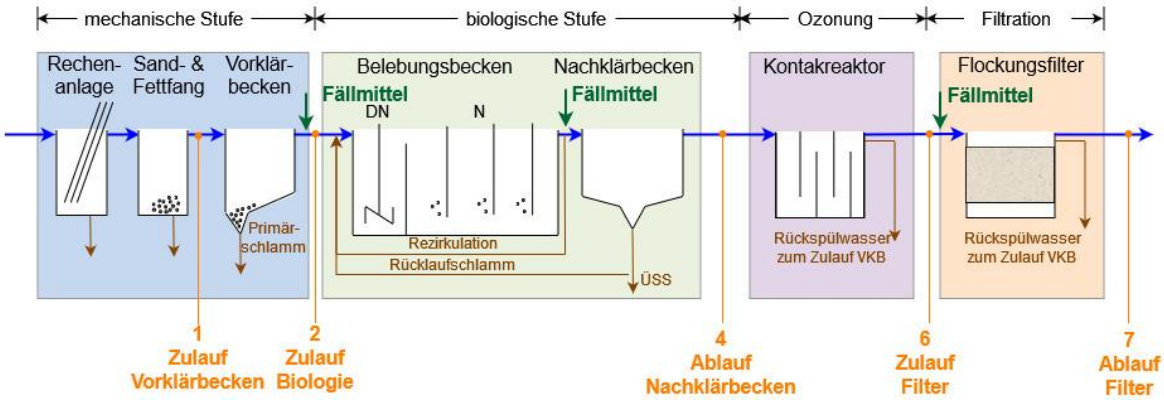


Abbildung 10-2: Verfahrensschema der Kläranlage Friedrichshafen

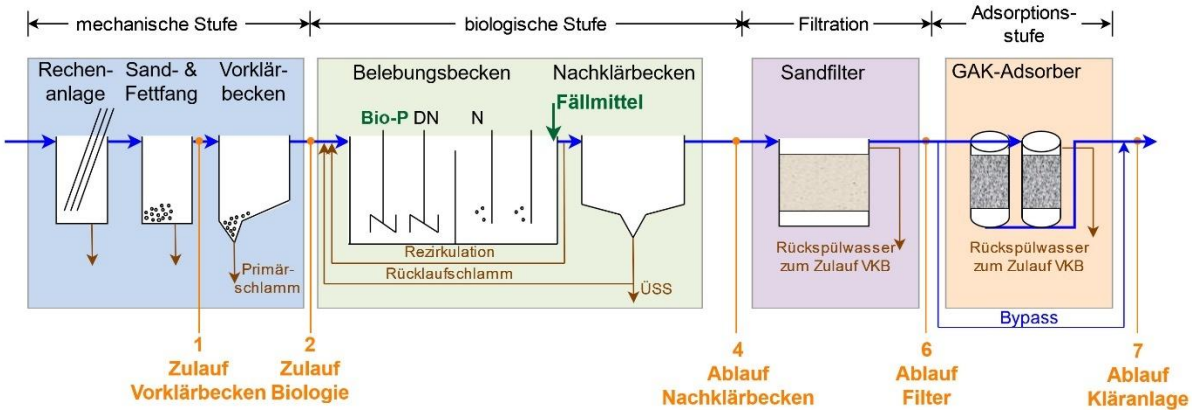


Abbildung 10-3: Verfahrensschema der Kläranlage Dagersheim-Darmsheim

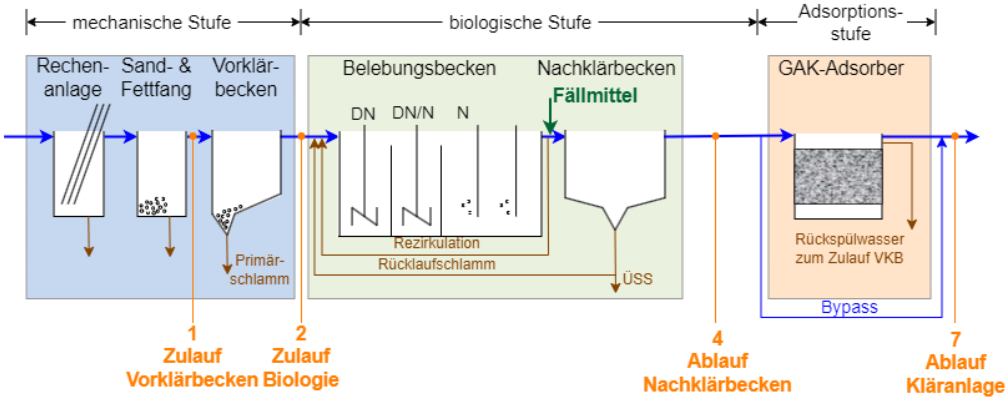


Abbildung 10-4: Verfahrensschema der Kläranlage Immendingen-Geisingen

