

Texte

173/2020

Prioritäre Stoffe in kommunalen Kläranlagen

Ein deutschlandweit harmonisiertes Monitoring

TEXTE 173/2020

Prioritäre Stoffe in kommunalen Kläranlagen

Ein deutschlandweit harmonisiertes Vorgehen

von

Snezhina Toshovski, Maria Kaiser, PD Dr. Stephan Fuchs
Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG),
Fachbereich Siedlungswasserwirtschaft und
Wassergütwirtschaft, Karlsruhe

Dr. Frank Sacher, Astrid Thoma, Veronika Kümmel
DVGW-Technologiezentrum Wasser (TZW),
Abteilung Analytik und Wasserbeschaffenheit, Karlsruhe


Benedikt Lambert
BIOPLAN Landeskulturgesellschaft, Sinsheim

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
info@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

/umweltbundesamt.de

/umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG), Fachbereich Siedlungswasserwirtschaft und Wassergütewirtschaft
Gotthard-Franz-Str. 3, Geb. 50.31
76131 Karlsruhe

Abschlussdatum:

April 2020

Redaktion:

Fachgebiet II 2.7 Bodenzustand und Bodenmonitoring
Antje Ullrich

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Oktober 2020

Dieses Projekt wurde von den Bundesländern finanziert und vom Umweltbundesamt fachlich und administrativ begleitet.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Prioritäre Stoffe in kommunalen Kläranlagen und Entwässerungssystemen

Das Ziel dieses zwischen den Bundesländern koordinierten und methodisch harmonisierten Vorhabens war es, die vorhandene Datenbasis zur Quantifizierung der Einträge prioritärer Stoffe aus den urbanen Abwasserpfeifen, insbesondere kommunalen Kläranlagen, zu verbessern. Hierzu wurden die Abläufe von 49 repräsentativ über Deutschland verteilten kommunalen Kläranlagen untersucht. Bei fünf der Anlagen wurden zusätzlich die Zuläufe und Schlammwege untersucht, um Aussagen zum Stoffrückhalt auf den Kläranlagen treffen zu können. Weiterhin wurden zwei Regenklärbecken und sechs Regenüberlaufbecken beprobt. In den Zu- und Ablaufproben, die als Langzeit-Mischproben (7-Tage-Mischprobe) vorlagen, wurden 54 Einzelsubstanzen der Stoffgruppen Schwermetalle, Industriechemikalien, perfluorierte Verbindungen, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe und Pflanzenschutzmittel sowie typische Abwasserparameter analysiert. Hierbei kamen sensitive, teilweise neu entwickelte analytische Methoden zum Einsatz.

Eine Reihe von Stoffen konnten in den Proben der unterschiedlichen Abwasserpfeifen an den Schnittstellen zu den Gewässern nicht oder nur in Einzelproben nachgewiesen werden. Für 20 Stoffe, die im Ablauf der Kläranlagen mit mehr als 50 % der Werte oberhalb der Bestimmungsgrenze analysiert wurden, konnten mediane und mittlere Ablaufkonzentrationen und Emissionsfaktoren abgeleitet werden. Für diese Stoffe ist eine Quantifizierung der mittleren Emissionen in Deutschland möglich. Für eine große Anzahl weiterer Parameter liegt eine solide Datengrundlage für weitere Aufgaben- und Fragestellungen vor.

Abstract: Priority Substances in Wastewater Treatment Plants and Drainage Systems

The aim of this project, which was methodologically harmonized and coordinated between the federal states, was to improve the existing database for the quantification of emissions of priority substances from municipal wastewater treatment plants. For this purpose, the effluents of 49 municipal wastewater treatment plants representatively distributed across Germany were sampled. In five of the 49 plants, additional investigations of inflow and sludge pathways were conducted. They form the basis for the assessment of the retention performance of conventional waste water treatment plants for priority pollutants. In addition, two storm water outlets and six combined sewer overflow tanks were sampled. In all samples 54 individual substances like heavy metals, industrial chemicals, perfluorinated compounds, polycyclic aromatic hydrocarbons, pesticides and standard waste water parameters were examined. Sensitive, partly newly developed analytical methods were used.

A number of substances could not be quantified in any effluent, storm water or combined overflow sample. Some occurred only in a few samples. However, for 20 substances which measured above the LOQ in > 50 % of the effluent samples, median, mean concentrations and emission factors could be derived. For these substances, a quantification of the mean emissions in Germany is possible. For a large number of other substances a solid data basis for additional tasks and questions is available.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	VI
Tabellenverzeichnis.....	IX
Abkürzungsverzeichnis.....	XIII
Zusammenfassung.....	1
Summary.....	6
1 Einführung.....	10
2 Auswahl und Charakterisierung der Standorte.....	13
2.1 Kläranlagen.....	13
2.2 Regenwassereinleitungen und Mischwasserentlastungen.....	18
3 Probenahmestrategie.....	20
3.1 Kläranlagen.....	20
3.2 Regenwassereinleitungen und Mischwasserentlastungen.....	24
4 Analytik der prioritären Stoffe und Begleitparameter.....	28
4.1 Parameterauswahl.....	28
4.2 Probenaufbereitung.....	30
4.2.1 Abwasserproben.....	30
4.2.2 Klärschlammproben.....	31
4.3 Analyseverfahren zur Bestimmung der prioritären Stoffe.....	32
4.3.1 Schwermetalle.....	32
4.3.2 Pestizide (Aclonifen, Atrazin, Bifenox, Cybutryn, Dichlorvos, Diuron, Isoproturon, Quinoxifen, Terbutryn).....	34
4.3.3 Polycyclische Kohlenwasserstoffe (PAK), chlorierte Verbindungen, Alkylphenole und DEHP.....	37
4.3.4 Per- und polyfluorierte Verbindungen (PFAS).....	39
4.3.5 Hexabromcyclododecan (HBCDD).....	42
4.4 Analyseverfahren zur Bestimmung der Begleitparameter.....	44
4.4.1 Ammonium- und Nitrat-Stickstoff in den Kläranlagenproben.....	44
4.4.2 Weitere Begleitparameter in den Kläranlagenproben.....	45
4.4.3 Begleitparameter in den Proben der Mischwasserentlastungen und Regenwassereinleitungen.....	46
4.5 Methodvalidierung und Vergleichsuntersuchung.....	46
4.5.1 Methodvalidierung.....	46
4.5.2 Vergleichsuntersuchung.....	50

4.5.3	Maßnahmen zur Qualitätssicherung	53
5	Ergebnisse	56
5.1	Datenanalysen	56
5.1.1	Umgang mit Werten kleiner Bestimmungsgrenze.....	56
5.1.2	Ausreißerprüfung.....	56
5.1.3	Statistische Kennwerte	57
5.2	Mittlere Konzentrationen des Gesamtdatenbestandes	57
5.2.1	Begleitparameter	57
5.2.2	Schadstoffe	60
5.3	Stoffgruppenspezifische Befunde	63
5.3.1	Schwermetalle	63
5.3.2	Alkylphenole	66
5.3.3	Di-(2-ethylhexyl)phthalat (DEHP).....	67
5.3.4	Perfluorierte Verbindungen.....	69
5.3.5	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK ₁₆).....	70
5.3.6	Pflanzenschutzmittel/Biozide (Diuron, Isoproturon, Terbutryn).....	72
5.4	Vergleich mit Literaturdaten.....	74
5.5	Saisonalität der Ablaufkonzentrationen	80
5.6	Regenwassereinleitungen und Mischwasserentlastungen.....	83
5.6.1	Monitoringdaten der Regenwassereinleitungen.....	83
5.6.1.1	Begleitparameter	83
5.6.1.2	Schadstoffe	84
5.6.2	Monitoringdaten der Mischwasserentlastungen	89
5.6.2.1	Begleitparameter.....	89
5.6.2.2	Schadstoffe	89
5.6.3	Standortspezifische mittlere Konzentrationen.....	93
5.7	Zusammenfassende Betrachtung der Eintragspfade.....	95
6	Stoffrückhalt in kommunalen Kläranlagen.....	99
6.1	Reinigungsleistung	99
6.2	Einflüsse von Temperatur und hydraulischer Belastung	102
6.3	Vergleich mit Literaturdaten.....	103
7	Quantifizierung der Stoffeinträge aus kommunalen Kläranlagen und Kanalisationssystemen..	106
7.1	Ableitung repräsentativer differenzierter mittlerer Ablaufkonzentrationen für kommunale Kläranlagen	106

7.1.1	Definition der Differenzierungsmerkmale	106
7.1.2	Hypothesen	107
7.1.3	Prüfung der Differenzierbarkeit	109
7.1.4	Zusammenfassung/Empfehlungen	110
7.1.5	Ableitung repräsentativer Emissionsfaktoren für kommunale Kläranlagen	110
7.2	Quantifizierung der Stoffeinträge über die urbanen Eintragspfade in die Gewässer Deutschlands.....	113
8	Fazit	116
	Danksagung	119
	Quellenverzeichnis	120
A	Anhang Materialien.....	126
A.1	Statistische Analysen zur Versuchsplanung des Kläranlagenmonitorings	126
A.1.1	Datenbasis.....	126
A.1.2	Statistische Analyse	127
A.1.3	Fazit und Empfehlungen für die Versuchsplanung	130
A.2	Fragebogen zur Kläranlagencharakteristik zur Vorauswahl der Anlagen	132
A.3	Erhebungsbogen zur Organisation, Kläranlagencharakteristik und Probenahme der ausgewählten Anlagen.....	133
A.4	Untersuchte Regenwassereinleitungen (RKB) und Mischwasserentlastungen (RÜB).....	138
A.5	Probenahmeprotokoll.....	140
B	Anhang Daten.....	141
B.1	Statistische Kenngrößen der Begleitparameter in Zu- und Ablauf der fünf Kläranlagen im Detailprogramm	141
B.2	Statistische Kenngrößen der Begleitparameter in den Schlämmen der fünf Kläranlagen im Detailprogramm	143
B.3	Statistische Kenngrößen der gemessenen Schadstoffkonzentrationen	144
B.3.1	Konzentrationen im Zulauf der fünf untersuchten Kläranlagen.....	144
B.3.2	Konzentrationen im Ablauf der 49 untersuchten Kläranlagen	148
B.3.3	Konzentrationen im Primärschlamm der fünf im Detail untersuchten Kläranlagen	151
B.3.4	Konzentrationen Überschussschlamm der fünf im Detail untersuchten Kläranlagen ...	154
B.4	Vergleich ausgewählter statistischer Kennwerte der Ablaufkonzentrationen unterschiedlicher Studien	157
B.5	Begleitparameter: statistische Auswertung der Ergebnisse der Beprobung von Mischwasserentlastungen und Regenwassereinleitungen für die Datenkollektive der volumenproportionalen und problembehafteten Proben	162

B.5.1	Statistische Auswertung der volumenproportionalen Proben – Feststoff-Konzentrationen und Glühverlust.....	162
B.5.2	Statistische Auswertung der volumenproportionalen Proben – Konventionelle Abwasserparameter.....	163
B.5.3	Statistische Auswertung der problembehafteten Proben – Feststoff-Konzentrationen und Glühverlust.....	164
B.5.4	Statistische Auswertung der problembehafteten Proben – Konventionelle Abwasserparameter.....	165
B.6	Statistische Kennwerte prioritärer Stoffe in Mischwasserentlastungen und Regenwassereinleitungen	166
B.6.1	Statistische Kennwerte der volumenproportionalen Proben - Regenwassereinleitungen	166
B.6.2	Statistische Auswertung der volumenproportionalen Proben - Mischwasserentlastungen	170
B.6.3	Statistische Auswertung der problembehafteten Proben - Mischwasserentlastungen	174
B.6.4	Statistische Kennwerte für prioritäre Stoffe in Regenwassereinleitungen unter Berücksichtigung aller Proben	178
B.6.5	Statistische Kennwerte für prioritäre Stoffe in Mischwasserentlastungen unter Berücksichtigung aller Proben	182
B.7	Stoffkonzentrationen in Regenwassereinleitungsproben im Vergleich mit Literaturwerten	186
B.8	Stoffkonzentrationen in Überlaufmischproben im Vergleich mit Literaturwerten	202
B.9	Vergleich der Reinigungsleistung konventioneller Kläranlagen mit Literaturwerten.....	221
B.10	Anteil der Messwerte oberhalb des BUW bzw. des halben BUW für die Schnittstellen zwischen Siedlungsentwässerung und Gewässerkörper	225
B.10.1	Auswertung Kläranlagenablauf.....	225
B.10.2	Auswertung Regenwassereinleitungen	228
B.10.3	Auswertung Mischwassereinleitungen.....	231
B.11	Grundlagen für die Ableitung von differenzierten Ablaufkonzentrationen	234
B.11.1	Ausprägung der Stoffeigenschaften Sorption, Abbaubarkeit und Volatilisation sowie Verwendung und Herkunftsbereiche, Haupteintragspfad im Siedlungsgebiet und Rückhalt in der Kläranlage	234
B.11.2	Statistische Kennwerte der Ablaufkonzentrationen in Abhängigkeit vom Differenzierungsmerkmal Art des dominanten Entwässerungssystems im Einzugsgebiet (Trennsystem (TS) oder Mischsystem (MS)).....	237

B.11.3	Statistische Kennwerte der Ablaufkonzentrationen in Abhängigkeit vom Differenzierungsmerkmal Trockenwetter-(TW) oder Regenwettersituation (RW) bei Mischsystem-Anlagen	240
B.11.4	Statistische Kennwerte der Ablaufkonzentrationen in Abhängigkeit vom Differenzierungsmerkmal Lage des Einzugsgebietes innerhalb oder außerhalb vom Agglomerationsraum	243
B.11.5	Statistische Kennwerte der Ablaufkonzentrationen in Abhängigkeit vom Differenzierungsmerkmal Größenklasse (GK) bezogen auf die behandelte Abwasserlast in Einwohnerwerten	246
B.11.6	Graphiken für die Verteilung der Ablaufkonzentrationen in Abhängigkeit von den Differenzierungsmerkmalen	251
B.11.7	Bewertungsmatrix für die Ableitung von differenzierten Ablaufkonzentrationen je nach Differenzierungsmerkmal.....	262
B.12	Prüfung saisonaler Einflüsse auf die Ableitung der Emissionsfaktoren	264
B.12.1	Monatliche Ablaufkonzentrationen und Ablaufrachten für Diuron, Isoproturon und Terbutryn	264
B.12.2	Monatliche Ablaufkonzentrationen und Ablaufrachten für Fluoranthen und Pyren....	265

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Ausgewählte Kläranlagenstandorte	15
Abbildung 2:	Behandelte Abwasserlast der untersuchten Kläranlagen in Einwohnerwerten (EW) im Jahr 2016 (UBA 2018)	16
Abbildung 3:	Probenahmepunkte auf den kommunalen Kläranlagen	20
Abbildung 4:	Probenahmegefäß: 10-Liter-Edelstahlkanne.....	21
Abbildung 5:	Schematische Darstellung der Vorgehensweise zur Erstellung der 7-Tage-Mischproben.....	22
Abbildung 6:	Transportkisten für Probenahmegefäße (Kläranlage/Labor)	24
Abbildung 7:	Probenahme mit Feststoffsammler am Klärüberlauf eines Regenüberlaufbeckens	25
Abbildung 8:	Homogenisierung mit Tauchpumpe im Feststoffsammler, Probenahmeflaschen, Entnahme der homogenisierten Mischprobe aus dem Feststoffsammler	26
Abbildung 9:	Transportbox für die homogenisierten Mischproben	27
Abbildung 10:	Auftauen der Wasserproben in den Edelstahlgefäßen (links) und Lagerung der abgefüllten Proben in der Kühlkammer (rechts).....	31
Abbildung 11:	Umfüllen einer Wasserprobe aus dem Edelstahlgefäß in eine Braunglasflasche (links) und eine PE-Flasche (rechts).....	31
Abbildung 12:	Klärschlammproben in den Zentrifugenbechern vor dem Zentrifugieren (links) und nach dem Zentrifugieren und Dekantieren der Wasserphase (rechts).....	32
Abbildung 13:	Kontrollkarten für ausgewählte Einzelstoffe	55
Abbildung 14:	Kläranlagenspezifische Ammonium- und Nitrat-Stickstoff-Konzentrationen (Ablauf)	59
Abbildung 15:	Ammonium- und Nitrat-Stickstoff-Konzentrationen (Ablauf) im zeitlichen Verlauf der Probenahme.....	59
Abbildung 16:	Schwermetallablaufkonzentrationen aller 49 Kläranlagen	64
Abbildung 17:	Summenkurven für die Zulaufkonzentrationen aus fünf Kläranlagen und die Ablaufkonzentrationen aus allen 49 Kläranlagen für die Schwermetalle	65
Abbildung 18:	Ablaufkonzentrationen Alkylphenole aller 49 untersuchten Kläranlagen	66
Abbildung 19:	Summenkurven für die Zulaufkonzentrationen aus fünf Kläranlagen und die Ablaufkonzentrationen aus allen 49 Kläranlagen für die Alkylphenole	67
Abbildung 20:	DEHP-Ablaufkonzentrationen aller untersuchten 49 Kläranlagen sortiert nach Größenklassen	68
Abbildung 21:	Summenkurven für die Zulaufkonzentrationen aus fünf Kläranlagen und die Ablaufkonzentrationen aus allen 49 Kläranlagen für DEHP	68
Abbildung 22:	PFOS-Ablaufkonzentrationen aller untersuchten 49 Kläranlagen sortiert nach Größenklassen	69
Abbildung 23:	Fluoranthen-Ablaufkonzentrationen aller untersuchten 49 Kläranlagen sortiert nach Größenklassen	71
Abbildung 24:	Summenkurven für die Zulaufkonzentrationen aus fünf Kläranlagen und die Ablaufkonzentrationen aus allen 49 Kläranlagen für ausgewählte PAK-Vertreter	72

Abbildung 25:	Diuron-, Isoproturon- und Terbutryn-Ablaufkonzentrationen aller untersuchten 49 Kläranlagen sortiert nach Größenklassen	73
Abbildung 26:	Summenkurven für die Zulaufkonzentrationen aus fünf Kläranlagen und die Ablaufkonzentrationen aus allen 49 Kläranlagen für Diuron, Isoproturon und Terbutryn.....	74
Abbildung 27:	Vergleich der Zulaufkonzentrationen unterschiedlicher Studien für a) Schwermetalle, b) Phenole, DEHP und Pflanzenschutzmittel.....	76
Abbildung 28:	Vergleich der Zulaufkonzentrationen unterschiedlicher Studien für a) perfluorierte Verbindungen und b) PAK.....	77
Abbildung 29:	Vergleich der Ablaufkonzentrationen unterschiedlicher Studien für a) Schwermetalle und b) Phenole, DEHP und Pflanzenschutzmittel.....	78
Abbildung 30:	Vergleich der Ablaufkonzentrationen unterschiedlicher Studien für a) perfluorierte Verbindungen und b) PAK.....	79
Abbildung 31:	Zeitlicher Verlauf der Ablauf-Konzentrationen für Fluoranthen und Pyren	81
Abbildung 32:	Zeitlicher Verlauf der Ablauf-Konzentrationen für Diuron, Isoproturon und Terbutryn.....	82
Abbildung 33:	Vergleich der Stoffkonzentrationen in den untersuchten Abwasserströmen: a) Kläranlagenablauf und Mischwasserentlastung (RÜB), b) Kläranlagenablauf und Regenwassereinleitung (RKB), c) Regenwassereinleitung (RKB) und Mischwasserentlastung (RÜB).....	98
Abbildung 34:	Einordnung der fünf detailliert betrachteten Anlagen in den Gesamtdatenbestand.....	99
Abbildung 35:	Reinigungsleistung in kommunalen Kläranlagen	101
Abbildung 36:	Reinigungsleistung in Abhängigkeit der hydraulischen Belastung in $m^3/(d \cdot EW)$ (gelb = Trockenwetter; blau = Regenwetter)	103
Abbildung 37:	Reinigungsleistung in Abhängigkeit der Temperatur (blau = Winterproben; gelb = Sommerproben)	103
Abbildung 38:	Vergleich der Reinigungsleistung der Kläranlagen mit Literaturwerten	105
Abbildung 39:	Stoffeinträge über urbane Abwasserströme in kommunale Kläranlagen, Regenwassereinleitungen und Mischwasserentlastungen in Deutschland im Mittel für den Zeitraum 2012-2016	115
Abbildung 40:	Summenhäufigkeit der Stickstoff-Konzentrationen im Kläranlagenablauf, differenziert nach Größenklassen	129
Abbildung 41:	Erhebungsbogen Kläranlagenmonitoring.....	133
Abbildung 42:	Probennahmeprotokoll Kläranlagenmonitoring	140
Abbildung 43:	Graphiken für die Verteilung der Ablaufkonzentrationen von Blei und Cadmium in $\mu g/l$ in Abhängigkeit von den Differenzierungsmerkmalen	251
Abbildung 44:	Graphiken für die Verteilung der Ablaufkonzentrationen von Nickel und Quecksilber in $\mu g/l$ in Abhängigkeit von den Differenzierungsmerkmalen	252
Abbildung 45:	Graphiken für die Verteilung der Ablaufkonzentrationen von 4-iso-Nonylphenol und Di-(2-ethylhexyl)phthalat in $\mu g/l$ in Abhängigkeit von den Differenzierungsmerkmalen.....	253

Abbildung 46:	Graphiken für die Verteilung der Ablaufkonzentrationen von Perfluorbutanoat (PFBA) und Perfluorpentanoat (PFPA) in µg/l in Abhängigkeit von den Differenzierungsmerkmalen	254
Abbildung 47:	Graphiken für die Verteilung der Ablaufkonzentrationen von Perfluorhexanoat (PFHxA) und Perfluorheptanoat (PFHpA) in µg/l in Abhängigkeit von den Differenzierungsmerkmalen	255
Abbildung 48:	Graphiken für die Verteilung der Ablaufkonzentrationen von Perfluoroctanoat (PFOA) und Perfluorbutansulfonat (PFBS) in µg/l in Abhängigkeit von den Differenzierungsmerkmalen	256
Abbildung 49:	Graphiken für die Verteilung der Ablaufkonzentrationen von Perfluoroctansulfonat (PFOS) und Acenaphthen in µg/l in Abhängigkeit von den Differenzierungsmerkmalen	257
Abbildung 50:	Graphiken für die Verteilung der Ablaufkonzentrationen von Fluoren und Phenanthren in µg/l in Abhängigkeit von den Differenzierungsmerkmalen	258
Abbildung 51:	Graphiken für die Verteilung der Ablaufkonzentrationen von Fluoranthren und Pyren in µg/l in Abhängigkeit von den Differenzierungsmerkmalen	259
Abbildung 52:	Graphiken für die Verteilung der Ablaufkonzentrationen von Diuron und Isoproturon in µg/l in Abhängigkeit von den Differenzierungsmerkmalen	260
Abbildung 53:	Graphiken für die Verteilung der Ablaufkonzentrationen von Terbutryn in µg/l in Abhängigkeit von den Differenzierungsmerkmalen.....	261
Abbildung 54:	Bewertungsmatrix für die Ableitung von differenzierten Ablaufkonzentrationen je nach Differenzierungsmerkmal	262

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Verfahrensstufen der Kläranlagen.....	17
Tabelle 2:	Reinigungsleistung der Kläranlagen in Bezug auf konventionelle Abwasserparameter, berechnet anhand der Eigenkontrollwerte für das Jahr 2016.....	17
Tabelle 3:	Übersicht der untersuchten Regenklärbecken (RKB) und Regenüberlaufbecken (RÜB)	19
Tabelle 4:	Anzahl der Proben je Probenahmeort bei Mischwasser- und Trockenwetterzufluss	23
Tabelle 5:	Messsignale für die Ansteuerung der volumenproportionalen Beprobung und angewandte Abflussberechnung.....	26
Tabelle 6:	Liste der untersuchten prioritären Stoffe der OGewV 2016 einschließlich weiterer PAK- und PFC-Einzelsubstanzen	29
Tabelle 7:	Aufschlussbedingungen für die Bestimmung der Schwermetalle.....	33
Tabelle 8:	ICP-MS-Parameter für die Bestimmung von Cadmium, Nickel und Blei	33
Tabelle 9:	AFS-Parameter für die Bestimmung von Quecksilber	34
Tabelle 10:	Anreicherungsbedingungen zur Bestimmung von Pflanzenschutzmittel- und Biozid-Wirkstoffen und -Transformationsprodukte in Abwasserproben.....	35
Tabelle 11:	Anreicherungsbedingungen zur Bestimmung von Pflanzenschutzmittel- und Biozid-Wirkstoffen und Transformationsprodukte in Feststoffen	35
Tabelle 12:	HPLC-MS-MS-Parameter zur Bestimmung von Pflanzenschutzmittel- und Biozid- Wirkstoffen und Biozid-Transformationsprodukten in Abwasserproben	36
Tabelle 13:	Precursor- und Produkt-Ionen zur Analyse von Pflanzenschutzmittel- und Biozid- Wirkstoffen in Abwasserproben.....	36
Tabelle 14:	Anreicherungsbedingungen zur Bestimmung von PAK, chlorierten Verbindungen, Alkylphenolen und DEHP in Abwasserproben.....	37
Tabelle 15:	Anreicherungsbedingungen zur Bestimmung von PAK, chlorierten Verbindungen und Alkylphenolen in Feststoffen.....	38
Tabelle 16:	GC-MS-MS-Parameter zur Bestimmung von PAK, chlorierten Verbindungen, Alkylphenolen und DEHP.....	38
Tabelle 17:	Precursor- und Produkt-Ionen zur Analyse von PAK, chlorierten Verbindungen, Alkylphenolen und DEHP	39
Tabelle 18:	Anreicherungsbedingungen zur Bestimmung von PFAS in Abwasserproben	40
Tabelle 19:	Anreicherungsbedingungen zur Bestimmung von PFAS in Feststoffen	40
Tabelle 20:	HPLC-MS-MS-Parameter zur Bestimmung von PFAS	41
Tabelle 21:	Precursor- und Produkt-Ionen zur Analyse von PFAS	41
Tabelle 22:	Anreicherungsbedingungen zur Bestimmung von HBCDD in Abwasserproben	43
Tabelle 23:	Anreicherungsbedingungen zur Bestimmung von HBCDD und DEHP im Feststoff	44
Tabelle 24:	GC-MS-Parameter zur Bestimmung von HBCDD.....	44
Tabelle 25:	Untersuchungsmethoden der Begleitparameter in den Wasserproben der Kläranlagen	45

Tabelle 26:	Untersuchungsmethoden in den Schlammproben	46
Tabelle 27:	Methoden zur Bestimmung der konventionellen Abwasserparameter	46
Tabelle 28:	Verfahrensparameter für 39 prioritäre Einzelstoffe in Kläranlagenzuläufen.....	48
Tabelle 29:	Verfahrensparameter für 39 prioritäre Einzelstoffe in Kläranlagenabläufen	49
Tabelle 30:	Ergebnisse der ersten Vergleichsuntersuchung	52
Tabelle 31:	Ergebnisse der zweiten Vergleichsuntersuchung.....	54
Tabelle 32:	Mittlere Nährstoffablaufkonzentrationen im Vergleich des deutschlandweiten Monitorings und des 31. Leistungsnachweis der DWA (DWA 2018)	58
Tabelle 33:	Stoffe, die im Kläranlagenablauf nie größer Bestimmungsgrenze nachgewiesen wurden	60
Tabelle 34:	Stoffe mit Einzelbefunden im Kläranlagenablauf.....	61
Tabelle 35:	Statistische Kennwerte der Konzentrationen prioritärer Stoffe in den Ablaufproben.....	61
Tabelle 36:	Statistische Kennwerte der Konzentrationen prioritärer Stoffe in den Ablaufproben.....	62
Tabelle 37:	Probenahmen Regenwassereinleitungen (RKB) und Mischwasserentlastungen (RÜB).....	83
Tabelle 38:	Statistische Kenngrößen der Begleitparameter in Regenwassereinleitungen.....	84
Tabelle 39:	Stoffe, die in den Regenwassereinleitungen immer unter der Bestimmungsgrenze lagen	85
Tabelle 40:	Stoffe mit Einzelbefunden in den Regenwassereinleitungen	85
Tabelle 41:	Statistische Kennwerte für prioritäre Stoffe in den untersuchten Regenwassereinleitungen	87
Tabelle 42:	Statistische Kenngrößen der Begleitparameter der Mischwasserentlastungen....	89
Tabelle 43:	Stoffe, die in den Mischwasserentlastungen nie größer Bestimmungsgrenze nachgewiesen wurden.....	90
Tabelle 44:	Stoffe mit Einzelbefunden in den Mischwasserentlastungen	90
Tabelle 45:	Konzentration von prioritären Stoffen in den untersuchten Mischwasserentlastungen unter Berücksichtigung aller Proben in µg/l.....	91
Tabelle 46:	Standortspezifische Konzentrationen für prioritäre Stoffe in Regenwassereinleitungen (RKB) und Mischwasserentlastungen (RÜB) mit Anzahl (n) der genutzten Werte.....	94
Tabelle 47:	Klassifizierte Häufigkeit der Positivbefunde in den untersuchten urbanen Abwasserströmen.....	95
Tabelle 48:	Umfang der Teildatenkollektive für die potentielle Differenzierung der Ablaufkonzentrationen.....	107
Tabelle 49:	Zusammenfassung der Erwartungswerte zur Differenzierung der Ablaufkonzentrationen.....	108
Tabelle 50:	Ableitung der mittleren Einwohnerwerte und Jahresabwassermengen	111
Tabelle 51:	Vergleich der mittleren Ablaufkonzentrationen mit und ohne Berücksichtigung saisonaler Unterschiede	112
Tabelle 52:	Emissionsfaktoren für den Ablauf kommunaler Kläranlagen für ausgewählte Stoffe nach OGewV2016 und weiterer Stoffe	112

Tabelle 53:	Kennwerte der untersuchten Regenwassereinleitungen (RKB) und Mischwasserentlastungen (RÜB).....	138
Tabelle 54:	Statistische Kenngrößen der Begleitparameter in Zu- und Ablauf der fünf Kläranlagen im Detailprogramm	141
Tabelle 55:	Statistische Kenngrößen der Begleitparameter in den Schlämmen der fünf Kläranlagen im Detailprogramm	143
Tabelle 56:	Statistische Kenngrößen der gemessenen Schadstoffkonzentrationen im Zulauf der fünf untersuchten Kläranlagen	144
Tabelle 57:	Statistische Kenngrößen der gemessenen Schadstoffkonzentrationen im Ablauf der 49 untersuchten Kläranlagen	148
Tabelle 58:	Statistische Kenngrößen der gemessenen Schadstoffkonzentrationen im Primärschlamm der fünf untersuchten Kläranlagen	151
Tabelle 59:	Statistische Kenngrößen der gemessenen Schadstoffkonzentrationen im Überschussschlamm der fünf untersuchten Kläranlagen	154
Tabelle 60:	Vergleich ausgewählter statistischer Kennwerte der Ablaufkonzentrationen der Kläranlagen (KA) unterschiedlicher Studien	157
Tabelle 61:	Statistische Auswertung der Feststoff-Konzentrationen und Glühverlust in den volumenproportionalen Proben von Regenwassereinleitungen und Mischwasserentlastungen.....	162
Tabelle 62:	Statistische Auswertung der konventionellen Abwasserparameter in den volumenproportionalen Proben von Mischwasserentlastungen und Regenwassereinleitungen	163
Tabelle 63:	Statistische Auswertung der Feststoff-Konzentrationen und Glühverlust der problembehafteten Proben von Mischwasserentlastungen.....	164
Tabelle 64:	Statistische Auswertung der konventionellen Parameter der problembehafteten Proben von Mischwasserentlastungen	165
Tabelle 65:	Konzentrationen für prioritäre Stoffe in den untersuchten Regenwassereinleitungen für die volumenproportionalen Proben in µg/l	166
Tabelle 66:	Konzentrationen für prioritäre Stoffe in den untersuchten Mischwasserentlastungen für die volumenproportionalen Proben in µg/l.....	170
Tabelle 67:	Statistische Kennwerte für prioritäre Stoffe in den untersuchten Mischwasserentlastungen für die problembehafteten Proben in µg/l.....	174
Tabelle 68:	Konzentrationen für prioritäre Stoffe in den untersuchten Regenwassereinleitungen unter Berücksichtigung aller Proben in µg/l	178
Tabelle 69:	Konzentrationen für prioritäre Stoffe in den untersuchten Mischwasserentlastungen unter Berücksichtigung aller Proben in µg/l.....	182
Tabelle 70:	Stoff-Konzentrationen in Regenwassereinleitungsproben (Regenklärbecken (RKB)) im Vergleich mit Literaturwerten	186
Tabelle 71:	Stoff-Konzentrationen in Überlaufmischproben (Regenüberlaufbecken (RÜB)) im Vergleich mit Literaturwerten	202
Tabelle 72:	Vergleich der Reinigungsleistung konventioneller Kläranlagen (KA) mit Literaturwerten	221

Tabelle 73:	Auswertung des Anteils der Messwerte oberhalb des BUW bzw. des halben BUW für den Kläranlagenablauf	225
Tabelle 74:	Auswertung des Anteils der Messwerte oberhalb des BUW bzw. des halben BUW für die Regenwassereinleitungen	228
Tabelle 75:	Auswertung des Anteils der Messwerte oberhalb des BUW bzw. des halben BUW für die Mischwassereinleitungen	231
Tabelle 76:	Ausprägung der Stoffeigenschaften Sorption, Abbaubarkeit und Volatilisation sowie Verwendung und Herkunftsbereiche, Haupteintragspfad im Siedlungsgebiet und Rückhalt in der Kläranlage.....	234
Tabelle 77:	Statistische Kennwerte der Ablaufkonzentrationen in µg/l bezogen auf die Art des dominanten Entwässerungssystems im Einzugsgebiet (Trenn- oder Mischsystem).....	237
Tabelle 78:	Statistische Kennwerte der Ablaufkonzentrationen in µg/l bezogen auf Trocken- oder Regenwettersituation bei den Mischsystem-Anlagen	240
Tabelle 79:	Statistische Kennwerte der Ablaufkonzentrationen in µg/l bezogen auf die Lage des Einzugsgebiets (innerhalb oder außerhalb von Agglomerationsraum)	243
Tabelle 80:	Statistische Kennwerte der Ablaufkonzentrationen in µg/l für verschiedene Größenklassen bezogen auf die Abwasserlast (EW)	246
Tabelle 81:	Berechnung monatlicher Ablauffrachten für die Pestizide Diuron, Isoproturon und Terbutryn.....	264
Tabelle 82:	Berechnung monatlicher Ablauffrachten für die PAK Fluoranthen und Pyren....	265

Abkürzungsverzeichnis

Stoffbezogene Abkürzungen

Kürzel	Langtext
4iNP	4-iso-Nonylphenol
4tOP	4-tert.-Oktylphenol
ACF	Aclonifen
ACN	Acenaphthen
ACY	Acenaphthylen
AFS₆₃	abfiltrierbare Stoffe < 63 µm
AFS_{ges}	abfiltrierbare Stoffe
AFS_{grob}	abfiltrierbare Stoffe zwischen 63 – 2.000 µm
Al	Aluminium
ANT	Anthracen
ATR	Atrazin
BaA	Benzo(a)anthracen
BaP	Benzo(a)pyren
BbF	Benzo(b)fluoranthen
BFX	Bifenox
BghiP	Benzo(ghi)perylen
BkF	Benzo(k)fluoranthen
BSB₅	biologischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen
CBT	Cybutryn
Cd	Cadmium
cHCE	cis-Heptachlorepoxyd
CHR	Chrysen
CSB_{gel}	gelöster chemischer Sauerstoffbedarf
CSB_{ges}	gesamter chemischer Sauerstoffbedarf
Cu	Kupfer
CYM	Cypermethrin, gesamt

Kürzel	Langtext
DahA	Dibenz(ah)anthracen
DCV	Dichlorvos
DEHP	Di-(2-ethylhexyl)phthalat
DIF	Dicofol
DIU	Diuron
EPA-PAK	polycyclische Kohlenwasserstoffe Auswahl von 16 Stoffen nach EPA (Environmental Protection Agency, US Umweltbehörde)
Fe	Eisen
FLRN	Fluoren
FLRTN	Fluoranthen
GV	Glühverlust
H4PFOS	1H,1H,2H,2H-Perfluorooctansulfonat
HBCDD	Hexabromcyclododecan (Summe)
HC	Heptachlor
Hg	Quecksilber
IcdP	Indeno(1,2,3-cd)pyren
ISO	Isoproturon
Koc	Adsorptionskoeffizient
Kow	Octanol/Wasser-Verteilungskoeffizient
Ks_{4,3}	Säurekapazität
Lf	Leitfähigkeit
NAP	Naphthalin
N_{ges}	Gesamtstickstoff
NH₄-N	Ammonium-Stickstoff
Ni	Nickel
NO₂-N	Nitrit-Stickstoff
NO₃-N	Nitrat-Stickstoff
N_{org}	gesamter organischer Stickstoff

Kürzel	Langtext
o-PO₄-P	Orthophosphat-Phosphor
PAK	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe
Pb	Blei
PE	Polyethylen
PFAS	per- und polyfluorierte Verbindungen
PFBA	Perfluorbutanoat
PFBS	Perfluorbutansulfonat
PFC	perfluorierte Verbindungen
PFDA	Perfluordecanoat
PFDoA	Perfluordodecanoat
PFDS	Perfluordecansulfonat
PFHpA	Perfluorheptanoat
PFHpS	Perfluorheptansulfonat
PFHxA	Perfluorhexanoat
PFHxS	Perfluorhexansulfonat
PFNA	Perfluornonanoat
PFOA	Perfluoroctanoat
PFOS	Perfluoroctansulfonat
PFPA	Perfluorpentanoat
PFPeS	Perfluorpentansulfonat
PFUnA	Perfluorundecanoat
P_{ges}	Gesamtphosphor
PHE	Phenanthren
PYR	Pyren
QNX	Quinoxifen
TBY	Terbutryn
tHCE	trans-Heptachlorepoxyd
TR	Trockenrückstand

Kürzel	Langtext
Zn	Zink

Allgemeine Abkürzungen

Kürzel	Langtext
AFS	Atomfluoreszenzspektrometrie
AG	Arbeitsgruppe
BG	Bestimmungsgrenze
BMU	Bundesministerium für Umwelt
BUW	Beurteilungswert
BVT	beste verfügbare Technik
CAS-Nummer	CAS-Registrierungsnummer (CAS Registry Number, CAS = Chemical Abstracts Service)
CFA	kontinuierliche Fließanalytik
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
EPA	Environmental Protection Agency, US Umweltbehörde
EW	Einwohnerwerte
GC-MS	Gaschromatographie mit Massenspektrometrie
GC-MS-MS	Gaschromatographie mit Tandem-Massenspektrometrie
GK	Größenklasse
HPLC-MS-MS	Flüssigchromatographie mit Tandem-Massenspektrometrie
ICP-MS	Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma
IED	Industrieemissions-Richtlinie
JD-UQN	Umweltqualitätsnorm ausgedrückt als Jahresdurchschnitt
KIT-IWG	Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung
LANUV	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
MS	Mischsystem
OGewV	Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer
PNEC	predicted no effect concentration
RKB	Regenklärbecken
RL	Richtlinie

Kürzel	Langtext
RÜB	Regenüberlaufbecken
RW	Regenwetter
SIM	single ion monitoring
SMC	standortspezifische Konzentrationen
TS	Trennsystem
TW	Trockenwetter
TZW	DVGW-Technologiezentrum Wasser des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfachs e.V.
UBA	Umweltbundesamt
UFZ	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung
UQN	Umweltqualitätsnorm
UQN-RL	Änderungsrichtlinie 2013/39/EU
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie

Zusammenfassung

Am 13. Januar 2009 trat die Richtlinie 2008/105/EG (geändert durch 2013/39/EU) des Europäischen Parlaments und des Rates, die unter anderem Umweltqualitätsnormen (UQN) für prioritäre und prioritär gefährliche Stoffe festlegt, in Kraft. Die Umsetzung in nationales Recht erfolgte in Deutschland mit der Oberflächengewässerverordnung (OGewV) vom 20. Juli 2011 (Neufassung mit OGewV 2016). Ziel ist die Reduzierung des Eintrags prioritärer Stoffe in die Oberflächengewässer. Hierzu ist in regelmäßigen Abständen ein Inventar der Einleitungen, Emissionen und Verluste für alle prioritären Stoffe und Schadstoffe, die in Anhang I Teil A der Richtlinie aufgeführt sind, zu erstellen.

Im Rahmen der ersten Bestandsaufnahme wurde von der Bund/Länder ad-hoc-Arbeitsgruppe Bestandsaufnahme im Jahr 2011 ein zweistufiges Konzept erarbeitet, das zum Ziel hatte, die vorhandene Datenbasis zur Ermittlung von Einträgen aus kommunalen Abwasserbehandlungsanlagen zu verbessern. In einem ersten Schritt (Stufe 1) wurde in einem von der Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) und den Bundesländern kofinanzierten Vorhaben der methodische Rahmen für ein umfassendes deutschlandweites Monitoring am Beispiel von drei Kläranlagen erarbeitet. Neben den methodischen Empfehlungen für ein zielführendes, koordiniertes Vorgehen konnten aus den Messergebnissen dieses Vorhabens unter Hinzunahme weiterer Datensätze Emissionsfaktoren für 18 Stoffe abgeleitet werden. Für elf dieser Stoffe beruhten die Emissionsfaktoren allerdings nach wie vor auf einer aus statistischer Sicht unsicheren Datenbasis.

In Stufe 2 des Konzepts sollte aufbauend auf den vorliegenden Erfahrungen und dem methodischen Rahmen hinsichtlich Probenahmestrategie und Analytik aus Stufe 1 eine Erweiterung und Differenzierung der Datenbasis erfolgen. Mit der Änderungsrichtlinie 2013/39/EU waren neue Stoffe sowie für einzelne Stoffe deutliche verschärfte Anforderungen (Umweltqualitätsnormen) zu berücksichtigen. Beide Aspekte erzeugten neue Herausforderungen an die Sensitivität der Analytik. Die Konkretisierung der Ziele der zweiten Projektstufe umfasste damit vier wesentliche Punkte:

- ▶ Absicherung der bisher noch unsicheren Datenbasis zur Ableitung der Emissionsfaktoren,
- ▶ Ableitung differenzierter Emissionsfaktoren,
- ▶ Berücksichtigung der nach RL 2013/39/EU verschärften Umweltqualitätsnormen für einzelne Stoffe,
- ▶ Einbindung der neuen Stoffe nach der RL 2013/39/EU.

Die Arbeiten wurden von den Ländern finanziert und von einem Konsortium, bestehend aus dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG), dem Technologiezentrum Wasser des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches e.V. (TZW) und der Firma Bioplan durchgeführt. Die Auswahl der am Vorhaben teilnehmenden Kläranlagen erfolgte auf Vorschlag und in Abstimmung mit den Ländern.

Insgesamt wurden 54 Einzelsubstanzen der Stoffgruppen Schwermetalle, Industriechemikalien, perfluorierte Verbindungen, polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe und Pflanzenschutzmittel analysiert. Es wurden Abläufe von 49 kommunalen Kläranlagen, verteilt über das gesamte Bundesgebiet sowie Zuläufe und Schlämme (Primär- und

Überschussschlamm) von fünf kommunalen Kläranlagen untersucht. Zusätzlich wurden zwei Regenklärbecken (RKB) und sechs Regenüberlaufbecken (RÜB) beprobt.

Aus den Zu- und Abläufen der kommunalen Kläranlagen wurden Langzeit-Mischproben genommen (7-Tage-Mischprobe), um kurzfristige Schwankungen der Belastung auszugleichen und so ohne Informationsverlust die Kosten für Analytik und Datenverdichtung zu reduzieren. Bei Anlagen, deren Einzugsgebiet hauptsächlich im Mischsystem entwässert wird, wurden die Mischwasser- und Trockenwetterzuflüsse getrennt beprobt.

Bei den Regenwasserbehandlungsanlagen wurden im Ereignisfall volumenproportionale Mischproben mittels großvolumiger Feststoffsammler (1.000 l) erzeugt, um mittlere Konzentrationen sicher ableiten zu können.

Hinsichtlich der Analytik wurden Multi-Methoden angewandt, mit denen eine größere Anzahl an Stoffen gemeinsam erfasst werden können. Die Bestimmungsgrenzen der Methoden orientieren sich an den zu erwartenden Stoffkonzentrationen in den Kläranlagenabläufen und an den Umweltqualitätsnormen. Im Zulauf der Kläranlagen lag die Bestimmungsgrenze für die meisten Stoffe aufgrund von Matrixeffekten höher als im Ablauf. Für einige Stoffe wurden neue Analyseverfahren entwickelt.

Aus dem Projekt resultierten insgesamt 1.265 Proben, in denen die prioritären Stoffe, aber auch typische Abwasserparameter zur Überprüfung des Betriebszustandes der Anlagen, analysiert wurden.

Im Zulauf der fünf detailliert untersuchten Kläranlagen wurden 13 Stoffe nie oberhalb der Bestimmungsgrenze gemessen:

- ▶ Perfluorundecanoat (PFUnA), Perfluordodecanoat (PFDoA), Perfluorpentansulfonat (PFPeS), Perfluorheptansulfonat (PFHpS), Perfluordecansulfonat (PFDS), Bifenox, cis-Heptachlorepoxyd, Cybutryn, Dichlorvos, Dicofol, Heptachlor, Quinoxyfen und trans-Heptachlorepoxyd.

Für 22 Stoffe wurden in über 80 % der Zulaufproben Werte oberhalb der Bestimmungsgrenze gemessen:

- ▶ Blei, Cadmium, Nickel, Quecksilber, 4-iso-Nonylphenol, Di-(2-ethylhexyl)phthalat, Acenaphthylen, Acenaphthen, Fluoren, Phenanthren, Anthracen, Fluoranthren, Pyren, Benzo[a]anthracen, Chrysen, Benzo[b]fluoranthren, Benzo[k]fluoranthren, Benzo[a]pyren, Indeno[1,2,3-cd]pyren, Benzo[g,h,i]perylen, Isoproturon und Terbutryn.

Im Ablauf der 49 kommunalen Kläranlagen wurden acht Stoffe nie oberhalb der Bestimmungsgrenze gemessen:

- ▶ Perfluordecansulfonat (PFDS), Bifenox, cis-Heptachlorepoxyd, Cypermethrin, Dicofol, Heptachlor, Quinoxyfen und trans-Heptachlorepoxyd.

Die Stoffe mit den höchsten Wiederfindungsraten im Ablauf waren:

- ▶ Cadmium, Nickel, DEHP, Perfluorbutanoat (PFBA), Perfluorhexanoat (PFHxA), Perfluoroctanoat (PFOA) und Phenanthren.

Diese sieben Stoffe wurden in über 90 % der Ablaufproben in einem quantifizierbaren Bereich gemessen.

Bei den Feststoff-Proben wurden 19 Substanzen im Primärschlamm und 16 im Überschussschlamm nie oberhalb der Bestimmungsgrenze gefunden. Dazu gehören einige der Vertreter der perfluorierten Verbindungen und alle untersuchten Pflanzenschutzmittel bis auf Diuron, Isoproturon und Terbutryn.