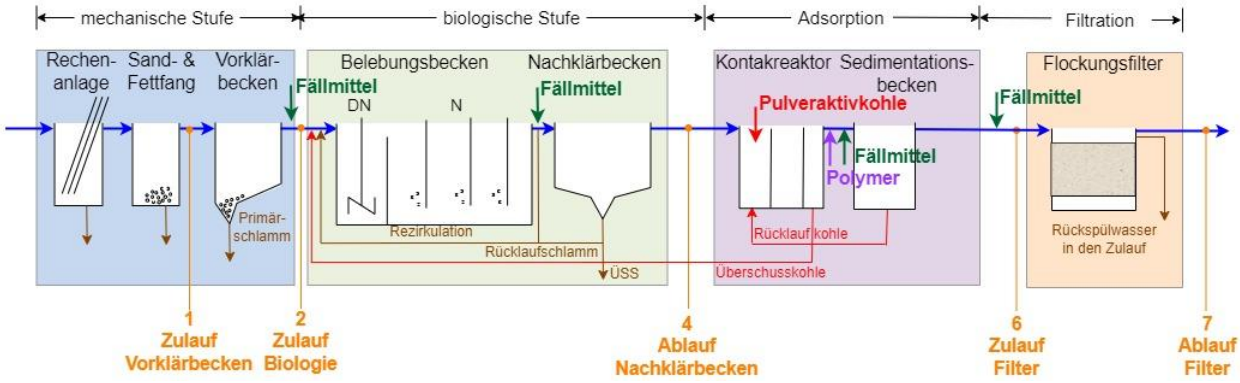


Abbildung 10-5: Verfahrensschema der Kläranlage Kressbronn-Langenargen

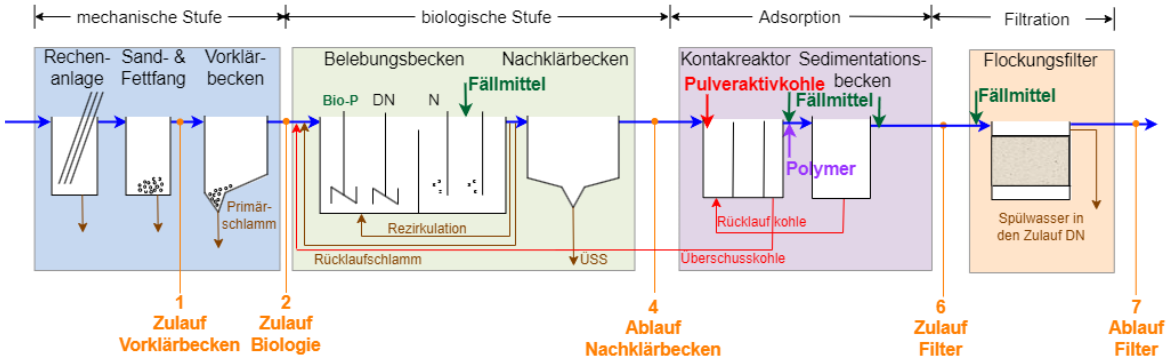


Abbildung 10-6: Verfahrensschema der Kläranlage Mannheim

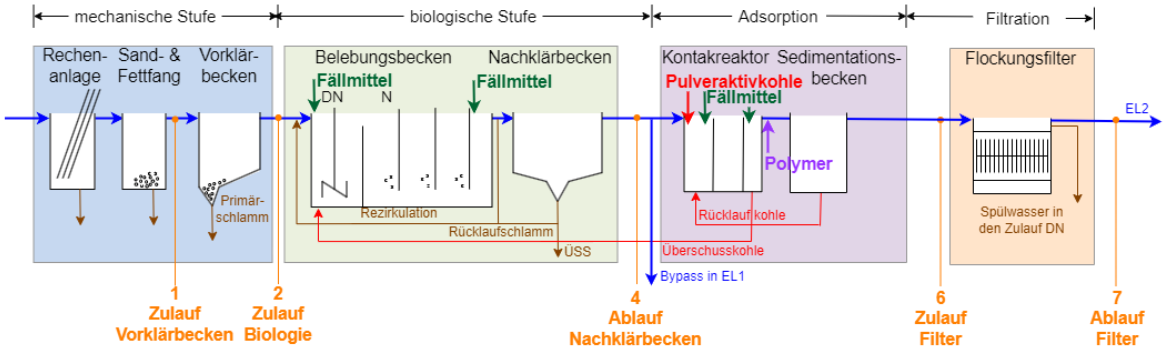


Abbildung 10-7: Verfahrensschema der Kläranlage Wendlingen

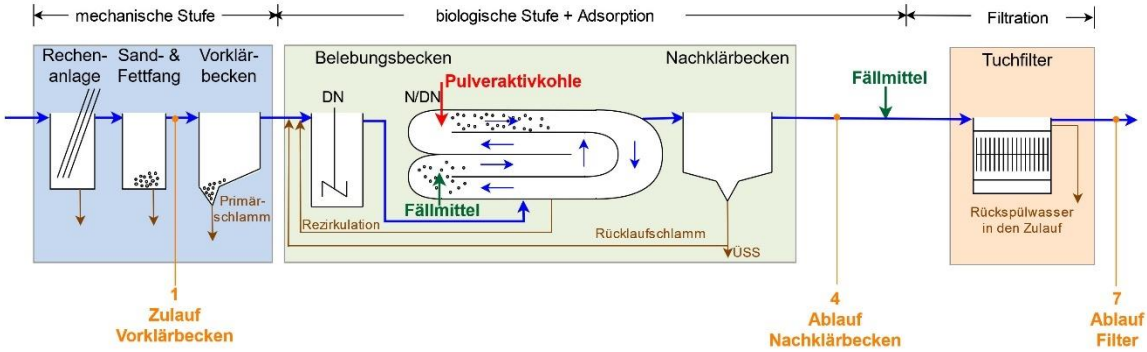