Die Stoffe, die in beiden Schlammarten in mehr als 90 % der Proben quantitativ bestimmt werden konnten, sind im Primärschlamm:

- ▶ Blei, Cadmium, Nickel und Quecksilber, 4-iso-Nonylphenol, DEHP, HBCDD (Summe), Phenanthren, Fluoranthen, Pyren, Benzo[a]anthracen, Chrysen, Benzo[b]fluoranthen, Benzo[a]pyren, Indeno[1,2,3-cd]pyren, Benzo[g,h,i]perylen.

Im Überschussschlamm sind es:

- ▶ Blei, Cadmium, Nickel, Quecksilber, DEHP, HBCDD (Summe), Perfluorooctansulfonat (PFOS), Phenanthren, Fluoranthen, Pyren, Chrysen, Benzo[b]fluoranthen und Benzo[g,h,i]perylen.

Aus den Befunden der Wasser- und Schlammproben ergeben sich wichtige Hinweise zu Vorkommen und Verbleib der Substanzen in der Kläranlage sowie zu den möglichen Rückhalteprozessen. Zuverlässige mittlere und kläranlagenspezifische Rückhalteleistungen konnten für 33 Stoffe abgeleitet werden.

Bei Stoffen mit sehr gutem Rückhalt in den Kläranlagen, wie z.B. den hoch kondensierten PAK-Vertretern, ist die Variabilität der Rückhalteleistung vergleichsweise gering. Andererseits variiert die Rückhalteleistung stark bei Stoffen mit mäßigem bis schlechtem Rückhalt, wie bei Nickel, 4-iso-Nonylphenol oder Isoproturon. Die ermittelten Ablaufkonzentrationen und die Rückhalteleistung wurde in den Wertebereich einer umfänglichen Literaturrecherche eingeordnet. In der Summe kann eine gute Übereinstimmung festgestellt werden. Größere Differenzen gehen häufig auf eine andere Probennahme, eine kleinere Stichprobe und höhere Bestimmungsgrenzen in den Vergleichsstudien zurück.

Während der Projektlaufzeit konnten weiterhin 20 Regenwasserproben aus Regenklärbecken und 27 Mischwasserproben aus Regenüberlaufbecken untersucht werden. In den Regenwasserproben am Klärüberlauf der Regenklärbecken wurden 15 Substanzen nie oberhalb der Bestimmungsgrenze gemessen.

21 Stoffe werden in über 90 % der Proben gefunden:

- ▶ Blei, Cadmium, Nickel, Quecksilber, DEHP, alle EPA-PAK₁₆-Vertreter bis auf Naphthalin und Fluoren, Diuron und Terbutryn.

Im Entlastungsabfluss der Regenüberlaufbecken wurden 14 Substanzen nie oberhalb der BG detektiert. Dazu gehören einige PFC-Verbindungen und Vertreter der Gruppe der Pflanzenschutzmittel. In fast allen Proben gab es Positivbefunde für:

- ▶ Blei, Cadmium, Nickel, Quecksilber, DEHP, alle PAK-Vertreter bis auf Naphthalin, Perfluorbutanoat (PFBA) und Terbutryn.

Eine Gesamtauswertung für die siedlungsbedingten Abflüsse zeigt die Aufkommensrelevanz des Siedungsraumes und erlaubt gleichzeitig ein Ranking in Bezug auf die Bedeutung der einzelnen Abflusskomponenten. Für einen Teil der untersuchten Stoffe hat sich gezeigt, dass die betrachteten urbanen Eintragspfade keine relevante Quelle sind (Kläranlagenablauf, Regen- und Mischwassereinleitungen). Die Stoffe wurden nie oder nur als Einzelbefunde in den

unterschiedlichen Abwasserströmen nachgewiesen. Für einige Stoffe sind die erreichbaren Bestimmungsgrenzen derzeit nicht niedrig genug, um einen Bezug zu den Beurteilungswerten im Gewässer wie die Umweltqualitätsnorm oder die PNEC herzustellen. Das betrifft die Stoffe HBCDD (Summe), Perfluorooctansulfonat (PFOS), Benzo[a]pyren, Heptachlorperoxid, Cybutryn, Cypermethrin, Dichlorvos, Dicolol und Heptachlor. Für diese Stoffe ist die Einschätzung der Relevanz der urbanen Eintragspfade hinsichtlich einer Gefährdung des Erreichens der Beurteilungswerte nicht möglich.

Eines der Hauptziele dieses Vorhabens war die Ableitung stoffspezifischer Emissionsfaktoren für kommunale Kläranlagen zur Abbildung der Eintragssituation in Deutschland. Für 20 Stoffe, die im Ablauf mit mehr als 50 % der Werte oberhalb der BG analysiert wurden, konnten mediane und mittlere Konzentrationen aus dem gesamte Datenkollektiv abgeleitet werden. Basierend auf diesen repräsentativen Konzentrationen wurden Emissionsfaktoren abgeleitet, die mittlere Verhältnisse widerspiegeln. Die Eintragssituation einzelner Kläranlagen kann definitionsgemäß signifikant von diesen mittleren Bedingungen abweichen. Nichtsdestotrotz können die realen mittleren Emissionen in der Gesamtbetrachtung größerer Gebietseinheiten gut abgebildet werden. Sie ergeben sich aus der Multiplikation des stoffspezifischen Emissionsfaktors mit der Aktivitätsrate (Abwassermenge) für Einzeljahre oder für Bilanzzeiträume.

Ein weiteres Projektziel war es, zu prüfen, ob eine Differenzierung der deutschlandweit einheitlichen Emissionsfaktoren für den Ablauf der kommunalen Kläranlagen möglich ist. Hierzu wurden auf Basis der verfügbaren Daten/Begleitinformationen denkbare Differenzierungsmöglichkeiten zusammengetragen. Dazu zählen die technische Ausstattung der Anlagen, die Art des Entwässerungssystems, Trockenwetter- und Mischwassersituation, Lage des Einzugsgebiets (innerhalb oder außerhalb von Agglomerationsräumen) und Größenklasse der Anlagen. Um eine statistische Auswertung zu ermöglichen, wurde festgelegt, dass jedes Teildatenkollektiv mindestens drei Kläranlagen und 30 Messwerte beinhalten muss. Anhand verschiedener Prüfkriterien wie statistische Tests, die Werteverteilung und die Unsicherheit bei Probenahme und Analytik wurde geprüft, ob eine auf den ersten Blick unterschiedliche mittlere Konzentration von zwei Teildatenkollektiven tatsächlich eine sinnvolle Differenzierung zulässt. Für viele Stoffe zeigt sich, dass eine Differenzierung nicht zu empfehlen ist, auch wenn im statistischen Sinn signifikante Unterschiede vorliegen, da die Konzentrationsunterschiede aus analytischer Sicht so gering sind. Bei strenger Auslegung aller Prüfkriterien konnte letztlich nur für die vier PAK-Vertreter Acenaphthen, Fluoren, Phenanthren und Fluoranthen und nur für das Differenzierungsmerkmal „Lage des Einzugsgebiets“ eine differenzierte Konzentration ausgegeben werden.

Die Konzentrationen einiger Stoffe im Kläranlagenablauf können jahreszeitlich bedingt deutlichen Schwankungen unterliegen. Dies gilt beispielsweise für die PAK, Pflanzenschutzmittel und Biozide. Anhand mittlerer und medianer monatlicher Konzentrationen wurde für diese Stoffe eine gewichtete Fracht anhand des Produktes aus Ablaufkonzentration und aus der monatlichen Niederschlagssumme berechnet. Aus dieser gewichteten Jahresfracht wurde eine mittlere, jährliche Ablaufkonzentration zurückgerechnet, die nahezu den Ablaufkonzentrationen aus dem Gesamtdatensatz entsprach. Unter Berücksichtigung der bestehenden Unsicherheiten kann daher davon ausgegangen werden, dass die im Rahmen dieses Monitorings abgeleiteten mittleren Konzentrationen die jahreszeitliche Variabilität der Einträge über Kläranlagen integrieren und die Saisonalität der Stoffeinträge gut berücksichtigen.

Für die Quantifizierung der Stoff-Einträge in die Gewässer Deutschlands wird nach den durchgeführten Datenanalysen empfohlen, ausschließlich mit den deutschlandweit einheitlichen Emissionsfaktoren zu arbeiten. Sie stellen eine valide Basis zur Abschätzung der

Gesamtemissionen aus kommunalen Kläranlagen dar und erlauben stoffspezifisch eine sichere Einschätzung der Relevanz der einzelnen urbanen Abflusskomponenten. Für Detailanalysen und bei kleinräumiger Betrachtung kann es darüber hinaus sinnvoll sein, differenzierte mittlere bzw. mediane Ablaufkonzentrationen zu verwenden.

In der Gesamtschau konnten in diesem Vorhaben über die definierten Ziele hinausgehend wichtige Erkenntnisse in Bezug auf das Vorkommen von prioritären Stoffen in den urbanen Abflusskomponenten und den Schlämmen produziert werden. Dies liegt nicht zuletzt daran, dass erstmalig ein zwischen den Bundesländern koordiniertes und entsprechend seiner Zielsetzung methodisch harmonisiertes Monitoring durchgeführt wurde. Das Vorhaben liefert daher für eine große Anzahl an Parametern eine solide Datengrundlage für die Bestandsaufnahme und darüberhinausgehende Aufgaben. Für eine Reihe von Stoffen liegt mit Abschluss dieses Vorhabens erstmalig eine Quantifizierungsgrundlage vor.

Summary

On 13th January 2009 the directive 2008/105/EG (amended by 2013/39/EU) of the European Parliament and Council came into force, which inter alia sets environmental quality standards (EQS) for priority and priority hazardous substances. The incorporation into national law in Germany took place with the Surface Water Ordinance (OGewV) of 20 July 2011 (new version with OGewV 2016). The aim was to reduce the emissions of priority substances into surface waters. This includes an inventory of effluents, emissions and losses for all priority substances and pollutants listed in Annex I Part A of the Directive at regular intervals.

As part of the first assessment, the Federal Government/Länder ad hoc task group on the assessment of the current situation in 2011 developed a two-stage concept with the aim of improving the existing database for the quantification of emissions from municipal wastewater treatment plants. In a first step (stage 1), a project co-financed by the German Federal Environmental Foundation (Deutsche Bundesstiftung Umwelt - DBU) and the federal states developed the methodological framework for a comprehensive nationwide monitoring on the example of three wastewater treatment plants. In addition to the methodological recommendations for a coordinated, effective procedure, emission factors for 18 substances were derived from the measurement results of this project by incorporating further data sets. For eleven of these substances, however, the emission factors were still based on a database that was statistically not reliable.

In the second stage of the concept, the database was extended and differentiated, building on the existing experience and the methodological framework regarding sampling strategy and analysis from stage 1. With the amending directive 2013/39/EU, new substances as well as significantly stricter requirements for individual substances (environmental quality standards) had to be considered. Both aspects created new challenges for the sensitivity of the analytics. Specifying the objectives for the second stage contained four essential points:

- ▶ validate the yet uncertain database for deriving of emission factors,
- ▶ derivate differentiated emission factors,
- ▶ consider the more stringent environmental quality standards for individual substances under directive 2013/39/EU,
- ▶ integrate the new substances according to D 2013/39/EU.

The work was financed by the federal states and carried out by a consortium consisting of the Karlsruhe Institute of Technology (KIT), the Institute for Water and River Basin Management (IWG), the German Water Centre (TZW) at the German Technical and Scientific Association for Gas and Water as well as the firm Bioplan. The choice of treatment plants participating in the project was based on proposals and in consultation with the federal states.

In total 54 individual substances of the substance groups heavy metals, industrial chemicals, perfluorinated compounds, polycyclic aromatic hydrocarbons and pesticides were analysed. The effluents of 49 municipal wastewater treatment plants distributed throughout Germany, as well as the inflows and sludges (primary and surplus sludge) of five municipal wastewater treatment plants were investigated. In addition, two stormwater outlets and six combined sewer overflow tanks were sampled.

Long-term composite samples (7-day composite samples) were taken from the inflows and the effluents of the municipal wastewater treatment plants to balance short-term fluctuations in the

loads and thereby reduce the costs for analysis and data compression without loss of information. For plants with a catchment area that is mainly drained in a combined system, the wet and dry weather inflows were sampled separately.

In the stormwater outlet and combined sewer overflow, volume-proportional mixed samples were produced in the event by using large-volume sampler (1,000 l) to reliably determine medium concentrations.

Multi-methods were used for the analysis which allow a larger number of substances to be measured at once. The limits of quantification aimed for are based on the expected effluent concentrations of the substances and on the environmental quality standards. For most substances, the limit of quantification (LoQ) in the inflow of the sewage treatment plants was higher than in the effluent due to matrix effects. New analytical methods were developed for some substances.

The project yielded a total of 1,265 samples in which the priority substances and typical wastewater parameters were analysed to check the operating status of the plants. In the inflow of the five wastewater treatment plants investigated, 13 substances were never measured above the limit of quantification (LoQ):

- ▶ perfluorundecanoat (PFUnA), perfluordodecanoat (PFDoA), perfluorpentansulfonat (PFPeS), perfluorheptansulfonat (PFHpS), perfluordecansulfonat (PFDS), bifenox, cis-heptachlor-epoxide, cybutryn, dichlorvos, dicofol, heptachlor, quinoxyfen und trans heptachlor epoxide.

Values above the limit of quantification were measured in over 80 % of the inflow samples for 22 substances:

- ▶ lead, cadmium, nickel, mercury, 4 iso-nonylphenol, di(2ethylhexyl)phthalate, acenaphthylene, acenaphthene, fluorine, phenanthrene, anthracene, fluoranthene, pyrene, benzo(a)anthracene, chrysene, benzo(b)fluoranthene, benzo(k)fluoranthene, benzo(a)pyrene, indeno(1,2,3 cd)pyrene, benzo(g,h,i)perylene, isoproturon and terbutryn.

The effluent of the 49 municipal wastewater treatment plants never showed levels above the limit of quantification for these eight substances:

- ▶ perfluordecansulfonat (PFDS), bifenox, cis-heptachlor-epoxide, cypermethrin, dicofol, heptachlor, quinoxyfen und trans-heptachlor epoxide.

The substances with the highest recovery rates in the effluent were:

- ▶ cadmium, nickel, DEHP, perfluorobutanoate (PFBA), perfluorhexanoate (PFHxA), perfluorooctanoate (PFOA) and phenanthrene.

These seven substances were found in over 90 % of the effluent samples in a quantifiable range.

In the sediment samples, 19 substances were found in the primary sludge and 16 in the excess sludge, none above the limit of quantification. These include some of the representatives of the perfluorinated compounds and all examined pesticides except diuron, isoproturon and terbutryn.

The substances that were quantitatively determined in both types of sludge in more than 90 % of the samples are for the primary sludge:

- ▶ lead, cadmium, nickel and mercury, 4 iso-nonylphenol, DEHP, HBCDD (in sum), phenanthrene, fluoranthene, pyrene, benzo(a)anthracene, chrysene, benzo(b)fluoranthene, benzo(a)pyrene, indeno(1,2,3 cd)pyrene, benzo(g,h,i)perylene.

And for the excess sludge:

- ▶ lead, cadmium, nickel, mercury, DEHP, HBCDD (in sum), perfluorooctane sulfonate (PFOS), phenanthrene, fluoranthene, pyrene, chrysene, benzo(b)fluoranthene and benzo(g,h,i)perylene.

The results of the water and sludge samples provide important information on the presence and persistence of substances in the treatment plant and on possible retention processes. Reliable mean and wastewater treatment plant-specific retention rates were derived for 33 substances.

For substances with a good retention in sewage treatment plants, such as the highly condensed PAH representatives, the variability of the retention performance is comparatively low. On the other hand, the retention performance varies considerably for substances with moderate to poor retention, such as nickel, 4 iso-nonylphenol or isoproturon. The measured effluent concentrations and the retention capacity were assigned to the value range of a comprehensive literature search and, in total, were in accordance. Larger differences are often due to different sampling, smaller sample sizes and higher detection limits in the comparative studies.

In addition, 20 stormwater samples from stormwater treatment tanks and 27 combined sewer overflow samples were assessed. In the stormwater samples at the overflow of the stormwater treatment tanks, 15 substances were never measured above LoQ.

21 substances were found in over 90 % of all samples:

- ▶ lead, cadmium, nickel, mercury, DEHP, all EPA-PAH16 representatives except naphthalene and fluorine, diuron and terbutryn.

In the overflow of the combined sewer overflow tanks, 14 substances were never detected above the LOQ. These include several PFC compounds and representatives of pesticides. Almost all samples showed positive results for:

- ▶ lead, cadmium, nickel, mercury, DEHP, all PAH representatives except naphthalene, perfluorobutanoate (PFBA) and terbutryn.

An overall evaluation for settlement-related effluent shows the relevance of the settlement area and at the same time allows ranking the importance of the individual urban flow components. For some of the substances analysed, it showed that the considered urban flows (wastewater treatment plant effluent, stormwater outlet and combined sewer overflow) are not a relevant source. The substances were never detected in the different or only as isolated cases. For some substances, the limits of quantification that could be achieved are currently not low enough to check whether environmental quality standards or the PNEC-value are met or not. This refers to the substances HBCDD (in sum), perfluorooctane sulfonate (PFOS), benzo(a)pyrene, heptachlorperoxide, cybutryn, cypermethrin, dichlorvos, dicofol and heptachlor. It is not possible to assess the relevance of the urban effluent pathways for a risk of reaching the assessment values for these substances.

One of the main objectives of this project was to derive substance-specific emission factors for municipal wastewater treatment plants to map the emission situation in Germany. For 20 substances analysed in the effluent with more than 50 % of the values above the LoQ, median

and mean concentrations were derived from the entire data collective. Emission factors were derived based on these representative concentrations, which reflect average conditions. The input situation of individual sewage treatment plants can, by definition, deviate significantly from these average conditions. Nevertheless, the overall assessment shows that the actual average emissions of larger territorial areas are well represented. They result from multiplying the substance-specific emission factor by the activity rate (wastewater quantity) for individual years or for balance periods.

A further aim of the project was to examine whether it is possible to differentiate the emission factors for the effluent of municipal wastewater treatment plants. For this, possible differentiation options were compiled based on the available data/accompanying information. These include the technical features of the plants, the type of drainage system, dry weather and wet water situation, the location of the catchment area (within or outside agglomeration areas) and the size category of the plants. To enable statistical evaluation, it was specified that each partial data collective must contain at least three treatment plants and 30 measurements. Using various test criteria such as statistical tests, the distribution of values and the uncertainty in sampling and analysis, it was examined whether an initially different mean concentration of two partial data collectives allows a reasonable differentiation. For many substances it appears that a differentiation is not recommended, even if there are statistically significant differences, as from an analytical point of view the differences in concentration are minimal. In the end, with a strict interpretation of all test criteria, it was only possible to issue differentiated concentrations for the four PAH representatives acenaphthene, fluorene, phenanthrene and fluoranthene and only for the differentiating criteria "location of the catchment area".

The concentrations of some substances in the effluent of wastewater treatment plants can vary considerably from season to season. This applies, for example, to PAHs, pesticides and biocides. A weighted load was calculated for these substances using the product of the effluent concentration and the monthly precipitation sum based on mean and median monthly concentrations. From this weighted annual load, a mean annual effluent concentration was calculated back, which almost corresponded to the effluent concentrations from the overall data set. Considering existing uncertainties, it can therefore be assumed that the mean concentrations derived within the framework of this monitoring integrate the seasonal variability of inputs via wastewater treatment plants and factor in the seasonality of substance inputs.

According to the data analyses carried out, it is recommended to work exclusively with the emission factors that are uniform throughout Germany to quantify the input of substances into German surface waterbodies. They provide a valid basis for estimating total emissions from municipal wastewater treatment plants and allow a reliable substance-specific assessment of the relevance of the individual urban flow components. For detailed analyses and small-scale observations, it can be useful to additionally use differentiated mean or median effluent concentrations.

In an overall appraisal, this project has produced important results that go beyond the defined objectives regarding the occurrence of priority substances in urban flow components and sludge. This is not least because for the first time the monitoring was carried out in a coordinated manner between the federal states and methodically harmonised in accordance with its objectives. The project therefore provides a solid database for a large number of parameters for inventory and further tasks. A quantification base will be available for the first time for a number of substances with the completion of this project.

1 Einführung

Ziel internationaler und nationaler Umweltpolitik im Wasserbereich ist es unter anderem, die stofflichen Belastungen der Gewässer zu reduzieren und den Eintrag gewässerbelastender Stoffe im Idealfall ganz zu verhindern. Hierfür sind effiziente, umweltentlastende Maßnahmen umzusetzen. Eine wesentliche Grundlage zur Maßnahmenausweisung ist die Kenntnis der tatsächlichen Eintragungssituation, d.h. der Quellen und Eintragungspfade der Stoffe in die Gewässer und deren Relevanz.

Im urbanen Raum ist das kommunale Abwassersystem ein Sammelbecken für eine Vielzahl von Stoffen unterschiedlicher Herkunftsbereiche. Die Stoffeinträge in das System resultieren aus den Primäremissionen unterschiedlicher Nutzungen, wie Verkehr, industrielle und gewerbliche Produktion oder allgemein Siedlungstätigkeit. In Abhängigkeit von Anwendungsbereichen der Stoffe im Siedlungsgebiet erfolgt der Eintrag über den Schmutzwasser- oder Regenwasserabfluss. Insbesondere für Stoffe, die aus Verbrennungsprozessen emittiert werden, wird das innerstädtische Potential durch den atmosphärischen Ferntransport und die Deposition aufgestockt. Die wichtigsten Schnittstellen mit Oberflächengewässern im urbanen Raum sind die kommunalen Kläranlagen, Regenwassereinleitungen und Mischwasserüberläufe.

Die europäische Richtlinie (RL) zu Umweltqualitätsnormen (UQN) in der Wasserpolitik (RL 2008/105/EG, geändert durch RL 2013/39/EU), die mit der Oberflächengewässerverordnung (OGewV 2011, Neufassung 2016) in deutsches Recht umgesetzt wurde, legt Zielwerte insbesondere für prioritäre bzw. prioritär gefährliche Stoffe im Gewässer fest (BMU 2016, EU 2008, EU 2013). Um die Zielerreichung zu bewerten, sieht die RL eine Bestandsaufnahme der Emissionen, Einleitungen und Verluste von prioritären Stoffen vor. Die erste Bestandsaufnahme für prioritäre Stoffe wurde Ende 2013 durchgeführt, die zweite war bis Ende 2019 abzuschließen und ist dann in regelmäßigen Abständen (alle 6 Jahre) zu wiederholen. Ziel dieses zyklischen Vorgehens ist es, die Wirksamkeit der jeweils umgesetzten Maßnahmen zu dokumentieren und weiteren Handlungsbedarf zu identifizieren.

Die erste Bestandsaufnahme für prioritäre Stoffe wurde in Deutschland koordiniert durchgeführt. Die Koordination und fachliche Begleitung oblag einer Arbeitsgruppe (AG) unter Beteiligung aller Länder und des Bundes (Bund/Länder AG). Das primäre Ziel war die plausible Beschreibung der Einträge aus dem kommunalen Abwassersystem. Eine Prüfung national und international verfügbarer Daten, insbesondere zu kommunalen Kläranlagen, hat gezeigt, dass die verfügbare Datenbasis nicht bzw. nur bedingt geeignet ist, um zu realitätsnahen Abschätzungen der Eintragungssituation zu kommen. Die Gründe hierfür sind vielfältig (siehe Lambert et al. 2014). Zusammenfassend wurde festgestellt, dass Daten/Informationen zu prioritären Stoffen nur sehr lückenhaft zur Verfügung standen, die Daten hauptsächlich in Sondermessprogrammen mit sehr unterschiedlichen Zielstellungen und daher auch sehr unterschiedlichen Probenahmestrategien (bspw. Stichproben oder 24-Stunden-Mischproben) und analytischer Sensitivität erhoben wurden. Einige prioritäre Stoffe (z.B. Biozide) unterliegen stoßartigen Einträgen in die Kläranlagen, so dass die Stichprobe oder 24-Stunden-Mischprobe als Probenahmestrategie die langfristige Eintragungssituation nicht widerspiegeln.

Die Bilanzierung von Stoffeinträgen auf Basis von für die Fragestellung nicht geeigneten Daten kann zu einer Fehleinschätzung der Emissionsanteile einzelner Verursacher und damit zu einer falschen Prioritätensetzung bei der Planung und Umsetzung von umweltentlastenden Maßnahmen führen. Vor diesem Hintergrund wurde im Jahr 2011 ein von der Bund/Länder AG initiiertes zweistufiges Monitoringkonzept zur Verbesserung der Datenbasis für kommunale Kläranlagen als Grundlage für eine plausible Abschätzung der Stoffeinträge entwickelt.

In der ersten Vorhabenstufe wurde, finanziert von den Ländern und der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) und fachlich begleitet von der Bund/Länder AG, 2013-2014 ein Monitoring an drei kommunalen Kläranlagen durchgeführt (Lambert et al. 2014).

Ziele der ersten Vorhabenstufe waren:

- ▶ Entwicklung und Prüfung eines für die Frachtermittlung geeigneten Vorgehens für ein kampagnenbezogenes Monitoring und
- ▶ Ableitung erster mittlerer Ablaufkonzentrationen bzw. Emissionsfaktoren zur Verwendung für die erste Bestandsaufnahme.

Die wichtigsten Eckpunkte der entwickelten Probenahmestrategie waren:

- ▶ Herstellung von Langzeitmischproben (7-Tage-Mischprobe),
- ▶ Getrennte Beprobung von Regen- (RW)¹ und Trockenwetterzuflüsse (TW) zur Identifizierung von Eintragsunterschieden bei Stoffen unterschiedlicher Herkunftsbereiche,
- ▶ Mitbetrachtung konventioneller Abwasserparameter zur Plausibilisierung und
- ▶ Anwendung einheitlicher möglichst sensitiver analytischer Verfahren.

Im Ergebnis dieser Untersuchung in Stufe 1 des Vorhabens haben sich die umgesetzte Probenahmestrategie und die verwendeten analytischen Methoden bewährt. Die Schwankungen der Messdaten zwischen den vier Beprobungskampagnen konnten deutlich reduziert werden. Für die konventionellen Abwasserparameter konnten entsprechend stabile Messwerte erzeugt werden. Eine detaillierte Beschreibung der Probenahmestrategie und der Analytik findet sich im Abschlussbericht des Vorhabens (Lambert et al. 2014).

Insgesamt hat die Vorhabenstufe 1 wesentlich zur Verdichtung der bestehenden Datenbasis der für kommunale Kläranlagen relevanten prioritären Stoffe beigetragen. Die Ergebnisse bilden eine gute Basis für die notwendigen weiterführenden Arbeiten. Nach Abschluss der ersten Vorhabenstufe wurde der folgende Handlungsbedarf und damit die Ziele für die zweite Vorhabenstufe identifiziert:

- ▶ Absicherung und Verdichtung der nach wie vor „unsicheren“ Datenbasis der für kommunale Kläranlagen, relevanten prioritären Stoffe und weiterer Stoffe (bspw. neuer Stoffe der Änderungsrichtlinie 2013/39/EU) und
- ▶ Ableitung differenzierter mittlerer Ablaufkonzentrationen bzw. Emissionsfaktoren zur Abbildung der in Deutschland aufgrund der bestehenden technischen und landnutzungsbedingten (Schwerpunktnutzung des Einzugsgebietes urbane / landwirtschaftlich) Gegebenheiten bestehenden Unterschiede (Indirekteinleitersituation, Kanalisationssysteme etc.).

Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass die Datenbasis zur Abschätzung der Stoffeinträge über Mischwasserentlastungen und Regenwassereinträge ebenfalls zu verbessern ist, um zu plausiblen Aussagen zu Stoffeinträgen über diese Pfade zu gelangen. Daraus ergibt sich das Ziel:

¹ Der Regenwetterzufluss ist durch eine mit Bezug zum Trockenwetter um einen Faktor X erhöhte Zuflusssituation definiert und beschreibt die Mischwasserzuflusssituation der Kläranlagen

- ▶ Verbesserung der Datengrundlage für Mischwasserüberläufe und Regenwassereinleitungen für relevante prioritäre Stoffe und weitere Stoffe (bspw. entsprechend der RL 2013/39/EU).

Die zweite Vorhabenstufe wurde im Zeitraum 2017-2019 vom Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (KIT-IWG), in Zusammenarbeit mit dem DVGW-Technologiezentrum Wasser (TZW) und dem mittelständischen Unternehmen BIOPLAN umgesetzt. Die Aufgabe war, die Durchführung eines deutschlandweit koordinierten und auf harmonisierten Methoden basierenden Monitoring für kommunale Kläranlagen sowie für Mischwasserentlastungen und Regeneinleitungen.

2 Auswahl und Charakterisierung der Standorte

2.1 Kläranlagen

Aus fachlicher Sicht war, mit Blick auf den finanziellen Rahmen, eine ausreichende Anzahl und eine repräsentative Verteilung der Anlagen hinsichtlich Lage, Größe und technischer Ausstattung sicherzustellen, um mögliche Unterschiede der Stoffeintragungssituation sicher zu erfassen. Die hier zu beantwortenden Fragen waren:

- ▶ Gibt es Einflussgrößen, die einen hohen Anteil der Schwankungen von Ablaufkonzentrationen erklären?
- ▶ Wie viele Kläranlagen müssen untersucht werden, um die Repräsentativität der Stichprobe abzusichern?

Zur Prüfung des notwendigen Untersuchungsumfanges wurde eine statistische Vorhabenplanung durchgeführt.

Für die statistischen Tests zur Prüfung der notwendigen Stichprobengröße wurde der deutschlandweite Datensatz zur Berichterstattung der EU-Kommunalabwasserrichtlinie (91/271/EWG) herangezogen (UBA 2008). Die Analysen erfolgten beispielhaft für den Parameter Stickstoff. Eine detaillierte Beschreibung der statistischen Analyse findet sich im Anhang A.1. Im Ergebnis zeigt die Analyse, dass mit einem Stichprobenumfang von ca. $n = 50$ Anlagen eine robuste und im statistischen Sinn sichere Einschätzung der mittleren Stickstoff-Konzentration möglich ist und Einflüsse relevanter Merkmale (Regressoren) quantifizierbar sind. Die ausgewählten Anlagen sollten vordergründig den Anlagenbestand in Deutschland in Bezug auf die behandelte Abwassermenge (nicht Anzahl der Anlagen) und die Art des Entwässerungssystems repräsentieren.

Die Auswahl der zu untersuchenden Kläranlagen erfolgte in enger Abstimmung mit den Vertreter*innen der Länder. Einheitliche fachliche Kriterien wurden entsprechend der Empfehlung der vorgeschalteten Vorhabenplanung abgestimmt. Die ausgewählten Anlagen

- ▶ repräsentieren den aktuellen Anlagenbestand in Deutschland in Bezug auf die
 - behandelte Abwassermenge (implizit Größe),
 - technische Ausstattung (ohne 4. Reinigungsstufe und keine Verfahrenstechnik, die nicht verbreitet ist),
 - Charakteristik des Einzugsgebietes; keine Extremstandorte (z.B. Industrieanlagen, die kommunales Abwasser mitbehandeln) und
 - Art des Entwässerungssystems,
- ▶ sind stabil im Anlagenbetrieb während des Untersuchungszeitraumes und verfügen über eine gute und über längere Zeit zurückreichende Dokumentation des aktuellen Ausbau- und Betriebszustandes (mindestens drei Jahre) im Sinne der Eigenkontrollverordnungen bzw. Selbstüberwachungsverordnungen der Länder und
- ▶ sind repräsentativ über das Bundesgebiet verteilt z.B. im Hinblick auf die behandelte Abwassermenge im Vergleich zur insgesamt deutschlandweit behandelten Abwassermenge.

Die Mehrzahl dieser Auswahlkriterien sind interkorreliert. So besteht ein offensichtlicher Zusammenhang zwischen der Kläranlagengröße und der Schwerpunktnutzung der Einzugsgebiete. Große Kläranlagen haben überwiegend ein städtisches bzw. urbanes Einzugsgebiet, während kleinere Kläranlagen i. d. R. einen nennenswerten Anteil eines ländlichen Einzugsgebietes haben. Auch die Art der Abwasserbehandlung ist häufig abhängig von der Anlagengröße. Und letztlich wird die Systemwahl der Städtentwässerung durch die geografische Lage der Kläranlage determiniert. Im Norden Deutschlands ist überwiegend Trennsystem (TS) und im Süden überwiegend Mischsystem (MS) anzutreffen (Brombach und Dettmar 2016). Im Fall dieser Studie wurde eine Anlage als Trennsystemanlage definiert, wenn mehr als 90 % des Einzugsgebietes im Trennsystem entwässert wird.

Auf Basis der abgestimmten Kriterien haben die Länder eine fachliche Vorauswahl getroffen. Sie waren aufgefordert, die dreifache Menge kommunaler Kläranlagen für das abschließende Auswahlverfahren bereitzustellen (Anhang A.2).

Für alle in Frage kommenden Anlagen wurde den abgestimmten Kriterien folgend ein Profil erstellt, das letztlich zur Endauswahl repräsentativer Anlagen genutzt wurde.

Neben den fachlichen Anforderungen wurden auch organisatorische Aspekte bei der Auswahl berücksichtigt. In der ersten Vorhabenstufe hat sich die enge und gute Zusammenarbeit mit den Kläranlagenbetreiber*innen und dem Kläranlagenpersonal als essentiell für eine erfolgreiche Projektumsetzung und Zielerreichung herausgestellt. Die Bereitschaft der Mitarbeiter*innen auf den Kläranlagen, die vorgegebene Probenahmestrategie zuverlässig umzusetzen, ist eine wesentliche Voraussetzung für eine spätere Vergleichbarkeit der Ergebnisse.

Unter Berücksichtigung der oben aufgeführten Aspekte wurde ein Kollektiv von 49 Kläranlagen ausgewählt (Abbildung 1). Alle Länder mit Ausnahme von Hamburg sind mit mindestens einer Anlage am Vorhaben beteiligt. Von den Anlagen sind sieben im Trenn- und 42 im Mischsystem.

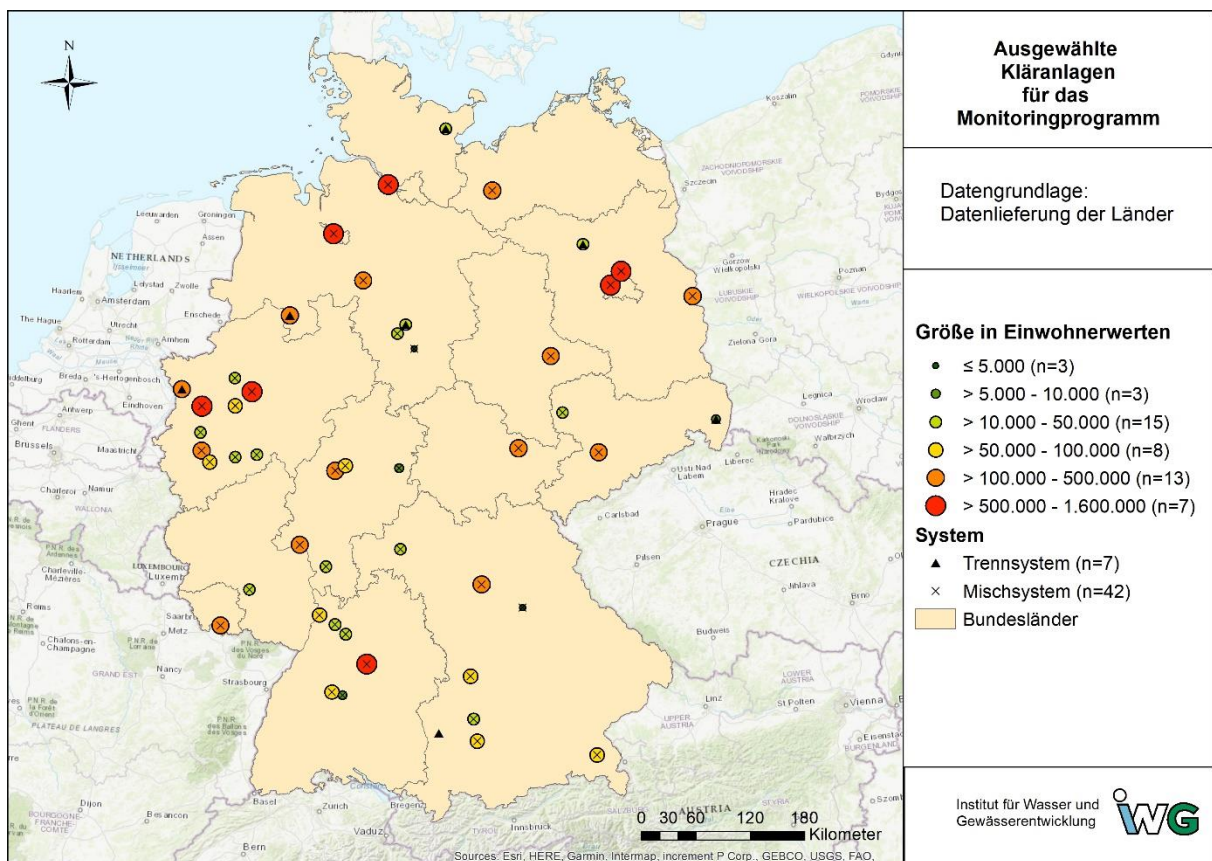
Bezogen auf die behandelte Abwasserlast in Einwohnerwerten (EW) für das Bezugsjahr 2016 (UBA 2018) sind:

- ▶ drei Kläranlagen der Größenklasse (GK) 2 (≤ 5.000 EW),
- ▶ drei Kläranlagen der GK 3 (> 5.000 und ≤ 10.000 EW),
- ▶ 26 Anlagen der GK 4 (> 10.000 und < 100.000 EW) und
- ▶ 17 Anlagen der GK 5 mit > 100.000 EW

zuzuordnen.

Die kleinste Kläranlage behandelte im Jahr 2016 ca. 1.000 EW und die größte ca. 1.500.000 EW (Abbildung 2).

Abbildung 1: Ausgewählte Kläranlagenstandorte

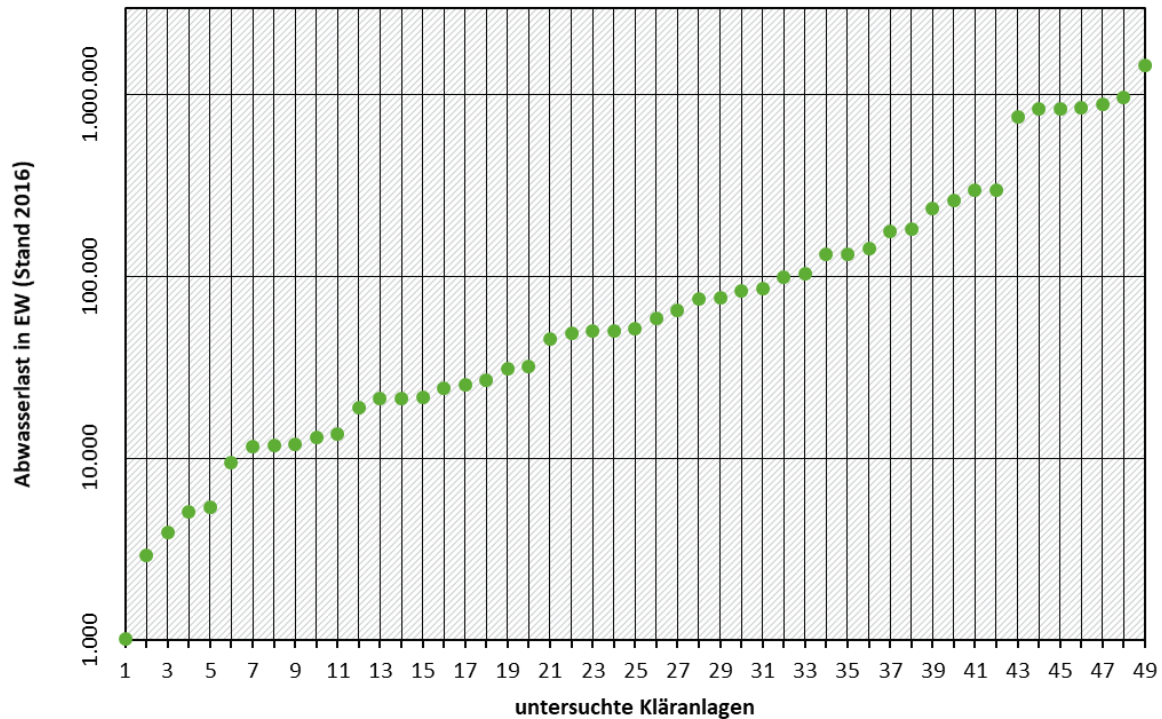


Quelle: eigene Darstellung, KIT-IWG

Für die ausgewählten Anlagen wurde ein Fragebogen zur weiteren Charakterisierung der Kläranlagen und ihrer Einzugsgebiete erstellt, um die Ergebnisinterpretation zu unterstützen und die Grundlage für mögliche Differenzierungen der Emissionsfaktoren/mittleren Ablaufkonzentrationen zu schaffen. Der Fragebogen bezog sich auf die folgenden Merkmale (Anhang A.3):

- ▶ Ausbau, Auslastung (angeschlossene Einwohner, behandelte Einwohnergleichwerte),
- ▶ Abflüsse, Verfahrensstufen, Aufenthaltszeiten, Schlammcharakterisierung,
- ▶ Charakterisierung des Einzugsgebiets,
- ▶ Zu- und Ablaufkonzentrationen für konventionelle Abwasserparameter als Jahresmittelwerte.

Abbildung 2: Behandelte Abwasserlast der untersuchten Kläranlagen in Einwohnerwerten (EW) im Jahr 2016 (UBA 2018)



Quelle: eigene Darstellung, KIT-IWG

Die behandelte Jahresabwassermenge aller untersuchten Kläranlagen liegt bei ca. 545.000.000 m³/a. Dies entspricht etwa 6 % der anfallenden Jahresabwassermenge in Deutschland.

Insbesondere gewerbliche Indirekteinleitungen können in Abhängigkeit der Branche und der Produktion Einfluss auf die Stoffzusammensetzung im Zulauf der kommunalen Kläranlagen haben. Als besondere industrielle Einleiter im Einzugsgebiet der Anlagen wurden u.a. Pharmaindustrie, Galvanikbetriebe, Metallverarbeitung, Molkereien, Brauereien, Schlachtbetriebe, Fleischverarbeitungsbetriebe, sonstige Lebensmittelfabriken, Papierfabriken genannt.

Nicht bei allen Anlagen lagen Informationen zum Fremdwasseranteil vor. Für 36 Kläranlagen liegt der Schwankungsbereich zwischen 6 % und 80 %. Im Mittel liegt der Fremdwasseranteil bei ca. 30 %. Fremdwasserzuflüsse führen zur Verdünnung der Stoffkonzentrationen im Zulauf und bei mäßig bis schlecht abbaubaren Stoffen auch im Ablauf. Hohe Fremdwasserabflüsse können auch bei geringen Konzentrationen zu erhöhten Ablauffrachten führen.

Hinsichtlich der Verfahrenstechnik verfügen alle Kläranlagen über eine mechanische und biologische Abwasserbehandlung sowie eine Phosphor-Fällung (Tabelle 1).

Tabelle 1: Verfahrensstufen der Kläranlagen

Verfahrensstufe	Anzahl der Anlagen vorhanden
Rechen	49
Sandfang/Fettfang	48
Vorklärung	35
Vorgeschaltete Denitrifikation	26
Nitrifikation/Denitrifikation im Belebungsbecken	37
Phosphor-Fällung	49
Nachklärung	49
Schlammfäulung	38
Filtrationsstufe	7

Für eine weitere Charakterisierung der Kläranlagen wurden die in der Eigenüberwachung gemessenen Abwasserparameter ausgewertet. Da diese Angaben nicht von allen Betreibern geliefert wurden, beziehen sich die folgenden Auswertungen nur auf eine Teilmenge des Gesamtkollektivs. Zur Einschätzung der Reinigungsleistung wurden die Zu- und Ablaufkonzentrationen der klassischen Abwasserparameter gegenübergestellt (Tabelle 2). Zusätzlich ist die Anzahl der Anlagen angegeben, die der Berechnung zugrunde liegen. Insgesamt zeigen die Kläranlagen im Monitoringprogramm eine gute Reinigungsleistung in Bezug auf die konventionellen Abwasserparameter. Es sind keine Auffälligkeiten erkennbar.

Tabelle 2: Reinigungsleistung der Kläranlagen in Bezug auf konventionelle Abwasserparameter, berechnet anhand der Eigenkontrollwerte für das Jahr 2016

Parameter	Anzahl der Anlagen	Reinigungsleistung Minimum (%)	Reinigungsleistung Mittelwert (%)
BSB ₅	32	88	98
CSB	45	82	95
NH ₄ -N	35	93	98
N _{ges}	39	56	87
P _{ges}	44	66	91

BSB₅ = Biochemischer Sauerstoffbedarf, CSB = Chemischer Sauerstoffbedarf, NH₄-N = Ammoniumstickstoff, N_{ges} = Gesamtstickstoff, P_{ges} = Gesamtphosphor

Zu Plausibilisierung der gelieferten mittleren Stickstoff- und Phosphor-Konzentrationen im Zu- und Ablauf der Kläranlagen wurden anhand der berichteten Jahresabwassermenge die Frachten berechnet. Diese wurden den von den Ländern im Rahmen der EU-Kommunalabwasserrichtlinie

gelieferten Nährstoff-Frachten für die Anlagen > 2.000 EW behandelte Abwasserlast (UBA 2018) gegenübergestellt. Es zeigte sich eine sehr gute Übereinstimmung.

2.2 Regenwassereinleitungen und Mischwasserentlastungen

Neben den Kläranlagen wurden ausgewählte Regenbecken (RKB – Regenklärbecken) und Mischwasserentlastungen (RÜB – Regenüberlaufbecken) untersucht. Sie sind insbesondere für prioritäre Stoffe ein wichtiger Eintragspfad in die Gewässer.

In Zusammenarbeit mit den Ländern wurden drei Mischwasserentlastungsanlagen und zwei Regenwassereinleitungen für die Beprobung ausgewählt. Die Auswahl erfolgte nach folgenden Kriterien:

- ▶ Lage auf bzw. in unmittelbarer Nähe einer der Kläranlagen,
- ▶ gute Datenlage zum Einstau- und Entlastungsverhalten,
- ▶ Kooperationsbereitschaft der Anlagenbetreiber (Übernahme der Beprobung durch das Personal vor Ort),
- ▶ Verfügbarkeit der notwendigen Infrastruktur (Stromanschluss, Stellfläche für Probenahmeeinrichtung, Entlastungsmessung und Datenaufzeichnung),
- ▶ gute Zugänglichkeit.

Zur Untersuchung der Regenwassereinleitungen wurde zwei RKB ausgewählt, für die aus vorangegangenen Forschungsvorhaben eine gute Kenntnislage bestand. Eine Anlage befindet sich in Baden-Württemberg in unmittelbarer Nähe zum KIT. Die zweite Anlage ist in Berlin und wurde in Kooperation mit der Ingenieurgesellschaft für Stadthydrologie (ifs) untersucht.