Abbildung 10-8: Verfahrensschema der Kläranlage mittleres Glemstal (Leonberg)

10.2 Auswertung der Betriebsdaten hinsichtlich P_{ges} (2019 bis 2021)

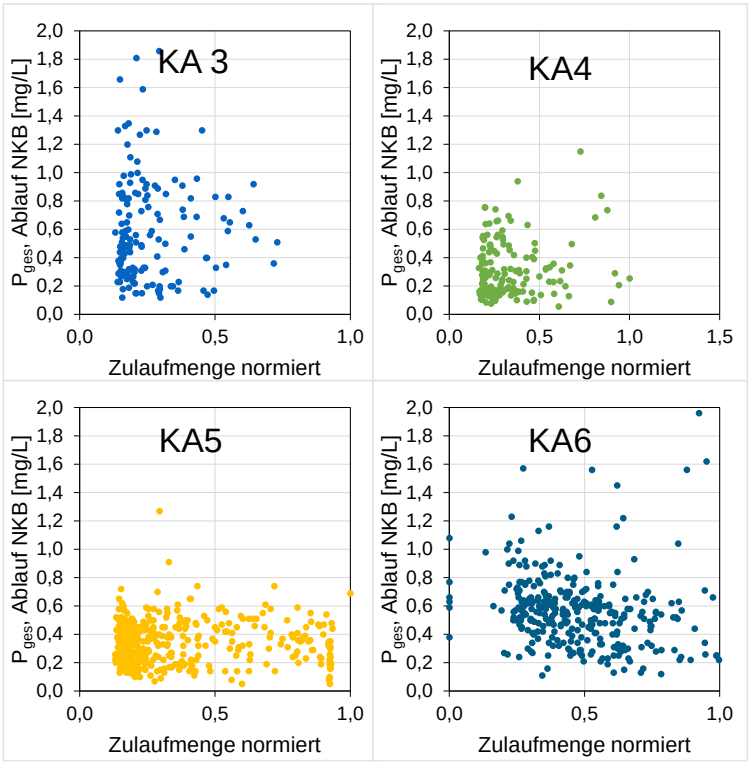


Abbildung 10-9: P_{ges}-Konzentration im Ablauf der Nachklärung von vier Kläranlagen in den Jahren 2019 bis 2021 in Abhängigkeit der normierten Abwassermenge