Die ausgewählten Mischwasserentlastungsanlagen befinden sich auf drei Kläranlagen des Vorhabens. Im Laufe der Projektbearbeitung wurde klar, dass aufgrund der langen Trockenheit im Probenahmezeitraum die ursprünglich angestrebte Probenanzahl (jeweils 10 Proben pro Standort) mit den drei vorgesehenen Anlagen nicht erreicht werden kann. Deswegen wurden zusätzlich drei Standorte aus einem zeitgleich laufenden Forschungsprojekt im Auftrag vom Bayerischen Landesamt für Umwelt beprobt. Somit wurden im Vorhaben ohne Zusatzkosten insgesamt zwei RKB und sechs RÜB betrachtet.

Eine Übersicht der Standorte sowie die Charakteristik der Anlagen findet sich in Tabelle 3. Eine detaillierte tabellarische Beschreibung der einzelnen Anlagen mit spezifischen Angaben zur Beckencharakteristik, zum Einzugsgebiet und zu den Einstellungen der Messeinrichtung befindet sich im Anhang A.4.

Tabelle 3: Übersicht der untersuchten Regenklärbecken (RKB) und Regenüberlaufbecken (RÜB)

Standort	Typ	Bauart	Volumen (m ³)	Einzugsgebietscharakteristik
RKB1	DB	Rechteckbecken, offen	650	Gewerbegebiet
RKB2	DB	Rechteckbecken, offen	325	Verkehrsflächen, wenig Wohngebiet
RÜB1	DB	Rechteckbecken, offen	380	Städtisch
RÜB2	DB	Rechteckbecken, offen	1.250	Städtisch
RÜB3	DB	Rundbecken, offen	1.414	Städtisch
RÜB4	DB	Rechteckbecken, geschlossen	450	Ländlich geprägtes Wohngebiet
RÜB5	FB	Rechteckbecken, geschlossen	840	Ländlich geprägter Ortsteil
RÜB6	DB	2 Rundbecken, offen	2.800	Städtisch

DB = Durchlaufbecken; FB = Fangbecken

3 Probenahmestrategie

3.1 Kläranlagen

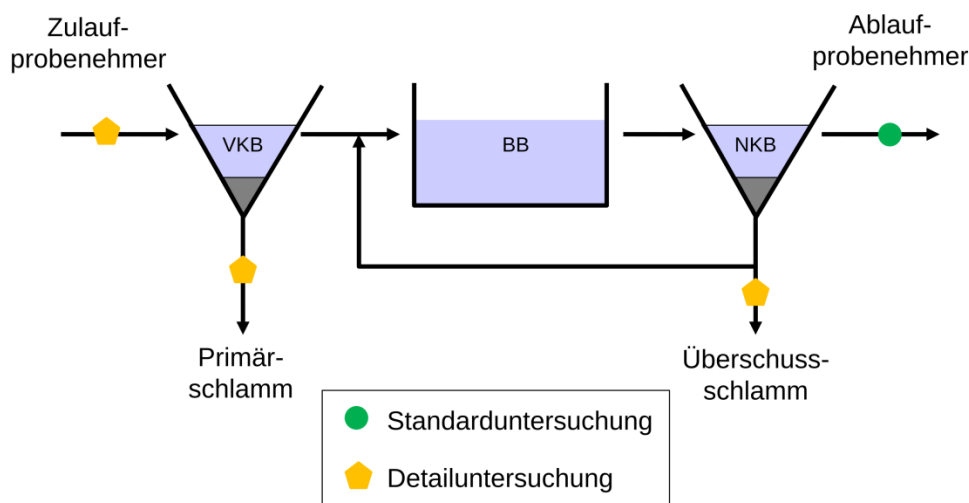
Der Abwasserzufluss von kommunalen Kläranlagen schwankt in Menge und Qualität im Tages- und Wochenverlauf. Er unterliegt saisonalen Schwankungen und ist von singulären Ereignissen geprägt. Ziel dieser Untersuchung ist es, diese Schwankungen zu relativieren, indem robuste mittlere Ablaufkonzentrationen zur Beschreibung des mittleren Systemverhaltens ermittelt werden.

Eine Beprobung der Kläranlagenabläufe erfolgte bei 49 ausgewählten kommunalen Kläranlagen. In fünf Kläranlagen wurden zusätzlich der Zulauf und die Schlammströme untersucht (Primär- und Überschussschlamm soweit möglich). Diese Detailuntersuchungen wurden durchgeführt, um Informationen zum Verhalten der unterschiedlichen Stoffe zu erhalten (Rückhalt, Abbau etc.), Handlungsoptionen auf der Kläranlage quantitativ darstellen zu können und über eine Bilanzierung der Massenströme eine Plausibilisierung der Analyseergebnisse zu ermöglichen.

Die Probenahme wurde bei 39 Kläranlagen im Ablauf der Nachklärung durchgeführt. Bei drei Anlagen erfolgte die Probenahme nach der Filtrationsstufe und bei sieben Anlagen im Ablauf des Schönungsteiches.

Die Probenahmestelle für den Zulauf befindet sich in der Regel im Zulauf des Vorklärbeckens (Abbildung 3).

Abbildung 3: Probenahmepunkte auf den kommunalen Kläranlagen



VKB = Vorklärbecken, BB = Belebungsbecken, NKB = Nachklärbecken

Quelle: eigene Darstellung, KIT-IWG

Mit dem Ziel das mittlere Systemverhalten der Anlagen zu beschreiben, wurde eine Langzeit-Mischprobe angestrebt. In Stufe 1 des Vorhabens erwies sich die 7-Tage-Mischprobe insbesondere für die organische Analytik als sehr gut geeignet (Lambert et al. 2014). Sie reduziert die Streuung der Analyseergebnisse signifikant und reduziert die Kosten für Analytik und Datenverdichtung erheblich ohne Informationsverlust (Lambert et al. 2014).

Zur Herstellung der 7-Tage-Mischprobe werden sieben 24-Stunden-Mischproben (jeweils 1 Liter) nach Homogenisierung der Teilproben in großen 10-Liter-Edelstahlkannen (Abbildung 4) bei -18 °C übereinander gefroren.

Die 7-Tage-Mischprobe besteht aus sieben übereinander gefrorenen Teilproben (je 1l), die den 24-Stunden-Mischproben entnommen wurden. Alle Teilproben werden in eine 10 Liter Edelstahlkanne (Abbildung 4) gegeben und bei -18°C tiefgefroren.

Ein Jahr lang wurden monatlich eine bzw. zwei (Mischwasser-/ Trockenwetterprobe) 7-Tage-Mischproben erzeugt.

Abbildung 4: Probenahmegefäß: 10-Liter-Edelstahlkanne



Quelle: eigene Darstellung, KIT-IWG

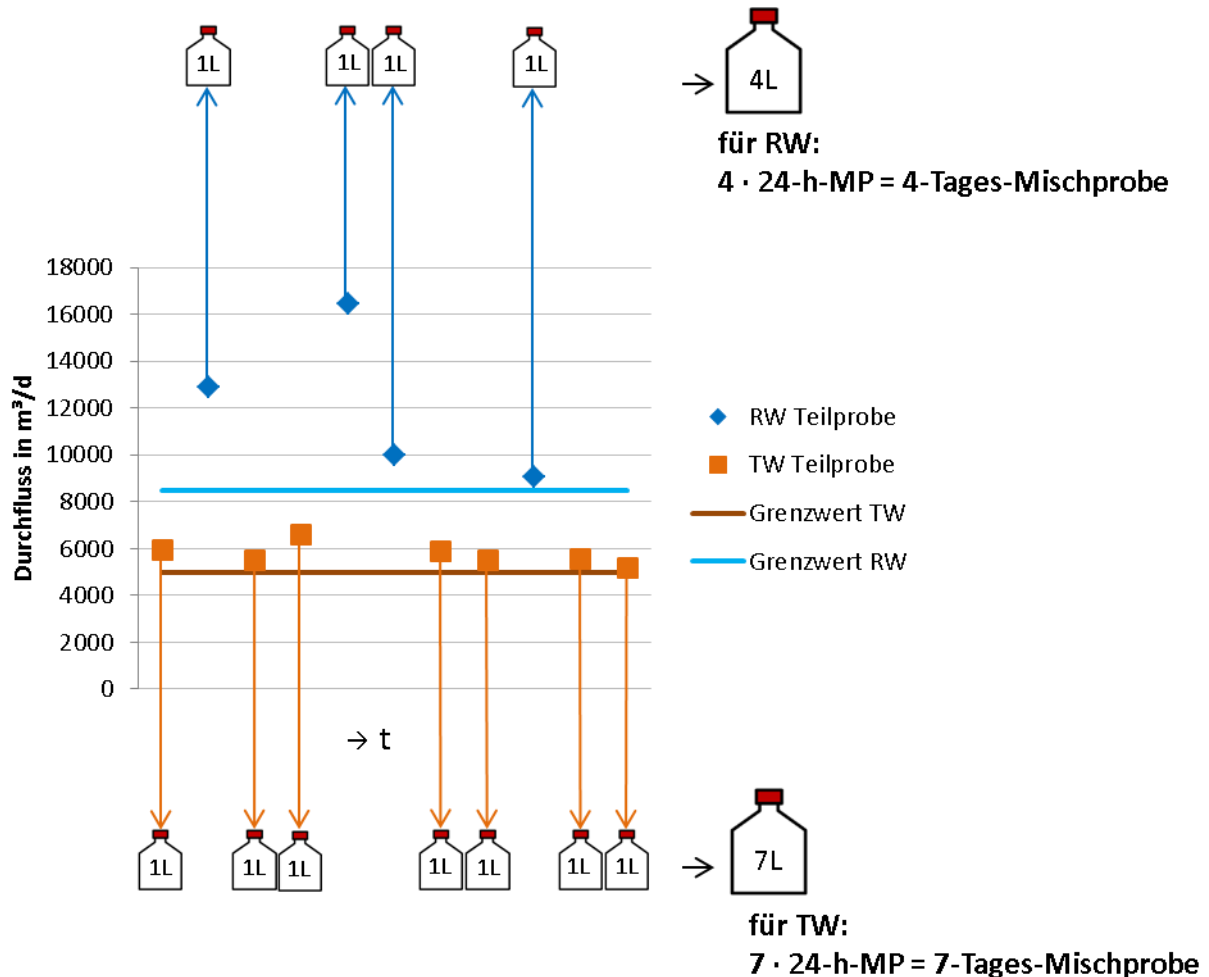
Für die 24-Stunden-Mischproben wurden die auf den Anlagen vorhandenen Probenehmer und Probenehmerschläuche verwendet. Zur Sammlung der 24-Stunden-Mischprobe und der 7-Tage-Mischprobe sollten Gefäße aus Edelstahl verwendet werden, da sich diese sowohl in der Handhabung (Reinigung und Stabilität) als auch hinsichtlich einer Nichtbeeinflussung der Proben bewährt haben. In der praktischen Umsetzung erfolgte die Sammlung der 24-Stunden-Mischproben allerdings nicht auf allen Anlagen wie empfohlen in Edelstahlgefäßen. Grund dafür war, dass die Routinen auf den Kläranlagen möglichst unverändert bleiben sollten. Dort, wo ein problemloser Austausch der Kunststoffflaschen möglich war, wurde die Empfehlung umgesetzt (betrifft elf Anlagen). Auf vier Anlagen wurden Glasflaschen und auf den restlichen 34 Kunststoffflaschen bzw. -behälter verwendet. Die Kläranlagen unterscheiden sich außerdem in der Art der Probenahme der 24-Stunden-Mischproben. Die Probennahmen wurden bei etwa der Hälfte der Anlagen durchfluss-, bei der anderen Hälfte zeitproportional durchgeführt. Im Rahmen der Datenauswertung wurde geprüft, ob diese Abweichungen zu einer relevanten Veränderung der Ablaufkonzentrationen führten. Dies war nicht der Fall, so dass die Proben gemeinsam ausgewertet werden konnten

Da innerhalb der Gesamtstichprobe der Anteil der Anlagen im Trennsystem relativ niedrig ist, wurde bei den Mischsystem-Anlagen Regenwetterproben (Mischwasserproben) und Trockenwetterproben für den Zu- und Ablauf sowie den Primärschlamm genommen. Auf diese Weise sollte geprüft werden, ob die Trockenwetterproben aus Mischsystemanlagen mit den Zulaufproben im Trennsystem vergleichbar sind.

Die Entscheidung, ob eine Tagesmischprobe dem Trockenwetter- oder Regenwetterpool zuzuordnen ist, wurde anhand des Tageszuflusses der jeweiligen Anlage entschieden. Für die Unterscheidung der Zuflusssituation wurde der Faktor 1,5 eingeführt (d. h. Mischwasserzufluss entspricht mindestens dem 1,5-fachen des Trockenwetterzuflusses). In der Umsetzung hat sich gezeigt, dass dieser Wert in den Anlagen mit einem niedrigen Mischsystemanteil im Einzugsgebiet nicht erreicht werden konnte. Daher wurde dieser Faktor kläranlagenspezifisch festgelegt und im Laufe der Untersuchungen bei Bedarf angepasst. Die Faktoren liegen kläranlagenspezifisch zwischen 1,2 und 2,6. Eine schematische Darstellung des

Entscheidungsfalles auf der Anlage hinsichtlich monatlicher Mischwasser- bzw. Trockenwetterzuordnung zeigt Abbildung 5.

Abbildung 5: Schematische Darstellung der Vorgehensweise zur Erstellung der 7-Tage-Mischproben



MP = Mischprobe; RW = Regenwetter; TW = Trockenwetter
Quelle: eigene Darstellung, KIT-IWG

Aus verfahrenstechnischen Gründen erfolgte die Probenahme auf drei der Mischsystem-Anlagen ohne Unterscheidung in Regen- und Trockenwetterprobe.

Jede Probe die ins Labor geschickt wurde, sollte mindestens aus drei Teilproben bestehen. Standen im betreffenden Monat weniger Teilproben zur Verfügung, war die Probe zu verwerfen und dies entsprechend zu protokollieren.

Durch wetterbedingte Gegebenheiten konnte nicht auf jeder Mischsystem-Anlage für jede Monatsmesskampagne eine Regenwetter- und Trockenwetterprobe entnommen werden. In den Wintermonaten hatten einige Kläranlagen nur Regenwetterzufluss. An anderen Standorten konnte in den Sommermonaten keine Regenwetterprobe erzeugt werden.

Nach Herstellung der monatlichen Mischproben (im Idealfall 7-Tage-Mischproben) für die Zu- und Ablaufprobenahme wurden diese gefroren zum Analyselabor transportiert.

Für die Beprobung der Schlämme war in der Planung eine zeitgleiche Beprobung zu den Wasserströmen vorgesehen. Diese Vorgehensweise konnte allerdings nicht für alle

Monatmesskampagnen eingehalten werden. Die Primärschlämme der Mischsystem-Anlagen wurden gefroren und am Ende des 7-Tage Zyklus aufgetaut, homogenisiert und in 1 Liter-PE-Flaschen abgefüllt und anschließend versandt. Auf einer Anlage wurden nur Stichproben gezogen.

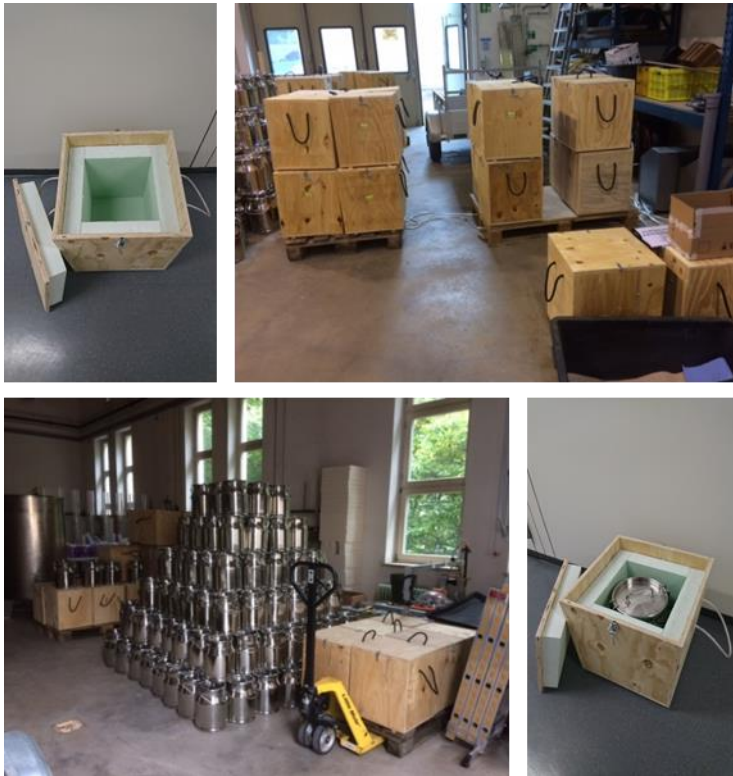
Die Überschussschlammproben wurden als Stichproben einmal monatlich unabhängig von der Wettersituation entnommen, da sie über die lange Verweilzeit im System bereits eine Langzeitprobe repräsentieren. Die Probenahme erfolgte in 1 Liter-PE-Flaschen. Der Versand erfolgte als gekühlte frische Probe. Tabelle 4 zeigt die Verteilung der Proben auf die Probenahmeorte.

Tabelle 4: Anzahl der Proben je Probenahmeort bei Mischwasser- und Trockenwetterzufluss

Probenahmeort	Anzahl Proben		
	insgesamt	Mischwasser	Trockenwetter
Zulauf	96	29	67
Ablauf	1.000	401	599
Primärschlamm	57	11	46
Überschussschlamm	65	-	-

Um zu gewährleisten, dass die ausgewählte Probenahmestrategie auf allen Kläranlagen einheitlich umgesetzt wird, wurde das Kläranlagenpersonal vor Ort persönlich eingewiesen. Weiterhin lag jedem Probentransport eine ausführliche Schritt-für-Schritt-Anleitung bei. Der Transport der Proben erfolgte in isolierten Sperrholzkisten, die speziell für das Vorhaben entwickelt wurden (Abbildung 6).

Abbildung 6: Transportkisten für Probenahmegefäße (Kläranlage/Labor)



Quelle: eigene Darstellung, KIT-IWG

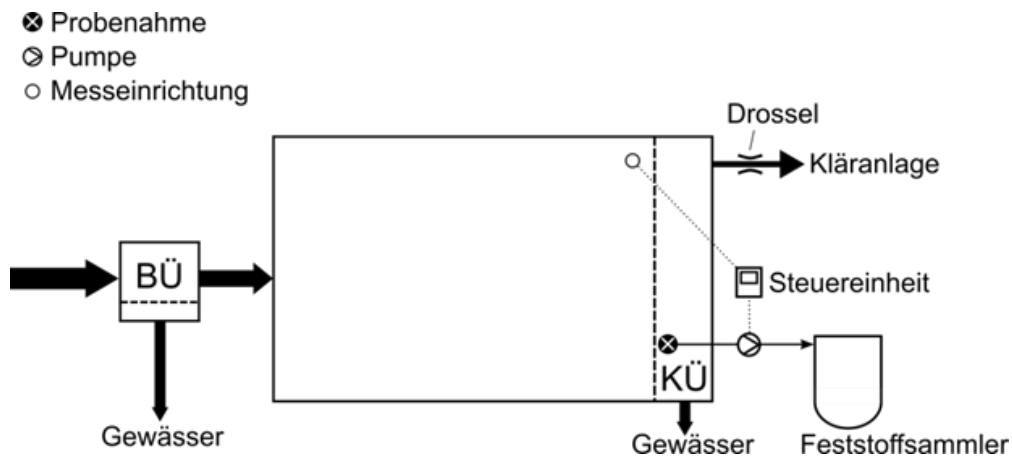
Für Dokumentationszwecke war für jede 7-Tage-Mischprobe ein Probenahmeprotokoll zu erstellen, in dem die Entstehung der 7-Tage-Mischprobe mit Datum, Probenahmeort, Wettersituation und Abfluss dokumentiert wurde (siehe Anlage A.5). Die Probenahmeprotokolle waren für die räumliche und zeitliche Zuordnung der Probe, für die Angaben zur Probenahmeart und für die Zuflussverhältnisse essentiell.

3.2 Regenwassereinleitungen und Mischwasserentlastungen

Das Institut für Wasser- und Gewässerentwicklung des KIT hat sich in den vergangenen zehn Jahren intensiv mit dem Monitoring von Regenwasserbehandlungsanlagen und dem Eintrag von Schadstoffen aus urbanen Gebieten befasst (z.B. Fuchs et al. 2010; Eyckmanns-Wolters et al. 2013; Fuchs et al. 2014; Kemper et al. 2015).

Im Rahmen des Vorhabens wurden die Entlastungsabflüsse der RKB und der Mischwasserbehandlungsanlagen ereignisbasiert und volumenproportional beprobt. Für die Beprobung wurden an sieben Standorten Feststoffsammler installiert. An einem RKB erfolgte die Probenahme mittels eines automatischen Probenehmers. Die Abbildung 7 zeigt schematisch die Probenahme mit Feststoffsammler am Klärüberlauf eines RÜB.

Abbildung 7: Probenahme mit Feststoffsammler am Klärüberlauf eines Regenüberlaufbeckens



BÜ = Beckenüberlauf, KÜ = Klärüberlauf

Quelle: eigene Darstellung, KIT-IWG

Die Ansteuerung der Probenahme erfolgte über Messsignale, die von den üblichen Messeinrichtungen (Ultraschall- oder Drucksonden) an eine für diesen Anwendungsfall entwickelte Steuerungseinheit weitergeleitet wurden. Dort wurde der Entlastungsabfluss berechnet und die Probenahmepumpe nach definierten Volumenintervallen aktiviert. Durch eine geeignete Konfiguration der Teilproben und Intervalle wurden Entlastungsereignisse über ihre gesamte Dauer repräsentativ beprobt. Der Sammelbehälter fasst Mischproben mit einem Volumen von bis zu 950 l. Das gesammelte Probenmaterial war auch bei kleinen Entlastungsereignissen und geringerem Volumen ausreichend für eine umfangreiche Schadstoffanalytik.

Alle Komponenten des Feststoffsammlers mit langer Kontaktzeit zur Probe waren in Edelstahl ausgeführt (Tank, Hähne), um Minder- bzw. Mehrbefunde aufgrund von Adsorptions- und Desorptionsprozessen zu minimieren.

In Tabelle 5 sind die verwendeten Messsignale für die Ansteuerung der volumenproportionalen Beprobung und die angewandte Abflussberechnung zusammengefasst.

Tabelle 5: Messsignale für die Ansteuerung der volumenproportionalen Beprobung und angewandte Abflussberechnung

Standort	Messeinrichtung	Signal	Abflussberechnung
RKB1	NIVUS Durchflussmessung Zulauf	Durchfluss	Linear
RKB2	Abflussmessung im Zulaufkanal	Abfluss	OCMpro
RÜB1	Ultraschallsonde am Klärüberlauf	Wasserstand	Poleni-Formel
RÜB2	Ultraschallsonde am Klärüberlauf	Wasserstand	Poleni-Formel
RÜB3	Ultraschallsonde am Klärüberlauf	Wasserstand	Polynom
RÜB4	Ultraschallsonde im Zulauf	Wasserstand	An Kennlinie gefittetes Polynom
RÜB5	Stauschild-Winkelgeber	Winkel	Lineare Kennlinie
RÜB6	Ultraschallsonde in Becken	Abfluss	Linear

Nach dem Ereignis wurde aus dem Feststoffsammler eine homogenisierte Mischprobe entnommen und in vier Probeflaschen abgefüllt:

- ▶ 2 Liter PE-Flasche für konventionelle Abwasserparameter,
- ▶ 2 Liter Braunglasflasche für organische Schadstoffe,
- ▶ 0,25 Liter LDPE-Flasche mit Säurevorlage (2,5 ml einer 1:1 verdünnten konzentrierten Salpetersäure) für Schwermetalle,
- ▶ 0,1 Liter Duranglasflasche mit Säurevorlage (2 ml einer 1:1 verdünnten konzentrierten Salpetersäure und 1 ml Kaliumdichromat-Lösung (1,25 g $K_2Cr_2O_7$ in 250 ml 1:1 verdünnter konzentrierter Salpetersäure) für Quecksilber.

Zur Homogenisierung wurde die Probe im Feststoffsammler mit einer Tauchpumpe ca. 5 Minuten umgewälzt. (Abbildung 8).

Abbildung 8: Homogenisierung mit Tauchpumpe im Feststoffsammler, Probenahmeflaschen, Entnahme der homogenisierten Mischprobe aus dem Feststoffsammler



Quelle: eigene Darstellung, KIT-IWG

Das Probenahmepersonal wurde anhand einer Probenahmевorschrift in die Vorgehensweise eingewiesen. Diese beinhaltete beispielsweise, dass die Feststoffsammler nach jeder Probenahme entleert und gereinigt wurden. Für die Probenahme wurde ein Protokoll geführt, das neben dem Datum des Ereignisses auch Informationen zur Unterstützung der Datenanalyse enthielt, z.B. den Behälterfüllstand. Die Proben wurden kühl aufbewahrt und so schnell wie möglich versandt. Für den Versand der Proben wurden isolierte Transportboxen verwendet (Abbildung 9).

Abbildung 9: Transportbox für die homogenisierten Mischproben



Quelle: eigene Darstellung, KIT-IWG

Die Probennahme begann im Juni 2018 und wurde bis August 2019 fortgeführt, um möglichst die ursprünglich vorgesehene Probenanzahl von 50 zu erreichen.

4 Analytik der prioritären Stoffe und Begleitparameter

4.1 Parameterauswahl

Die Auswahl der zu untersuchenden Stoffe orientiert sich grundlegend an den Anforderungen der OGeWV (2016), d.h., an der Liste der Stoffe nach Anhang 8 OGeWV. Die abschließende Stoffauswahl basierte auf:

- ▶ der Umweltrelevanz der Stoffe insbesondere in den Fließgewässern,
- ▶ der Bedeutung des kommunalen Abwassersystems als relevantem Eintragspfad sowohl mit Blick auf die Herkunftsbereiche der Stoffe als auch basierend auf bereits vorliegende Untersuchungen (insbesondere Vorhabenstufe 1).

Die neuen Stoffe der Änderungsrichtlinie 2013/39/EU (UQN-RL) bzw. der OGeWV (2016) wurden komplett in die Stoffliste aufgenommen. Aus der Gruppe der perfluorierten Verbindungen (PFC) ist allein Perfluoroktansulfonsäure (PFOS) in der UQN-RL (2013/39/EU) geregelt. Trotzdem wurden insgesamt 16 PFC-Vertreter gemessen. Ähnliches gilt für die polycyclischen Kohlenwasserstoffe (PAK). Hier wurden alle 16 EPA-PAK in das Messprogramm aufgenommen, obwohl nur einzelne in der UQN-RL geregelt sind. Diese Auswahl erfolgte in enger Abstimmung mit allen Ländern.

Im Rahmen des Monitoring-Programms wurden die Proben aus den Zu- und Abläufen der kommunalen Kläranlagen sowie die entnommenen Klärschlämme auf insgesamt 54 Stoffe analysiert (prioritäre Stoffe und weitere Einzelsubstanzen siehe Tabelle 6). Zusätzlich zu den Schadstoffen wurden in den Wasser- und Schlammproben klassische Abwasserparameter als Begleitparameter analysiert. Sie erlauben eine Beschreibung und eine zuverlässige Einschätzung des Betriebsverhaltens der untersuchten Anlagen und wurden als Plausibilisierungsgröße und Interpretationshilfe für die Schadstoffanalytik genutzt. In allen Proben wurden die Begleitparameter Ammonium- und Nitrat-Stickstoff analysiert.

Bei den fünf Kläranlagen, die einer detaillierten Untersuchung unterlagen, wurden zahlreiche Begleitgrößen untersucht. Als Begleitparameter in den Zu- und Abläufen wurden analysiert:

- ▶ Leitfähigkeit (Lf), Säurekapazität ($Ks_{4,3}$),
- ▶ abfiltrierbare Stoffe (AFS_{ges}), Glühverlust (GV),
- ▶ gesamter und nur gelöster chemischer Sauerstoffbedarf (CSB_{ges} , CSB_{gel}),
- ▶ gesamter organischer Stickstoff (N_{org}), Gesamtstickstoff (N_{ges}), Ammonium-Stickstoff (NH_4-N), Nitrit-Stickstoff (NO_2-N) und Nitrat-Stickstoff (NO_3-N),
- ▶ Gesamtphosphor (P_{ges}), Orthophosphat-Phosphor (PO_4-P) und
- ▶ Eisen (Fe).

In den Schlammproben wurden GV, P_{ges} , Kupfer (Cu), Aluminium (Al), Eisen (Fe) und Zink (Zn) analysiert.

In den Ablaufproben der Standarduntersuchung wurden die Parameter Ammonium-Stickstoff (NH_4-N) und Nitrat-Stickstoff (NO_3-N) analysiert.

Tabelle 6: Liste der untersuchten prioritären Stoffe der OGewV 2016 einschließlich weiterer PAK- und PFC-Einzelsubstanzen

Stoffe	CAS-Nummer	Stoffe	CAS-Nummer	Stoffe	CAS-Nummer	Stoffe	CAS-Nummer
Blei	7439-92-1	Naphthalin	91-20-3	Perfluorbutanoat (PFBA)	375-22-4	Aclonifen	74070-46-5
Cadmium	7440-43-9	Acenaphthylen	208-96-8	Perfluorpentanoat (PFPA)	2706-90-3	Atrazin	1912-24-9
Nickel	7440-02-0	Acenaphthen	83-32-9	Perfluorhexanoat (PFHxA)	307-24-4	Bifenox	53774-07-5
Quecksilber	7439-97-6	Fluoren	86-73-7	Perfluorheptanoat (PFHpA)	375-85-9	Heptachlorepoxyd	1024-57-3
4-iso-Nonylphenol	84852-15-3	Phenanthren	85-01-8	Perfluoroctanoat (PFOA)	335-67-1	Cybutryn	28159-98-0
4-tert.-Oktylphenol	140-66-9	Anthracen	120-12-7	Perfluorononanoat (PFNA)	375-95-1	Cypermethrin	72204-44-5
Di-(2-ethylhexyl)phthalat	117-81-7	Fluoranthren	206-44-0	Perfluordecanoat (PFDA)	375-76-2	Diclorvos	62-73-7
HBCDD (Summe)	3194-55-6	Pyren	129-00-0	Perfluorundecanoat (PFUnA)	2058-94-8	Dicofol	115-32-2
		Benz[a]anthracen	56-55-3	Perfluordodecanoat (PFDoA)	2058-94-8	Diuron	330-54-1
		Chrysen	218-01-9	Perfluorbutansulfonat (PFBS)	375-73-5	Heptachlor	76-44-8
		Benzo[b]fluoranthren	207-08-2	Perfluorpentansulfonat (PFPeS)	2706-91-4	Isoproturon	34123-59-6
		Benzo[k]fluoranthren	207-08-9	Perfluorhexansulfonat (PFHxS)	355-46-4	Quinoxifen	124495-18-7
		Benzo[a]pyren	205-99-2	Perfluorheptansulfonat (PFHpS)	375-92-8	Terbutryn	886-50-0
		Indeno[1,2,3-cd]pyren	193-39-5	Perfluoroctansulfonat (PFOS)	1763-23-1		
		Dibenz[a,h]anthracen	53-70-3	Perfluordecansulfonat (PFDS)	335-77-3		
		Benzo[g,h,i]perylen	191-24-2	1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonat (H4PFOS)	27619-97-2		

In den Proben der Regenwassereinleitungen und Mischwasserentlastungen wurden ebenfalls zahlreiche Begleitparameter gemessen:

- ▶ pH-Wert, Lf, Ks_{4,3},
- ▶ Trockenrückstand (TR), AFS_{ges}, abfiltrierbare Stoffe zwischen 63 – 2.000 µm (AFS_{grob}), abfiltrierbare Stoffe < 63 µm (AFS₆₃), Glühverlust der abfiltrierbaren Stoffe < 63 µm (GV AFS₆₃), Glühverlust der abfiltrierbaren Stoffe 63 – 2000 µm (GV AFS_{grob}),
- ▶ CSB_{ges}, CSB_{gel},
- ▶ NH₄-N, NO₃-N, N_{ges}, o-PO₄-P und P_{ges}.

4.2 Probenaufbereitung

4.2.1 Abwasserproben

Die Abwassermischproben der Kläranlagenzuläufe und -abläufe erreichten das TZW in gefrorenem Zustand in Edelstahlgefäßen. Die Proben wurden bei Raumtemperatur innerhalb von ein bis zwei Tagen aufgetaut (Abbildung 10, links). Aus den Edelstahlgefäßen wurden die aufgetauten Proben unter wiederholtem Aufschütteln in Braunglasflaschen (für die Bestimmung der organischen Parameter) bzw. in PE-Flaschen (für die Bestimmung der Schwermetalle) umgefüllt (Abbildung 11). Damit alle Teilproben repräsentativ für die Gesamtprobe waren, wurden die Proben vor dem Umfüllen weitgehend homogenisiert. Für die organischen Parameter war keine Probenstabilisierung mit Chemikalien notwendig. Die Teilproben für die Schwermetallanalytik wurden zur Stabilisierung mit konzentrierter Salpetersäure (1 Vol-%) angesäuert. Bis zur Analyse wurden die Proben kühl bei 4 °C gelagert (Abbildung 10, rechts).

Nach dem Umfüllen wurden die Edelstahlgefäße zunächst mit Trinkwasser und demineralisiertem Wasser gespült und abschließend mit Isopropanol gereinigt. Nach dem Trocknen standen sie dann für die nächste Probenahme zur Verfügung.

Die Proben der Regenwassereinleitungen und Mischwasserentlastungen wurden als Mischproben bereits in Braunglasflaschen und PE-Flaschen angeliefert, so dass hier das Umfüllen entfallen konnte. Die Proben wurden direkt nach Anlieferung bis zur Analyse bei 4 °C gelagert.

Abbildung 10: Auftauen der Wasserproben in den Edelstahlgefäßen (links) und Lagerung der abgefüllten Proben in der Kühlkammer (rechts)



Quelle: eigene Darstellung, TZW

Abbildung 11: Umfüllen einer Wasserprobe aus dem Edelstahlgefäß in eine Braunglasflasche (links) und eine PE-Flasche (rechts)



Quelle: eigene Darstellung, TZW

4.2.2 Klärschlammproben

Die in 1 Liter-Kunststoffbehältnissen angelieferten wasserhaltigen Klärschlammproben wurden zunächst in Zentrifugenbecher aus Edelstahl überführt und durch Zentrifugieren mit einer Standzentrifuge (Sigma 8KS) teilentwässert. Die partikelfreie Wasserphase wurde dekantiert und verworfen (Abbildung 12). Der verbleibende Klärschlamm wurde eingefroren und gefriergetrocknet (Laborgefrieretrocknungsanlage LSCplus, Firma Christ). Abschließend wurden die gefriergetrockneten Klärschlämme mit Hilfe einer Planeten-Kugelmühle (Firma Fritsch)

gemahlen und homogenisiert. Der Wassergehalt der Proben wurde anhand der Masse der Originalprobe und der Masse der gefriergetrockneten Probe berechnet.

Abbildung 12: Klärschlammproben in den Zentrifugenbechern vor dem Zentrifugieren (links) und nach dem Zentrifugieren und Dekantieren der Wasserphase (rechts)



Quelle: eigene Darstellung, TZW

4.3 Analyseverfahren zur Bestimmung der prioritären Stoffe

Im Rahmen des Projektes wurden für viele der untersuchten Stoffe spezielle Analysemethoden entwickelt und etabliert, so dass durch die sensitiven analytischen Methoden möglichst viele Stoffe mit Werten $> BG$ im kommunalen Abwasser nachgewiesen werden können. Als Mindestanforderung für die Analytik im Ablauf der Kläranlagen wurde zu Projektbeginn das Erreichen einer analytischen BG von 30 % der Umweltqualitätsnorm formuliert. Das konnte für viele der Stoffe erreicht werden. Für einzelne Stoffe konnte die genannte Mindestanforderung an die BG nicht erreicht werden. Dies liegt daran, dass die UQN für einige Stoffe sehr niedrig und die analytischen Methoden noch nicht ausreichend empfindlich sind. Dies betrifft die Stoffe HBCDD (Summe), Perfluoroctansulfonat (PFOS), Benzo[a]pyren, Heptachlorperoxid, Cybutryn, Cypermethrin, Dichlorvos, Dicofol und Heptachlor. Zudem konnten aus finanziellen Gründen keine parameterspezifischen Einzelstoffmethoden eingesetzt werden. Für Heptachlor und Cypermethrin sind die JD-UQN in einem sehr niedrigen Konzentrationsbereich, der bis jetzt von keinem Analyseverfahren erreicht werden konnte. Auch ist zu berücksichtigen, dass die Matrix Abwasser im Vergleich bspw. zu Gewässerproben schwieriger zu analysieren ist.

Im Laufe des Vorhabens wurde deutlich, dass die Mindestanforderung (analytische BG ist mindestens 30 % der Umweltqualitätsnorm) für einzelne Stoffe nicht ausreicht, um, wie für eine Frachtberechnung notwendig, Werte $> BG$ zu detektieren. Hier wurden soweit möglich weitere Anstrengungen zur Absenkung der analytischen BG unternommen.

4.3.1 Schwermetalle

Die Bestimmung der Schwermetalle Cadmium, Nickel und Blei erfolgte nach DIN EN ISO 17294, d. h. mittels Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-MS). Quecksilber wurde nach DIN EN ISO 17852, d. h. mittels Atomfluoreszenzspektrometrie bestimmt. Vor der Messung wurde für alle Abwasser- und Feststoffproben ein Mikrowellenaufschluss unter Zugabe von Säure (Aufschlussapparatur Multiwave PRO, Firma Paar) durchgeführt, um auch die

partikelgebundenen Anteile zu erfassen. Für den Aufschluss der Wasserproben wurden 29,5 ml Probe mit 0,5 ml konzentrierter Salpetersäure versetzt, für den Aufschluss der Feststoffproben 500 mg Feststoff mit 4,5 ml konzentrierter Salzsäure und 1,5 ml konzentrierter Salpetersäure („Königswasser“). Die Proben wurden jeweils in der Mikrowelle aufgeschlossen. Die Aufschlusslösung der Feststoffe wurde nach dem Aufschluss mit MilliQ-Wasser auf 50 ml verdünnt, um den Säuregehalt in der Messlösung zu reduzieren. Die Bestimmung der Schwermetalle erfolgte anschließend sowohl für die Wasserproben als auch für die Feststoffproben mittels ICP-MS bzw. AFS. Die wichtigsten Parameter der Aufschlüsse und Messungen sind in Tabelle 7, Tabelle 8 und Tabelle 9 zusammengefasst.

Tabelle 7: Aufschlussbedingungen für die Bestimmung der Schwermetalle

Parameter	Wasserphase	Feststoff
Probenvolumen	29,5 ml	500 mg
Säurezugabe	0,5 ml Salpetersäure	4,5 ml Salzsäure, 1,5 ml Salpetersäure
Mikrowelle	Multiwave PRO (Paar)	Multiwave PRO (Paar)
Temperaturprogramm	Heizen auf 180 °C (15 min), Halten (55 min), Kühlen auf 70 °C (19 min)	Heizen auf 135 °C (10 min), Halten (40 min), Kühlen auf 70 °C (11 min)
Max. Mikrowellenleistung	1.500 W	1.500 W
Endvolumen	30 ml	50 ml

Tabelle 8: ICP-MS-Parameter für die Bestimmung von Cadmium, Nickel und Blei

Parameter	Bedingung/Umsetzung
Gerät	ICP-MS 7900 (Agilent Technologies)
RF Leistung	1.550 W
Plasmagas	Argon
Plasmafluss	15 l/min
Carriergasfluss	1,04 l/min
Make-up-Gasfluss	0,2 l/min
Zerstäuber	MicroMist
Messmodus	No-gas (Cd, Pb), Helium (Ni)
Analysenzeit	2 min
Quantifizierungsmassen	111 (Cd), 60 (Ni), 206/207/208 (Pb)
Wiederholmessungen	3

Tabelle 9: AFS-Parameter für die Bestimmung von Quecksilber

Parameter	Bedingung/Umsetzung
Gerät	Mercur plus Quecksilber-Fluoreszenzanalysator (Analytik Jena)
Strahlungsquelle	Hg-Niederdrucklampe
Wellenlänge	253,7 nm
Integrationszeit	20 s
Auswertung	Peakhöhe

4.3.2 Pestizide (Aclonifen, Atrazin, Bifenox, Cybutryn, Dichlorvos, Diuron, Isoproturon, Quinoxyfen, Terbutryn)

Die Bestimmung der genannten prioritären Stoffe erfolgte aus der Gesamtwasserprobe mittels Flüssigchromatographie und Tandem-Massenspektrometrie (HPLC-MS-MS) nach on-line-Festphasenanreicherung mit einem PAL-Autosampler (Firma CTC-Analytics). Vor der Anreicherung wurden die Kläranlagenzuläufe im Verhältnis 1:5 mit Trinkwasser verdünnt, die Kläranlagenabläufe wurden unverdünnt analysiert. Die 5 ml Wasserproben wurden mit einer methanolischen Lösung verschiedener interner Standards versetzt (Aclonifen-d5, Atrazin-d5, Bifenox-d3, Cybutryn-d9, Dichlorvos-d6, Diuron-d6, Isoproturon-d6, Quinoxyfen-d4 und Terbutryn-d5), automatisiert mittels online-SPE auf der Festphase angereichert und eluiert. Das Eluat gelangte dann direkt in das HPLC-System, wo die Trennung und Detektion der Zielverbindungen stattfanden. Durch das kleine Anreicherungs-volumen kann die Gesamtwasserphase analysiert werden, da nur sehr wenige partikuläre Bestandteile der Abwasserproben auf die Anreicherungskartuschen gelangen. Bei der anschließenden Elution kommen diese Partikel ebenfalls mit dem organischen Lösemittel in Kontakt, so dass bei diesem Verfahren auch die auf den Partikeln sorbierten Zielverbindungen erfasst werden.

Für die Analyse der Klärschlämme wurden 100 mg der gefriergetrockneten Probe mit Aceton im Ultraschallbad extrahiert (Sonorex, Firma Bandelin) und anschließend zentrifugiert (Sigma 8KS, Firma Sigma). Der Extrakt wurde eingengt und in 100 µl Methanol rückgelöst. Für die weitere Analytik wurde der methanolische Extrakt in 10 ml Trinkwasser gegeben und ein Aliquot in der für die Wasserproben beschriebenen Weise analysiert. Die wichtigsten Parameter der Probenvorbereitung und der HPLC-MS-MS-Analyse sind in Tabelle 10, Tabelle 11, Tabelle 12 und Tabelle 13 zusammengestellt.

Tabelle 10: Anreicherungsbedingungen zur Bestimmung von Pflanzenschutzmittel- und Biozid-Wirkstoffen und -Transformationsprodukte in Abwasserproben

Parameter	Bedingung/Umsetzung
Probenvolumen	5 ml
pH-Wert	original
Autosampler	PAL RTC (PAL System)
Anreicherungskartusche	C18HD (18,5 mg C18-Material, Gerstel)
Konditionierung	1 ml Methanol 2 ml HPLC-Wasser
Elutionsmittel	Gradient Wasser - Methanol siehe Eluentenprogramm der HPLC-Methode

Tabelle 11: Anreicherungsbedingungen zur Bestimmung von Pflanzenschutzmittel- und Biozid-Wirkstoffen und Transformationsprodukte in Feststoffen

Parameter	Bedingung/Umsetzung
Feststoffmenge	100 mg
Extraktionsmittel	Aceton
Extraktionsvolumen	2 x 5 ml
Ultraschallbehandlung	15 min
Zentrifugieren	5.000 rpm 15 min 12 °C
Endvolumen	5 ml

Tabelle 12: HPLC-MS-MS-Parameter zur Bestimmung von Pflanzenschutzmittel- und Biozid-Wirkstoffen und Biozid-Transformationsprodukten in Abwasserproben

Parameter	Bedingung/Umsetzung
HPLC-System	HPLC 1290 (Agilent Technologies)
Injektionsvolumen	5 ml
Trennsäule	X-Bridge Peptide BEH C18, 150 mm x 2,1 mm; 3,5 µm (Waters)
Temperatur	40 °C
Eluenten	A: HPLC-Wasser + 1 mM Ammoniumformiat + 0,1 % Ameisensäure B: Methanol + 1 mM Ammoniumformiat + 0,1 % Ameisensäure
Eluentenprogramm	0 min: 70 % A 30 % B 2 min: 45 % A 55 % B 9 min: 35 % A 65 % B 10 min: 0 % A 100 % B 20 min: 0 % A 100 % B 21 min: 70 % A 30 % B 26 min: 70 % A 30 % B
Fluss	0,2 ml/min
MS-MS-System	API 5500 (SCIEX)
Interface	Elektrospray (ESI)
Ionisierungsmodus	positiv/negativ
Ionisierungsspannung	+5500 V/-5500 V

Tabelle 13: Precursor- und Produkt-Ionen zur Analyse von Pflanzenschutzmittel- und Biozid-Wirkstoffen in Abwasserproben

Stoff	Precursor-Ion (m/z)	Produkt-Ion I (m/z)	Produkt-Ion II (m/z)	Ionisierungsmodus
Aclonifen	264,9	182,0	193,9	positiv
Atrazin	216,1	61,9	68,0	positiv
Bifenox	359,0	188,8	310,0	positiv
Cyburtryn	254,1	67,9	83,0	positiv
Dichlorvos	221,0	109,0	127,0	positiv
Diuron	233,0	71,9	46,2	positiv
Isoproturon	207,2	72,1	46,1	positiv
Quinoxifen	308,0	162,1	196,9	positiv
Terbutryn	242,1	71,1	67,9	positiv

4.3.3 Polycyclische Kohlenwasserstoffe (PAK), chlorierte Verbindungen, Alkylphenole und DEHP

Die Bestimmung der 16 polycyclischen Kohlenwasserstoffe (PAK) nach EPA, chlorierten Verbindungen, Alkylphenole und DEHP erfolgte mittels Gaschromatographie mit Tandem-Massenspektrometrie (GC-MS-MS) nach flüssig-flüssig-Extraktion mit Cyclohexan. Vor der Extraktion wurden die Wasserproben mit Trinkwasser im Verhältnis 1:5 (Kläranlagenzulauf) bzw. 1:2 (Kläranlagenablauf) verdünnt und mit einer Lösung verschiedener interner Standards (16 deuterierte EPA-PAK, cis-Heptachlorepoxyd-¹³C10, n-Oktylphenol-d17, n-Nonylphenol, DEHP-d4 in Methanol) sowie 50 ml Aceton versetzt. Nach Vorbehandlung der Proben im Ultraschallbad (12 min) erfolgte die flüssig-flüssig-Extraktion mit Cyclohexan für 30 Minuten unter starkem Rühren mittels Magnetprüher. Der Lösemittel-extrakt wurde über Natriumsulfat getrocknet, über Kieselgel aufgereinigt und auf ein Endvolumen von 0,2 ml eingengt.

200 mg der gefriergetrockneten Klärschlammprobe wurden mit einer Mischung aus Acetonitril und Aceton (9:1) im Reagenzglasschüttler (Multi Reax, Firma Heidolph) bei 2.000 Umdrehungen pro Minute geschüttelt. Die Probe wurde anschließend zentrifugiert und aufgereinigt. Der Extraktionsschritt wurde wiederholt und die Extrakte anschließend vereinigt. Der aufgereinigte Extrakt wurde wie die Extrakte der Wasserproben mittels GC-MS-MS analysiert. Die Extraktion von DEHP aus den Klärschlammproben erfolgte wie in Kapitel 4.3.5 beschrieben gemeinsam mit Hexabromcyclododecan. In Tabelle 14, Tabelle 15, Tabelle 16 und Tabelle 17 sind die wichtigsten Parameter der Probenvorbereitung und GC-MS-MS-Analyse zusammengefasst.

Tabelle 14: Anreicherungsbedingungen zur Bestimmung von PAK, chlorierten Verbindungen, Alkylphenolen und DEHP in Abwasserproben

Parameter	Bedingung/Umsetzung
Probenvolumen	950 ml + 50 ml Aceton
pH-Wert	original
Extraktionsmittel	Cyclohexan
Extraktionsvolumen	25 ml
Extraktionsdauer	30 min
Endvolumen	0,25 ml

Tabelle 15: Anreicherungsbedingungen zur Bestimmung von PAK, chlorierten Verbindungen und Alkylphenolen in Feststoffen

Parameter	Bedingung/Umsetzung
Feststoffmenge	200 mg
Extraktionsmittel	Acetonitril/Aceton (9:1)
Extraktionsvolumen	2 x 5 ml
Reagenzglasschüttler	2.000 rpm, 2 x 10 min
Zentrifugieren	2.000 rpm 15 min 18 °C
Endvolumen	0,5 ml

Tabelle 16: GC-MS-MS-Parameter zur Bestimmung von PAK, chlorierten Verbindungen, Alkylphenolen und DEHP

Parameter	Bedingung/Umsetzung
GC-MS-MS-System	TraceGC ultra/TSQ QuantumXLS ultra (Thermo)
Injektor	Kaltaufgabesystem KAS 6 (Gerstel)
Injektortemperaturprogramm	70 °C (0,02 min), 12 °C/s auf 290 °C (4 min)
Injektionsvolumen	1 µL
Trennsäule	TR-PESTICIDE III, 30 m x 0,25 mm x 0,25 µm (Thermo)
Trärgas	Helium
Temperaturprogramm	50 °C (1 min) 10 °C/min auf 200 °C (2 min) 3 °C/min auf 250 °C 5 °C/min auf 300 °C (14 min)
Scan-Modus	SRM (Selective Reaction Monitoring)

Tabelle 17: Precursor- und Produkt-Ionen zur Analyse von PAK, chlorierten Verbindungen, Alkylphenolen und DEHP

Stoffe	Precursor-Ion m/z	Produkt-Ion I m/z	Produkt-Ion II m/z
Acenaphthen	153,1	151,1	126,1
Acenaphthylen	152,1	151,1	126,1
Anthracen	178,1	176,1	152,1
Benzo(a)anthracen	228,1	226,1	202,1
Benzo(a)pyren	252,1	250,1	224,1
Benzo(b)fluoranthren	252,1	250,1	224,1
Benzo(g,h,i)perylen	276,1	274,1	248,1
Benzo(k)fluoranthren	252,1	250,1	224,1
Chrysen	228,1	226,1	202,1
Dibenzo(ah)anthracen	278,1	276,1	252,1
Fluoranthren	202,1	200,1	176,1
Fluoren	165,1	163,1	139,1
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	276,1	274,1	248,1
Naphthalin	128,1	127,1	102,1
Phenanthren	178,1	176,1	152,1
Pyren	202,1	200,1	176,1
Dicofol	251,0	139,0	111,0
Heptachlor	236,84	142,92	118,92
cis-Heptachlorepoxyd	352,84	262,86	281,92
trans-Heptachlorepoxyd	182,91	154,91	118,91
Cypermethrin	163,0	127,0	-
4-tert.-Oktylphenol	135,08	107,05	77,04
4-iso-Nonylphenol	149,1	107,05	77,04
Di-(2-ethylhexyl)phthalat (DEHP)	167,03	121,03	149,02

4.3.4 Per- und polyfluorierte Verbindungen (PFAS)

Die analytische Bestimmung der 16 per- und polyfluorierten Verbindungen (PFAS) erfolgte aus der Gesamtwasserphase mittels HPLC-MS-MS nach Festphasenanreicherung. Vor der Extraktion wurden die Kläranlagenzulaufproben mit Trinkwasser im Verhältnis 1:10 verdünnt, die Kläranlagenabläufe wurden unverdünnt analysiert. 50 ml der Wasserprobe wurden mit einem internen Standard, einer Lösung verschiedener ¹³C-markierter PFAS, versetzt (Perfluorbutanoat, Perfluorpentanoat, Perfluorhexanoat, Perfluorheptanoat, Perfluoroctanoat, Perfluornonanoat, Perfluordecanoat, Perfluorundecanoat, Perfluordodecanoat, Perfluorbutansulfonat, Perfluorhexansulfonat und Perfluoroctansulfonat in Methanol). Die Analyten wurden dann auf

einem Anionenaustauscher angereichert, mit Methanol eluiert und bis zur Trocknung eingengt. Der Trockenrückstand wurde in einem kleinen Volumen einer Mischung aus Wasser und Methanol aufgenommen.

500 mg der gefriergetrockneten Feststoffproben wurden mit Methanol im Ultraschallbad extrahiert und anschließend zentrifugiert. Ein Aliquot des Extrakts wurde zu 50 ml künstlichem Trinkwasser gegeben, wie die Wasserproben angereichert und mittels HPLC-MS-MS analysiert. In Tabelle 18, Tabelle 19, Tabelle 20 und Tabelle 21 sind die wichtigsten Parameter der Probenvorbereitung und HPLC-MS-MS-Analyse zusammengefasst.

Tabelle 18: Anreicherungsbedingungen zur Bestimmung von PFAS in Abwasserproben

Parameter	Bedingung/Umsetzung
Probenvolumen	50 ml
pH-Wert	5
Festphasenmaterial	200 mg Strata X-AW (Phenomenex)
Elutionsmittel	Methanol, Methanol + 0,1 % Ammoniak
Elutionsvolumen	2 x 2 ml, 3 x 2 ml
Endvolumen	0,15 ml

Tabelle 19: Anreicherungsbedingungen zur Bestimmung von PFAS in Feststoffen

Parameter	Bedingung/Umsetzung
Feststoffmenge	500 mg
Extraktionsmittel	Methanol
Extraktionsvolumen	2 x 5 ml
Ultraschallbehandlung	15 min
Zentrifugieren	3.000 rpm 20 min 18 °C
Endvolumen	2 ml

Tabelle 20: HPLC-MS-MS-Parameter zur Bestimmung von PFAS

Parameter	Bedingung/Umsetzung
HPLC-System	HPLC 1200 (Agilent Technologies)
Injektionsvolumen	10 µL
Trennsäule	Gemini C18, 100 mm x 2 mm, 5 µm (Phenomenex)
Temperatur	40 °C
Eluenten	A: HPLC-Wasser + 10 mM Ammoniumacetat B: Methanol + 10 mM Ammoniumacetat
Eluentenprogramm	5 min: 55 % A 45 % B 0 min: 55 % A 45 % B 4 min: 55 % A 45 % B 12 min: 3 % A 97 % B 17 min: 3 % A 97 % B 17,1 min 55 % A 45 % B
Fluss	0,3 ml/min
MS-MS-System	API 4000 (SCIEX)
Interface	Elektrospray (ESI)
Ionisierungsmodus	negativ
Ionisierungsspannung	-4500 V

Tabelle 21: Precursor- und Produkt-Ionen zur Analyse von PFAS

Stoffe	Precursor-Ion (m/z)	Produkt-Ion I (m/z)	Produkt-Ion II (m/z)
Perfluorbutanoat	213,1	168,8	-
Perfluorpentanoat	262,9	218,8	196,8
Perfluorhexanoat	312,9	268,8	119,0
Perfluorheptanoat	362,9	318,7	168,9
Perfluoroctanoat	412,9	368,8	168,9
Perfluorononanoat	463,0	418,9	218,9
Perfluordecanoat	513,0	469,0	218,9
Perfluorundecanoat	563,0	518,8	268,8
Perfluordodecanoat	613,0	568,9	168,8
Perfluorbutansulfonat	298,9	98,9	79,8
Perfluorpentansulfonat	349,1	99,0	79,7

Stoffe	Precursor-Ion (m/z)	Produkt-Ion I (m/z)	Produkt-Ion II (m/z)
Perfluorhexansulfonat	399,0	98,8	79,9
Perfluorheptansulfonat	449,2	99,2	79,8
Perfluoroctansulfonat	499,0	98,9	79,9
Perfluordecansulfonat	599,0	98,7	80,0
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonat	326,8	306,7	80,7

4.3.5 Hexabromcyclododecan (HBCDD)

Die Bestimmung von Hexabromcyclododecan erfolgte mittels Gaschromatographie und Massenspektrometrie (GC-MS) nach flüssig-flüssig-Extraktion mit Cyclohexan. Vor der Extraktion wurde die Wasserprobe mit Trinkwasser im Verhältnis 1:10 (Kläranlagenzulauf) bzw. 1:2 (Kläranlagenablauf) verdünnt und mit einem internen Standard (¹³C-γ-HBCDD in Methanol) sowie 50 ml Aceton versetzt. Nach Vorbehandlung der Proben im Ultraschallbad (12 min) erfolgte die flüssig-flüssig-Extraktion mit Cyclohexan für 30 min unter starkem Rühren mittels Magnetrührer. Der Lösemittelextrakt wurde über Natriumsulfat getrocknet und abschließend eingengt. Die Zulaufproben wurden zusätzlich über Kieselgel aufgereinigt.

Die Extraktion von HBCDD aus den Klärschlammproben erfolgte gemeinsam mit DEHP. Hierzu wurden 100 mg des gefriergetrockneten Feststoffes mit Cyclohexan und Dichlormethan (80:20) im Ultraschallbad extrahiert und anschließend zentrifugiert. Die internen Standards wurden vor der Ultraschallextraktion hinzugegeben (¹³C- γ-HBCDD und DEHP-d4 in Methanol). Für die DEHP-Analytik wurde 1 ml des Extraktes über eine C18 Hydra-Säule aufgereinigt und wie in Kapitel 4.3.3 beschrieben gemessen. Für die Messung des HBCDD wurde der restliche Extrakt eingengt und über Kieselgel aufgereinigt. In Tabelle 22,

Tabelle 23 und Tabelle 24 sind die wichtigsten Parameter der Probenvorbereitung und GC-MS-Analyse zusammengefasst.

Tabelle 22: Anreicherungsbedingungen zur Bestimmung von HBCDD in Abwasserproben

Parameter	Bedingung/Umsetzung
Probenvolumen	950 ml + 50 ml Aceton
pH-Wert	original
Extraktionsmittel	Cyclohexan
Extraktionsvolumen	25 ml
Extraktionsdauer	30 min
Endvolumen	0,25 ml

Tabelle 23: Anreicherungsbedingungen zur Bestimmung von HBCDD und DEHP im Feststoff

Parameter	Bedingung/Umsetzung
Feststoffmenge	100 mg
Extraktionsmittel	Cyclohexan/Dichlormethan (80:20)
Extraktionsvolumen	2 x 5 ml
Ultraschallbehandlung	12 min
Zentrifugieren	2000 rpm 15 min 18 °C
Endvolumen	1 ml

Tabelle 24: GC-MS-Parameter zur Bestimmung von HBCDD

Parameter	Bedingung/Umsetzung
GC-MS-System	6890N/ 5975 (Agilent Technologies)
Injektor	Kaltaufgabesystem KAS 4 (Gerstel)
Injektortemperaturprogramm	75 °C (0,03 min), 12 °C/s auf 180 °C (1 min), 12 °C/s auf 270 °C (10 min)
Injektionsvolumen	15 µl
Trennsäule	ZB-1HT, 15 m x 0,25 mm x 0,1 µm (Zebtron)
Trägergas	Helium
Temperaturprogramm	75 °C (1 min) 20 °C/min auf 180 °C (2 min) 25 °C/min auf 310 °C (2,5 min)
Scan-Modus	NCI-SIM
Auswertemassen	561, 563, 559, 565

NCI – negative chemische Ionisation; SIM - single ion monitoring

4.4 Analyseverfahren zur Bestimmung der Begleitparameter

4.4.1 Ammonium- und Nitrat-Stickstoff in den Kläranlagenproben

Zur Charakterisierung des Leistungszustands der Kläranlagen wurden in den Ablaufproben zusätzlich die beiden Parameter Ammonium- und Nitrat-Stickstoff als Begleitparameter bestimmt.

Die Bestimmung von Ammonium-Stickstoff erfolgte mittels kontinuierlicher Fließanalytik (CFA) und spektrometrischer Detektion nach DIN EN ISO 11732. Vor der Analyse wurden die Proben filtriert und im Verhältnis 1:5 mit Trinkwasser verdünnt. Die Analyse erfolgte automatisiert mittels AutoAnalyser3 (Firma SEAL Analytica). In einem kontinuierlich fließenden, durch Luftblasen segmentierten Trägerstrom reagiert das Ammonium der Probe in alkalischer Lösung mit Hypochlorit. Bei der Reaktion entsteht Chloramin, welches unter Katalyse von Nitroprussid mit Salicylat zu einem blau-grünen Indophenolfarbstoff umgesetzt wird. Die Messung der Absorption der farbigen Lösung erfolgte in einem Durchflussphotometer bei 660 nm.

Die Bestimmung von Nitrat-Stickstoff erfolgte mittels Ionenchromatographie nach DIN EN ISO 10304-1. Auch hier wurden die Proben vor der Analyse filtriert. Eine weitere Aufbereitung der Proben war nicht notwendig. Die Messung der Nitratkonzentration der Wasserproben wurde mit einem Ionenchromatographen mit Leitfähigkeitsdetektion (Firma Thermo) durchgeführt. Als stationäre Phase diente ein Anionenaustauscherharz. Die mobile Phase war ein Eluentengemisch aus Natriumcarbonat und Natriumhydrogencarbonat.

4.4.2 Weitere Begleitparameter in den Kläranlagenproben

Für die fünf Kläranlagen im detaillierten Untersuchungsprogramm wurden detaillierte Untersuchungen von Begleitparametern in Zu- und Ablauf sowie in den Schlammströmen im Labor der Firma BIOPLAN durchgeführt. Tabelle 25 und Tabelle 26 geben eine Übersicht über die untersuchten Begleitparametern und die angewendeten Verfahren.

Tabelle 25: Untersuchungsmethoden der Begleitparameter in den Wasserproben der Kläranlagen

Parameter	Methode
LF	DIN EN 27888
AFS	DIN 38409-H2-3
GV	DIN 38409-H 2
Ks _{4,3}	EN 29963-1-H7
CSB	Dr. Lange Fertigtest LCK414 (Gesamtprobe mit Ultra Turrax homogenisiert)
NH ₄ -N	DIN 38406-E5
NO ₃ -N	Diazomethode, LTZ Augustenberg
N _{ges}	DIN EN 25663 (H11)
P _{ges}	DIN EN ISO 6878
oPO ₄ -P	DIN EN ISO 6878
Fe	DIN EN ISO 11885-E22, Aufschluss nach DIN EN ISO 15587-2
Zn	DIN EN ISO 11885-E22, Aufschluss nach DIN EN ISO 15587-2

Lf = Elektrische Leitfähigkeit, AFS = Abfiltrierbare Stoffe, GV = Glühverlust aus abfiltrierbaren Stoffen, Ks_{4,3} = Säurekapazität bis pH-Wert 4,3, CSB = Chemischer Sauerstoffbedarf, NH₄-N = Ammonium-Stickstoff, NO₃-N = Nitrat-Stickstoff, N_{ges} = Gesamtstickstoff, P_{ges} = Gesamtphosphor, o-PO₄-P = Othophosphat Phosphor, Fe = Eisen Gesamtgehalt, Zn = Zink Gesamtgehalt.

Tabelle 26: Untersuchungsmethoden in den Schlammproben

Parameter	Methode
GV	DIN 18128
P _{ges}	nach DIN EN ISO 11885, Königswasseraufschluss nach DIN 38414-S7
Fe, Al, Zn, Cu, Cd, Pb	nach DIN EN ISO 11885, Königswasseraufschluss nach DIN 38414-S7

GV = Glühverlust aus abfiltrierbaren Stoffen, P_{ges} = Gesamtphosphor, Fe, Al, Zn, Cu, Cd, Pb = Gesamtgehalte von Eisen, Aluminium, Zink, Kupfer, Cadmium, Blei

4.4.3 Begleitparameter in den Proben der Mischwasserentlastungen und Regenwassereinleitungen

Konventionelle Abwasserparameter wie pH, Leitfähigkeit, Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB), Phosphat (o-PO₄-P), Gesamtphosphor (P_{ges}) und Gesamtstickstoff (N_{ges}) wurden im Labor des KIT-IWG gemäß den Verfahren in Tabelle 27 bestimmt.

Tabelle 27: Methoden zur Bestimmung der konventionellen Abwasserparameter

Parameter	Methode
CSB	DIN 38409 H41-H44
P _{ges}	DIN EN ISO 6878
o-PO ₄ -P	DIN EN ISO 6878
N _{ges}	EN ISO 11905-1

CSB = Chemischer Sauerstoffbedarf, P_{ges} = Gesamtphosphor, o-PO₄-P = Othophosphat Phospor, N_{ges} = Gesamtstickstoff (gemessen als TNb)

4.5 Methodenvalidierung und Vergleichsuntersuchung

4.5.1 Methodenvalidierung

Alle beschriebenen Verfahren zur Untersuchung von Kläranlagenzu- und -abläufen wurden nach abgeschlossener Methodenentwicklung und -optimierung einer umfangreichen Validierung unterzogen, in welcher die Verfahrensparameter, Reproduzierbarkeit und Bestimmungsgrenzen ermittelt wurden.

Für die Validierung wurden Abwasserproben aus dem Zu- und Ablauf der kommunalen Kläranlage Karlsruhe-Neureut verwendet. Die Proben wurden zum einen im Originalzustand auf die Zielverbindungen analysiert und zum anderen mit allen Verbindungen in einer Konzentration von 5 ng/l dotiert und danach analysiert. Alle Analysen wurden 7-fach parallel durchgeführt. Aus den Ergebnissen der sieben Einzelbestimmungen wurden jeweils die Standardabweichung und die Bestimmungsgrenze nach der in DIN 32645 beschriebenen Vorgehensweise errechnet (Schnellschätzung der Bestimmungsgrenze nach der Kalibriergeradenmethode). Die Standardabweichung ist ein Maß für die Reproduzierbarkeit des Analyseverfahrens. Die Berechnung der Bestimmungsgrenze nach DIN 32645 erfolgt mit folgender Beziehung (Gleichung 1):

Gleichung 1: Berechnung der Bestimmungsgrenze

$$BG = 1,2 \cdot k \cdot \Phi_{n,\alpha} \cdot s_{x0},$$

mit:

BG – Bestimmungsgrenze

k – Kehrwert der relativen Ergebnisunsicherheit

s_{x0} – die absolute Verfahrensstandardabweichung (in ng/l)

$\Phi_{n,\alpha}$ – Faktor

s_{x0} ergibt sich aus den sieben Einzelbestimmungen. Für die Berechnung wurde $k = 3$, entsprechend einer relativen Ergebnisunsicherheit von 33 %, gewählt. Der Faktor $\Phi_{n,\alpha}$ errechnet sich gemäß DIN 32645 nach folgender Formel (Gleichung 2):

Gleichung 2: Berechnung des Faktors $\Phi_{n,\alpha}$

$$\Phi_{n,\alpha} = t_{f;\alpha} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n}}$$

mit:

$t_{f;\alpha}$ – ein Wert, der sich aus der Anzahl der durchgeführten Wiederholungsmessungen (hier 7) und dem Signifikanzniveau α , das üblicherweise auf 0,05 gesetzt wird, ergibt

α – Signifikanzniveau

n – Anzahl der Wiederholungen

Abhängig von der Anzahl der Wiederholungsmessungen und dem gewählten Signifikanzniveau sind in DIN 32645 Werte für $\Phi_{n,\alpha}$ in Tabellenform zusammengestellt. Bei sieben Wiederholungsmessungen und einem Signifikanzniveau von 0,05 ergibt sich ein Wert für $\Phi_{n,\alpha}$ von 2,1.

Die sich aus den Ergebnissen der Einzelmessungen mit den verschiedenen Analyseverfahren ergebenden Standardabweichungen und Bestimmungsgrenzen sind in Tabelle 28 und Tabelle 29 für die prioritären 39 Einzelstoffe jeweils für Proben aus Kläranlagenzuläufen und -abläufen zusammengestellt. Für alle Einzelstoffe, die bereits in den undotierten Ausgangsproben nachweisbar waren, wurden die Ergebnisse für diese Proben für die Berechnung der Verfahrensparameter herangezogen. Nur wenn ein Stoff nicht nachweisbar war, wurden die Ergebnisse für die dotierten Proben verwendet. Bei einer Reihe von Substanzen, beispielsweise bei den Schwermetallen und den PAK, ergab sich das Problem, dass bereits in der undotierten Abwasserprobe hohe Konzentrationen vorlagen. Bei hohen Konzentrationen ergeben sich hohe absolute Standardabweichungen und damit entsprechend der oben aufgeführten Beziehung rechnerisch hohe Bestimmungsgrenzen. Diese Bestimmungsgrenzen sind allerdings nicht realistisch, da sich bei niedrigen Konzentrationen (die allerdings in Abwasserproben nicht auftreten) auch niedrigere Bestimmungsgrenzen ergeben würden. Aus diesem Grund wurden bei den Einzelstoffen, bei denen eine hohe Ausgangskonzentration zu unrealistisch hohen rechnerischen Bestimmungsgrenzen führte, zusätzlich eine Abschätzung der Bestimmungsgrenze anhand des Signal/Rausch-Verhältnisses in den Kalibrierlösungen

vorgenommen, die in Trinkwasser angesetzt wurden. In den folgenden Tabellen sind neben den rechnerisch ermittelten Werten für die Bestimmungsgrenze daher auch die Bestimmungsgrenzen angegeben, die im Rahmen des Monitoring-Vorhabens angewendet wurden.

Tabelle 28: Verfahrensparameter für 39 prioritäre Einzelstoffe in Kläranlagenzuläufen

Stoffe	STABW (%)	BG _{theo} (µg/l)	BG _{real} (µg/l)
Blei	0,39	0,17*	0,10
Nickel	0,95	430*	1,0
Cadmium	1,6	19*	0,002
Quecksilber	48	210*	0,001
Atrazin	1,4	0,0013	0,010
Diuron	5,2	0,016	0,010
Isoproturon	3,2	0,0065	0,010
Terbutryn	4,7	0,011	0,010
Aclonifen	7,5	0,0060	0,010
Bifenox	8,4	0,0040	0,004
Quinoxifen	9,2	0,0054	0,010
Dicofol	3,9	0,0068	0,020
Heptachlor	5,1	0,0048	0,004
cis-/trans-Heptachlorepoxyd	3,3/3,4	0,0035/0,0035	0,004/0,004
Cypermethrin, gesamt	6,9	0,011	0,005
Dichlorvos	14	0,011	0,010
Cybutryn	4,1	0,0036	0,005
4-iso-Nonylphenol	3,1	0,030	0,040
4-tert.-Oktylphenol	1,9	0,0060	0,020
Di-(2-ethylhexyl)phthalat	7,5	1,0*	0,10
Acenaphthen	7,7	0,0029*	0,001
Acenaphthylen	18	0,00089	0,001
Anthracen	6,7	0,0011*	0,001
Benzo(a)anthracen	17	0,0065*	0,001
Benzo(a)pyren	15	0,0056*	0,0005
Benzo(b)fluoranthen	16	0,0065*	0,001
Benzo(g,h,i)perylene	14	0,0041*	0,0005
Benzo(k)fluoranthen	16	0,0032*	0,001

Stoffe	STABW (%)	BG _{theo} (µg/l)	BG _{real} (µg/l)
Chrysen	14	0,0079*	0,001
Dibenzo(a,h)anthracen	11	0,00091	0,001
Fluoranthren	17	0,018*	0,001
Fluoren	8,5	0,0021*	0,001
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	17	0,0049*	0,0005
Naphthalin	4,8	0,018*	0,010
Phenanthren	7,3	0,0072*	0,001
Pyren	12	0,011*	0,001
Perfluoroktansulfonsäure	2,9	0,0016*	0,001
Hexabromcyclododecan	3,7	0,00098	0,005

* hohe Ausgangskonzentration führt zu hoher theoretischer Bestimmungsgrenze

STABW = Standardabweichung; BG_{theo} = theoretisch errechnete Bestimmungsgrenze; BG_{real} = für das Monitoring-Vorhaben verwendete Bestimmungsgrenze

Tabelle 29: Verfahrensparameter für 39 prioritäre Einzelstoffe in Kläranlagenabläufen

Stoffe	STABW (%)	BG _{theo} (µg/l)	BG _{real} (µg/l)
Blei	1,4	0,040*	0,10
Nickel	1,8	450*	1,0
Cadmium	4,8	5*	0,002
Quecksilber	8,7	2,3*	0,001
Atrazin	2,0	0,0012	0,010
Diuron	1,4	0,0051	0,010
Isoproturon	1,5	0,0044	0,010
Terbutryn	0,46	0,0029	0,010
Aclonifen	4,0	0,0015	0,010
Bifenox	5,8	0,0022	0,004
Quinoxyfen	2,2	0,00075	0,010
Dicofol	4,1	0,0088	0,020
Heptachlor	3,1	0,0028	0,004
cis-/trans-Heptachlorepoxyd	2,0/1,2	0,0022/0,0012	0,004/0,004
Cypermethrin, gesamt	5,5	0,011	0,005
Dichlorvos	12	3,6	0,010
Cybutryn	2,3	1,1	0,005
4-iso-Nonylphenol	2,8	0,029	0,040

Stoffe	STABW (%)	BG _{theo} (µg/l)	BG _{real} (µg/l)
4-tert.-Oktylphenol	1,6	0,0053	0,020
Di-(2-ethylhexyl)phthalat	8,1	0,27*	0,10
Acenaphthen	3,4	0,0065	0,001
Acenaphthylen	4,3	0,00081	0,001
Anthracen	3,1	0,00061	0,001
Benzo(a)anthracen	4,1	0,00082	0,001
Benzo(a)pyren	4,5	0,00098	0,0005
Benzo(b)fluoranthen	4,4	0,00097	0,001
Benzo(g,h,i)perylene	3,5	0,00073	0,0005
Benzo(k)fluoranthen	3,4	0,00066	0,001
Chrysen	3,9	0,00091	0,001
Dibenzo(a,h)anthracen	2,4	0,00046	0,001
Fluoranthen	5,2	0,0013	0,001
Fluoren	3,9	0,00074	0,001
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	3,7	0,00077	0,0005
Naphthalin	2,6	0,0079	0,010
Phenanthren	4,3	0,0090	0,001
Pyren	4,7	0,0014	0,001
Perfluoroktansulfonsäure	2,8	0,0058*	0,001
Hexabromcyclododecan	1,1	0,00038	0,005

* hohe Ausgangskonzentration führt zu hoher theoretischer Bestimmungsgrenze

STABW = Standardabweichung; BG_{theo} = theoretisch errechnete Bestimmungsgrenze; BG_{real} = für das Monitoring-Vorhaben verwendete Bestimmungsgrenze

Die Ergebnisse der Validierung zeigen, dass alle entwickelten und optimierten Analyseverfahren sowohl in den Kläranlagenzuläufen als auch in den Kläranlagenabläufen gut reproduzierbare Ergebnisse liefern. Die Standardabweichungen liegen für die Mehrzahl der Einzelstoffe deutlich unter 10 % und für alle Einzelstoffe unter 20 %. Die Bestimmungsgrenzen für die organischen Einzelstoffe liegen auch in den Kläranlagenzuläufen bei 0,1 µg/l (DEHP) oder darunter, für viele Stoffe im Bereich von 0,001 µg/l bis 0,005 µg/l (1 bis 5 ng/l). Die Analyseverfahren sind nach den Ergebnissen der Validierung für eine zuverlässige und empfindliche Bestimmung der ausgewählten Einzelstoffe aus Abwasserproben geeignet.

4.5.2 Vergleichsuntersuchung

Als weitere Qualitätssicherungsmaßnahme wurden insgesamt zwei Vergleichsuntersuchungen durchgeführt. Hierfür wurden Proben aus Kläranlagenabläufen parallel durch das Labor des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) in Bonn auf ausgewählte Parameter analysiert. Die Auswahl der Parameter orientierte sich an den

analytischen Möglichkeiten des LANUV-Labors, welches bei der Vergleichsuntersuchung seine routinemäßig angewendeten Analyseverfahren eingesetzt hat. Die Proben wurden zufällig ausgewählt. In der ersten Vergleichsuntersuchung wurden drei Proben und in der zweiten fünf Proben parallel untersucht. Bei der Auswahl der Proben wurde darauf geachtet, dass mindestens eine Probe aus einem Mischsystem und eine Probe aus einem Trennsystem sowie eine Probe bei Mischwasserabfluss und eine Probe bei Trockenwetterabfluss berücksichtigt wurde. Für die ausgewählten Proben wurden bei der Abfüllung für die Analytik im Labor des TZW parallel jeweils eine 2 Liter- und eine 1 Liter-Braunglasflasche und eine Kunststoffflasche für die Schwermetallanalytik abgefüllt und zum Labor des LANUV in Bonn gebracht. Die Ergebnisse der Vergleichsuntersuchung sind in Tabelle 30 zusammengestellt.

Die Ergebnisse der Vergleichsuntersuchung zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen beiden Labors. Bei Betrachtung der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass die Bestimmungsgrenzen des Labors des LANUV teilweise höher als die Bestimmungsgrenzen des TZW lagen. Daher erhielt das LANUV-Labor, beispielsweise bei den PAK, keine Befunde, während das Labor des TZW für eine Reihe von Substanzen geringe Konzentrationen nachweisen konnte. Aus diesem Grund wurde vereinbart, die Vergleichsuntersuchung auf PAK zu wiederholen, wenn durch das TZW-Labor in einzelnen Proben Gehalte über den Bestimmungsgrenzen des LANUV-Labors gefunden werden.

Eine Abweichung der Ergebnisse zeigte sich in einzelnen Proben für 4-tert.-Oktylphenol und 4-iso-Nonylphenol. Für 4-iso-Nonylphenol wurde in einer Probe eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse festgestellt (1,0 vs. 0,89 µg/l), während in zwei Proben das TZW-Labor keine Befunde feststellen konnte, während das LANUV-Labor 0,068 µg/l bzw. 0,052 µg/l nachweisen konnte. Für 4-tert.-Oktylphenol wurde in einer Probe durch beide Labore übereinstimmend kein Befund festgestellt, während das Labor des LANUV in zwei Proben geringe Konzentrationen gemessen hat, obwohl das Labor des TZW keine Befunde feststellen konnte. Da für diese Unterschiede keine Erklärung gefunden werden konnte, wurde vereinbart, die Vergleichsuntersuchung für die beiden Alkylphenole ebenfalls zu wiederholen.

Tabelle 30: Ergebnisse der ersten Vergleichsuntersuchung

Stoffe	Kläranlage 1, Ablauf Trockenwetter (µg/l) Februar 2018		Kläranlage 2, Ablauf Trennsystem (µg/l) März 2018		Kläranlage 3, Ablauf Regenwetter (µg/l) März 2018	
	TZW	LANUV	TZW	LANUV	TZW	LANUV
Quecksilber	0,007	< 0,005	0,003	< 0,005	0,002	< 0,005
Cadmium	0,014	0,015	0,031	0,034	0,004	< 0,010
Nickel	8,9	9,8	6,5	6,5	5,0	5,2
Blei	0,15	0,14	0,15	0,13	0,17	0,16
4-tert.-Oktylphenol	< 0,020	0,033	< 0,020	0,011	< 0,020	< 0,010
4-iso-Nonylphenol	< 0,040	0,068	1,0	0,89	< 0,040	0,052
Dichlorvos	< 0,010	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010	< 0,001
Atrazin	< 0,010	< 0,025	< 0,010	< 0,025	< 0,010	< 0,025
Isoproturon	0,015	< 0,025	< 0,010	< 0,025	< 0,010	< 0,025
Diuron	< 0,010	< 0,025	< 0,010	< 0,025	< 0,010	< 0,025
Terbutryn	0,013	0,014	< 0,010	< 0,010	< 0,010	< 0,010
Cybutryn	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Quinoxifen	< 0,010	< 0,025	< 0,010	< 0,025	< 0,010	< 0,025
Perfluoroktansulfonsäure	0,004	0,005	0,002	< 0,005	0,001	< 0,005
Naphthalin	0,014	n.b.	< 0,010	n.b.	< 0,010	n.b.
Acenaphthen	0,0035	< 0,010	0,0016	< 0,010	< 0,001	< 0,010
Fuoren	0,0032	< 0,010	0,0021	< 0,010	0,0017	< 0,010
Phenanthren	0,0078	< 0,010	0,0031	< 0,010	0,0033	< 0,010
Anthracen	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010
Fluoranthen	0,0047	< 0,010	0,0035	< 0,010	0,0029	< 0,010
Pyren	0,0052	< 0,010	0,0029	< 0,010	0,0020	< 0,010
Benzo[a]anthracen	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010
Chrysen	0,0013	< 0,010	0,0012	< 0,010	0,0014	< 0,010
Benzo[b]fluoranthen	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010	0,0011	< 0,010
Benzo[k]fluoranthen	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010
Benzo[a]pyren	0,00088	< 0,010	0,00058	< 0,010	0,00079	< 0,010
Dibenz[a,h]anthracen	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010
Benzo[g,h,i]perylene	0,00051	< 0,010	< 0,0005	< 0,010	0,00093	< 0,010
Indeno[1,2,3-cd]pyren	0,00063	< 0,010	0,00056	< 0,010	0,00086	< 0,010

n.b. = nicht bestimmt; TZW = Technologiezentrum Wasser; LANUV = Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

Bei der zweiten Vergleichsuntersuchung wurden Proben aus insgesamt fünf Kläranlagen entnommen und parallel in beiden Laboren untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 31 zusammengefasst.

Die Ergebnisse der zweiten Vergleichsuntersuchung belegen die gute Übereinstimmung zwischen den beiden Labors. Mit Ausnahme eines Einzelergebnisses für 4-iso-Nonylphenol (TZW: 0,041 µg/l vs. LANUV: 0,28 µg/l) liegen die Konzentrationen, die durch die beiden Labore gemessen wurden, bei Berücksichtigung der üblichen analytischen Messunsicherheit, sehr eng beieinander. Für die PAK erhielt das Labor des LANUV nur in einer Probe einen positiven Befund. Der Messwert für Phenanthren von 0,011 µg/l passt aber sehr gut zu dem Wert von 0,0088 µg/l, der durch das Labor des TZW ermittelt wurde.

4.5.3 Maßnahmen zur Qualitätssicherung

Um die Qualität der Analyseergebnisse über die gesamte Dauer des Monitoring-Programms sicherzustellen und dokumentieren zu können, wurden verschiedene Maßnahmen ergriffen. Zum einen wurden regelmäßig Blindwertproben analysiert. Dabei handelt es sich um Trinkwasserproben, welche die zu analysierenden Verbindungen nicht enthielten. Diese Proben wurden wie die Proben aus dem regulären Monitoring-Programm analysiert und ausgewertet. Befunde, die für diese Proben erhalten worden wären, hätten auf Einträge während der Lagerung oder der Probenaufbereitung hingedeutet. Da einige der untersuchten Verbindungen ubiquitär verbreitet sind und da die Nachweisempfindlichkeit, die in diesem Projekt erreicht wurde, sehr hoch war, war diese Maßnahme wichtig, um sicherzustellen, dass die (teilweise sehr geringen) Befunde tatsächlich auf eine Belastung der untersuchten Proben und nicht auf einen Eintrag während der Analytik im Labor zurückzuführen waren. Die Auswertung der Blindwertproben zeigte, dass die Blindwerte der angewendeten Analyseverfahren während des gesamten Monitoring-Programms deutlich unterhalb der analytischen Bestimmungsgrenze lagen.

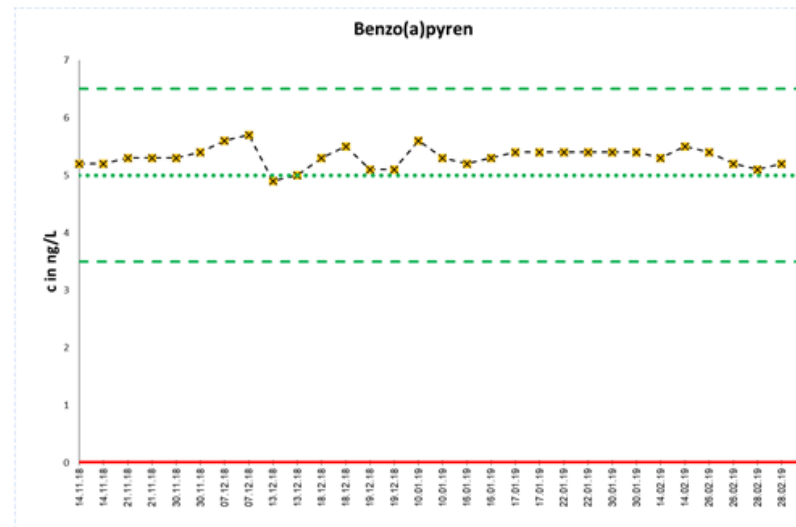
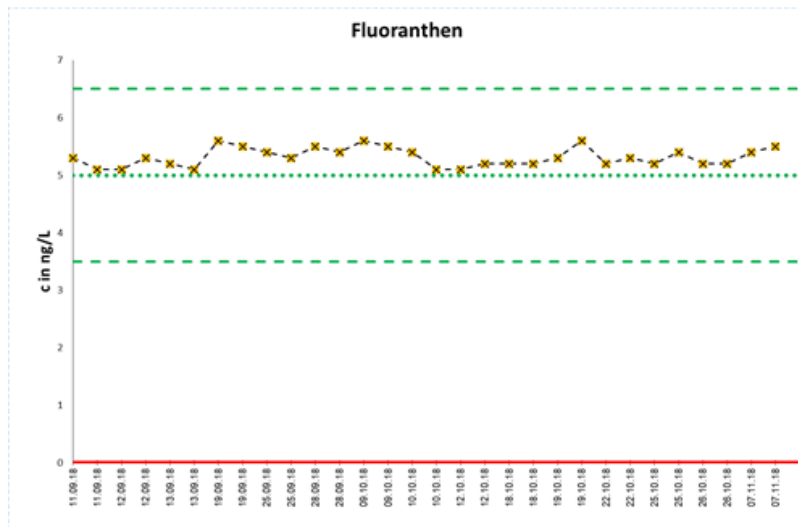
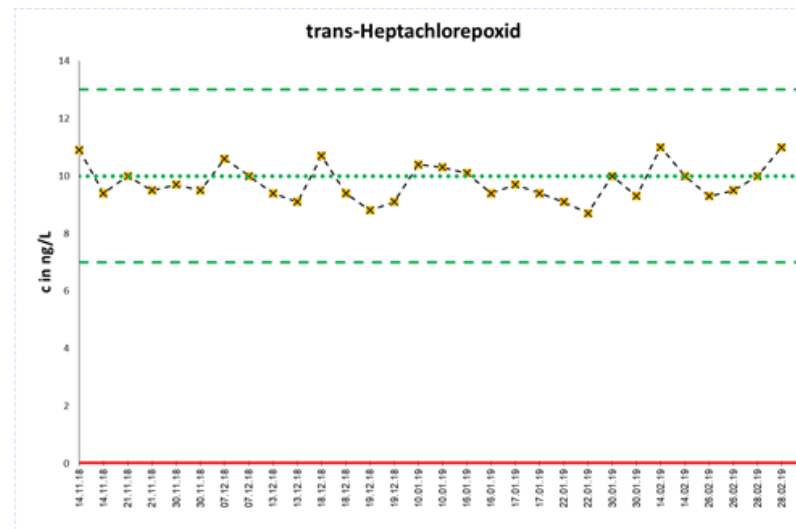
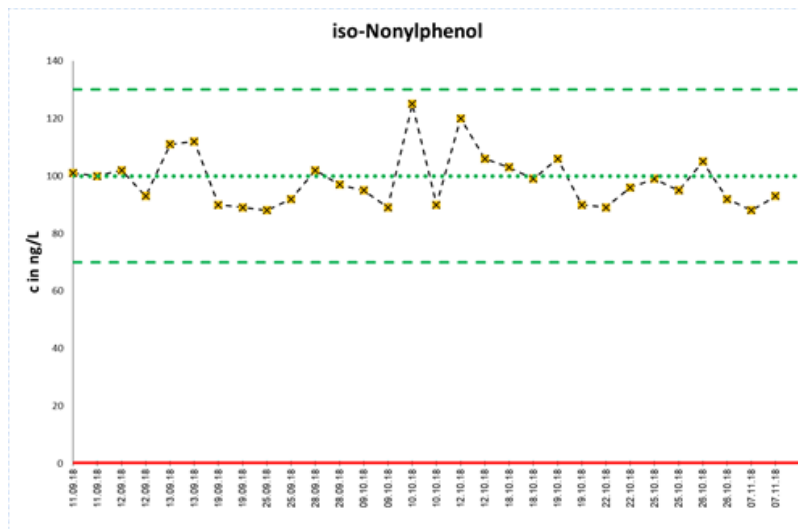
Als zweite Maßnahme zur Qualitätssicherung wurden in jeder Messserie Kontrollproben mitgeführt. Dabei handelte es sich um Proben, die die Zielverbindungen in einer definierten Konzentration enthielten. I. d. R. wurden diese Proben durch Dotierung von Trinkwasser hergestellt. Für diese Proben konnte durch einen Vergleich der gemessenen Konzentrationen (Istwert) mit den Erwartungswerten (Sollwert) Rückschlüsse auf die Qualität der Analyseergebnisse und auf möglicherweise auftretende Probleme gezogen werden. Die Auswertung der Kontrollproben erfolgte über das kommerzielle Programm SQS 2010, Version 1.3. In dem Programm werden Kontrollkarten erstellt, in denen der zeitliche Verlauf der für die Kontrollproben gemessenen Konzentrationen graphisch dargestellt wird (Abbildung 13). Gleichzeitig werden die Messwerte automatisiert auf Außer-Kontroll-Situationen geprüft. Werte außerhalb der Kontrollgrenzen werden durch die SQS-Software als Außer-Kontroll-Situation erkannt und automatisch angezeigt. Der Kontrollbereich ist definiert als der Konzentrationsbereich, der zwischen 75 % und 125 % des Sollwertes liegt. Abbildung 13 zeigt exemplarisch die Kontrollkarten für einige ausgewählte Einzelstoffe. Man erkennt, dass die dotierten Konzentrationen unterschiedlich sind. In der Regel orientieren sie sich an den Bestimmungsgrenzen der Verfahren. So lag für 4-iso-Nonylphenol die Sollkonzentration bei 0,1 µg/l, für trans-Heptachlorepid bei 0,01 µg/l und für die PAK Fluoranthren und Benzo[a]pyren bei 0,05 µg/l. Die dargestellten Diagramme zeigen das typische Bild einer Regelkarte. Die Messwerte schwanken innerhalb der Kontrollgrenzen um den Sollwert, eine Außer-Kontroll-Situation tritt aber nicht auf. Wäre ein Messwert außerhalb der Kontrollgrenzen gelegen, wäre die komplette Messserie wiederholt worden.

Tabelle 31: Ergebnisse der zweiten Vergleichsuntersuchung

Stoffe	Kläranlage 1, Ablauf Trockenwetter (µg/l) September 2018		Kläranlage 2, Ablauf Trennsystem (µg/l) Oktober 2018		Kläranlage 3, Ablauf Regenwetter (µg/l) September 2018		Kläranlage 4, Ablauf Trockenwetter (µg/l) Oktober 2018		Kläranlage 5, Ablauf Trennsystem (µg/l) Oktober 2018	
	TZW	LANUV	TZW	LANUV	TZW	LANUV	TZW	LANUV	TZW	LANUV
	4-tert.-Oktylphenol	0,045	0,037	0,085	0,048	< 0,020	< 0,010	0,045	0,040	< 0,020
4-iso-Nonylphenol	0,072	0,12	0,041	0,28	< 0,040	< 0,050	< 0,040	< 0,050	1,0	1,1
Naphthalin	< 0,010	n.b.	< 0,010	n.b.	< 0,010	n.b.	< 0,010	n.b.	< 0,010	n.b.
Acenaphthen	0,0025	< 0,010	0,0010	< 0,010	0,0019	< 0,010	0,0029	< 0,010	< 0,001	< 0,010
Fluoren	0,0035	< 0,010	0,0016	< 0,010	0,0022	< 0,010	0,0019	< 0,010	0,0053	< 0,010
Phenanthren	0,0055	< 0,010	0,0064	< 0,010	0,0088	0,011	0,0044	< 0,010	0,0053	< 0,010
Anthracen	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010
Fluoranthren	0,0047	< 0,010	0,0035	< 0,010	0,0029	< 0,010	0,0047	< 0,010	0,0035	< 0,010
Pyren	< 0,001	< 0,010	0,0011	< 0,010	0,0057	< 0,010	0,0010	< 0,010	0,0017	< 0,010
Benzo[a]anthracen	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010
Chrysen	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010
Benzo[b]fluoranthren	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010
Benzo[k]fluoranthren	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010
Benzo[a]pyren	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010
Dibenz[a,h]anthracen	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010
Benzo[g,h,i]perylen	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010
Indeno[1,2,3-cd]pyren	< 0,001	< 0,010	< 0,001	< 0,010	0,0052	< 0,010	0,00062	< 0,010	< 0,001	< 0,010

n.b. = nicht bestimmt; TZW = Technologiezentrum Wasser; LANUV = Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

Abbildung 13: Kontrollkarten für ausgewählte Einzelstoffe



Quelle: eigene Darstellung, TZW

5 Ergebnisse

5.1 Datenanalysen

5.1.1 Umgang mit Werten kleiner Bestimmungsgrenze

Für die Auswertung und Interpretation von Umweltdaten ist festzulegen, wie mit Messwerten $<$ Bestimmungsgrenze (BG) umzugehen ist. Für die Berechnung statistischer Kennwerte und die Durchführung statistischer Tests wird ein Messwert $<$ BG in der Regel durch einen numerischen Wert ersetzt. In dieser Studie wurden für Datenreihen mit einem ausreichenden Anteil (50 %) an Messwerten $>$ BG die Werte $<$ BG mit dem Wert der halben BG angesetzt.

5.1.2 Ausreißerprüfung

Als Ausreißer werden Werte bezeichnet, die sich deutlich von den anderen Werten im Datenkollektiv unterscheiden und deren Richtigkeit zu hinterfragen ist. Solche Extremwerte können große Auswirkungen auf die statistischen Kennwerte eines Datenkollektives haben.

In der Regel werden Ausreißer vor der Auswertung aus dem Datenkollektiv entfernt. Maestre et al. (2004) und Osborne und Overbay (2004) empfehlen eine Ausreißereliminierung nur, wenn es sich eindeutig um Fehler (bspw. Mess-, System- oder Übertragungsfehler) handelt. Unerwartet stark abweichende Werte können mit einem anwendungsbezogenen Verhalten oder herkunftsspezifischen Vorkommen verbunden sein (z.B. Applikationszeiten oder Starkregenereignis). Helsel und Hirsch (2002) weisen darauf hin, dass Extremwerte sogar die wichtigsten Daten einer Stichprobe sein können und weiterer Analyse bedürfen. Durch eine standardisierte Ausreißereliminierung (z.B. Ausreißer $>$ 0,75-Quantil + 1,5 Interquartilsabstand) würden wertvolle Informationen verloren gehen. So hat bspw. die aktuelle Datenauswertung gezeigt, dass höhere Konzentrationen bei einigen PAK häufig bei Mischwasserzufluss vorkommen. Eine Aussortierung der Extremwerte für die Regenwetterproben würde die Ergebnisse und die damit verbundenen Aussagen verfälschen.