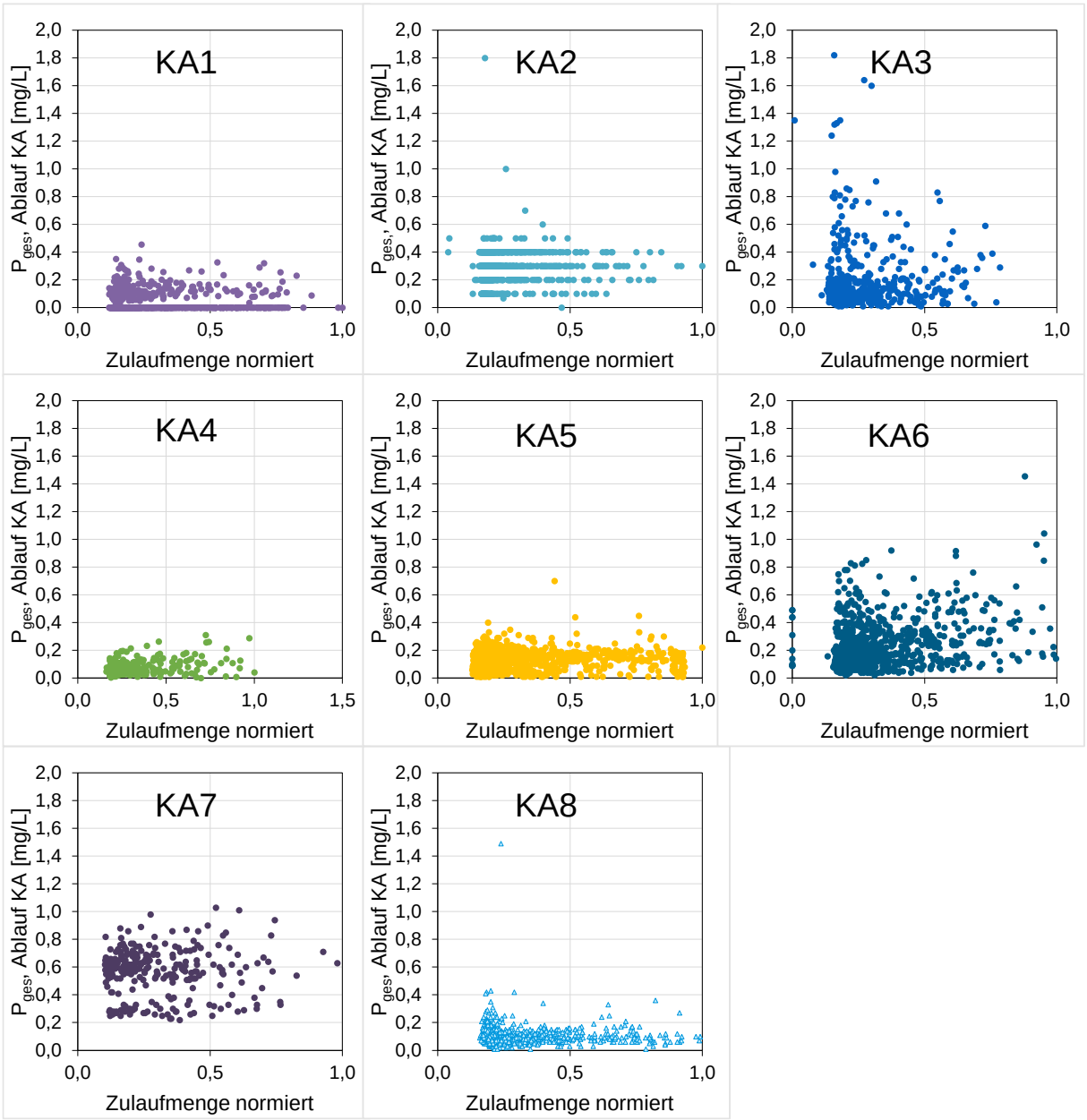


Abbildung 10-10: P_{ges}-Konzentration im Ablauf der betrachteten Kläranlagen in den Jahren 2019 bis 2021 in Abhängigkeit der normierten Abwassermenge