Im Rahmen des Projektes erfolgte eine fachliche Plausibilitätsprüfung und fallspezifische Entscheidung in Abhängigkeit des Kenntnisstands zum Betriebszustand der Anlagen, dem Stoffvorkommen und -verhalten sowie den Hauptherkunftsbereichen.

Für die fünf Anlagen im Detailprogramm wurden zur Identifizierung von Ausreißern bzw. unplausiblen Werten weitergehende Prüfschritte durchgeführt:

- ▶ Prüfung des Zusammenhangs zwischen Zu- und Ablaufkonzentrationen,
- ▶ Prüfung korrespondierender Stoffe/Stoffgruppen gleicher Herkunftsbereiche und ähnlicher Stoffeigenschaften und
- ▶ Prüfung korrespondierender Schlammgehalte bei Stoffen, die stark an die Biomasse bzw. Schlamm adsorbieren.

Da im Rahmen der Datenanalyse keine offensichtlichen Fehler bei der Laboranalyse, der Datenerfassung und -übertragung nachgewiesen werden konnten, wird davon ausgegangen, dass alle Werte des Datensatzes, inklusive der Extremwerte, die tatsächliche Situation in den kommunalen Kläranlagen widerspiegeln.

5.1.3 Statistische Kennwerte

Zur Beschreibung und Bewertung des Datenkollektives wurden eine Reihe von statistischen Kenngrößen herangezogen. Als Zentralwerte dienen der arithmetische Mittelwert (kurz Mittelwert) und der Median. Der Mittelwert ist sensitiv gegenüber Ausreißern und kann sich bereits durch Berücksichtigung eines neuen Messwertes deutlich verschieben. Der Median stellt die Mitte eines Datenkollektives dar und ist daher unabhängig von Extremwerten. Darüber hinaus werden die Schiefe und die Varianz als Maß der Streuung der Werte herangezogen. Um verschiedene Verteilungen vergleichen zu können, wurde der Variationskoeffizient eingeführt, der als Quotient aus Standardabweichung (Quadratwurzel der Varianz) und Mittelwert definiert ist und damit ein relatives Streuungsmaß darstellt (Henze 2012).

Das vorliegende Datenkollektiv zeigt keine Normalverteilung, sondern eine rechtsschiefe Werteverteilung, wie es häufig bei Umweltdaten der Fall ist (Limpert et al. 2001). D.h., die überwiegende Zahl an Messwerten liegt im niedrigen Konzentrationsbereich. Zur Prüfung dieser Aussage wurden statistische Tests auf Normalverteilung wie Anderson-Darling-Test, Shapiro-Wilk-Test und Shapiro-Francia-Test durchgeführt. Alle Tests bestätigten die schiefe Werteverteilung. Für solche Datenkollektive ist der arithmetische Mittelwert systematisch größer als der Median. Aus statistischer Sicht ist bei solchen Datenkollektiven die Verwendung des Medians zu empfehlen. Die Verwendung des Medians gewährleistet Konsistenz und Vergleichbarkeit der Stoffe untereinander. Allerdings wird in der Literatur häufig der Mittelwert angegeben, so dass es sinnvoll ist, diesen Wert mitzuführen. Darüber hinaus können mit dem Median im Gegensatz zum Mittelwert kurzfristige Veränderungen der Eintragungssituation nicht abgebildet werden. Beide Kennwerte haben in Abhängigkeit der Fragestellung Vor- und Nachteile. Daher werden für die Schadstoffe beide Größen angegeben.

5.2 Mittlere Konzentrationen des Gesamtdatenbestandes

Insgesamt wurden 54 Einzelschadstoffe untersucht. Hinzu kommen die Begleitparameter. Je nach Probenahmeort (Zulauf, Ablauf, Primärschlamm und Überschussschlamm) ergibt sich für die einzelnen Kläranlagenstandorte eine etwas abweichende Anzahl an Proben. Mit den mehr als 1.200 Proben wurden über 70.000 Einzelmesswerte erfasst. Zusätzlich zu der Schadstoffanalytik wurden in 96 Zu- und 100 Ablaufproben sowie in allen Schlammproben Begleitparameter erfasst.

5.2.1 Begleitparameter

Tabelle 32 zeigt die in diesem Vorhaben ermittelten mittleren Ablaufkonzentrationen für Ammonium- und Nitrat-Stickstoff und Gesamtposphor im Vergleich zu Werten aus dem 31. DWA² Leistungsnachweis kommunaler Kläranlagen (DWA 2018). Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung der Wertebereiche.

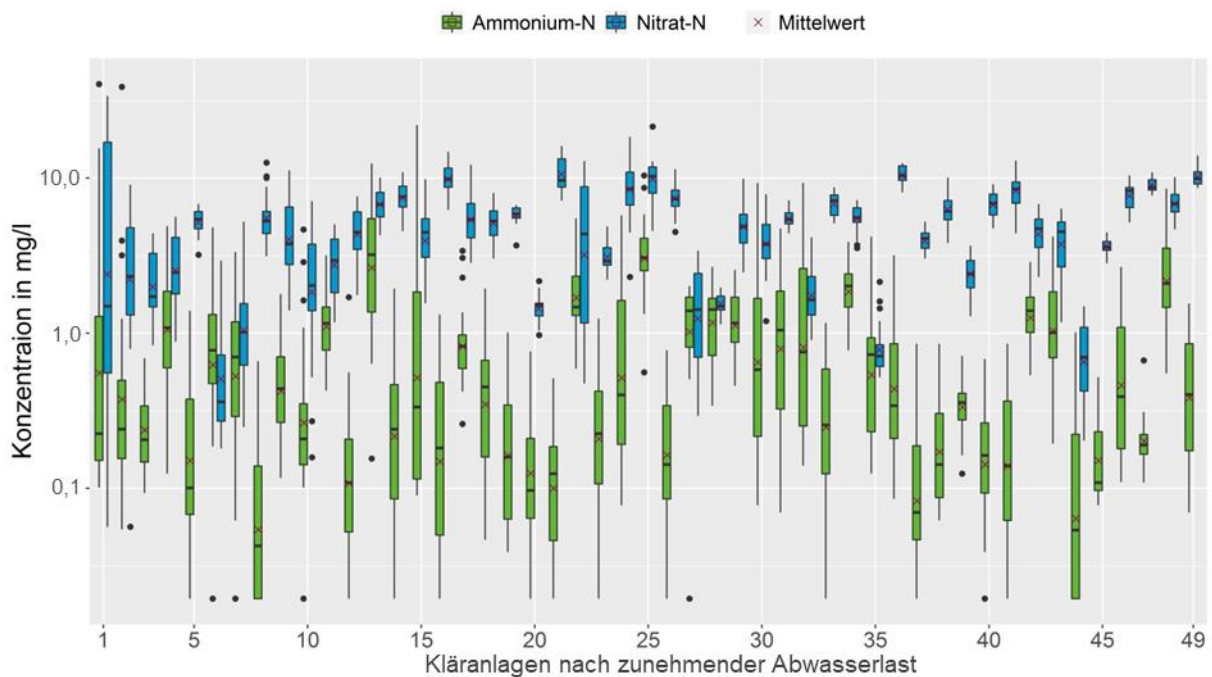
² DWA – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.

Tabelle 32: Mittlere Nährstoffablaufkonzentrationen im Vergleich des deutschlandweiten Monitorings und des 31. Leistungsnachweis der DWA (DWA 2018)

Quelle	Anzahl Kläranlagen	NH ₄ -N Ablaufkonzentration (mg/l)	NO ₃ -N Ablaufkonzentration (mg/l)	P _{ges} Ablaufkonzentration (mg/l)
dieses Monitoring	49	1,0	5,3	-
Baden-Württemberg	898	0,66	7,3	0,42
Bayern	1.585	1,60	6,5	0,78
Hessen/Rheinland-Pfalz/Saarland	1.190	1,73	5,3	0,61
Nord	521	1,29	6,0	0,54
Nord-Ost	289	0,94	8,4	0,53
Nordrhein-Westfalen	476	0,94	5,0	0,42
Sachsen/Thüringen	503	1,35	6,5	0,86
DWA	5.462	1,18	6,2	0,56
Österreich und Südtirol	7.775	1,30	6,2	0,58

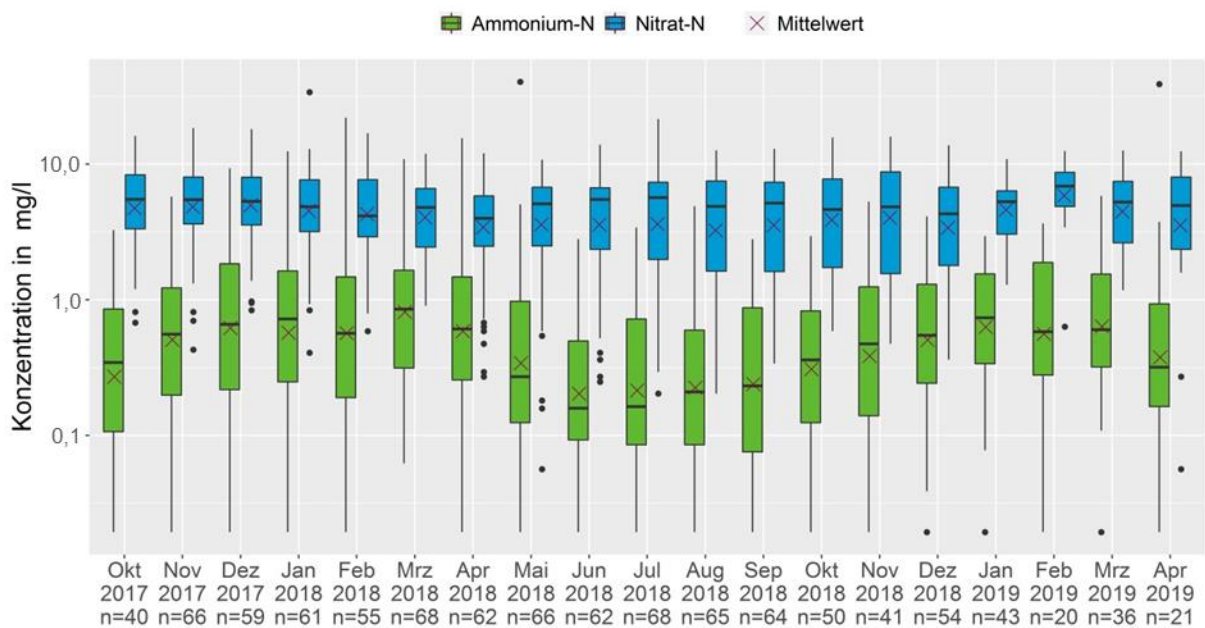
Abbildung 14 zeigt die Variabilität der Ammonium- und Nitrat-Stickstoff-Konzentrationen zwischen den einzelnen Kläranlagen. Die Anlagen sind nach zunehmender Abwasserlast (EW) aufgetragen, es zeigt sich jedoch kein von der Größe der Anlage abhängiger Trend in Bezug auf die Stickstoffelemination. Im saisonalen Verlauf zeigt sich ebenfalls die zu erwartende Variabilität mit höheren Ammonium-Stickstoff-Ablaufkonzentrationen in den Wintermonaten (Abbildung 15).

Abbildung 14: Kläranlagenspezifische Ammonium- und Nitrat-Stickstoff-Konzentrationen (Ablauf)



Quelle: eigene Darstellung, KIT-IWG

Abbildung 15: Ammonium- und Nitrat-Stickstoff-Konzentrationen (Ablauf) im zeitlichen Verlauf der Probenahme



Quelle: eigene Darstellung, KIT-IWG

Für die fünf Kläranlagen, in denen neben den Abläufen auch die Zuläufe und Schlammströme beprobt wurden, wurde eine größere Zahl an Begleitparametern betrachtet (Anhang B.1 und Anhang B.2). Die Analyseergebnisse für alle Begleitparameter liegen in einem plausiblen Wertebereich und zeigen weder für die Abwasser- noch für die Schlammproben Auffälligkeiten.

Alle fünf Kläranlagen zeigen eine sehr gute Reinigungsleistung in Bezug auf die Parameter CSB_{ges} , Ammonium-Stickstoff und Gesamtphosphor (über 90 %). Die mittlere Reinigungsleistung für Gesamtstickstoff liegt zwischen 83 % und 96 %.

5.2.2 Schadstoffe

Sieben der berücksichtigten Stoffe konnten in keiner Ablaufprobe mit Werten > BG gemessen werden (Tabelle 33). Nur Cypermethrin wurde im Zulauf der fünf im Detailprogramm berücksichtigten Kläranlagen in 15 von 96 Proben mit Werten > BG gemessen. Nach derzeitigem Kenntnisstand und unter Berücksichtigung der verfügbaren Werte zur Umweltqualitätsnorm kann daher festgestellt werden, dass die Kläranlage für die Stoffe Bifenox, Quinoxifen und Perfluordecansulfona kein relevanter Eintragspfad ist. Für die weiteren in Tabelle 33 gelisteten Stoffe ist diese Feststellung nicht möglich. Auch sie werden im Ablauf der Kläranlagen nie mit Werten > BG nachgewiesen, allerdings liegt die derzeit erreichbare Bestimmungsgrenze um Größenordnungen über dem Jahresdurchschnittswert der Umweltqualitätsnorm.

Tabelle 33: Stoffe, die im Kläranlagenablauf nie größer Bestimmungsgrenze nachgewiesen wurden

Stoffe	Bestimmungsgrenze (µg/l)	Umweltqualitätsnorm (JD-UQN ¹⁾ (µg/l)
Bifenox	0,004	0,012
Quinoxifen	0,01	0,15
Perfluordecansulfonat	0,001	-
cis-Heptachlorepoxid und trans-Heptachlorepoxid	0,004	0,0000002
Cypermethrin	0,005	0,00008
Dicofol	0,02	0,0013
Heptachlor	0,004	0,0000002

¹⁾ JD-UQN = Umweltqualitätsnorm (UQN), ausgedrückt als Jahresdurchschnitt (JD), hier für Binnenoberflächengewässer (siehe Richtlinie 2013/39/EU)

Weitere zwölf Einzelsubstanzen konnten nur in wenigen Ablaufproben (bis 5 % der Werte) und einer geringen Anzahl an Kläranlagen oberhalb der BG gemessen werden. Tabelle 34 listet die Stoffe auf und zeigt neben der BG auch die gemessene Maximalkonzentration im Ablauf. Von den aufgeführten Stoffen wurden lediglich die drei PAK-Vertreter Anthracen, Benzo[k]fluoranthren und Dibenz[a,h]anthracen und HBCDD in einer größeren Anzahl der Zulaufproben nachgewiesen (s. Anhang B.3.1). Die drei PAK-Vertreter konnten ebenfalls zu unterschiedlichen Anteilen in den Primär- und Überschussschlämmen nachgewiesen werden (s. Anhang B.3.3 und B.3.4).

Tabelle 34: Stoffe mit Einzelbefunden im Kläranlagenablauf

Stoffe	Anzahl Messwerte > BG	Anteil Messwerte > BG (%)	Anzahl Kläranlagen mit Messwerten > BG	BG (µg/l)	Maximum (µg/l)
Anthracen	38	3,8	13	0,001	0,013
Benzo[k]fluoranthren	46	4,6	14	0,001	0,038
Dibenz[a,h]anthracen	14	1,4	5	0,001	0,014
Aclonifen	1	< 1	1	0,01	0,041
Atrazin	41	4,1	12	0,01	0,15
Perfluorundecanoat	2	< 1	2	0,001	0,001
Perfluordodecanoat	4	< 1	4	0,001	0,006
Perfluorpentansulfon	16	1,6	8	0,001	0,005
Perfluorheptansulfon	16	1,6	9	0,001	0,006
HBCDD (Summe)	8	< 1	6	0,005	0,047
Cybutryn	35	3,5	9	0,005	0,059
Dichlorvos	4	< 1	4	0,01	0,52

BG = Bestimmungsgrenze

Aufgrund der vielen Befunde kleiner Bestimmungsgrenze gehen die Stoffe, die lediglich als Einzelbefunde in den Kläranlagenabläufen nachgewiesen wurden, nicht in die weitere Datenauswertung ein.

Für 13 Stoffe schwanken die Positivbefunde zwischen 15 % und 50 % (Tabelle 35). Für diese Stoffe kann für die Mehrzahl zur Maximalkonzentration zusätzlich ein Mittelwert angegeben werden. Der Median entspricht der Bestimmungsgrenze solange weniger als 50 % der Werte oberhalb der BG liegen und ist damit für dieses Teildatenkollektiv nicht aussagekräftig.

Tabelle 35: Statistische Kennwerte der Konzentrationen prioritärer Stoffe in den Ablaufproben

Stoffe	Anzahl Messwerte > BG	Anzahl Messwerte > BG (%)	BG (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	Maximum (µg/l)
4-tert.-Oktylphenol	271	27	0,02	< BG	0,2
Perfluorononanoat	165	17	0,001	< BG	0,012
Perfluordecanoat	238	24	0,001	0,0011	0,017
Perfluorhexansulfonat	329	33	0,001	0,0016	0,035
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonat	234	23	0,001	< BG	0,087
Naphthalin	432	43	0,01	0,01	0,065
Acenaphthylen	303	30	0,001	< BG	0,007
Benzo[a]anthracen	137	14	0,001	0,0009	0,061
Chrysen	331	33	0,001	0,0013	0,1
Benzo[b]fluoranthren	148	15	0,001	0,001	0,083

Stoffe	Anzahl Messwerte > BG	Anzahl Messwerte > BG (%)	BG (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	Maximum (µg/l)
Benzo[a]pyren	327	33	0,0005	0,0007	0,057
Indeno[1,2,3-cd]pyren	227	23	0,0005	0,0006	0,053
Benzo[g,h,i]perylen	273	27	0,0005	0,0006	0,05

BG = Bestimmungsgrenze

21 Stoffe wurden mit Positivbefunden > 50 % in den Ablaufproben nachgewiesen (Tabelle 36). Für diese Stoffe werden die für die weiteren Auswertungen wichtigen statistischen Kenngrößen Median und Mittelwert dargestellt.

Eine vollständige Parameterliste der Ablaufproben mit allen statistischen Kennwerten findet sich in Anhang B.3.2.

Tabelle 36: Statistische Kennwerte der Konzentrationen prioritärer Stoffe in den Ablaufproben

Stoffe	Anzahl Messwerte > BG	Anzahl Messwerte > BG (%)	BG (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)
Blei	679	68	0,1	0,14	0,18
Cadmium	930	93	0,002	0,006	0,009
Nickel	998	100	1	4,4	4,8
Quecksilber	891	89	0,001	0,002	0,006
4-iso-Nonylphenol	569	57	0,04	0,043	0,115
Di-(2-ethylhexyl)phthalat	995	99	0,1	1,7	3,1
Perfluorbutanoat	912	91	0,001	0,004	0,007
Perfluorpentanoat	889	89	0,001	0,004	0,008
Perfluorhexanoat	979	98	0,001	0,006	0,018
Perfluorheptanoat	582	58	0,001	0,001	0,002
Perfluoroctanoat	898	90	0,001	0,006	0,009
Perfluorbutansulfonat	885	89	0,001	0,003	0,007
Perfluoroctansulfonat	840	84	0,001	0,003	0,008
Acenaphthen	629	63	0,001	0,0012	0,0023
Fluoren	861	86	0,001	0,0016	0,0022
Phenanthren	972	97	0,001	0,0043	0,0058
Fluoranthren	834	83	0,001	0,0021	0,0037
Pyren	804	80	0,001	0,0019	0,0031
Diuron	712	71	0,01	0,016	0,023
Isoproturon	699	70	0,01	0,019	0,047
Terbutryn	893	89	0,01	0,035	0,044

BG = Bestimmungsgrenze

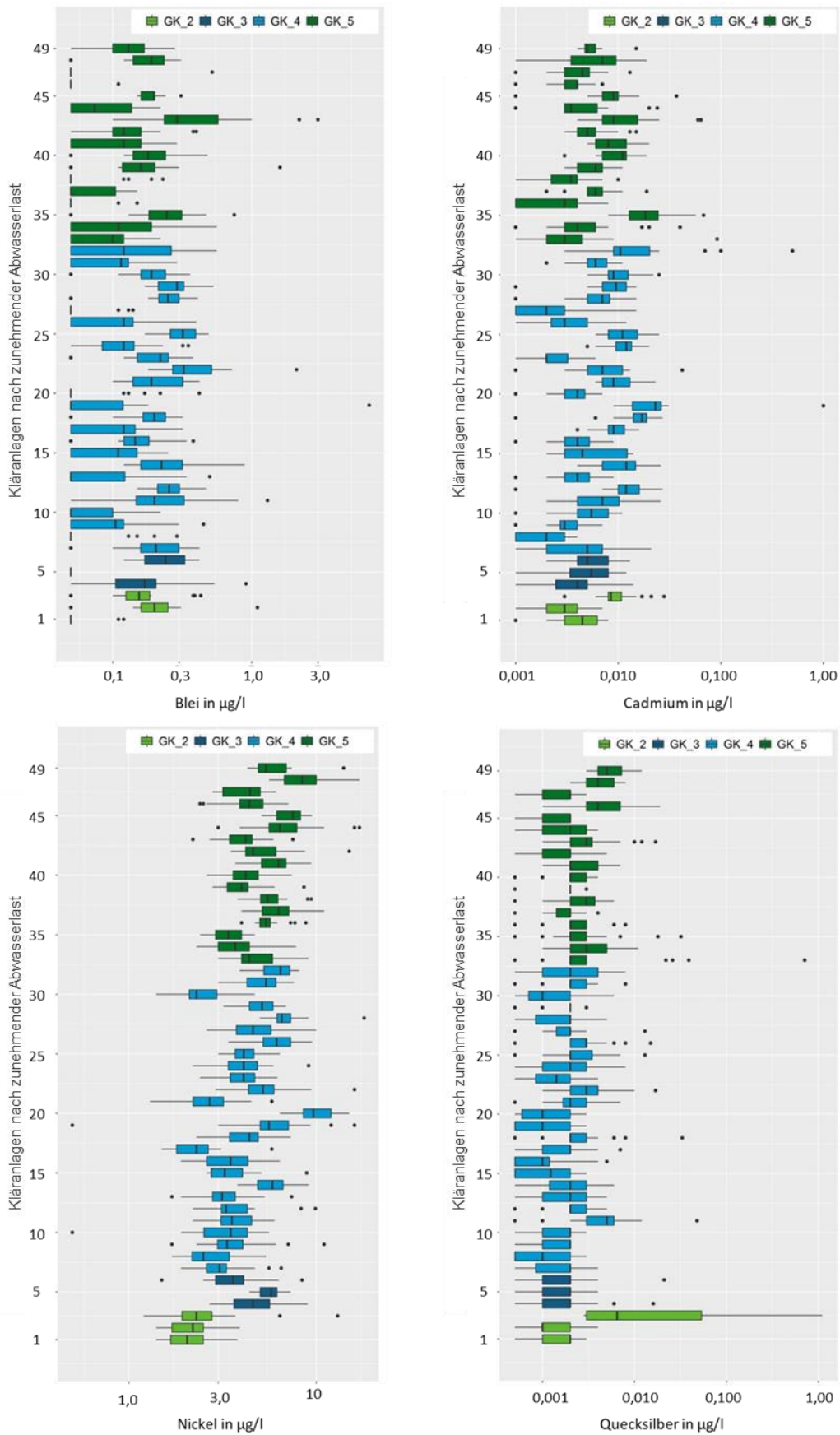
Auch für die Zulaufproben (Anhang B.3.1) und die Schlammproben (Anhang B.3.3 und B.3.4) wurden alle statistische Kenngrößen berechnet und tabellarisch zusammengefasst.

5.3 Stoffgruppenspezifische Befunde

5.3.1 Schwermetalle

Die prioritären Schwermetalle Blei, Cadmium, Nickel und Quecksilber wurden in allen untersuchten Kläranlagen und dabei in fast allen Zulauf- und im großen Teil der Ablaufproben nachgewiesen (Tabelle 36). Keine der untersuchten Anlagen zeigt im Vergleich zum Gesamtkollektiv deutlich höhere Ablaufkonzentrationen (Abbildung 16). Die Unterschiede der Mediane der Ablaufkonzentrationen aller Anlagen ist geringer als die Spannweite der Messwerte auf den einzelnen Anlagen. Mit Ausnahme von Nickel ist keine Abhängigkeit zwischen der Abwasserlast (EW) der Anlagen und der Ablaufkonzentration der Anlagen erkennbar.

Abbildung 16: Schwermetallablaufkonzentrationen aller 49 Kläranlagen

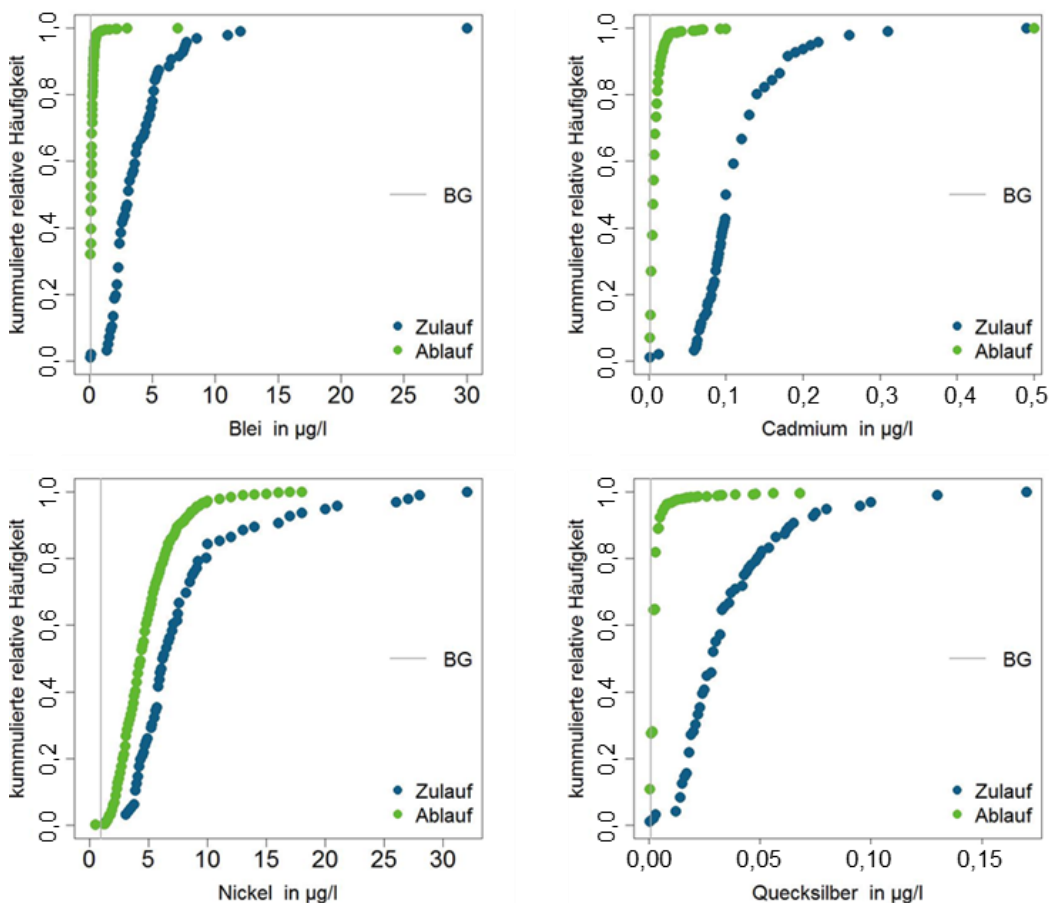


Quelle: eigene Darstellung, KIT-IWG

Die Summenhäufigkeit der beobachteten Konzentrationen im Zu- und Ablauf unterstreichen das einheitlich gute Leistungsniveau der Kläranlagen (Abbildung 17). Die nahezu vertikal ansteigenden Kurven der Ablaufwerte sowie ihr Abstand zur Zulaufkurve weisen für Blei, Cadmium und Quecksilber auf den sehr guten Rückhalt der Anlagen hin. Der bei Cadmium erkennbare Effekt, dass die maximale Ablaufkonzentration höher ist als die maximale Zulaufkonzentration, ist darauf zurückzuführen, dass den Häufigkeitsverteilungen unterschiedlich umfangreiche Datenkollektive zugrunde liegen. Der Ablaufdatensatz setzt sich aus 1.000 Einzelwerten zusammen, während die Zulaufkonzentrationen nur in knapp 100 Proben ermittelt wurden. Für Nickel zeigt sich im flacheren Kurvenverlauf und im geringeren Abstand zwischen Zulauf- und Ablaufkurve ein im Vergleich zu den anderen Schwermetallen etwas schlechterer Rückhalt.

Der steile Kurvenverlauf der Häufigkeiten der Zulaufkonzentrationen deutet auf einen stetigen Eintrag in die Kläranlage und das ubiquitäre Vorkommen der Stoffe hin.

Abbildung 17: Summenkurven für die Zulaufkonzentrationen aus fünf Kläranlagen und die Ablaufkonzentrationen aus allen 49 Kläranlagen für die Schwermetalle



Die BG im Zu- und Ablauf sind gleich.

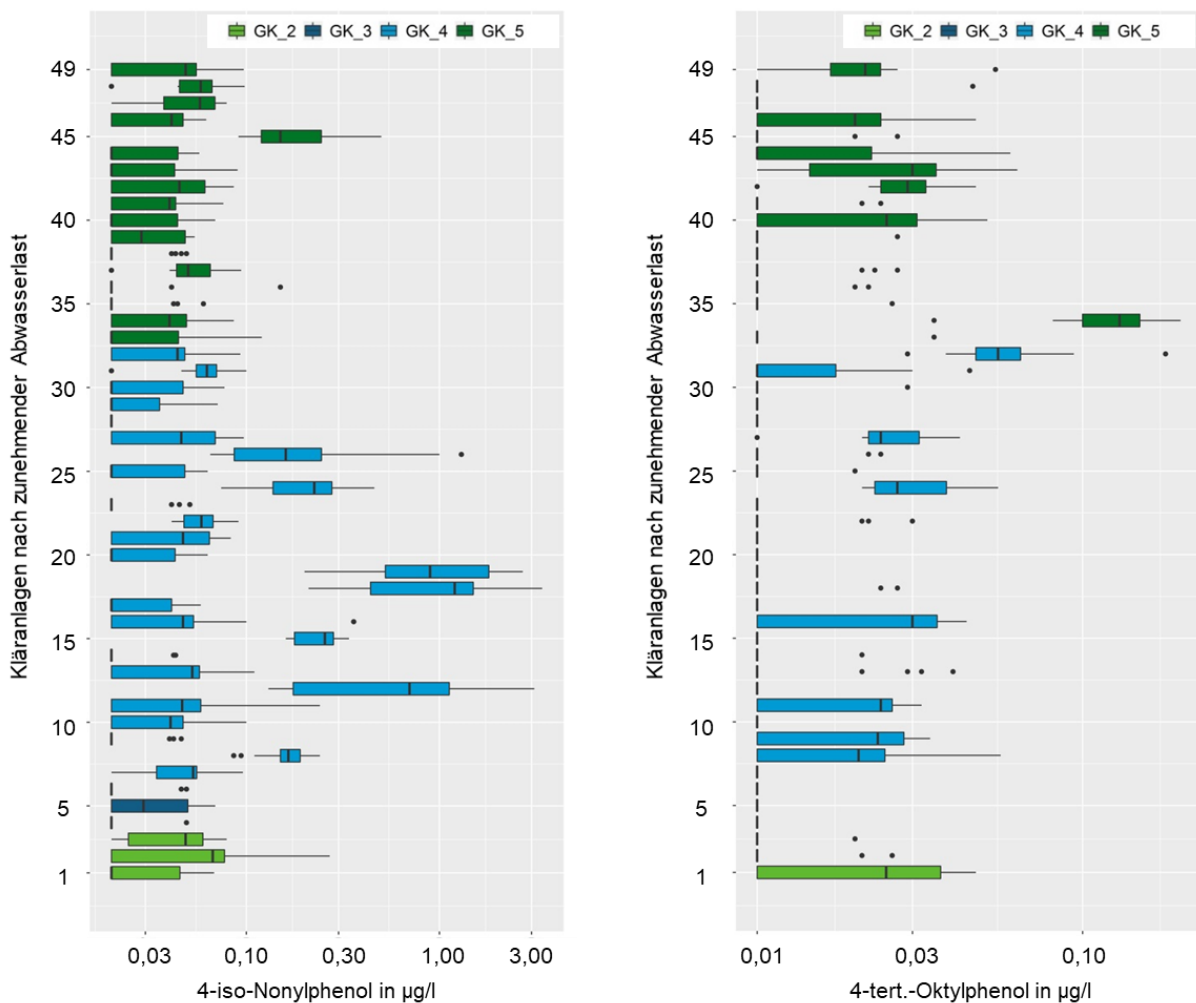
Quelle: eigene Darstellung, KIT-IWG

5.3.2 Alkylphenole

Im Zulauf der fünf detailliert untersuchten Kläranlagen wurde 4-iso-Nonylphenol in fast allen Proben oberhalb der BG gemessen, 4-tert.-Oktylphenol dagegen nur in ca. 11 % der Proben. Im Ablauf der Kläranlagen beträgt der Anteil der Positivbefunde 57 % für 4-iso-Nonylphenol bzw. 27 % für 4-tert.-Oktylphenol. Lediglich in einer Kläranlage im Trennsystem wurde 4-iso-Nonylphenol in keiner der Ablaufproben oberhalb der BG nachgewiesen. 4-tert.-Oktylphenol wurde in 16 Anlagen in keiner Ablaufprobe mit Werten oberhalb der BG nachgewiesen.

Abbildung 18 zeigt die Schwankungen der gemessenen Alkylphenolkonzentrationen auf den einzelnen Anlagen und zwischen den Anlagen.

Abbildung 18: Ablaufkonzentrationen Alkylphenole aller 49 untersuchten Kläranlagen



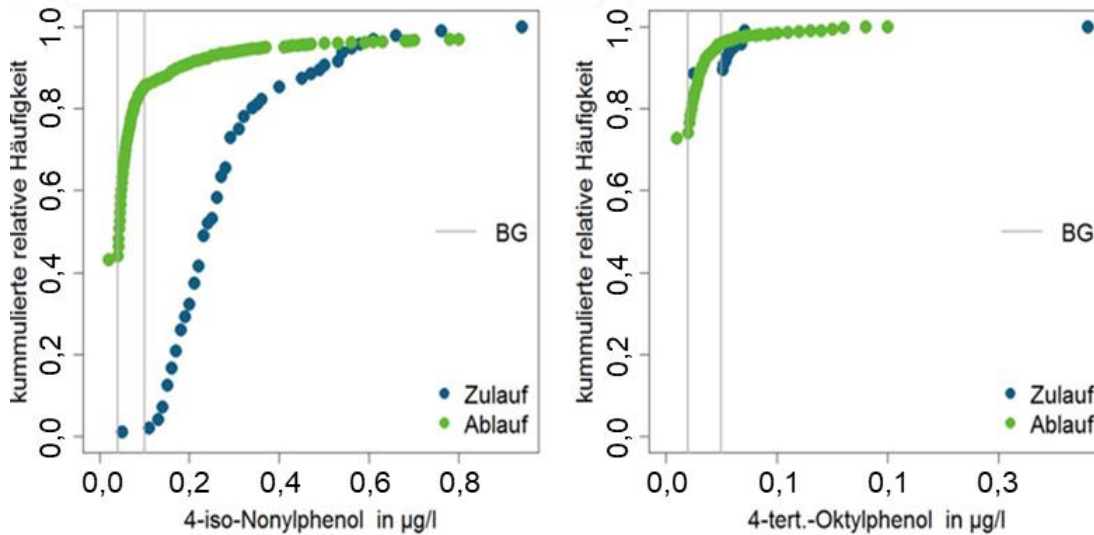
Quelle: eigene Darstellung, KIT-IWG

Die Medianwerte der Ablaufkonzentration der einzelnen Kläranlagen unterscheiden sich sehr deutlich und sind größer als die Messwertschwankungen an einem Standort. Dies deutet darauf hin, dass lokale Besonderheiten im Einzugsgebiet oder auf der Anlage systematisch zu erhöhten Emissionen beitragen können.

Bei den Phenolen unterscheiden sich die BG der Zu- und Ablaufuntersuchungen. Insbesondere bei 4-tert.-Oktylphenol ist daher ein Vergleich schwierig. Die Ablaufkonzentrationen sind aber insgesamt tendenziell niedriger als die Zulaufkonzentrationen (Abbildung 19). Für 4-iso-Nonylphenol deutet die Summenhäufigkeit der Zu- und Ablaufkurven auf einen guten Rückhalt

in den Kläranlagen hin. Die Gehalte in den Schlammproben zeigen, dass dieser Rückhalt vor allem über den Schlammfad stattfindet. 4-iso-Nonylphenol wurde in fast allen Primärschlammproben und in 68 % der Überschussschlammproben oberhalb der BG nachgewiesen. Im Gegensatz dazu wurde 4-tert.-Oktylphenol in jeweils nur einer Probe je Schlammart in der Größenordnung der BG positiv detektiert.

Abbildung 19: Summenkurven für die Zulaufkonzentrationen aus fünf Kläranlagen und die Ablaufkonzentrationen aus allen 49 Kläranlagen für die Alkylphenole



Die BG im Zulauf ist höher als im Ablauf.

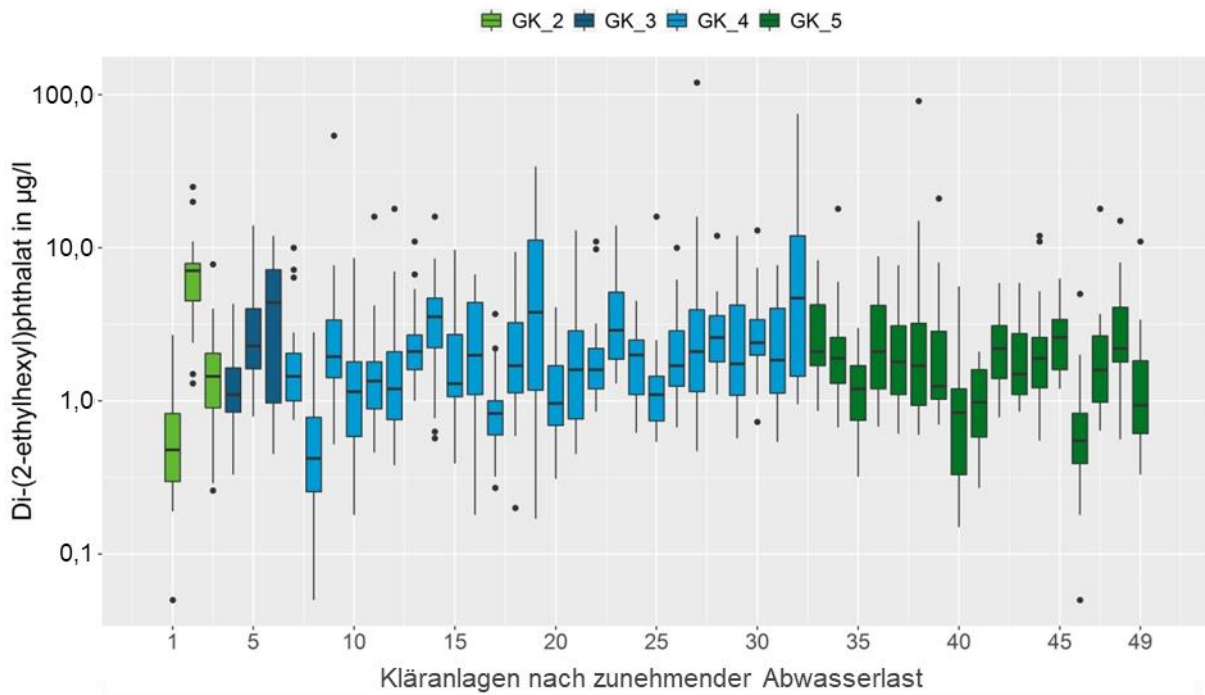
Quelle: eigene Darstellung, KIT-IWG

5.3.3 Di-(2-ethylhexyl)phthalat (DEHP)

Der Weichmacher DEHP wurde in allen Zulauf- und in fast allen Ablaufproben oberhalb der BG gefunden. Die durchschnittlichen DEHP-Konzentrationen wurden mit 16 µg/l im Zulauf und 3,1 µg/l im Ablauf beobachtet. Der Stoff wurde auch in allen Schlammproben gefunden, wobei die Konzentrationsbereiche der Primär- und Überschussschlämme sehr ähnlich sind. Die Größenordnung der Messwerte liegt zwischen 2 und 28 mg/kg. Eine Zusammenfassung aller statistischen Kenngrößen findet sich in Anhang B.3.

Keine der Anlagen zeigt im Vergleich zum Gesamtkollektiv besonders hohe bzw. besonders niedrige Ablaufkonzentrationen (Abbildung 20). Die kläranlagenspezifischen Mediane bewegen sich in einem engen Korridor zwischen 1 und ca. 4 µg/l. Lediglich vereinzelt wurden Werte dokumentiert, die weit vom übrigen Datenkollektiv abweichen. Diese Einzelbefunde deuten darauf hin, dass es durchaus Situationen mit einem vermehrten DEHP-Eintrag gibt. Auch für DEHP zeigt sich, dass die Variabilität der einzelnen Kläranlagen größer ist als die Variabilität über alle Kläranlagen.

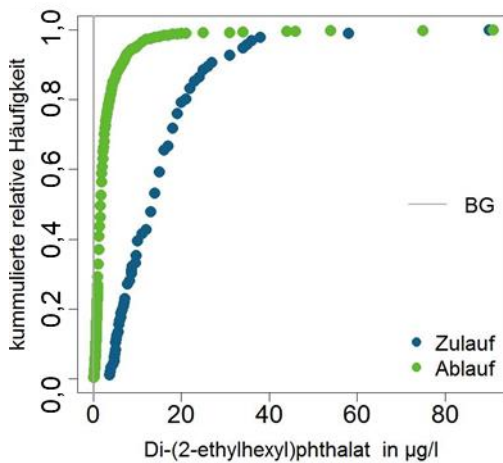
Abbildung 20: DEHP-Ablaufkonzentrationen aller untersuchten 49 Kläranlagen sortiert nach Größenklassen



Quelle: eigene Darstellung, KIT-IWG

Die kumulativen Wertehäufigkeiten der Zu- und Ablaufkonzentrationen weisen auf eine gute Reinigungsleistung der Kläranlagen hin (Abbildung 21). Auch für DEHP zeigt sich ein stetiger und kontinuierlicher Eintrag in die Kläranlage.

Abbildung 21: Summenkurven für die Zulaufkonzentrationen aus fünf Kläranlagen und die Ablaufkonzentrationen aus allen 49 Kläranlagen für DEHP



Die BG im Zu- und Ablauf sind gleich.

Quelle: eigene Darstellung, KIT-IWG

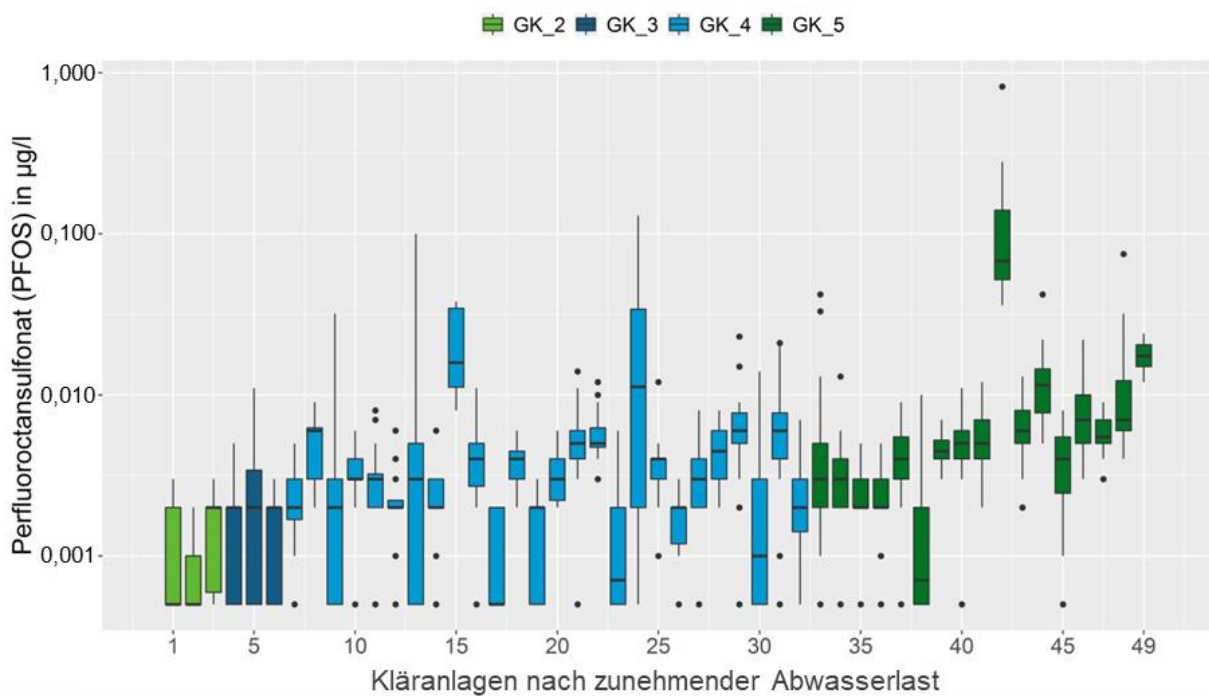
5.3.4 Perfluorierte Verbindungen

Einzelne Vertreter aus der Gruppe der perfluorierten Verbindungen (PFC) wurden nicht oder nur in sehr wenigen Proben (bis 5 %) > BG nachgewiesen (Tabelle 33 und Tabelle 34). Für die PFC ist zu berücksichtigen, dass die BG für den Ablauf um den Faktor 10 niedriger ist als im Zulauf.

Sieben der untersuchten PFC-Vertreter, darunter auch PFOS, wurden in mehr als 50 % der Ablaufproben > BG gemessen (PFBA, PFPA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFBS und PFOS) (Tabelle 36). Es handelt sich dabei vorwiegend um kurzketzige PFC. Der größte Anteil von Werten > BG wurde mit 98 % bei PFHxA festgestellt. Eine Zusammenfassung aller statistischen Kenngrößen findet sich in Anhang B.3.

PFOS als Stoff der UQN-RL, wurde in 84 % aller Ablaufproben > BG gemessen. Der Stoff wurde in allen Anlagen mindestens einmal und in 16 Anlagen in allen Ablaufproben gefunden. Abbildung 22 zeigt die Befunde für PFOS. Lediglich in einer Anlage der Größenklasse 5 werden deutlich höhere Konzentrationen gemessen. Im Rahmen des Vorhabens konnte die Ursache dafür nicht geklärt werden. Für die anderen PFC finden sich die Ergebnisse im Anhang B.4.

Abbildung 22: PFOS-Ablaufkonzentrationen aller untersuchten 49 Kläranlagen sortiert nach Größenklassen



Quelle: eigene Darstellung, KIT-IWG

Für die Gruppe der PFC ist die Spanne der Medianwerte aller Anlagen in der Regel größer als die Spannweite der auf einer Anlage gemessenen Werte. Allerdings fallen einzelne Anlagen mit einer besonders großen Wertespanne auf.

Die vier PFC-Vertreter PFPeS, PFHxS, PFHpS und PFDS werden weder im Primär- noch im Überschussschlamm gefunden. Mit Ausnahme von PFHxS werden sie auch weder in Zu- noch in Ablaufproben nachgewiesen. In den Primärschlammproben werden die PFC insgesamt in sehr wenigen Proben gefunden, meist liegen nur Einzelbefunde vor (Anhang B.3.3 und B.3.4). Eine Ausnahme ist PFOS, welches in 58 % der Proben oberhalb der BG nachgewiesen wurde. Im Überschussschlamm ist der Anteil höher. So wurde PFOA in allen Überschussschlammproben

und PFDA in 86 % der Proben mit Werten > BG gefunden. Zusammenfassend ist festzustellen, dass lediglich für PFOS ein nennenswerter Rückhalt durch Adsorption an der Biomasse in der Kläranlage festgestellt werden kann.

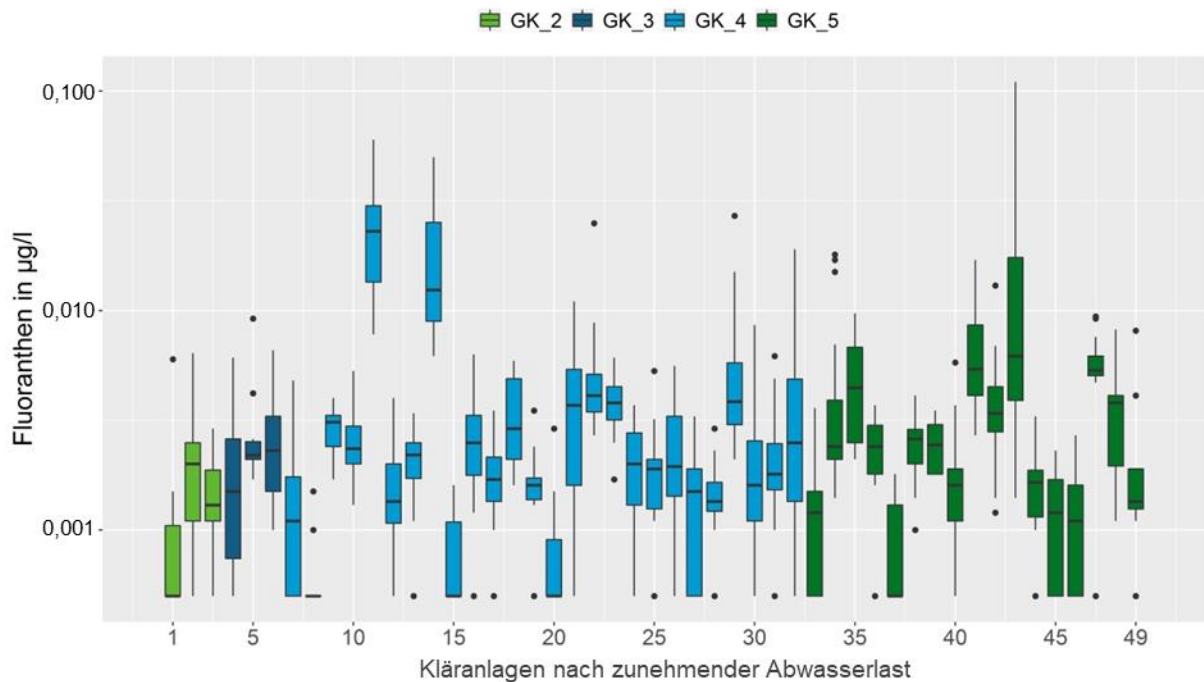
Die Auswertung der kumulativen relativen Wertehäufigkeiten der Zu- und Abläufe lieferte keine zuverlässigen Ergebnisse aufgrund der niedrigen Wiederfindungsraten im Zulauf. Daher wird an dieser Stelle auf eine Darstellung verzichtet.

5.3.5 Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK₁₆)

In den Zulaufproben wurden alle PAK₁₆-Vertreter in einem relevanten Umfang oberhalb der BG gefunden. Den niedrigsten Anteil an Messwerten > BG hat Dibenz[a,h]anthracen mit 43 % gefolgt von Naphthalin mit 58 %. Bei den anderen Vertretern sind die Wiederfindungsraten > 80 %. Die zehn PAK-Vertreter Acenaphthen, Fluoren, Phenanthren, Fluoranthen, Benzo[a]anthracen, Chrysen, Benzo[b]fluoranthen, Benzo[a]pyren, Indeno[1,2,3-cd]pyren und Benzo[g,h,i]perylen wurden in allen Zulaufproben oberhalb der BG gefunden. In den Ablaufproben wurden für alle PAK deutlich weniger Werte > BG gemessen (Tabelle 34 und Tabelle 36). Phenanthren zeigte die höchste Wiederfindungsrate von 97 %, gefolgt von Fluoren (86 %) und Fluoranthen (83 %). Dabei werden insbesondere die niedrig kondensierten PAK häufiger in einem größeren Anteil der Proben oberhalb der BG nachgewiesen. Sechs PAK-Vertreter wurden in allen 49 Kläranlagen in mindestens einer Ablaufprobe > BG nachgewiesen (Naphthalin, Acenaphthen, Fluoren, Phenanthren, Fluoranthen und Pyren). Acenaphthylen wurde in 47 Abläufen mindestens einmal oberhalb der BG gemessen, gefolgt von Benzo[a]pyren in 41 und Benzo[g,h,i]perylen in 39 Anlagen. Dibenz[a,h]anthracen wurde lediglich in fünf Anlagen mit Werten > BG gemessen.

Am Beispiel von Fluoranthen kann gezeigt werden, dass einzelne Kläranlagen hohe Ablaufkonzentrationen aufweisen (Abbildung 23). Diese Beobachtung wiederholt sich insbesondere bei den hochkondensierten PAK-Vertretern für dieselben Anlagen und deutet auf das gemeinsame Vorkommen der Stoffe hin (siehe auch Anhang A.1.1). Für die Gruppe der PAK₁₆ ist es schwer, eine verallgemeinernde Aussage über die Variabilität der Werte zu treffen, da sich diese für die einzelnen PAK-Vertreter unterscheidet. Die Variabilität an einem Standort ist z.B. für die großen PAK größer als die Variabilität zwischen den Kläranlagen. Für die niedrig kondensierten PAK-Vertreter ist es umgekehrt.

Abbildung 23: Fluoranthen-Ablaufkonzentrationen aller untersuchten 49 Kläranlagen sortiert nach Größenklassen

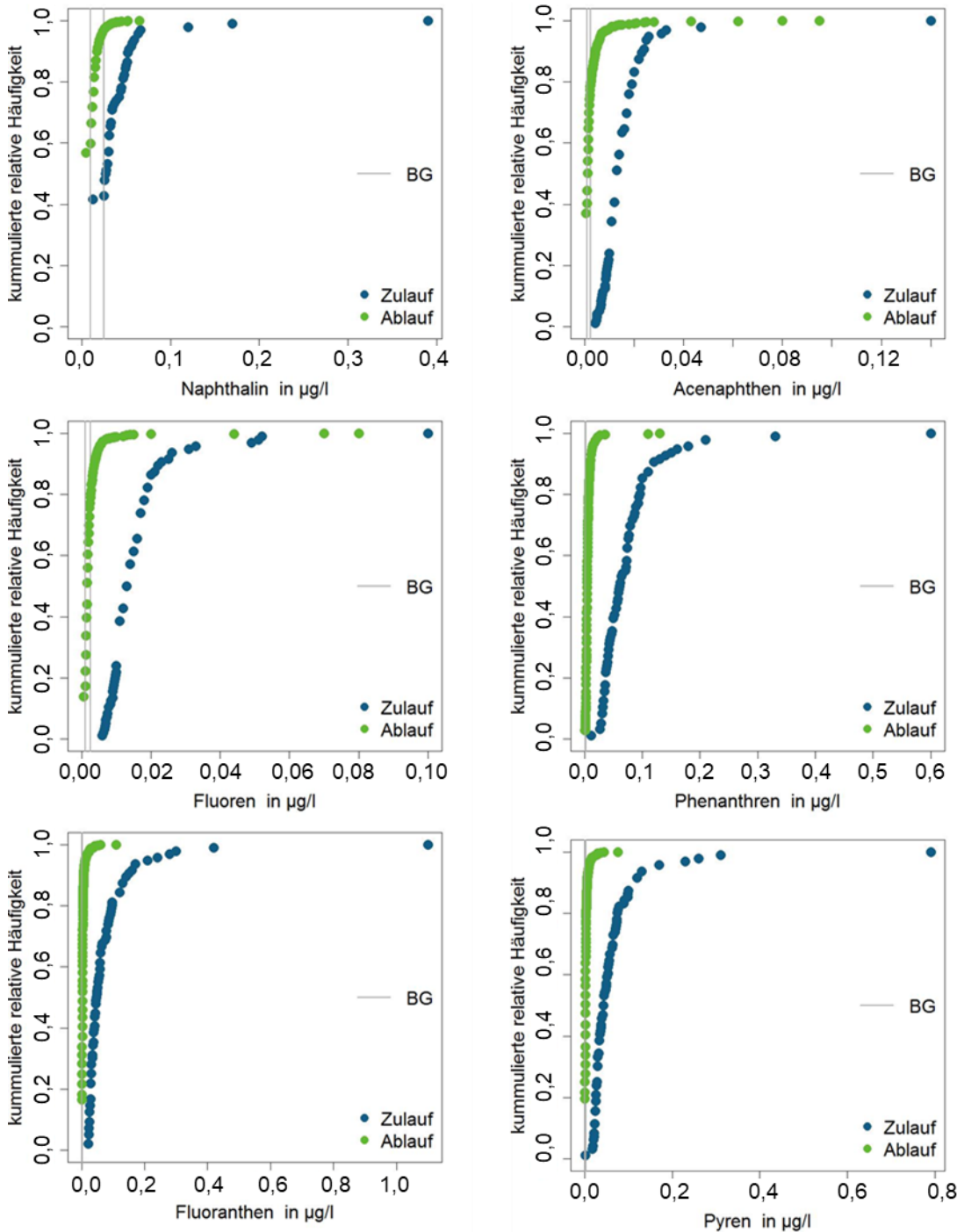


Quelle: eigene Darstellung, KIT-IWG

In den Schlammproben konnten alle PAK-Vertreter in mindestens einer Probe oberhalb der BG nachgewiesen werden. Insgesamt sind die Primärschlammgehalte tendenziell höher als die Überschussschlammgehalte (Anhang B.3.3 und B.3.4). Die höchsten Konzentrationen für den Primärschlamm wurden bei Naphthalin und Fluoranthen mit jeweils 1.300 µg/kg und für den Überschussschlamm mit 390 µg/kg bzw. 450 µg/kg gemessen.

Abbildung 24 zeigt für die PAK-Vertreter mit einem hohen Anteil von Werten > BG den gewissermaßen überall in der gleichen Größenordnung vorhandenen Eintrag in die Kläranlagen sowie den sehr guten Rückhalt. Die Adsorption an die Biomasse ist als Hauptentfernungsmechanismus zu sehen.

Abbildung 24: Summenkurven für die Zulaufkonzentrationen aus fünf Kläranlagen und die Ablaufkonzentrationen aus allen 49 Kläranlagen für ausgewählte PAK-Vertreter



Die BG im Zulauf ist höher als im Ablauf.

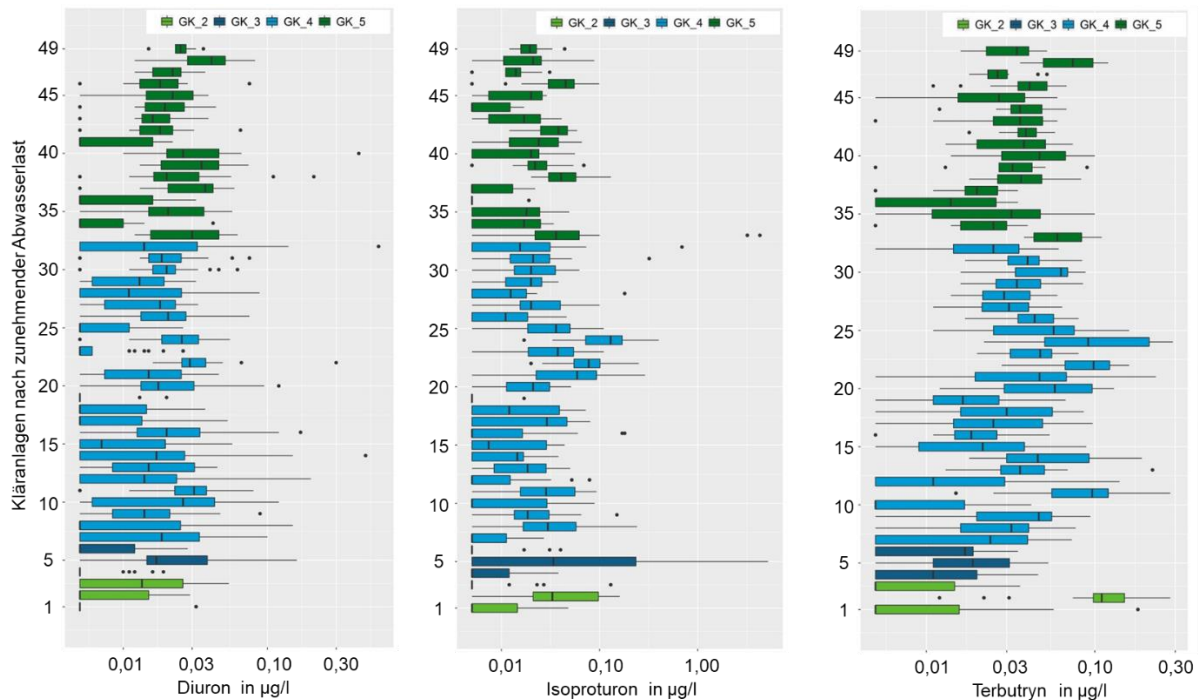
Quelle: eigene Darstellung, KIT-IWG

5.3.6 Pflanzenschutzmittel/Biozide (Diuron, Isoproturon, Terbutryn)

Die Stoffe Diuron, Isoproturon und Terbutryn werden sowohl im Zu- als auch im Ablauf in vielen Proben mit Werten > BG nachgewiesen (Tabelle 36). Im Ablauf hat Terbutryn mit 91 % den größten Anteil an Positivbefunden, Diuron und Isoproturon liegen in der Größenordnung von 75 %. Alle drei Stoffe wurden in allen Anlagen in mindestens einer Probe nachgewiesen.

Die auf den einzelnen Anlagen gemessenen Ablaufkonzentrationen zeigen für die drei Stoffe keine auffällig hohen bzw. niedrigen Werte in einzelnen Anlagen (Abbildung 25). Auch für Diuron, Isoproturon und Terbutryn ist die Variabilität zwischen den Anlagen niedriger als die auf den einzelnen Anlagen.

Abbildung 25: Diuron-, Isoproturon- und Terbutryn-Ablaufkonzentrationen aller untersuchten 49 Kläranlagen sortiert nach Größenklassen

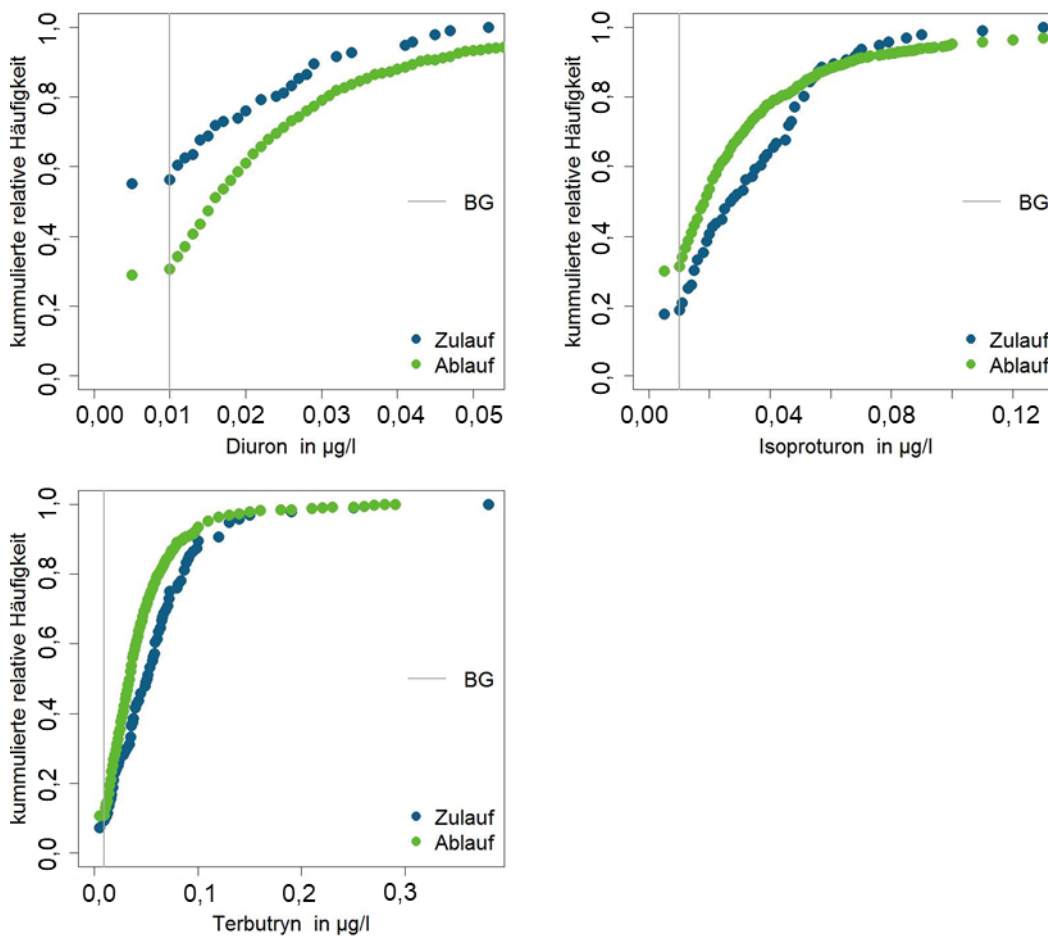


Quelle: eigene Darstellung, KIT-IWG

In den Schlammproben wurde Diuron nur vereinzelt > BG nachgewiesen. Isoproturon wurde in ca. 30 % der Primär- und Überschussschlammproben in Konzentrationen zwischen 10 und 100 µg/kg bzw. 10 und 35 µg/kg gemessen. Bei Terbutryn wurden vergleichsweise oft Gehalte oberhalb der BG gemessen. Dies bedeutet, dass der Stoff teilweise an die Biomasse absorbiert und über den Schlamm aus dem Abwasser entfernt wird. Zudem liegen die Terbutryn-Gehalte im Primär- und Überschussschlamm in derselben Größenordnung.

Die Summenhäufigkeit der Konzentrationen in den Zu- und Ablaufproben bestätigt den geringen Rückhalt der drei Stoffe in den Kläranlagen (Abbildung 26). Die Ablaufkonzentrationen sind nahe den Zulaufkonzentrationen. Der relativ flache Kurvenverlauf bei Diuron und Isoproturon deutet auf eine hohe Streuung der Messwerte und auf einen anwendungs- bzw. ereignisbezogenen Eintrag in die Kläranlage. Bei Terbutryn deutet der steilere Kurvenverlauf wie bei den PAK und Schwermetallen auf einen eher kontinuierlichen Eintrag hin.

Abbildung 26: Summenkurven für die Zulaufkonzentrationen aus fünf Kläranlagen und die Ablaufkonzentrationen aus allen 49 Kläranlagen für Diuron, Isoproturon und Terbutryn



Die BG im Zu- und Ablauf sind gleich.

Quelle: eigene Darstellung, KIT-IWG

5.4 Vergleich mit Literaturdaten

Für den Datenvergleich wurden Untersuchungsprogramme recherchiert, die hinsichtlich Probenahmestrategie und Stoffumfang vergleichbar sind und Daten über Zu- und Ablaufkonzentrationen zur Verfügung stellen. Ein wichtiges Auswahlkriterium war die Verfügbarkeit der Einzelmesswerte.

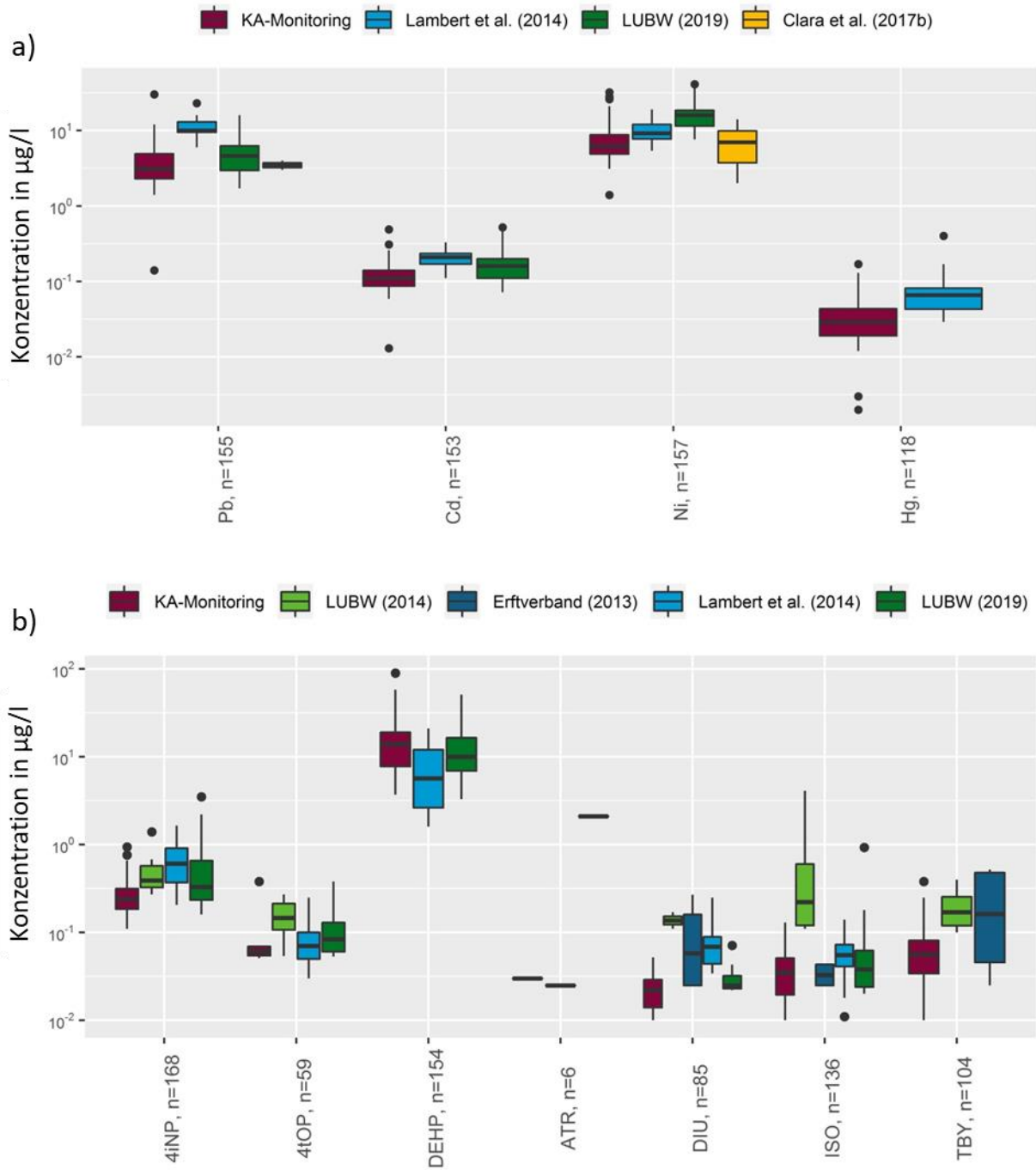
Im Ergebnis wurden die folgenden Studien ausgewählt und für den Datenvergleich genutzt:

- ▶ Lambert et al. 2014, Untersuchung von drei kommunalen Kläranlagen in Baden-Württemberg mit gleicher Probenahmestrategie,
- ▶ Erftverband 2013, Untersuchung von vier kommunalen Kläranlagen des Erft-Verbandes in Nordrhein-Westfalen (Zulaufproben: zeitproportionale Stichproben),
- ▶ LUBW 2014, Untersuchung von sechs kommunalen Kläranlagen in Baden-Württemberg, 24-Stunden-Mischproben,

- ▶ BAFU 2013, Untersuchung von 54 kommunalen Kläranlagen in der Schweiz, 24-Stunden-Mischproben oder 14-Tage-Mischprobe,
- ▶ Loos et al. 2012, Untersuchung von 91 kommunalen Kläranlagen europaweit,
- ▶ Clara et al. 2017a, Untersuchung von zwei kommunalen Kläranlagen in Österreich, Wochenmischproben (3 Datenpaare)
- ▶ Clara et al. 2017b, Untersuchung von acht Kläranlagen in Österreich, Wochenmischproben, und
- ▶ LUBW 2019, Untersuchung von 35 Anlagen > 100.000 EW in Baden-Württemberg mit annähernd gleicher Probenahmestrategie (Zulaufuntersuchungen in sechs Anlagen).

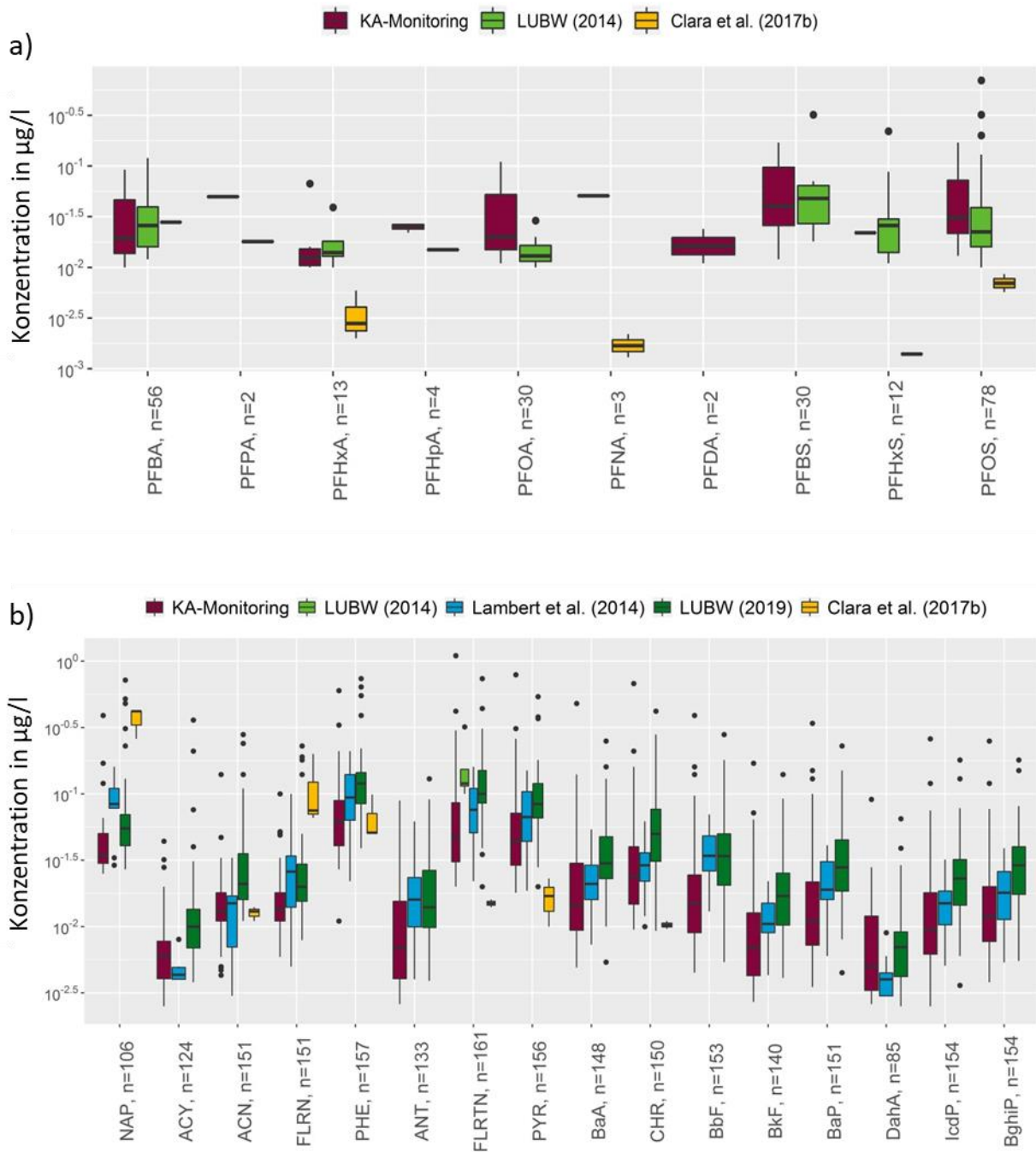
Alle Studien zeigen ähnliche Konzentrationsbereiche (Abbildung 27 bis Abbildung 30). Die Konzentrationen im Kläranlagenzulauf schwanken dabei erwartungsgemäß stärker als die im Ablauf und reflektieren die Unterschiede in Nutzungsarten und -intensitäten der Einzugsgebiete. Sowohl für den Zu- als auch für den Ablauf liegen die gemessenen Konzentrationen dieser Studie tendenziell im unteren Bereich der übrigen Untersuchungen. Dies könnte bedingt sein durch die größere Anzahl an Messwerten, aber auch durch die für einzelne Stoffe höheren analytischen BG der verschiedenen Untersuchungsprogramme.

**Abbildung 27: Vergleich der Zulaufkonzentrationen unterschiedlicher Studien für
a) Schwermetalle, b) Phenole, DEHP und Pflanzenschutzmittel**



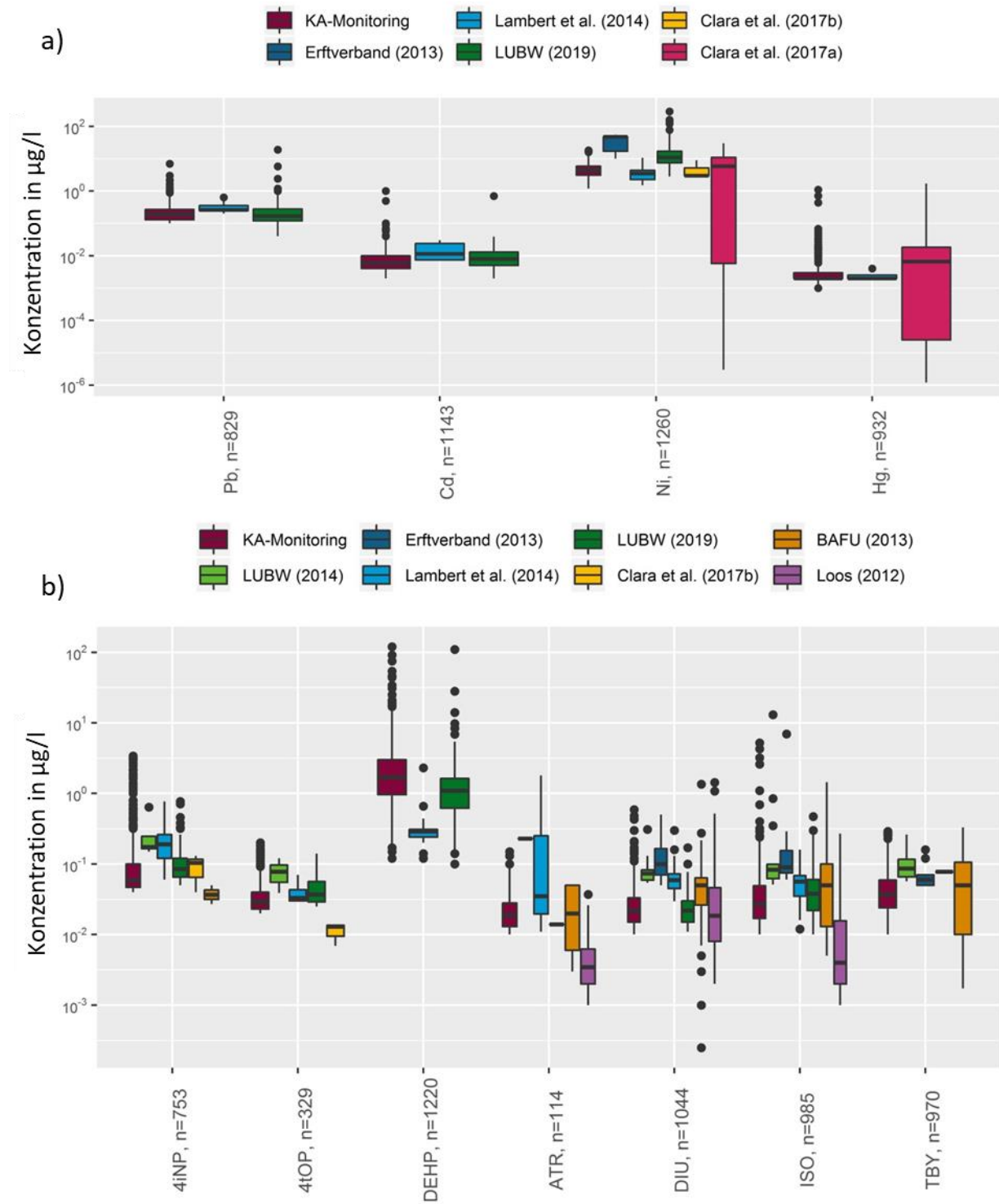
Quelle: eigene Darstellung, KIT-IWG

Abbildung 28: Vergleich der Zulaufkonzentrationen unterschiedlicher Studien für a) perfluorierte Verbindungen und b) PAK



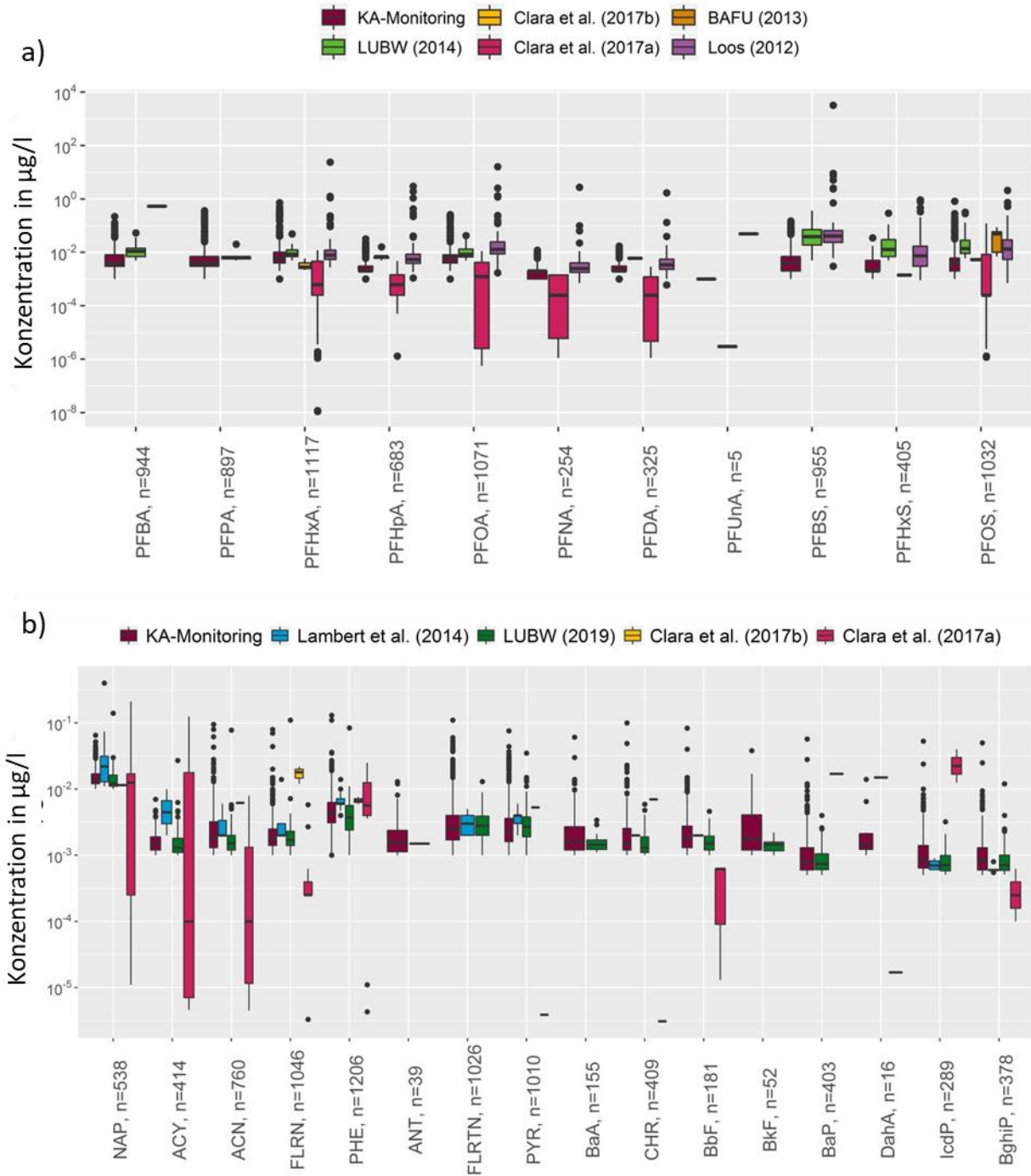
Quelle: eigene Darstellung, KIT-IWG

Abbildung 29: Vergleich der Ablaufkonzentrationen unterschiedlicher Studien für
a) Schwermetalle und b) Phenole, DEHP und Pflanzenschutzmittel



Quelle: eigene Darstellung, KIT-IWG

Abbildung 30: Vergleich der Ablaufkonzentrationen unterschiedlicher Studien für
a) perfluorierte Verbindungen und b) PAK



Quelle: eigene Darstellung, KIT-IWG

Für weitere Vergleichsstudien konnten nur die statistischen Kenngrößen zu den Ablaufkonzentrationen recherchiert werden. Eine detaillierte Zusammenstellung dieser Daten findet sich in Anhang B.4. Auch hier zeigt sich, dass die Werte in einer ähnlichen Größenordnung liegen. Für die PFC-Verbindungen PFPA, PFHxA und PFHpA sowie für den PAK-Vertreter Fluoranthen konnten keine Vergleichswerte gefunden werden.

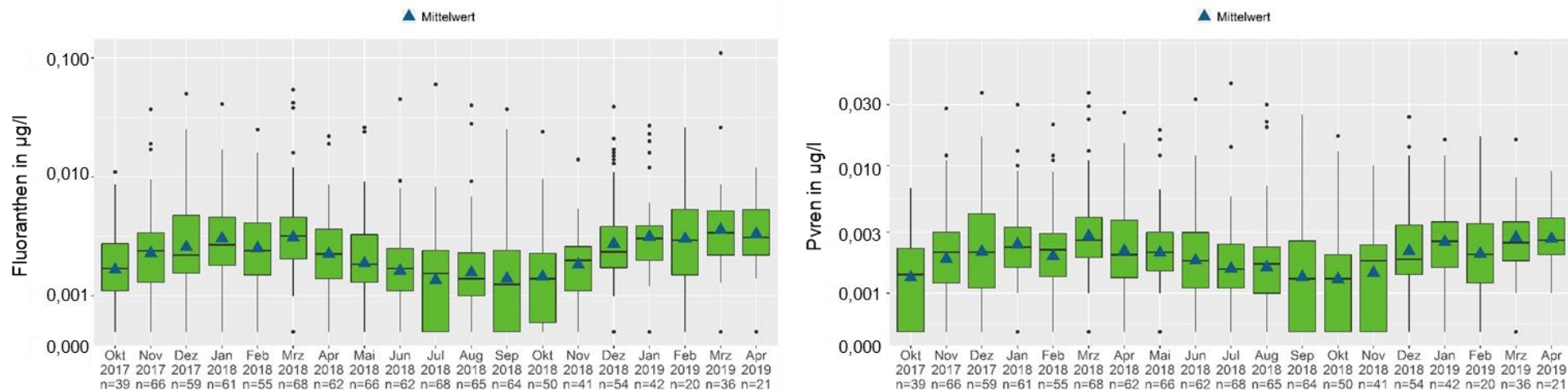
Für die Schlämme konnte kein Datenvergleich erfolgen. Im Anhang B.3 ist die allgemeine Charakterisierung der Datengrundlage zu Stoffkonzentrationen in den Primär- und Überschussschlammproben zu finden.

5.5 Saisonalität der Ablaufkonzentrationen

Das Eintragsmuster einzelner Stoffe unterliegt, beispielsweise aufgrund ihrer Applikationszeiten, einer Saisonalität. Dies könnte Ansatzpunkte für eine differenzierte Ableitung von Emissionsfaktoren (EF) liefern. Zur Prüfung saisonaler Schwankungen der Ablaufkonzentrationen wurden für das gesamte Datenkollektiv mittlere monatliche Konzentrationen berechnet.

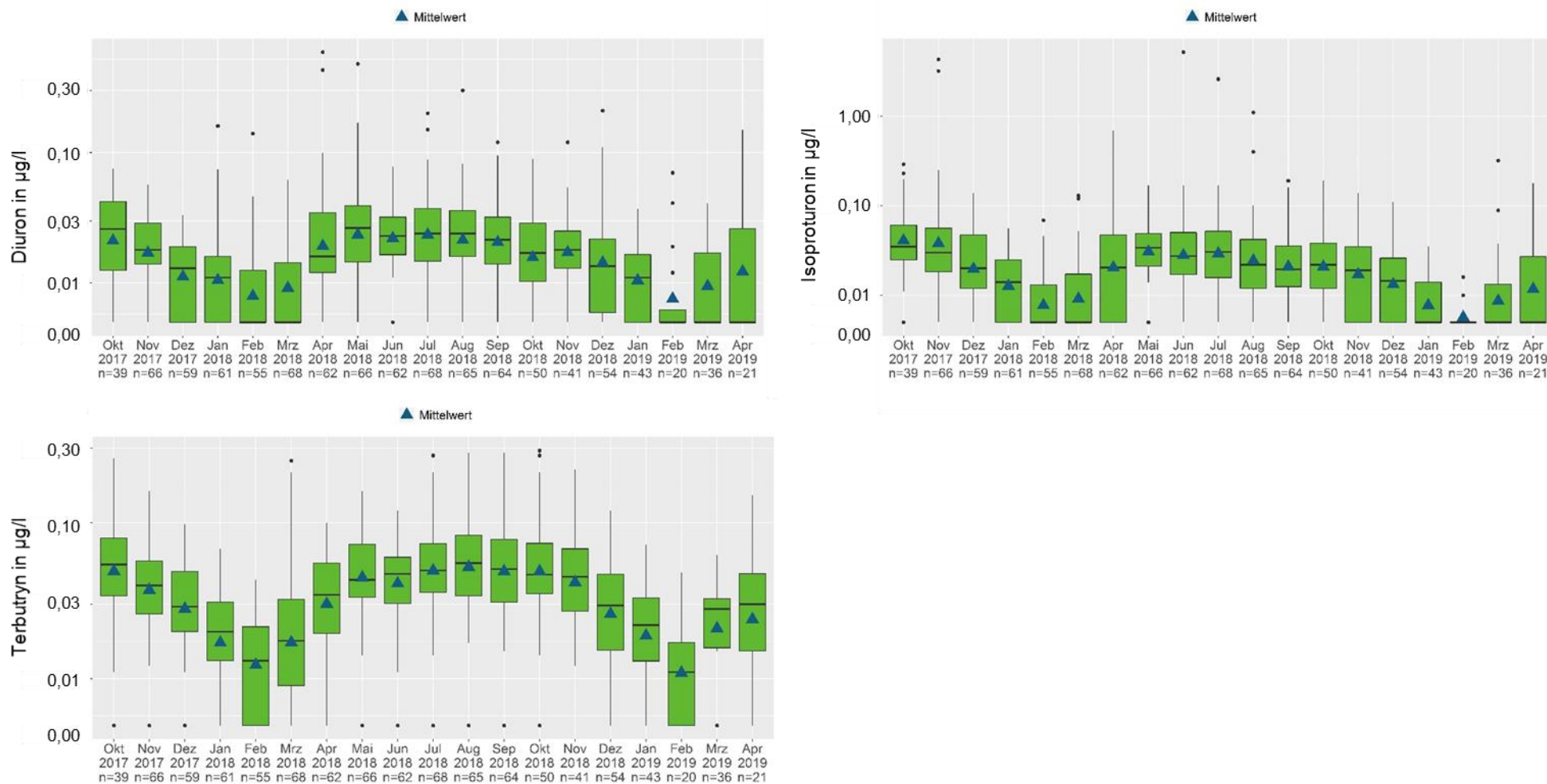
Die Auswertung zeigte insbesondere für einige PAK-Vertreter und Pestizide einen eindeutigen saisonalen Verlauf. Die PAK-Konzentrationen steigen in den Wintermonaten und sinken in den Sommermonaten (Abbildung 31). Im Gegensatz dazu zeigen die Stoffe, die als Biozide oder Pflanzenschutzmittel angewendet werden (Diuron, Isoproturon und Terbutryn), einen saisonalen Verlauf mit einem Peak im Sommer und einen Tiefpunkt im Winter (Abbildung 32). Dieses Ergebnis ist im Einklang mit den bekannten Herkunftsbereichen und Eintragsmustern der Stoffe. PAK werden in den Wintermonaten verstärkt z.B. durch Verbrennungsprozesse im Verkehr und Kleinf Feuerungsanlagen in die Atmosphäre emittiert und auf der Landfläche deponiert. Bei Niederschlagsereignissen erfolgt sowohl eine Auswaschung aus der Atmosphäre als auch von versiegelten Flächen in die Kanalisation. Bei den Stoffen Diuron und Isoproturon kann die Saisonalität der Einträge u.a. mit Applikationszeiten assoziiert sein. Diuron wird außerdem als Biozid in Fassadenanstrichen eingesetzt. Das Biozid Terbutryn wird verstärkt ab April/Mai durch Schlagregenereignisse und durch Taubildung oder Kondenswasser aus Fassaden und Dachflächen ausgewaschen. Dabei spielt die Zusammensetzung der Anstriche und der Putze eine wichtige Rolle. Sie beeinflusst entscheidend, wie schnell ein Stoff und wie viel von ihm ausgetragen wird. Zudem wird die Freisetzung der Biozidwirkstoffe durch Temperaturerhöhung in der warmen Jahreshälfte beschleunigt. Das zeigen bspw. Berechnungsversuche von Burkhardt et al. (2009).