10.3 Spurenstoffelimination in der biologischen Stufe in Abhängigkeit der Zuflussmenge (normiert)

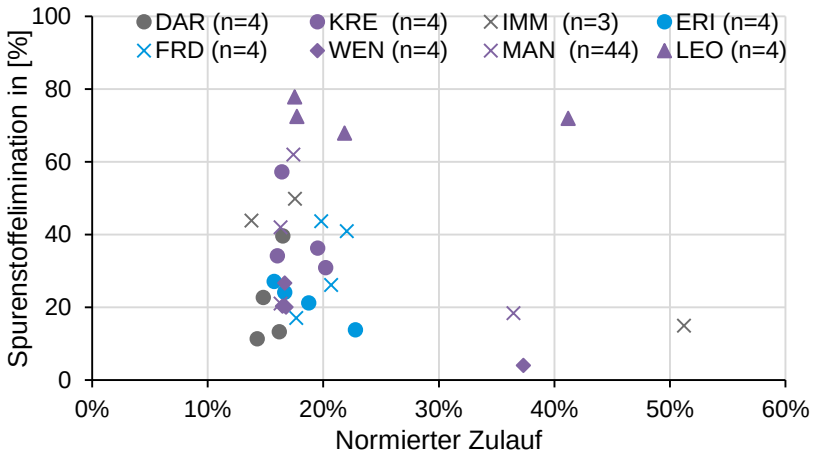


Abbildung 10-11: Spurenstoffelimination in der biologischen Stufe in Abhängigkeit des normierten Zuflusses

10.4 P-Elimination in der nachgeschalteten Stufe

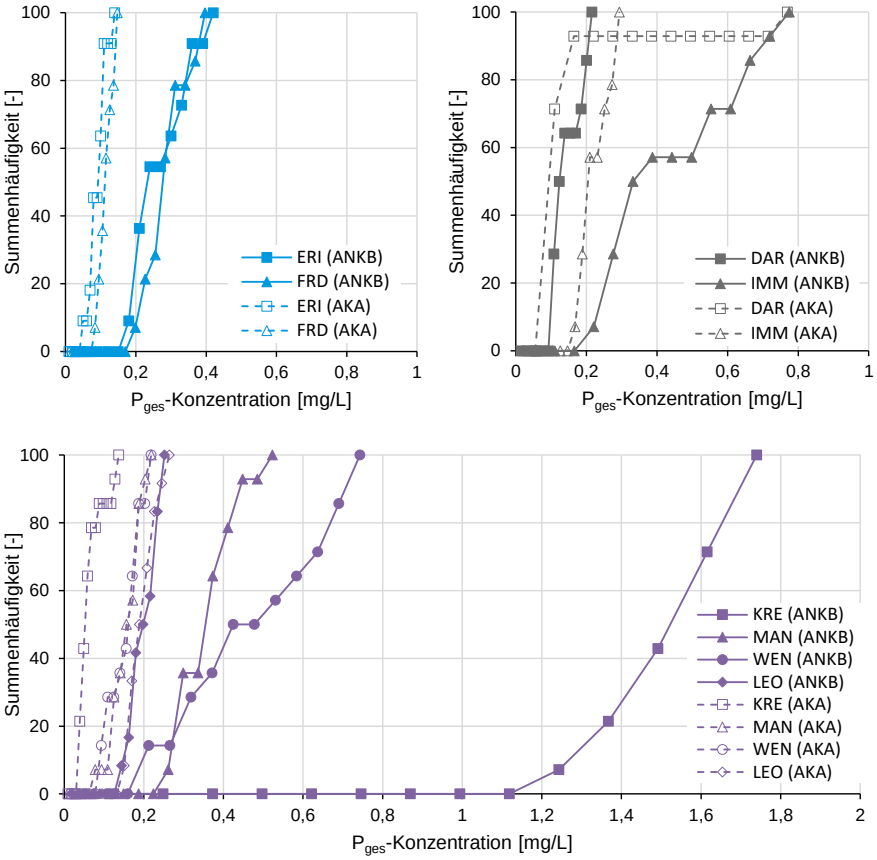


Abbildung 10-12: Summenkurven der P_{ges}-Konzentration im Zulauf der nachgeschalteten Stufe (gefüllte Symbole)) und im Ablauf der Kläranlage/nachgeschalteten Stufe (ungefüllte Symbole) sortiert nach den Spurenstoffeliminationsverfahren