Abbildung 31: Zeitlicher Verlauf der Ablauf-Konzentrationen für Fluoranthen und Pyren



Quelle: eigene Darstellung, KIT-IWG

Abbildung 32: Zeitlicher Verlauf der Ablauf-Konzentrationen für Diuron, Isoproturon und Terbutryn



Quelle: eigene Darstellung, KIT-IWG

5.6 Regenwassereinleitungen und Mischwasserentlastungen

Insgesamt wurden im Untersuchungszeitraum 27 Mischwasserentlastungsereignisse und 20 Regenwassereinleitungsereignisse untersucht. In der Regel handelte es sich dabei um mehrere aufeinander folgende Ereignisse, die vollständig in einer Probenahme erfasst wurden. Daneben konnten einige Ereignisse, bedingt durch das begrenzte Probenahmenvolumen, nur anteilig erfasst werden. Eine Übersicht der Proben mit Angaben zum Zeitraum der Probenahme gibt Tabelle 37.

Tabelle 37: Probenahmen Regenwassereinleitungen (RKB) und Mischwasserentlastungen (RÜB)

Standort	Anzahl Proben	Zeitraum der Probenahme
RKB1	10	28.10.2018 - 08.04.2019
RKB2	10	22.10.2018 - 15.03.2019
RÜB1	4	03.06.2019 - 07.08.2019
RÜB2	10	28.06.2018 - 02.07.2019
RÜB3	8	03.12.2018 - 12.07.2019
RÜB4	1	11.05.2019 - 11.05.2019
RÜB5	3	20.05.2019 - 07.07.2019
RÜB6	1	20.05.2019 - 21.05.2019

Für einen Teil der Proben wurden Unregelmäßigkeiten bei der Probenahme identifiziert. Für die Mischwasserentlastungen wurden 14 der 27 erfassten Ereignisse sicher volumenproportional beprobt, für die Regenwassereinleitungen waren es 18 von 20. Da ein Einfluss auf die statistischen Kenngrößen nicht auszuschließen ist, wurden die Daten der Ereignisse, bei denen Probleme bei der Probenahme auftraten, in einem separaten Auswertungsschritt analysiert. Die festgestellten Abweichungen waren weder für die Begleitparameter noch für die Schadstoffe signifikant, sodass für die Auswertung alle Messwerte herangezogen werden konnten. Im Anhang B.5 und Anhang B.6 sind darüber hinaus die Ergebnisse der getrennten Auswertung dokumentiert.

5.6.1 Monitoringdaten der Regenwassereinleitungen

5.6.1.1 Begleitparameter

In Tabelle 38 sind die statistischen Kenngrößen der Begleitparameter in den beprobten Regenwassereinleitungen zusammengestellt. Mit Ausnahme von AFS_{ges} , AFS_{63} , Gesamtstickstoff, Gesamtphosphor und des Glühverlustes der AFS_{63} sind die Daten nicht normalverteilt und weisen eine rechtsschiefe Verteilung auf (Median < Mittelwert).

Tabelle 38: Statistische Kenngrößen der Begleitparameter in Regenwassereinleitungen

Parameter	Anzahl Messwerte	Einheit	Minimum	25 %-Quantil	Median	Mittelwert	75 %-Quantil	Maximum
AFS _{ges}	19	mg/l	9,8	23	37	37	45	84
AFS _{grob}	19	mg/l	0,19	1,9	3,3	5	6,9	27
AFS ₆₃	19	mg/l	9,4	21	30	31	39	65
GV AFS _{grob}	19	%	38	43	53	59	65	100
GV AFS ₆₃	19	%	19	39	43	43	46	64
pH	20	-	5,8	6,6	6,8	6,8	6,9	7,7
Lf	20	µS/cm	4,3	141	340	934	508	6.660
Ks _{4,3}	18	mmol/L	0,6	0,7	0,9	1,3	1,7	3,9
CSB _{gel}	19	mg/l	11	15	19	23	25	59
CSB _{ges}	20	mg/l	21	32	42	44	51	92
NH ₄ -N	19	mg/l	0,06	0,28	0,49	0,74	0,89	2,86
NO ₃ -N	19	mg/l	0,35	0,62	0,93	1,03	1,18	2,53
N _{ges}	20	mg/l	1,7	2,6	3,3	3,2	3,6	5,1
o-PO ₄ -P	20	mg/l	0,003	0,025	0,047	0,083	0,095	0,6
P _{ges}	20	mg/l	0,07	0,19	0,25	0,24	0,28	0,48

AFS_{ges} = abfiltrierbare Stoffe gesamt, AFS_{grob} = abfiltrierbare Stoffe 63 – 2.000 µm, AFS₆₃ = abfiltrierbare Stoffe < 63 µm, GV AFS₆₃ = Glühverlust der abfiltrierbaren Stoffe < 63 µm, GV AFS_{grob} = Glühverlust der abfiltrierbaren Stoffe 63 – 2.000 µm, pH = pH-Wert, LF = Leitfähigkeit, Ks_{4,3} = Säurekapazität, CSB_{ges} = Chemischer Sauerstoffbedarf gesamt, CSB_{gel} = Chemischer Sauerstoffbedarf gelöst, N_{ges} = Gesamtstickstoff, NO₃-N = Nitrat-Stickstoff, NH₄-N = Ammonium-Stickstoff, P_{ges} = Gesamtphosphor, o-PO₄-P = Orthophosphat-Phosphor.

Bemerkenswert sind die hohen Ammonium-Stickstoff- und CSB-Konzentrationen in den Regenwassereinleitungen. Die gemessenen Maximalkonzentrationen von 2,86 mg NH₄-N/l und 92 mg CSB_{ges}/l, aber auch die Werte des 75 %-Quantils können auf Schmutzwassereinflüsse aufgrund von Fehlanschlüssen oder Fehleinleitungen hinweisen. Auch die in diesem Vorhaben genommenen Stichproben bestätigen damit quantitativ die Erfahrung, dass Regenwasserkanäle nur schwer und nicht vollständig frei von Schmutzwassereinleitungen zu halten sind.

5.6.1.2 Schadstoffe

Insgesamt 15 Einzelsubstanzen wurden in keiner der Regenwassereinleitungen > BG nachgewiesen (Tabelle 39).

Tabelle 39: Stoffe, die in den Regenwassereinleitungen immer unter der Bestimmungsgrenze lagen

Stoffe	Anzahl Messwerte	Bestimmungsgrenze (µg/l)
Aclonifen	20	0,01
Atrazin	20	0,01
Bifenox	20	0,004
Quinoxifen	20	0,01
Perfluordecansulfonat	20	0,001
Perfluorheptansulfonat	20	0,001
Perfluorhexansulfonat	20	0,001
Perfluordodecanoat	20	0,001
Perfluorundecanoat	20	0,001
cis-Heptachlorepoxyd und trans-Heptachlorepoxyd	20	0,004
Cybutryn	20	0,005
Dichlorvos	20	0,02
Dicofol	20	0,02
Heptachlor	20	0,004

Weitere sechs Stoffe wurden in weniger als der Hälfte der untersuchten Regenwasserproben gefunden, davon zwei nur in einer der Proben (Tabelle 40).

Tabelle 40: Stoffe mit Einzelbefunden in den Regenwassereinleitungen

Stoffe	Anzahl Messwerte	Anzahl Messwerte > BG	Maximum (µg/l)	BG (µg/l)
Perfluornonanoat	20	6	0,003	0,001
Perfluordecanoat	20	9	0,007	0,001
Perfluorpentansulfonat	20	1	0,001	0,001
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonat	20	5	0,006	0,001
Naphthalin	20	8	0,031	0,01
Cypermethrin, gesamt	20	1	0,0052	0,005

BG = Bestimmungsgrenze

Die verbleibenden 33 Stoffe wurden in mindestens der Hälfte, viele in nahezu allen Proben > BG nachgewiesen (Tabelle 41). Stoffspezifisch zeigen die Konzentrationen z.T. eine sehr hohe Variabilität. Die Schwermetalle, elf PAK-Vertreter, DEHP und Terbutryn sind in allen Proben in Konzentrationen > BG zu finden.

Zur Plausibilisierung der Monitoringergebnisse wurden diese ebenfalls mit Daten aus anderen Studien verglichen (Anhang B.7). Insgesamt decken sich die Werte aus anderen Untersuchungen mit denen dieses Monitorings. Trotzdem spielen Faktoren wie die ortsspezifischen Eigenschaften (Charakteristik der Einzugsgebiete), Probenahmeart, Untersuchungszeitraum, BG bzw. Analyseverfahren eine große Rolle und beeinflussen sowohl das Eintragsverhalten als auch die Ergebnisse der Analysen.

Tabelle 41: Statistische Kennwerte für prioritäre Stoffe in den untersuchten Regenwassereinleitungen

Stoffe	Anzahl Messwerte	Anzahl Messwerte > BG	BG (µg/l)	Minimum (µg/l)	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	Maximum (µg/l)
Blei	20	20	0,1	1,2	4,2	5,9	6,5	7,7	16
Cadmium	20	20	0,002	0,033	0,05	0,079	0,089	0,09	0,31
Nickel	20	20	1	2	3,7	4,5	4,7	5,6	7,1
Quecksilber	20	20	0,001	0,004	0,009	0,013	0,014	0,017	0,032
4-iso-Nonylphenol	20	14	0,04	< BG	< BG	0,059	0,082	0,094	0,46
4-tert.-Oktylphenol	20	17	0,02	< BG	0,03	0,062	0,11	0,18	0,3
Di-(2-ethylhexyl)phthalat	20	20	0,1	0,9	1,9	3	3,3	4,3	7
HBCDD (Summe)	20	10	0,005	< BG	< BG	< BG	0,0075	0,011	0,024
Perfluorbutanoat	20	17	0,001	< BG	0,0025	0,006	0,0062	0,009	0,015
Perfluorpentanoat	20	12	0,001	< BG	< BG	0,001	0,0021	0,003	0,009
Perfluorhexanoat	20	15	0,001	< BG	0,0016	0,003	0,0035	0,0053	0,008
Perfluorheptanoat	20	10	0,001	< BG	< BG	0,0008	0,0015	0,002	0,005
Perfluoroctanoat	20	16	0,001	< BG	0,0018	0,003	0,0038	0,006	0,01
Perfluorbutansulfonat	20	13	0,001	< BG	< BG	0,002	0,0017	0,002	0,004
Perfluoroctansulfonat	20	13	0,001	< BG	< BG	0,002	0,0023	0,004	0,005
Acenaphthylen	20	19	0,001	< BG	0,0018	0,0056	0,0057	0,0079	0,018
Acenaphthen	20	18	0,001	< BG	0,0027	0,0064	0,009	0,012	0,039

Stoffe	Anzahl Messwerte	Anzahl Messwerte > BG	BG (µg/l)	Minimum (µg/l)	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	Maximum (µg/l)
Fluoren	20	17	0,001	<BG	0,0019	0,0058	0,0076	0,013	0,024
Phenanthren	20	20	0,001	0,0066	0,023	0,037	0,051	0,077	0,15
Anthracen	20	18	0,001	< BG	0,0028	0,0098	0,0086	0,013	0,019
Fluoranthren	20	20	0,001	0,021	0,047	0,11	0,12	0,19	0,29
Pyren	20	20	0,001	0,023	0,05	0,12	0,12	0,19	0,29
Benzo[a]anthracen	20	20	0,001	0,0069	0,016	0,046	0,043	0,062	0,094
Chrysen	20	20	0,001	0,015	0,031	0,084	0,085	0,1	0,22
Benzo[b]fluoranthren	20	20	0,001	0,01	0,026	0,063	0,065	0,091	0,17
Benzo[k]fluoranthren	20	20	0,001	0,0036	0,012	0,022	0,026	0,033	0,071
Benzo[a]pyren	20	20	0,0005	0,0072	0,021	0,05	0,05	0,074	0,14
Dibenz[a,h]anthracen	20	20	0,001	0,0014	0,0048	0,0093	0,01	0,014	0,027
Indeno[1,2,3-cd]pyren	20	20	0,0005	0,0072	0,023	0,047	0,051	0,07	0,14
Benzo[g,h,i]perylene	20	20	0,0005	0,0091	0,026	0,059	0,062	0,088	0,13
Diuron	20	18	0,01	<BG	0,015	0,025	0,097	0,13	0,56
Isoproturon	20	10	0,01	<BG	<BG	<BG	0,028	0,032	0,18
Terbutryn	20	20	0,01	0,012	0,022	0,027	0,048	0,057	0,18

BG = Bestimmungsgrenze

5.6.2 Monitoringdaten der Mischwasserentlastungen

5.6.2.1 Begleitparameter

In Tabelle 42 sind die statistischen Kenngrößen der Begleitparameter in den beprobten Mischwasserentlastungen zusammengestellt. Mit Ausnahme von GV AFS_{grob} sind die Daten nicht normalverteilt, sondern weisen eine rechtsschiefe Verteilung auf.

Tabelle 42: Statistische Kenngrößen der Begleitparameter der Mischwasserentlastungen

Parameter	Anzahl Messwerte	Einheit	Minimum	25 %-Quantil	Median	Mittelwert	75 %-Quantil	Maximum
AFS _{ges}	27	mg/l	18	52	79	89	107	329
AFS _{grob}	27	mg/l	1,2	9,9	16	23	28	129
AFS ₆₃	27	mg/l	10	45	65	70	88	227
GV AFS _{grob}	25	%	41	58	73	70	83	94
GV AFS ₆₃	25	%	23	44	59	55	66	82
pH	27	-	6,4	6,7	6,8	6,8	6,9	7,1
Lf	27	µS/cm	94	247	286	302	362	605
Ks _{4,3}	20	mmol/L	0,8	1,4	1,9	1,9	2,3	4,2
CSB _{gel}	20	mg/l	9,2	24	29	38	57	103
CSB _{ges}	27	mg/l	16	61	99	106	136	252
NH ₄ -N	20	mg/l	1,5	2,9	4,2	5,9	8,5	13,7
NO ₃ -N	20	mg/l	0,12	0,12	0,21	0,27	0,28	0,99
N _{ges}	27	mg/l	1,9	5,8	10	11	14	30
o-PO ₄ P	27	mg/l	0,15	0,46	0,81	0,83	1,16	1,71
P _{ges}	27	mg/l	0,3	1,6	2,0	2,3	2,3	13

AFS_{ges} = abfiltrierbare Stoffe gesamt, AFS_{grob} = abfiltrierbare Stoffe 63 – 2000 µm, AFS₆₃ = abfiltrierbare Stoffe < 63 µm, GV AFS₆₃ = Glühverlust der abfiltrierbaren Stoffe < 63 µm, GV AFS_{grob} = Glühverlust der abfiltrierbaren Stoffe 63 – 2000 µm, pH = pH-Wert, LF = Leitfähigkeit, Ks_{4,3} = Säurekapazität, CSB_{ges} = Chemischer Sauerstoffbedarf gesamt, CSB_{gel} = Chemischer Sauerstoffbedarf gelöst, N_{ges} = Gesamt-Stickstoff, NO₃-N = Nitrat-Stickstoff, NH₄-N = Ammonium-Stickstoff, P_{ges} = Gesamt-Phosphor, o-PO₄P = ortho-Phosphat-Phosphor.

Die Plausibilisierung der Daten erfolgte ebenfalls über den Vergleich der Messwerte aus anderen Untersuchungsprogrammen. Auch hier zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Wertebereiche.

5.6.2.2 Schadstoffe

Auch bei den Mischwasserentlastungen wurden einzelne Stoffe in keiner der Proben mit Werten > BG gemessen (Tabelle 43).

Tabelle 43: Stoffe, die in den Mischwasserentlastungen nie größer Bestimmungsgrenze nachgewiesen wurden

Stoffe	Anzahl Messwerte	Bestimmungsgrenze (µg/l)
Aclonifen	27	0,01
Bifenox	27	0,004
Quinoxifen	27	0,01
Perfluordecansulfonat	27	0,001
Perfluorheptansulfonat	27	0,001
Perfluorhexansulfonat	20	0,001
Perfluordodecanoat	27	0,001
Perfluorundecanoat	27	0,001
Perfluorpentansulfonat	27	0,001
cis-Heptachlorepoxyd und trans-Heptachlorepoxyd	27	0,004
Cybutryn	27	0,005
Dichlorvos	27	0,02
Dicofol	27	0,02
Heptachlor	27	0,004

Weitere acht Stoffe wurden in weniger als der Hälfte der untersuchten Mischwasserüberlaufproben gefunden, davon zwei nur in einer der Proben (Tabelle 44).

Tabelle 44: Stoffe mit Einzelbefunden in den Mischwasserentlastungen

Stoffe	Anzahl Messwerte	Anzahl Messwerte > BG	Maximum (µg/l)	BG (µg/l)
Perfluornonanoat	27	4	0,002	0,001
Perfluordecanoat	27	11	0,005	0,001
Perfluorbutansulfonat	27	13	0,004	0,001
Perfluorhexansulfonat	27	1	0,001	0,001
1H,1H,2H,2H-Perfluorooctansulfonat	27	6	0,006	0,001
Atrazin	27	1	0,021	0,01
Cypermethrin, gesamt	27	4	0,087	0,005
Isoproturon	27	13	0,047	0,01

BG = Bestimmungsgrenze

Die verbleibenden 32 Stoffe wurden in mindestens der Hälfte, viele in nahezu allen Proben > BG nachgewiesen (Tabelle 45).

Tabelle 45: Konzentration von prioritären Stoffen in den untersuchten Mischwasserentlastungen unter Berücksichtigung aller Proben in µg/l

Stoffe	Anzahl Messwerte	Anzahl Messwerte > BG	BG (µg/l)	Minimum (µg/l)	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	Maximum (µg/l)
Blei	27	27	0,1	1,1	3,7	4,9	8,7	8,7	66
Cadmium	27	27	0,002	0,02	0,06	0,12	0,47	0,27	4,8
Nickel	27	26	1	< BG	2,3	3,7	6,3	5,5	37
Quecksilber	27	27	0,001	0,005	0,013	0,022	0,032	0,031	0,19
4-iso-Nonylphenol	27	21	0,04	< BG	0,05	0,11	0,1	0,13	0,31
4-tert.-Oktylphenol	27	16	0,02	< BG	< BG	0,023	0,021	0,03	0,037
Di-(2-ethylhexyl)phthalat	27	27	0,1	0,74	2,1	3,7	4,6	7,1	11
HBCDD (Summe)	27	15	0,005	< BG	< BG	0,008	0,01	0,011	0,086
Perfluorbutanoat	27	25	0,001	< BG	0,002	0,003	0,0037	0,0055	0,009
Perfluorpentanoat	27	16	0,001	< BG	< BG	0,002	0,0019	0,003	0,005
Perfluorhexanoat	27	23	0,001	< BG	0,002	0,003	0,0031	0,004	0,01
Perfluorheptanoat	27	14	0,001	< BG	< BG	0,001	0,0013	0,002	0,004
Perfluoroctanoat	27	24	0,001	< BG	0,002	0,003	0,0031	0,004	0,009
Perfluoroctansulfonat	27	18	0,001	< BG	< BG	0,002	0,0023	0,0035	0,007
Naphthalin	27	22	0,01	< BG	0,014	0,022	0,029	0,039	0,12
Acenaphthylen	27	26	0,001	< BG	0,0067	0,0098	0,0099	0,012	0,021
Acenaphthen	27	27	0,001	0,0028	0,0078	0,014	0,016	0,019	0,053

Stoffe	Anzahl Messwerte	Anzahl Messwerte > BG	BG (µg/l)	Minimum (µg/l)	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	Maximum (µg/l)
Fluoren	27	27	0,001	0,0025	0,0056	0,0093	0,011	0,013	0,029
Phenanthren	27	27	0,001	0,012	0,039	0,056	0,062	0,079	0,14
Anthracen	27	27	0,001	0,0018	0,0043	0,0068	0,0081	0,01	0,022
Fluoranthren	27	27	0,001	0,022	0,055	0,079	0,087	0,11	0,17
Pyren	27	27	0,001	0,017	0,048	0,072	0,073	0,078	0,16
Benzo[a]anthracen	27	27	0,001	0,0077	0,017	0,029	0,03	0,034	0,083
Chrysen	27	27	0,001	0,013	0,039	0,049	0,053	0,07	0,11
Benzo[b]fluoranthren	27	27	0,001	0,0082	0,027	0,035	0,04	0,053	0,1
Benzo[k]fluoranthren	27	27	0,001	0,0041	0,01	0,014	0,017	0,023	0,046
Benzo[a]pyren	27	27	0,0005	0,0076	0,019	0,028	0,03	0,038	0,082
Dibenz[a,h]anthracen	27	27	0,001	0,0018	0,0043	0,0062	0,0069	0,0087	0,023
Indeno[1,2,3-cd]pyren	27	27	0,0005	0,0064	0,018	0,025	0,031	0,041	0,1
Benzo[g,h,i]perylene	27	27	0,0005	0,0074	0,022	0,03	0,032	0,042	0,089
Diuron	27	16	0,01	< BG	< BG	0,012	0,019	0,022	0,14
Terbutryn	27	25	0,01	< BG	0,024	0,028	0,033	0,037	0,1

BG = Bestimmungsgrenze

Auch die Ergebnisse für die Mischwasserüberläufe wurden mit Daten aus anderen Studien verglichen (Anhang B.8). Unter Berücksichtigung unterschiedlicher äußerer Einflüsse in den Einzugsgebieten und von Unterschieden hinsichtlich Probenahme und Analytik wurden grundsätzlich ähnliche Konzentrationsbereiche für die betrachteten Stoffe dokumentiert.

5.6.3 Standortspezifische mittlere Konzentrationen

Zur Abschätzung der Einträge über Regenwassereinleitungen und Mischwasserüberläufe wurden standortspezifische Konzentrationen abgeleitet. In diese Betrachtung sind nur die als sicher volumenproportional erfassten Ereignisse eingeflossen. Aus der ereignisspezifischen mittleren Konzentration (EMC; event mean concentration) kann die ereignisspezifische Fracht berechnet werden (Gleichung 3).

Gleichung 3: Berechnung der ereignisspezifischen Fracht

$$F_E = EMC \cdot V_E$$

mit:

- F_E – ereignisspezifische Fracht
- EMC – ereignisspezifische mittlere Konzentration
- V_E – ereignisspezifisches Volumen

Die standortspezifische Konzentration (SMC; site-specific mean concentration) wird als ereignisvolumengewichtete Konzentration aus den ereignisspezifischen mittleren Konzentrationen berechnet (Gleichung 4).

Gleichung 4: Berechnung der standortspezifischen Konzentration

$$SMC = \frac{\sum_{i=1}^n F_E}{\sum_{i=1}^n V_E}$$

mit:

- SMC – standortspezifische Konzentration
- F_E – ereignisspezifische Fracht
- V_E – Überlaufvolumen der beprobten Ereignisse

Für die Ableitung repräsentativer mittlerer standortspezifischer Konzentrationen wurden nur Proben berücksichtigt, bei denen mindestens die Hälfte des Ereignisvolumens in der volumenproportionalen Probe erfasst wurde (Tabelle 46). Nur der beprobte Anteil des Ereignisses wurde jeweils für die Gewichtung berücksichtigt. Nach Anwendung dieser Kriterien war diese Auswertung für beide Regenklärbecken, aber nur für zwei der untersuchten Regenüberlaufbecken möglich. Weiterhin erfolgte diese Auswertung nur für die Stoffe, für die je Standort mindestens 50 % der Messwerte oberhalb der BG lagen. Je höher die Anzahl der berücksichtigten Proben pro Standort, desto sicherer ist die berechnete standortspezifische Konzentration.

Tabelle 46: Standortspezifische Konzentrationen für prioritäre Stoffe in Regenwasser-einleitungen (RKB) und Mischwasserentlastungen (RÜB) mit Anzahl (n) der genutzten Werte

Stoffe	RKB1, n=10	RKB2, n=8	RÜB2, n=7	RÜB3, n=3
Blei	5,68	7,68	4,80	2,76
Cadmium	0,101	0,076	0,086	0,043
Nickel	4,83	4,59	7,79	1,39
Quecksilber	0,012	0,018	0,020	0,009
4-iso-Nonylphenol	0,14	-	0,12	-
4-tert.-Oktylphenol	0,20	0,034	-	-
Di-(2-ethylhexyl)phthalat	4,26	2,61	3,88	1,02
HBCDD (Summe)	0,009	-	0,007	-
Perfluorbutanoat	0,0064	0,0042	0,0054	0,0017
Perfluorpentanoat	0,0017	0,0012	0,0030	-
Perfluorhexanoat	0,0032	0,0024	0,0033	-
Perfluorheptanoat	-	-	0,0015	0,0008
Perfluoroctanoat	0,0044	0,0018	0,0031	-
Perfluorpentansulfonat	0,0021	-	-	-
Perfluoroctansulfonat	0,0025	0,0013	0,0028	-
Naphthalin	0,013	-	0,017	0,020
Acenaphthylen	0,006	0,006	0,012	0,011
Acenaphthen	0,007	0,012	0,013	0,008
Fluoren	0,008	0,007	0,007	0,005
Phenanthren	0,067	0,044	0,048	0,026
Anthracen	0,011	0,010	0,005	0,004
Fluoranthren	0,169	0,103	0,075	0,047
Pyren	0,168	0,112	0,067	0,040
Benzo[a]anthracen	0,053	0,047	0,026	0,015
Chrysen	0,108	0,088	0,045	0,035
Benzo[b]fluoranthren	0,077	0,074	0,032	0,027
Benzo[k]fluoranthren	0,030	0,032	0,013	0,012
Benzo[a]pyren	0,058	0,060	0,027	0,017
Dibenz[a,h]anthracen	0,012	0,013	0,005	0,004
Indeno[1,2,3-cd]pyren	0,061	0,062	0,023	0,019

Stoffe	RKB1, n=10	RKB2, n=8	RÜB2, n=7	RÜB3, n=3
Benzo[g,h,i]perylen	0,079	0,069	0,026	0,020
Diuron	0,015	0,189	-	-
Isoproturon	0,044	-	0,014	-
Terbutryn	0,045	0,033	0,034	-

In diesem Projekt wurden Mischwasserentlastungen und Regenwassereinleitungen mitbetrachtet, um durch eine Beprobung im gleichen Zeitraum und mit einem einheitlichen Untersuchungsansatz Daten zu erzeugen, die unmittelbar mit den Befunden aus den Messungen im Kläranlagenablauf vergleichbar sind. So kann für den Untersuchungszeitraum der Gesamteintrag aus dem Siedlungsraum und die relative Bedeutung der verschiedenen Emissionspfade dargestellt werden. Diese Gesamtbetrachtung ist vor dem Hintergrund sich weiter entwickelnder Klärtechnik von besonderer Bedeutung, um bei der Maßnahmenplanung die richtigen Schwerpunkte zu setzen. Die durchgeführten stichprobenartigen Untersuchungen ergänzen darüber hinaus den Kenntnisstand aus einem umfangreichen Messprogramm zu Mischwasserentlastungen des Freistaates Bayern (Fuchs und Nickel 2019).

5.7 Zusammenfassende Betrachtung der Eintragspfade

Für einen Teil der untersuchten Stoffe hat sich gezeigt, dass die betrachteten urbanen Eintragspfade (Kläranlagenablauf, Regen- und Mischwassereinleitungen) keine relevanten Quellen sind. Die Stoffe wurden nie oder nur als Einzelbefunde in den unterschiedlichen Abwasserströmen nachgewiesen (Tabelle 47).

Tabelle 47: Klassifizierte Häufigkeit der Positivbefunde in den untersuchten urbanen Abwasserströmen

Stoffe	Befund Ablauf Kläranlage	Befund Mischwasser- entlastung	Befund Regenwasser- einleitung
Perfluordecansulfonat	-	-	-
Bifenox	-	-	-
cis-Heptachlorepoxyd	-	-	-
Cypermethrin, gesamt	-	-	-/+
Dicofol	-	-	-
Heptachlor	-	-	-
Quinoxyfen	-	-	-
trans-Heptachlorepoxyd	-	-	-
Aclonifen	-/+	-	-
Perfluorundecanoat	-/+	-	-
Perfluordodecanoat	-/+	-	-

Stoffe	Befund Ablauf Kläranlage	Befund Mischwasserentlastung	Befund Regenwassereinleitung
Dichlorvos	-/+	-	-
HBCDD (Summe)	-/+	-/+	+
Dibenz[a,h]anthracen	-/+	++	++
Perfluorpentansulfonat	-/+	-	-/+
Perfluorheptansulfonat	-/+	-	-
Cybutryn	-/+	-	-
Anthracen	-/+	++	++
Atrazin	-/+	-/+	-
Benzo[k]fluoranthren	-/+	++	++

0 % der Befunde > BG = -, < 5 % der Befunde > BG = -/+ < 50 % der Befunde > BG = +, >50 % der Befunde > BG = ++

Acht Stoffe konnten nie im Ablauf der Kläranlagen und mit Ausnahme von Cypermethrin (Einzelnachweise im Regenwasser) auch nicht in den Mischwasserüberläufen und Regenwassereinleitungen gefunden werden. Weitere zwölf Stoffe wurden im Kläranlagenablauf mit maximal 5 % der Werte oberhalb der BG gefunden. Für die PAK weichen die Ergebnisse in den Mischwasserüberläufen und Regenwassereinleitungen deutlich von dem Kläranlagenbefund ab. Die Einzelstoffe Dibenz[a,h]anthracen, Anthracen und Benzo[k]fluoranthren wurden mit bis zu 100 % Positivbefunden in den Proben an den Kanalisationsschnittstellen zum Gewässer nachgewiesen. Ursächlich hierfür ist die Herkunft der PAK, hauptsächlich aus Verbrennungsprozessen und deren Deposition auf u.a. urbanen versiegelten Flächen, und der sehr gute Rückhalt der PAK in den Kläranlagen.

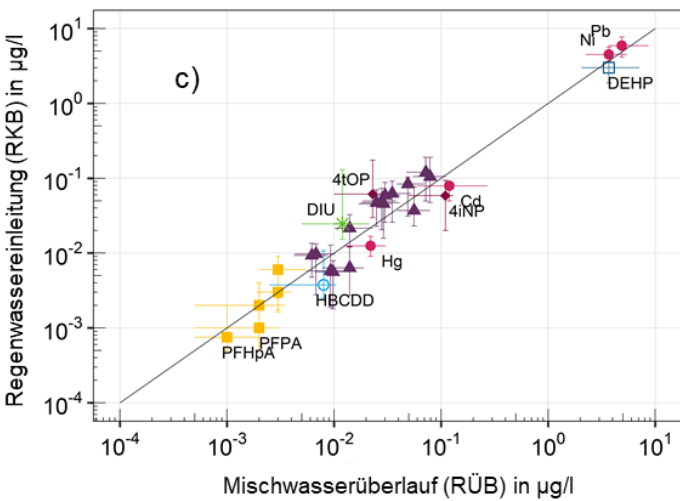
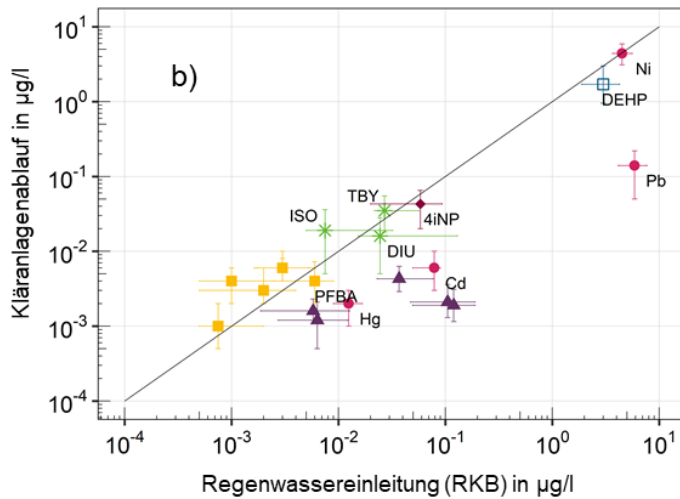
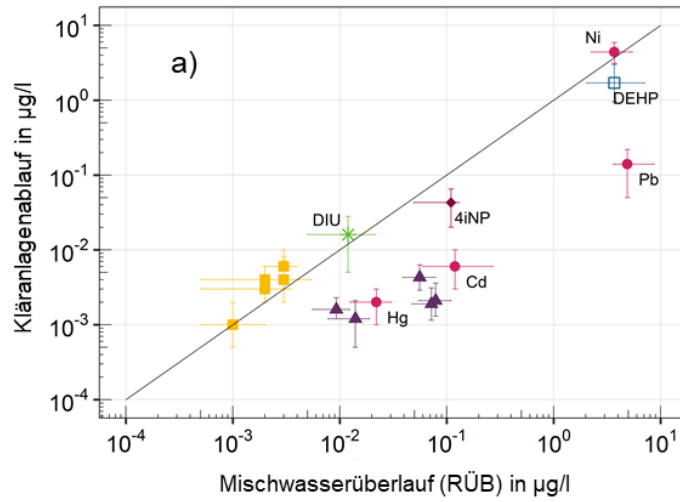
Inwieweit mit den in Tabelle 47 dargestellten Negativbefunden einhergeht, dass die Kläranlagenabläufe, Mischwasserentlastungen und Regenwassereinleitungen nicht zur Überschreitung der Umweltqualitätsnormen beitragen, kann für einzelne Stoffe derzeit nicht eindeutig festgestellt werden (Heptachlor, Heptachlorepoxyd, Cypermethrin, Dichlorvos, Dicofol). Diese Stoffe wurden zwar nie oder sehr selten in den Abwasserströmen gemessen, allerdings liegen die analytischen Bestimmungsgrenzen so weit über den Beurteilungswerten (BUW), wie Umweltqualitätsnorm (Jahresdurchschnitt (JD-UQN)) oder PNEC-Wert (predicted no effect concentration), dass eine Einschätzung derzeit nicht möglich ist. Im Anhang B.10 sind die prozentualen Anteile an Messwerten sowohl oberhalb des BUW als auch oberhalb des halben BUW tabellarisch zusammengefasst.

33 Stoffe wurden im Kläranlagenablauf, Regenwassereinleitungen und Mischwasserentlastungen mit > 50 % der Werte > BG und in Konzentrationen gemessen, die im Gewässer zu umweltbedenklichen Konzentrationen führen können. Eine Reihe dieser Stoffe kommen in allen untersuchten Abwasserströmen in vergleichbaren Konzentrationen vor. Dazu zählen die Schwermetalle, DEHP, die niedrig kondensierten PAK-Vertreter und die Pflanzenschutzmittel Diuron, Isoproturon und Terbutryn. Andere, wie die PAK, zeigen entsprechend ihrer Herkunftsbereiche und dem erreichbaren Stoffrückhalt in den Kläranlagen sehr unterschiedliche Konzentrationen. In Abbildung 33 sind die in den verschiedenen Abwasserströmen ermittelten medianen Konzentrationen vergleichend aufgetragen.

Im Vergleich zwischen Kläranlagenablauf und Mischwasserüberlauf zeigen sich für Nickel, Diuron und die PFC-Verbindungen vergleichbar hohe mediane Konzentrationen in beiden Abwasserströmen (Abbildung 33 a). Diese Stoffe werden mäßig bis schlecht in der Kläranlage zurückgehalten und mit dem Regenwasser in die Kanalisation eingetragen. Für die PFC-Verbindungen ist davon auszugehen, dass eine Verdünnung der Konzentrationen im Mischwasser durch den Regenwasseranteil stattfindet. Insbesondere für die Schwermetalle (Blei, Cadmium und Quecksilber) sowie die PAK-Vertreter zeigen sich deutlich höhere mittlere Konzentrationen in den Mischwasserüberläufen. Dies ist bedingt durch die Hauptquelle (Oberflächenabfluss), den sehr guten Rückhalt in den Kläranlagen (> 80 – 90 %) und den gleichzeitig geringen Rückhalt in den Anlagen zur Regenwasserbehandlung (< 20 %).

Die Gegenüberstellung von Kläranlagenablauf und Regenwassereinleitungen zeigt ein ähnliches Bild in Bezug auf die Herkunft der stofflichen Belastung und die Bedeutung der Kläranlagen (Abbildung 33 b). Beides wird durch die sehr ähnlichen mittleren Konzentrationen von Regenwassereinleitungen und Mischwasserüberläufen bestätigt (Abbildung 33 c). Für die Schwermetalle Blei, Cadmium und Quecksilber und für die PAK-Vertreter sind die Regenwassereinleitungen bezogen auf die Konzentrationen der bedeutendere Eintragspfad. Um darüber hinaus Aussagen zur Relevanz der Stoffeinträge machen zu können, ist eine Frachtbetrachtung notwendig (s. Kapitel 7).

Abbildung 33: Vergleich der Stoffkonzentrationen in den untersuchten Abwasserströmen:
a) Kläranlagenablauf und Mischwasserentlastung (RÜB), b) Kläranlagenablauf und Regenwassereinleitung (RKB), c) Regenwassereinleitung (RKB) und Mischwasserentlastung (RÜB)



- Pb Blei
- Cd Cadmium
- Ni Nickel
- Hg Quecksilber
- 4iNP 4-iso-Nonylphenol
- 4iOP 4-iso-Octylphenol
- DEHP DEHP
- HBCDD Hexabromcyclododecan
- PFBA Perfluorbutanoat (PFBA)
- PFPA Perfluorpentanoat (PFPA)
- PFHpA Perfluorheptanoat (PFHpA)
- DIU Diuron
- ISO Isoproturon
- TBY Terbutryn

- Stoffgruppen**
- * Biozide/PSM
 - DEHP
 - Industriechemikalie
 - ▲ PAK16
 - Perfluorierte Verbindungen
 - ◆ Phenole
 - Schwermetalle

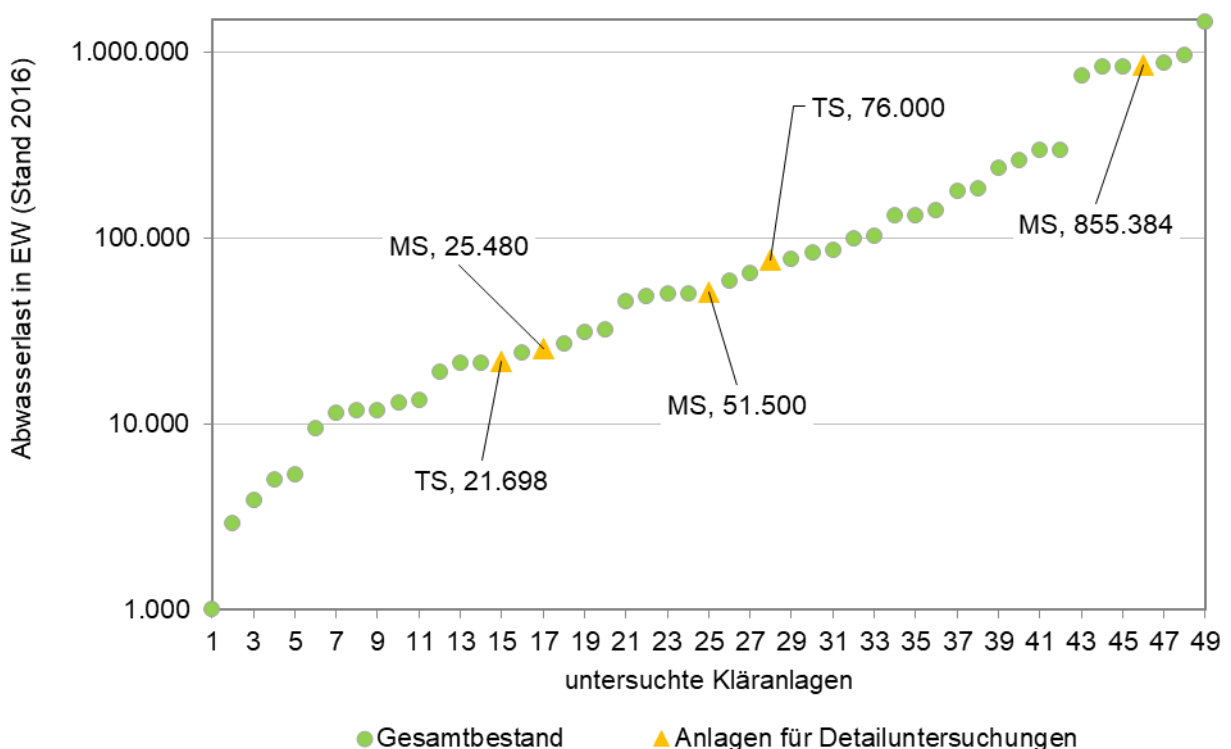
Quelle: eigene Darstellung, KIT-IWG

6 Stoffrückhalt in kommunalen Kläranlagen

6.1 Reinigungsleistung

Für die fünf umfassend untersuchten Kläranlagen ist eine Betrachtung des Stoffrückhaltes möglich. Die Anlagen wurden so ausgewählt, dass sie den Gesamtbestand der untersuchten Kläranlagen möglichst gut repräsentieren. Die Einzugsgebiete von zwei Anlagen werden im Trennsystem entwässert, die der weiteren im Mischsystem. Alle Anlagen sind mit einer weitergehenden Nährstoffelimination ausgestattet. Keine der Anlagen verfügt über eine 4. Reinigungsstufe zur gezielten Spurenstoffeliminierung. Abbildung 34 ordnet die Anlagen in den nach zunehmender behandelter Abwasserlast in EW aufgetragenen Gesamtanlagenbestand ein.

Abbildung 34: Einordnung der fünf detailliert betrachteten Anlagen in den Gesamtdatenbestand



MS = Mischsystem, TS = Trennsystem

Quelle: eigene Darstellung, KIT-IWG

Die Entfernung der betrachteten Stoffe erfolgt in den Kläranlagen vorrangig über Adsorption an die Biomasse und Fällung. In beiden Fällen verbleiben die Stoffe im separierten Schlamm. Bei einigen niedermolekularen organischen Stoffen findet auch ein nennenswerter mikrobieller Abbau statt. Sowohl die chemisch-physikalischen als auch die biologischen Rückhalteprozesse zeigen eine Abhängigkeit von der hydraulischen Belastung der Anlage und der Abwassertemperatur.

Für die fünf betrachteten Kläranlagen konnte für insgesamt 41 Stoffe die mittlere Reinigungsleistung (RS) ermittelt werden (Gleichung 5).

Gleichung 5: Berechnung der Reinigungsleistung (RS)

$$RS = \frac{C_{Zulauf} - C_{Ablauf}}{C_{Zulauf}}$$

Mit:

RS – mittlere Reinigungsleistung

C_{Zulauf} – Konzentration im Zulauf

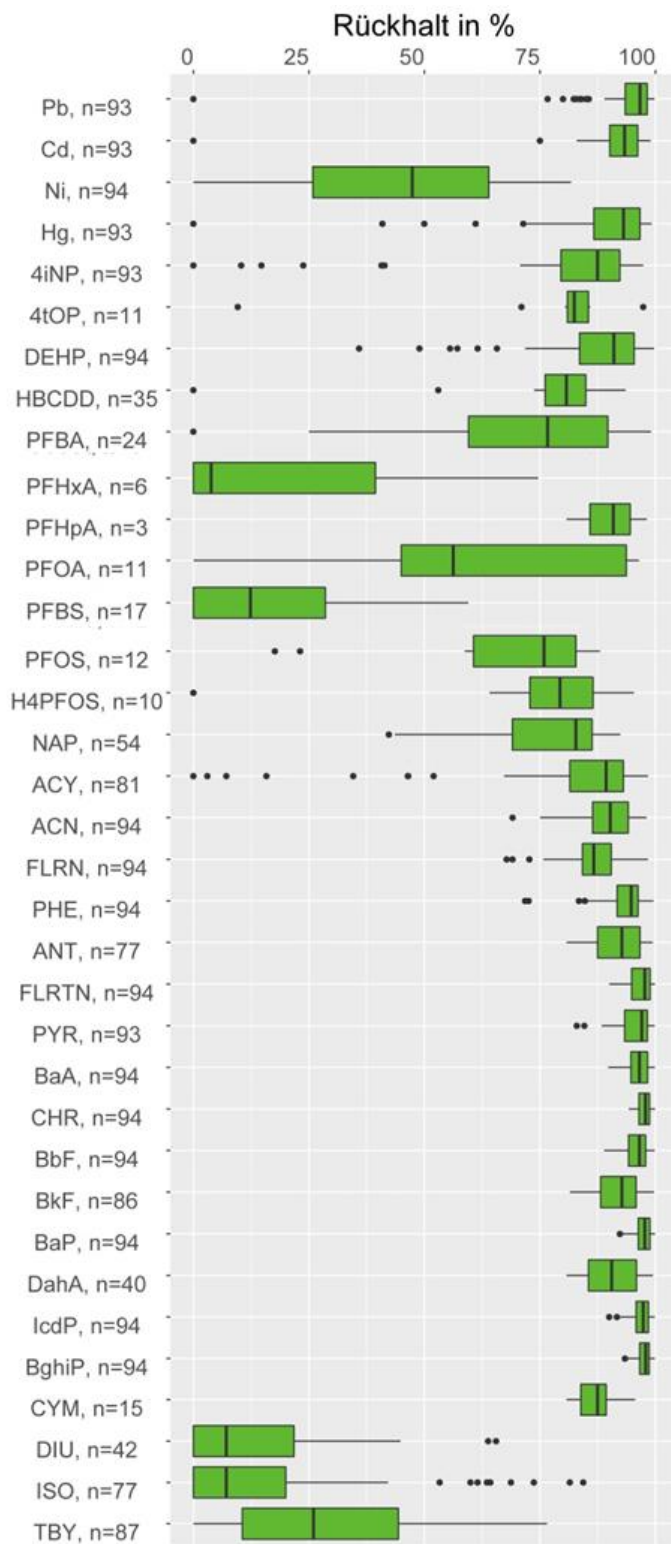
C_{Ablauf} – Konzentration im Ablauf

Die Konzentrationspaare Zu- und Ablauf beziehen sich auf den jeweils gleichen Probenahmezeitraum. Lag die Zulaufkonzentration unterhalb der BG, wurde das entsprechende Wertepaar nicht berücksichtigt. Ablaufkonzentrationen < BG gehen mit dem Wert der halben BG in die Berechnung ein. Ist der rechnerische Wert der Zulaufkonzentration kleiner als die Ablaufkonzentration, wurde die Reinigungsleistung auf null gesetzt. Unter Berücksichtigung dieser Kriterien ergibt sich stoffspezifisch eine unterschiedliche Anzahl an Wertepaaren zur Ermittlung der Reinigungsleistung. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Form von Boxplots in Abbildung 35 dargestellt. Bezogen auf die mittlere Reinigungsleistung der Stoffe können vier Gruppen unterteilt werden:

1. Mittlere Rückhalteleistung über 90 %: Hierzu zählen die Schwermetalle Blei und Cadmium und die PAK-Vertreter Phenanthren, Anthracen, Fluoranthen, Pyren, Benzo[a]anthracen, Chrysen, Benzo[b]fluoranthen, Benzo[k]fluoranthen, Benzo[a]pyren, Dibenz[a,h]anthracen, Indeno[1,2,3-cd]pyren und Benzo[g,h,i]perylen.
2. Mittlere Rückhalteleistung über 75 %: Hierzu zählen das Schwermetall Quecksilber, die Phenole 4-iso-Nonylphenol und 4-tert.-Oktylphenol, DEHP, HBCDD (Summe), die PAK-Vertreter Naphthalin, Acenaphthylen, Acenaphthen, Fluoren und Cypermethrin, gesamt.
3. Mittlere Rückhalteleistung zwischen 25 % und 75 %: Hierzu zählen das Schwermetall Nickel, die perfluorierten Stoffe Perfluorbutanoat (PFBA), Perfluoroctanoat (PFOA), Perfluoroctansulfonat (PFOS), 1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonat (H4PFOS) und Terbutryn.
4. Stoffe, die im Mittel zu weniger als 25 % eliminiert werden: Hierzu zählen die Pestizide Diuron, Isoproturon und die perfluorierten Stoffe Perfluorhexanoat (PFHxA) und Perfluorbutansulfonat (PFBS).