10.5 CSB-Fraktionen an unterschiedlichen Probenahmestellen

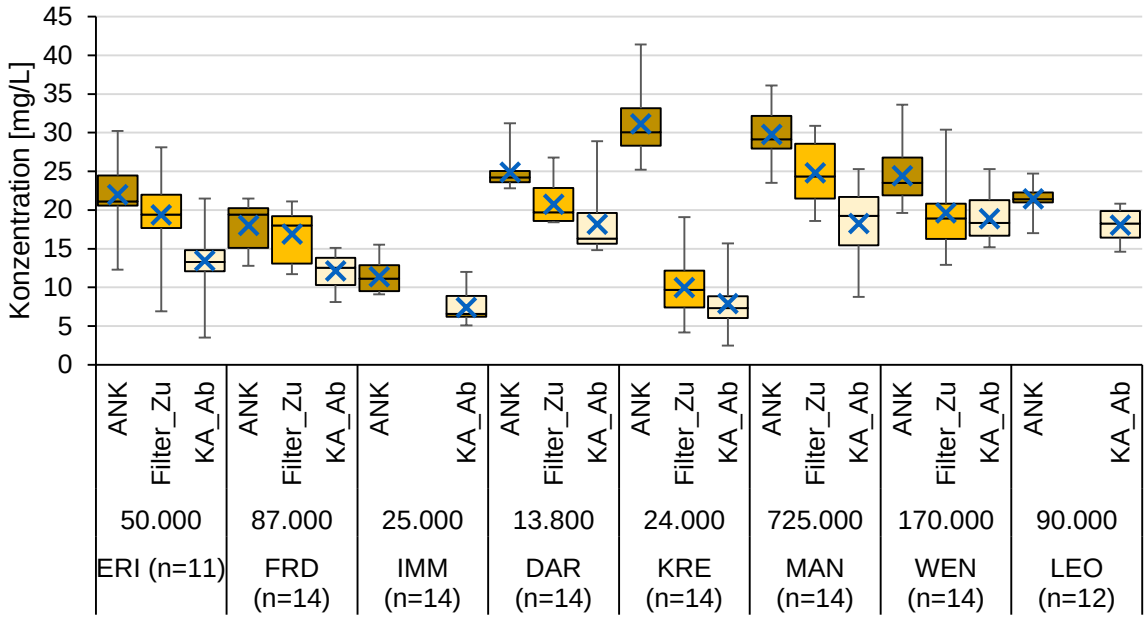


Abbildung 10-13: CSB_{ges}-Konzentrationen im Ablauf Nachklärung, Zulauf und Ablauf Filter für die acht Kläranlagen im Vergleich

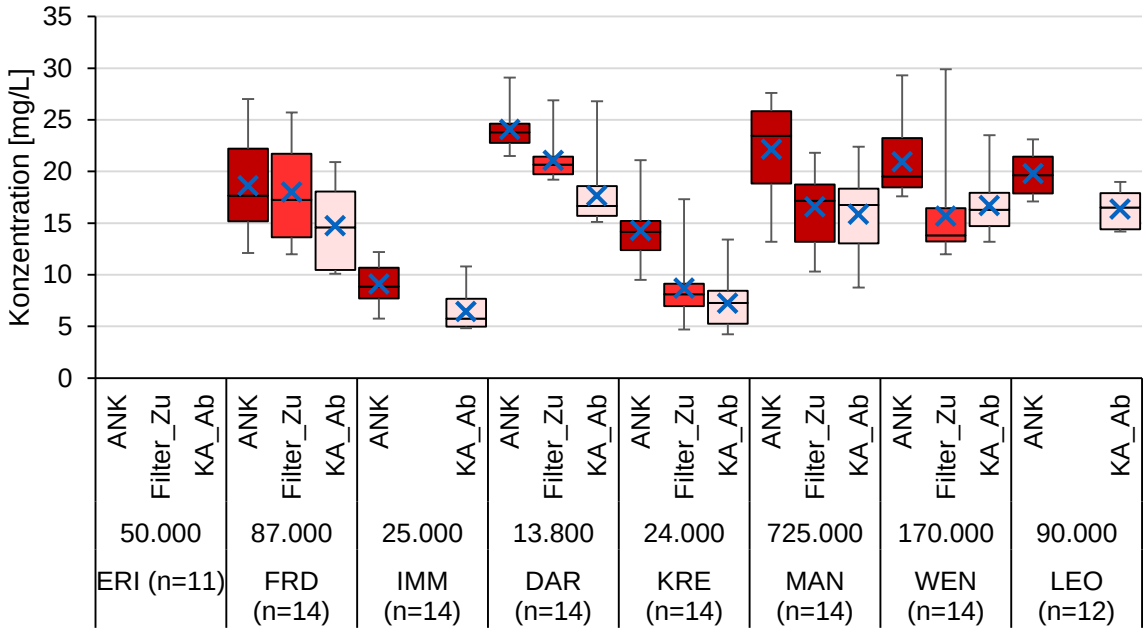


Abbildung 10-14: $CSB_{gelöst}$-Konzentrationen im Ablauf Nachklärung, Zulauf und Ablauf Filter für die acht Kläranlagen im Vergleich

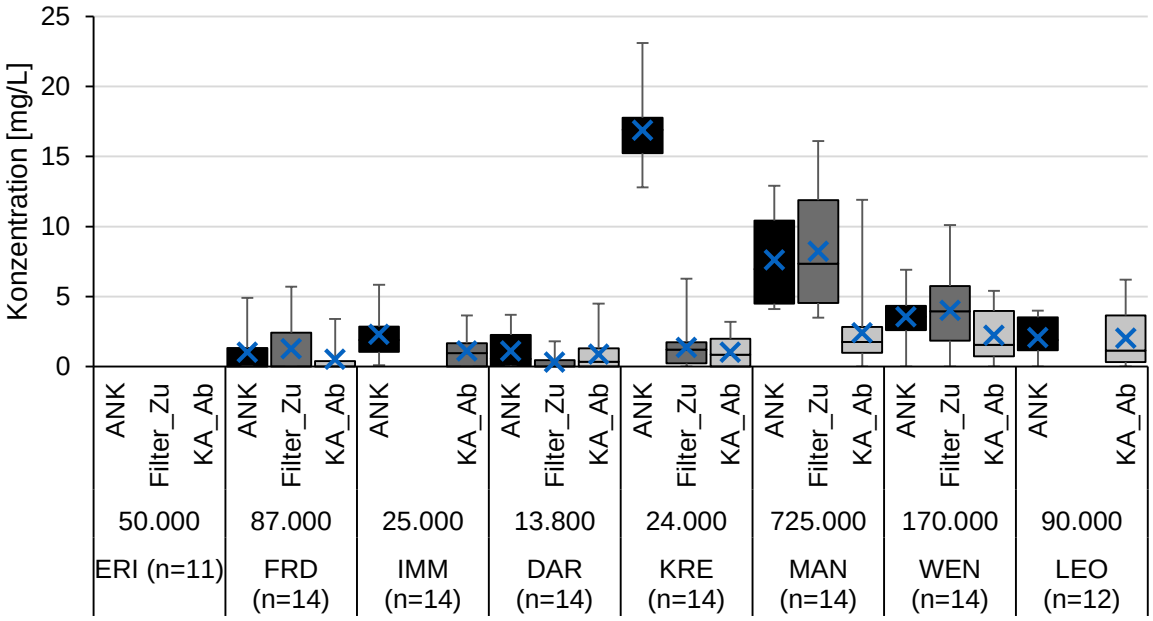


Abbildung 10-15: CSB_{part}-Konzentrationen im Ablauf Nachklärung, Zulauf und Ablauf Filter für die acht Kläranlagen im Vergleich