Für die Stoffe Perfluornonanoat (PFNA), Perfluordecanoat (PFDA), Perfluorpentanoat (PFPA), Perfluorheptanoat (PFHpA), Perfluorhexansulfonat (PFHxS), Aclonifen und Atrazin wurde keine Zuordnung getroffen, da jeweils weniger als fünf Konzentrationspaare vorliegen und keine eindeutige Aussage möglich ist.

Abbildung 35: Reinigungsleistung in kommunalen Kläranlagen



Quelle: eigene Darstellung, KIT-IWG

Einige Stoffe zeigen nicht das nach den dokumentierten Stoffeigenschaften erwartete Verhalten. Bei den perfluorierten Verbindungen wären für die langkettigen Verbindungen aufgrund der höheren Sorptionsaffinität höhere Reinigungsleistungen zu erwarten. Die Ergebnisse zeigen teilweise den umgekehrten Effekt bspw. mit höherer Eliminationsrate für das kurz-kettige PFBA

(ca. 60 %). Hier ist aber auch die Anzahl der betrachteten Wertepaare zu berücksichtigen. Bei der Gruppe der perfluorierten Verbindungen ergeben sich insgesamt deutlich weniger Konzentrationspaare als bei den anderen Stoffgruppen. Allerdings ist anzumerken, dass auch bei der Untersuchung der LUBW (2014) für das kurzkettige PFBA im Vergleich zu dem langkettigen PFOS eine höhere Reinigungsleistung ermittelt wurde.

Bei den PAK steigt die Reinigungsleistung tendenziell mit zunehmender Anzahl an Benzolringen. Allerdings ist die Anzahl an Positivbefunden der hochkondensierten PAK-Vertreter im Ablauf sehr niedrig. Durch Verwendung der halben BG können die Konzentrationen daher über- oder auch unterschätzt werden.

Bei Stoffen mit sehr gutem mittlerem Rückhalt in der Kläranlage ist die Variabilität der Einzelwerte niedriger als bei Stoffen mit geringerer Reinigungsleistung. Besonders hoch sind die Schwankungen bei Nickel, Nonylphenol, PFOS, Naphthalin und Acenaphthylen. Insbesondere bei diesen Stoffen, die alle mäßig in den Kläranlagen zurückgehalten werden, scheinen neben den Stoffeigenschaften weitere Faktoren die Reinigungsleistung der Kläranlage zu beeinflussen.

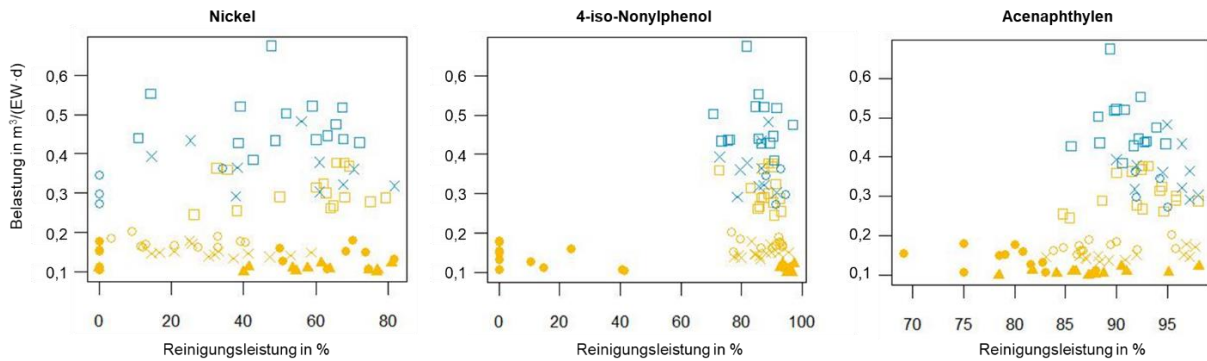
Um der Frage nachzugehen, ob sich die große Schwankungsbreite des Stoffrückhalts aus der systematisch niedrigen Leistung einer einzelnen Kläranlage ergibt, wurde eine Einzelbetrachtung durchgeführt. Für die meisten Stoffe bzw. Stoffgruppen wurden keine Auffälligkeiten für einzelne Anlagen identifiziert. Größere Schwankungen treten für einige Stoffe in allen fünf Kläranlagen auf, ohne dass erkennbare Unterschiede zwischen den Standorten bestehen. Lediglich für eine kleine Zahl von Stoffen zeigen sich Auffälligkeiten. Für die größte der fünf Anlagen fallen die niedrigen Reinigungsleistungen für die Stoffe 4-tert.-Oktylphenol, PFOA, PFHxS und PFOS auf. Allerdings liegen für diese Stoffe insgesamt nur sehr wenige Wertepaare, z.T. sogar nur Einzelwerte, vor. Für die kleinste der fünf Anlagen zeigen sich im Vergleich auffällig niedrige Reinigungsleistungen für 4-iso-Nonylphenol und Acenaphthylen. Dabei scheint es sich um ein systematisches Verhalten, zu handeln. Allerdings konnte weder aus dem Kläranlagenprofil noch aus den Begleitparametern eine schlüssige Ursache für dieses Phänomen abgeleitet werden. Beide Stoffe sind grundsätzlich relativ gut biologisch abbaubar.

6.2 Einflüsse von Temperatur und hydraulischer Belastung

Die Abwassertemperatur und die hydraulische Belastung haben Einfluss auf die Reinigungsleistung der Kläranlage, z.B. auf die Stickstoffelimination. Ob dieser Zusammenhang auch für prioritäre Stoffe gegeben ist, wird in Abbildung 36 und Abbildung 37 grafisch und über einen Spearman-Rang-Korrelationstest statistisch geprüft.

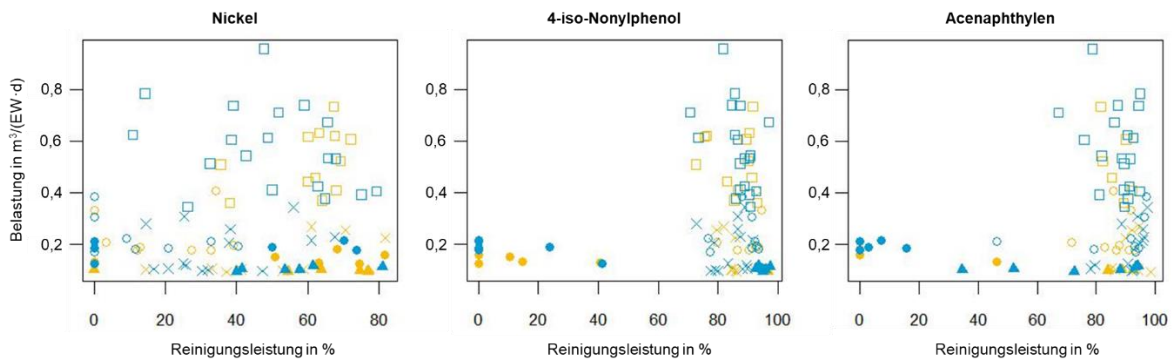
Der visuelle Vergleich zeigt für die ausgewählten Stoffe weder für die hydraulische Belastung noch für die Temperatur einen signifikanten Zusammenhang. Auch der Spearman-Rang-Korrelationstest ergab weder für die hydraulische Belastung noch für die Temperatur ein signifikantes Ergebnis und bestätigt damit den visuellen Eindruck.

Abbildung 36: Reinigungsleistung in Abhängigkeit der hydraulischen Belastung in $\text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{EW})$ (gelb = Trockenwetter; blau = Regenwetter)



Quelle: eigene Darstellung, KIT-IWG

Abbildung 37: Reinigungsleistung in Abhängigkeit der Temperatur (blau = Winterproben; gelb = Sommerproben)



Quelle: eigene Darstellung, KIT-IWG

6.3 Vergleich mit Literaturdaten

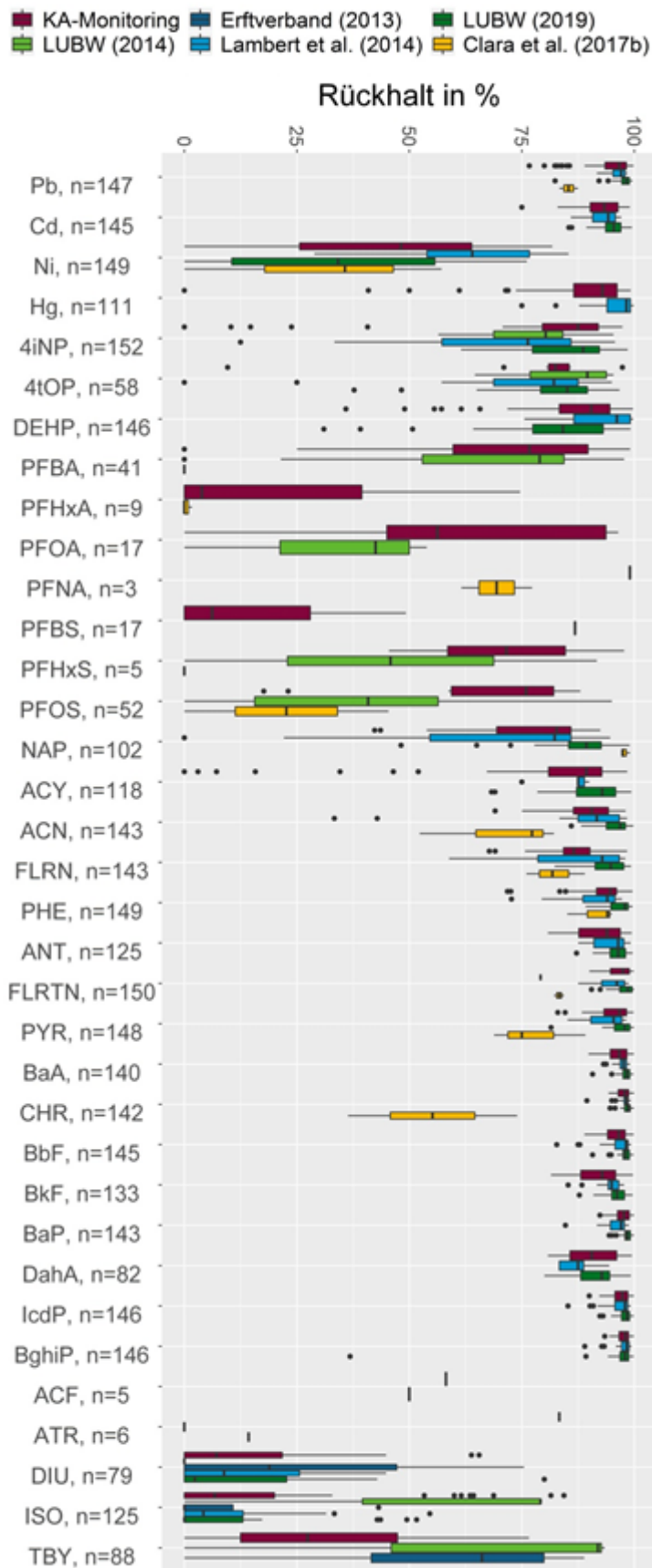
Zur Einordnung der ermittelten Reinigungsleistungen wurden Vergleichsstudien recherchiert, die Einzelwerte zur Verfügung stellen. Die Daten aus fünf unabhängigen Studien wurden zusammengetragen:

- ▶ Untersuchung von drei kommunalen Kläranlagen in Baden-Württemberg mit gleicher Probenahmestrategie (23 Datenpaare); (Lambert et al. 2014),
- ▶ Untersuchung von vier kommunalen Kläranlagen des Erft-Verbandes in Nordrhein-Westfalen (4 Datenpaare); (Erftverband 2013),
- ▶ Untersuchung von sechs kommunalen Kläranlagen in Baden-Württemberg, 24-Stunden-Mischproben (12 Datenpaare); (LUBW 2014),
- ▶ Untersuchung von zwei kommunalen Kläranlagen in Österreich, Wochenmischproben (3 Datenpaare); (Clara et al. 2017a) und
- ▶ Untersuchung von sechs PRTR-Anlagen in Baden-Württemberg mit annähernd gleicher Probenahmestrategie (35 Datenpaare); (LUBW 2019).

Ein Vergleich war nicht für alle Stoffe möglich (HBCDD, PFPA, PFHpA, PFDA, H4PFOS, und Cypermethrin, gesamt). Die Ergebnisse der verschiedenen Studien passen sehr gut zusammen und zeigen übereinstimmend sehr hohe Reinigungsleistungen für einzelne Stoffe (Abbildung 38).

Zusätzlich zu dieser Detailbetrachtung wurden die mittleren Reinigungsleistungen mit den Ergebnissen aus Studien verglichen, für die keine Einzelwerte verfügbar sind. Auch wenn bei diesem Literaturvergleich keine Methodenidentität gewährleistet werden konnte, sind die berechneten Reinigungsleistungen vergleichbar (Anhang B.9).

Abbildung 38: Vergleich der Reinigungsleistung der Kläranlagen mit Literaturwerten



Quelle: eigene Darstellung, KIT-IWG

7 Quantifizierung der Stoffeinträge aus kommunalen Kläranlagen und Kanalisationssystemen

7.1 Ableitung repräsentativer differenzierter mittlerer Ablaufkonzentrationen für kommunale Kläranlagen

Ein Ziel des Projektes war die Ableitung repräsentativer Ablaufkonzentrationen bzw. Emissionsfaktoren für die kommunalen Kläranlagen in Deutschland. Dabei sollte geprüft werden, ob eine Differenzierung der Werte anhand von technischen, räumlichen und weiteren Merkmalen möglich ist. Differenzierte Emissionsfaktoren würden es erlauben, die Einträge über kommunale Kläranlagen regionalisiert darzustellen. Dabei ist zu beachten, dass die differenzierten Emissionsfaktoren auf alle Kläranlagen eines bestimmten Merkmals anwendbar sein müssen und keinen Einzelfall widerspiegeln dürfen. Für diese Betrachtung wurden nur die Stoffe im Kläranlagenablauf herangezogen, für die bezogen auf die gesamte Stichprobe mehr als 50 % der Werte > BG nachgewiesen wurden (Tabelle 36). Nur so ist gewährleistet, dass der Median nicht der BG entspricht und eine Differenzierungsmöglichkeit besteht.

7.1.1 Definition der Differenzierungsmerkmale

Auf Grundlage der vorliegenden Metainformationen zu den untersuchten Kläranlagen wurden Differenzierungsmerkmale ausgewählt. Sie sollen weitestgehend unabhängige Kriterien bzw. Größen darstellen. Berücksichtigte Differenzierungsmerkmale sind:

- ▶ Technische Ausstattung der Anlagen,
- ▶ Art des dominanten Entwässerungssystems im Einzugsgebiet,
- ▶ Trockenwetter- und Mischwassersituation bei Mischsystem-Anlagen,
- ▶ Charakteristik des Einzugsgebiets hinsichtlich des Grades der Urbanisierung (innerhalb oder außerhalb von Agglomerationsräumen) und
- ▶ Größenklasse bezogen auf die behandelte Abwasserlast in Einwohnerwerten.

Obwohl sich die Merkmale „Lage/Urbanisierung des Einzugsgebiets“ und „Größenklasse“ teilweise überlagern und keine unabhängigen Größen sind, stellen sie verschiedene Regionalisierungsmöglichkeiten im Hinblick auf die Stoffeintragsmodellierung dar und werden aus diesem Grund separat betrachtet.

Für die Unterscheidung zwischen Trockenwetter- und Mischwassersituation bei Mischsystem-Anlagen wurden nur die Kläranlagen genutzt, bei denen die hydraulische Trennung der unterschiedlichen Abflusssituationen gut gelungen ist und die Trockenwetterabflüsse eine wenig schwankende Basislinie darstellen.

Als weitere Grundlage für die differenzierte Analyse des Gesamtdatensatzes wurden Kriterien für den Mindestumfang der Teildatenkollektive definiert:

- ▶ Messungen aus mindestens drei Kläranlagen und
- ▶ mindestens 30 Messwerte > BG.

Eine Zusammenstellung der möglichen Datenkollektive bezogen auf die betrachteten Differenzierungsmerkmale zeigt Tabelle 48.

Tabelle 48: Umfang der Teildatenkollektive für die potentielle Differenzierung der Ablaufkonzentrationen

Differenzierungsmerkmale			Anzahl Anlagen	Anzahl Proben	Merkmal nutzbar?
Technische Ausstattung	Vorklärung	vorhanden	35	722	ja
		nicht vorhanden	14	278	
	Denitrifikation	vorhanden	37	759	ja
		nicht vorhanden	12	241	
	Probenahmeort (Ablauf)	Nachklärbecken	36	761	ja
		Schönungsteich	6	92	ja
Filtration		7	147	ja	
Entwässerungssystem	Mischsystem	42	907	ja	
	Trennsystem	7	92	ja	
Abflusssituation	Regenwetter	28	284	ja	
	Trockenwetter	28	336	ja	
Urbanisierung/Agglomerationsräume	innerhalb	16	331	ja	
	außerhalb	33	668	ja	
Größenklasse (GK)	GK2	3	51	ja	
	GK3	3	48	ja	
	GK4	26	565	ja	
	GK5	17	335	ja	

Bei dem Differenzierungsmerkmal „Technische Ausstattung“ fallen Standardbauwerke wie Sand/Fettfang oder Nachklärbecken weg, da alle Anlagen mit diesen Komponenten ausgestattet sind. Auch die Phosphor-Fällung konnte nicht als Differenzierungsmerkmal genutzt werden, da in allen Anlagen eine chemische Phosphor-Elimination stattfindet. Bei der Analyse der verbleibenden Verfahrensschritte wurde festgestellt, dass die betrieblichen Einflüsse der Einzelanlagen sowie die Besonderheiten in den Einzugsgebieten den Einfluss unterschiedlicher Verfahren immer überlagern. Ein Einfluss einer einzelnen Verfahrenskomponente kann daher nicht zuverlässig identifiziert werden. Das Differenzierungsmerkmal „Technische Ausstattung der Anlagen“ wurde daher nicht weiterverfolgt.

7.1.2 Hypothesen

Die Hypothesen zur Prüfung der verbleibenden Differenzierungsmöglichkeiten wurden anhand der physikalisch-chemischen Stoffeigenschaften, dem Kläranlagenrückhalt sowie den

Herkunftsbereichen bzw. dem Haupteintragspfad der Stoffe in Siedlungsgebieten gebildet. Dabei wurden die folgenden Erwartungshaltungen formuliert:

- ▶ Bei guter Adsorption und guter biologischer Abbaubarkeit wird keine Differenzierung in den Ablaufkonzentrationen erwartet, da die Kläranlage mögliche Unterschiede im Zulauf nivelliert. Dies gilt insbesondere für Stoffe, die keinen eindeutigen Eintragspfad haben.
- ▶ Bei mäßiger bis schlechter Adsorption oder schlechter bis keiner biologischen Abbaubarkeit werden Unterschiede in den Ablaufkonzentrationen nachweisbar sein, insbesondere dann, wenn die Stoffgruppe einen ausgeprägten Haupteintragspfad aufweist.

Die zur Einordnung erforderlichen Stoffeigenschaften (Sorptions-, Abbaubarkeit und Volatilisation) sowie Verwendung und Herkunftsbereiche, Haupteintragspfad im Siedlungsgebiet und Rückhalt in der Kläranlage sind in Anhang B.11.1 zusammengefasst. Aus den dort aufgelisteten Stoffeigenschaften ergeben sich die in Tabelle 49 zusammengefassten Erwartungswerte der Datendifferenzierung.

Tabelle 49: Zusammenfassung der Erwartungswerte zur Differenzierung der Ablaufkonzentrationen

Stoffe	Konzentrationen Mischsystem (MS) / Trennsystem (TS)	Konzentrationen Regenwetter (RW) / Trockenwetter (TW)	Konzentrationen bezogen auf Lage zu Agglomerationsraum	Konzentrationen nach Größenklasse (GK)
Blei*	MS > TS	RW > TW	innerhalb > außerhalb	GK2 ≤ GK3 ≤ GK4 ≤ GK5
Cadmium*	MS > TS	RW > TW	innerhalb > außerhalb	GK2 ≤ GK3 ≤ GK4 ≤ GK5
Nickel	MS > TS	RW > TW	innerhalb > außerhalb	GK2 ≤ GK3 ≤ GK4 ≤ GK5
Quecksilber*	MS > TS	RW > TW	innerhalb > außerhalb	GK2 ≤ GK3 ≤ GK4 ≤ GK5
4-iso-Nonylphenol*	MS < TS	RW < TW	innerhalb > außerhalb	GK2 ≤ GK3 ≤ GK4 ≤ GK5
Di-(2-ethylhexyl)phthalat	keine	keine	keine	keine
Perfluorbutanoat	MS < TS	RW < TW	innerhalb > außerhalb	GK2 ≤ GK3 ≤ GK4 ≤ GK5
Perfluorpentanoat	MS < TS	RW < TW	innerhalb > außerhalb	GK2 ≤ GK3 ≤ GK4 ≤ GK5
Perfluorhexanoat	MS < TS	RW < TW	innerhalb > außerhalb	GK2 ≤ GK3 ≤ GK4 ≤ GK5
Perfluorheptanoat	MS < TS	RW < TW	innerhalb > außerhalb	GK2 ≤ GK3 ≤ GK4 ≤ GK5
Perfluoroctanoat	MS < TS	RW < TW	innerhalb > außerhalb	GK2 ≤ GK3 ≤ GK4 ≤ GK5

Stoffe	Konzentrationen Mischsystem (MS) / Trennsystem (TS)	Konzentrationen Regenwetter (RW) / Trockenwetter (TW)	Konzentrationen bezogen auf Lage zu Agglomerationsraum	Konzentrationen nach Größenklasse (GK)
Perfluorbutansulfonat	MS < TS	RW < TW	innerhalb > außerhalb	GK2 ≤ GK3 ≤ GK4 ≤ GK5
Perfluoroctansulfonat	MS < TS	RW < TW	innerhalb > außerhalb	GK2 ≤ GK3 ≤ GK4 ≤ GK5
Acenaphthen*	MS > TS	RW > TW	innerhalb > außerhalb	GK2 ≤ GK3 ≤ GK4 ≤ GK5
Fluoren*	MS > TS	RW > TW	innerhalb > außerhalb	GK2 ≤ GK3 ≤ GK4 ≤ GK5
Phenanthren*	MS > TS	RW > TW	innerhalb > außerhalb	GK2 ≤ GK3 ≤ GK4 ≤ GK5
Fluoranthren*	MS > TS	RW > TW	innerhalb > außerhalb	GK2 ≤ GK3 ≤ GK4 ≤ GK5
Pyren*	MS > TS	RW > TW	innerhalb > außerhalb	GK2 ≤ GK3 ≤ GK4 ≤ GK5
Diuron	MS > TS	RW > TW	innerhalb > außerhalb	GK2 ≤ GK3 ≤ GK4 ≤ GK5
Isoproturon	MS > TS	RW > TW	innerhalb > außerhalb	GK2 ≤ GK3 ≤ GK4 ≤ GK5
Terbutryn	MS > TS	RW > TW	innerhalb > außerhalb	GK2 ≤ GK3 ≤ GK4 ≤ GK5

*Stoffe zeigen einen guten Rückhalt in den Kläranlagen

7.1.3 Prüfung der Differenzierbarkeit

Die Differenzierbarkeit der Teildatenkollektive zur Ableitung unabhängiger Emissionsfaktoren wurde schrittweise anhand von fünf methodischen Ansätzen geprüft (siehe auch Anhang B.11):

- 1) Statistische Tests zum Nachweis, dass die beiden Datenkollektive statistisch als unabhängig und unterscheidbar einzustufen sind.
- 2) Vergleich der medianen Konzentrationen unter Berücksichtigung der Streuung der Messwerte in den jeweiligen Teilmengen über den Interquartilsabstand. (s. Anhang B.11.2).
- 3) Berücksichtigung der Häufigkeitsverteilung der gemessenen Konzentrationswerte (Verteilungsplots) zur Erklärung von Unterschieden im Medianwert. (s. Anhang B.11.6).
- 4) Bewertung der rechnerischen Unterschiede im Median vor dem Hintergrund der mit Probenahme und Analytik verbundenen Unsicherheiten.
- 5) Bewertung der rechnerischen Unterschiede im Median vor dem Hintergrund der Erwartungstrends bzw. der aufgestellten Hypothesen zur Differenzierbarkeit.

Die statistischen Tests wurden im Rahmen dieser Arbeiten mit dem Mann-Whitney-U-Test, dem Kruskal-Wallis-Test und dem Pairwise Wilcoxon-Test durchgeführt. Der Mann-Whitney-U-Test

vergleicht zwei Grundgesamtheiten, die eine stetige Verteilungsform aufweisen. Die Daten müssen dabei nicht normalverteilt sein. Er eignet sich insbesondere, um Lage-Unterschiede zwischen den beiden Verteilungen festzustellen, da nicht die Werte selbst, sondern nur ihre Ränge in die Prüfgröße eingehen. Als Nullhypothese wird angenommen, dass die Verteilungen sich nicht unterscheiden (Henze 2012). Mittels eines Kruskal-Wallis-Tests wurde allgemein geprüft, ob Unterschiede in der zentralen Tendenz der Ablaufkonzentrationen bei den verschiedenen Kläranlagengrößenklassen nachweisbar sind. Im Anschluss daran wurde mit Pairwise Wilcoxon geprüft, zwischen welchen Größenklassen genau die Unterschiede liegen.

Die Ergebnisse aller Prüfschritte (1-5) wurden in einer Bewertungsmatrix zusammengefasst. Diese Bewertungsmatrix einschließlich der Legende findet sich in Anhang B.11.7. Eine differenzierte Ablaufkonzentration wurde nur dann ausgewiesen, wenn die potentiellen Differenzierungsmerkmale nach allen fünf methodischen Ansätzen bestätigt wurden.

7.1.4 Zusammenfassung/Empfehlungen

Nach der Prüfung der Differenzierbarkeit der Kläranlagenablaufkonzentrationen entsprechend der fünf methodischen Ansätze konnte nur für das Merkmal „Urbanisierung/Agglomerationsräume“ und für die vier Stoffe Nickel, Acenaphthen, Fluoren, Phenanthren und Fluoranthren eine eindeutige Differenzierbarkeit festgestellt werden. Die in den statistischen Tests als signifikant ausgewiesenen Unterschiede sind bei strenger Auslegung aller Prüfkriterien nicht real. Sehr häufig sind die bestehenden analytischen Unsicherheiten hierfür von entscheidender Bedeutung. Darüber hinaus ist auffällig, dass die Unterschiede zwischen den medianen Konzentrationen von zwei Teildatenkollektiven für viele Stoffe kleiner sind als die zeitliche Variabilität der Einzeldaten eines Teildatenkollektivs.

Empfehlungen aus den durchgeführten Datenanalysen:

Für die deutschlandweite Quantifizierung der Stoffeinträge in die Gewässer im Rahmen der Bestandsaufnahme der Emissionen, Einleitungen und Verluste (prioritäre Stoffe) nach UQN-RL bzw. OGewV sollten ausschließlich die deutschlandweit einheitlich abgeleiteten Emissionsfaktoren verwendet werden, ohne weitere Differenzierung. Sie stellen für ein breites Stoffspektrum eine valide Basis zur Abschätzung der mittleren Gesamtemissionen aus kommunalen Kläranlagen dar. Für flussgebietsweite Betrachtungen können sie ohne Detailkenntnis zu potentiellen Differenzierungsmerkmalen angewendet werden und führen zu vergleichbaren Ergebnissen.

Für Detailanalysen und bei kleinräumiger Betrachtung kann es darüber hinaus sinnvoll sein, bspw. die in diesem Vorhaben abgeleiteten differenzierten Ablaufkonzentrationen/Emissionsfaktoren zu verwenden. Die Voraussetzung ist hierbei, dass der Anwender die Charakteristik der spezifischen Kläranlagen beschreiben und den vordefinierten Differenzierungsmerkmalen zuordnen kann. Da dies lokale Kenntnisse erfordert, bleibt die Anwendung einzelfallbezogen.

7.1.5 Ableitung repräsentativer Emissionsfaktoren für kommunale Kläranlagen

Ein repräsentativer Emissionsfaktor wird stoffspezifisch für einen definierten räumlichen und zeitlichen Gültigkeitsbereich abgeleitet und spiegelt mittlere Verhältnisse wider (in diesem Fall das mittlere Eintragsgeschehen). Er ist über einen längeren Zeitraum nutzbar, sofern sich die Eintragungssituation nicht grundlegend verändert.

Emissionsfaktoren stehen in Bezug zu einer sinnvollen Aktivitätsrate (Bezugsgröße), die in Relation zu den Stoffeinträgen steht (Gleichung 6). Wird ein repräsentativer Emissionsfaktor abgeleitet, müssen im Rahmen der zeitlichen Gültigkeit des Faktors lediglich die Aktivitätsraten aktualisiert werden.

Gleichung 6: Berechnung eines Emissionsfaktors

$$\text{Emissionsfaktor} \left[\frac{\text{kg}}{\text{a} \cdot \text{x}} \right] = \frac{\text{Stoffeintrag} \left[\frac{\text{kg}}{\text{a}} \right]}{\text{Aktivitätsrate} [\text{x}]}$$

Der Stoffeintrag wurden unter Verwendung der repräsentativen Kläranlagenablaufkonzentrationen und der mittleren Jahresabwassermenge für die Jahre 2010, 2013 und 2016 berechnet (StaBu 2013 und StaBu 2018). Als Aktivitätsrate wurde die behandelte Abwasserlast in Einwohnerwerten verwendet (Tabelle 50).

Tabelle 50: Ableitung der mittleren Einwohnerwerte und Jahresabwassermengen

Jahr	Jahresabwassermenge (1.000 m³)	Einwohnerwerte
2010	9.988.057	119.683.566
2013	9.825.198	116.872.889
2016	9.581.052	117.559.725
Mittel	9.798.102	118.038.727

Eine detaillierte methodische Beschreibung der Ableitung der Emissionsfaktoren findet sich in Lambert et al. (2014) und UBA-Texte 12/2016; UBA (2016).

Für die Stoffe, für die eine saisonal schwankende Ablaufkonzentrationen nachgewiesen wurde (siehe Kapitel 5.5), wurde geprüft, ob dies bei der Ableitung der Emissionsfaktoren zu berücksichtigen ist. In Anlehnung an das in UBA (2016) beschriebene methodische Vorgehen wurden monatspezifische Mittelwerte und Mediane berechnet. Da die Einträge stark niederschlagsbestimmt sind, wurde ein Gewichtungsfaktor aus langjährigen mittleren Monatsniederschlägen (18 Jahre) und langjährigem Jahresniederschlag berechnet. Anschließend wurden monatliche Stofffrachten als Produkt aus dem langjährigen bundesweiten Mittelwert der Jahresabwassermenge aus kommunalen Kläranlagen, den Gewichtungsfaktoren und der mittleren monatlichen Stoffkonzentration errechnet. Aus diesen wurde eine Jahresfracht ermittelt als Grundlage zur Ableitung einer gewichteten mittleren Ablaufkonzentration.

Im Vergleich der mittleren Ablaufkonzentrationen mit und ohne Berücksichtigung der saisonalen Effekte zeigt sich, dass diese kaum von einander abweichen (Tabelle 51). Die Werteunterschiede liegen in der Spannweite, die aus analytischer Sicht als nicht signifikante Konzentrationsunterschiede bezeichnet werden. Es wird deutlich, dass die erhobenen Stoffkonzentrationen im Rahmen dieses Monitorings in ihrer Gesamtheit die jahreszeitliche Variabilität der Einträge über Kläranlagen integrieren und die allgemein abgeleiteten statistischen Kenngrößen des Gesamtdatenkollektives die Saisonalität bei den Stoffen sehr gut abbilden.

Tabelle 51: Vergleich der mittleren Ablaufkonzentrationen mit und ohne Berücksichtigung saisonaler Unterschiede

Merkmal	Diuron		Isoproturon		Terbutryn		Fluoranthen		Pyren	
	Median	Mittelwert	Median	Mittelwert	Median	Mittelwert	Median	Mittelwert	Median	Mittelwert
gewichtete Ablaufkonzentration in µg/l	0,018	0,025	0,021	0,052	0,039	0,047	0,0020	0,0035	0,0019	0,0030
Ablaufkonzentration in µg/l	0,016	0,023	0,019	0,047	0,035	0,044	0,0021	0,0037	0,0019	0,0031

Auf Basis der beschriebenen Vorgehensweise wurden nun deutschlandweit einheitliche Emissionsfaktoren abgeleitet (Tabelle 52). An dieser Stelle sei erneut darauf hingewiesen, dass diese Emissionsfaktoren mittlere Verhältnisse im Hinblick auf ihren Gültigkeitsbereich widerspiegeln. Angewendet auf einzelne Kläranlagen können die Einträge sowohl deutlich über- als auch unterschätzt werden. Bei Betrachtung größerer Einheiten bspw. einer Flussgebietseinheit bilden die berechneten Einträge die mittleren Verhältnisse realitätsnah ab.

Tabelle 52: Emissionsfaktoren für den Ablauf kommunaler Kläranlagen für ausgewählte Stoffe nach OGeV2016 und weiterer Stoffe

Stoffe	Rechtsgrundlage	Emissionsfaktor (Median) (mg/Einwohnerwert/Jahr)	Emissionsfaktor (Mittelwert) (mg/Einwohnerwert/Jahr)
Blei	RL2013/39/EU	11,6	14,9
Cadmium	RL2013/39/EU	0,5	0,7
Nickel	RL2013/39/EU	365	398
Quecksilber	RL2013/39/EU	0,2	0,5
4-iso-Nonylphenol	RL2013/39/EU	3,6	9,5
Di-(2-ethylhexyl)phthalat	RL2013/39/EU	141	257
Perfluorbutanoat	-	0,3	0,6
Perfluorpentanoat	-	0,3	0,7
Perfluorhexanoat	-	0,5	1,5
Perfluorheptanoat	-	0,1	0,2
Perfluoroctanoat	-	0,5	0,7
Perfluorbutansulfonat	-	0,2	0,6
Perfluoroctansulfonat	RL2013/39/EU	0,2	0,7
Acenaphthen	-	0,1	0,2
Fluoren	-	0,1	0,2
Phenanthren	OGeV (2016)	0,4	0,5

Stoffe	Rechtsgrundlage	Emissionsfaktor (Median) (mg/Einwohnerwert/Jahr)	Emissionsfaktor (Mittelwert) (mg/Einwohnerwert/Jahr)
Fluoranthen	RL2013/39/EU	0,2	0,3
Diuron	RL2013/39/EU	1,3	1,9
Isoproturon	RL2013/39/EU	1,6	3,9
Terbutryn	RL2013/39/EU	2,9	3,7

Für die erste Bestandsaufnahme der Emissionen, Einleitungen und Verluste (prioritäre Stoffe) (UBA 2016) wurden auf Grundlage von Monitoringergebnissen (Lambert et al. 2014) und Literaturwerten Emissionsfaktoren für 18 Einzelstoffe und den Summenparameter PAK₁₆ abgeleitet. Verglichen mit den 2014 abgeleiteten Emissionsfaktoren zeigt sich eine gute Übereinstimmung für die Stoffe Blei, Nickel, 4-iso-Nonylphenol und Fluoranthen. Für einzelne Stoffe zeigen sich aber auch deutliche Abweichungen. So waren die Faktoren für Diuron und Isoproturon fast doppelt so hoch. Große Abweichungen ergeben sich auch bei den Stoffen Cadmium, Quecksilber und DEHP.

Für Cadmium ist der auf den Ergebnissen dieses Vorhabens basierende Emissionsfaktor um den Faktor 9,4 niedriger, bei Quecksilber dagegen um den Faktor 5 höher. Für Quecksilber ergibt sich die Abweichung insbesondere aus der Tatsache, dass die damals vorgenommene Ableitung stark von der BG beeinflusst war. Einzelne Datensätze wiesen aber bereits darauf hin, dass die tatsächlichen Konzentrationen deutlich geringer sind.

Bei DEHP wurden im Ergebnis dieses Vorhabens deutlich höhere mittlere Konzentrationen (3 µg/l) abgeleitet im Vergleich zu UBA (2016) mit 0,4 µg/l. Für DEHP besteht grundsätzlich die Gefahr von Kontaminationen durch die Verwendung von Kunststoffmaterialien (Bauteile automatischer Probenahmegeräte, Schläuche, Becher). Mit Vorliegen der ersten Ergebnisse wurden mögliche Kontaminationen bei der Probenahme und im Labor ohne Befund geprüft. Weiterhin wurde geprüft, ob die Probenahmegefäße der Kläranlagen (Glas, Edelstahl, HDPE) zur Herstellung der Tagesmischproben einen Einfluss auf die DEHP-Ergebnisse haben. Es konnten keine systematischen Unterschiede in den Messergebnissen festgestellt werden. Eine mögliche Ursache für die Unterschiede liegt ggf. in dem unterschiedlichen Umgang mit möglichen Ausreißern. In der ersten Studie wurde ein Schwellenwert von 1,2 µg/l für die Ausreißerbetrachtung festgelegt und größere Werte aus der Betrachtung herausgenommen. In diesem Vorhaben wurde begründet auf eine Ausreißereliminierung verzichtet, so dass für DEHP einige sehr hohe Konzentrationen in der Größenordnung zwischen 20 µg/l und 120 µg/l in das Datenkollektiv einfließen. Die Ergebnisse stimmen überein mit aktuellen Messwerten aus der Literatur (vgl. LUBW 2019).

Mit diesem Vorhaben konnten bestehende Datenlücken geschlossen und Unsicherheiten beseitigt werden. Der erzeugte Datensatz hat eine hohe Qualität und Plausibilität.

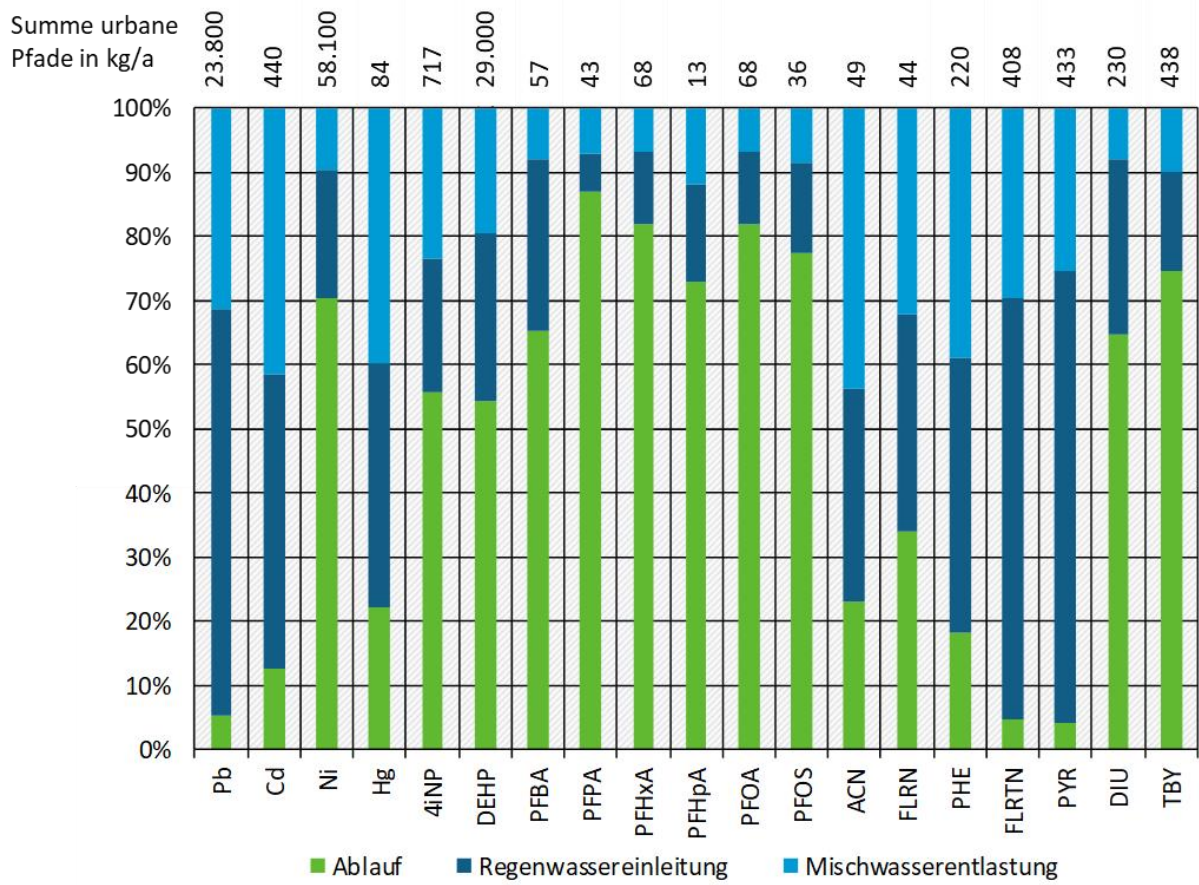
7.2 Quantifizierung der Stoffeinträge über die urbanen Eintragspfade in die Gewässer Deutschlands

Auf Basis der medianen bzw. mittleren Ablaufkonzentrationen bzw. Emissionsfaktoren können die Einträge über kommunale Kläranlagen deutschlandweit abgeschätzt werden. Das

Stoffeintragsmodell MoRE (Modelling of Regionalized Emissions) kann ebenfalls genutzt werden, um Stoffeinträge über die Pfade Regenwassereinleitungen und Mischwasserüberläufe zu quantifizieren (Fuchs et al. 2017). Aus der in MoRE hinterlegten Wasserbilanz wurden die urbanen Abflusskomponenten Jahresabwassermenge der kommunalen Kläranlagen, Regenwassereinleitungen und Mischwasserentlastungen extrahiert. Um eine langjährige Repräsentativität zu gewährleisten, wurden die Einzeljahre 2012-2016 gemittelt. In der urbanen Wasserbilanz sind im Mittel 13.400 Millionen m³/a als Gesamtabwassermenge zu berücksichtigen. Davon entfallen 70 % auf kommunale Kläranlagen, 19 % auf Regenwassereinleitungen und 11 % auf Mischwasserentlastungen. Mit den medianen Konzentrationen für Kläranlagenablauf, Regenwassereinleitungen und Mischwasserentlastungen können die jährlich in die Gewässer eingetragenen Stofffrachten und die Relevanz der einzelnen Abwasserströme im urbanen Raum abgeschätzt werden (Abbildung 39). Diese Gesamtbetrachtung verdeutlicht nochmals, dass für die Stoffe mit gutem bis sehr gutem Rückhalten in den Kläranlagen, wie Blei, Cadmium, Quecksilber und die PAK-Vertreter, die Eintragspfade der Regenwassereinleitung und Mischwasserentlastung besonders relevant sind. Für alle Stoffe, die mäßig oder schlecht in den Kläranlagen zurückgehalten werden können, sind die Kläranlagen nicht zuletzt wegen der deutlich größeren Abwassermenge der Haupteintragspfad.

Der große Abwasserstrom kann, wie am Beispiel von DEHP und 4-iso-Nonylphenol deutlich wird, auch dazu führen, dass trotz guter mittlerer Reinigungsleistung von > 80 % die Kläranlagenabläufe den größten Teil des Gesamteintrags verursachen. Ursächlich hierfür ist, dass die medianen Ablaufkonzentrationen der Kläranlagen nur etwa um Faktor 2 niedriger sind als die medianen Konzentrationen für die Regenklärbecken und Regenüberlaufbecken.

Abbildung 39: Stoffeinträge über urbane Abwasserströme in kommunale Kläranlagen, Regenwassereinleitungen und Mischwasserentlastungen in Deutschland im Mittel für den Zeitraum 2012-2016



Quelle: eigene Darstellung, KIT-IWG

8 Fazit

Die Wasserwirtschaft steht auch heute vor wichtigen Herausforderungen. Dank nationaler und internationaler Regelungen in unterschiedlichen Rechtsbereichen und technischer Fortschritte, nicht zuletzt auf den Kläranlagen, hat sich die Wasserqualität der Flüsse in den letzten 30 Jahren deutlich verbessert. Die Qualität des Trinkwassers ist heute flächendeckend hoch, auch dank guter Aufbereitung. Dennoch drängen ständig neue Stoffe und Produkte wie Medikamente, Pflanzenschutzmittel und Biozidprodukte auf den Markt. Die damit verbundenen Stoffeinträge können ein Risiko für die Gewässer darstellen und gegebenenfalls eine aufwändigere Trinkwasseraufbereitung erfordern. Aufgrund der Vielzahl der Stoffe, ihrer Abbauprodukte und der Komplexität der Eintragswege stoßen wir immer wieder auf Wissenslücken. Für viele Stoffe ist noch unklar, wie sie in die Gewässer eingetragen werden, ob sie dort zu Problemen führen können und welche Relevanz die einzelnen Eintragswege haben. Um zwei der wichtigsten Anliegen der Wasserwirtschaft umsetzen zu können:

- ▶ den chemischen und ökologischen Zustand der Gewässer weiter zu verbessern und
- ▶ die sehr gute Trinkwasserqualität in Deutschland langfristig zu sichern,

ist es zwingend notwendig, bestehende Wissenslücken zu schließen und nationale und internationale Rechtsvorschriften regelmäßig zu überprüfen und fortzuschreiben. Wichtig ist, dass Informationen und Daten, die als Grundlage hierfür verwendet werden, wissenschaftlich fundiert sind und auf breite Akzeptanz stoßen. Diesen Herausforderungen hat sich dieses Vorhaben in einer gemeinsamen Anstrengung von Bund, Ländern, der Wasserwirtschaft sowie der Wissenschaft und kommunaler Praxis gestellt. Die zu bewältigenden fachlichen, administrativen und logistischen Aufgaben waren anspruchsvoll. Explizit betrifft das insbesondere:

- ▶ die administrative Vorhabenbegleitung,
- ▶ die enge fachliche Begleitung und Abstimmung auf/über unterschiedliche/n Ebenen (Kläranlagen, Projektpartnern, Ländern, Bund und beteiligte Bund-Länder-Arbeitsgruppen),
- ▶ die Umsetzung der einheitlichen Probenahme auf allen Kläranlagen,
- ▶ die Logistik (Probenversand etc.),
- ▶ die Sensibilität der Analyseverfahren,
- ▶ die Datenanalyse und
- ▶ die Einbindung weiterer assoziierter Untersuchungsvorhaben.

Das koordinierte Vorgehen und die dadurch mögliche erfolgreiche Durchführung des Projektes hat nicht nur zu einer fundierten, fachlich validen und von allen beteiligten Ländern akzeptierten Datenbasis geführt. Es war auch in ökonomischer Sicht hocheffizient. Durch die Bündelung der Ressourcen aller Länder konnte für die prioritären Stoffe eine in Umfang und Qualität einmalige Datengrundlage geschaffen werden. Die aufgebauten Monitoringstrukturen haben darüber hinaus die Einbindung weiterer Fragestellungen und Untersuchungen kostengünstig ermöglicht:

- ▶ Analyse von Biozidwirkstoffen und -transformationsprodukten (Fuchs et al. (2020) noch unveröffentlicht),
- ▶ Analyse von Tensiden und ihre Transformationsprodukte in ausgewählten Kläranlagen (Freeling et al. 2019),
- ▶ Untersuchungen zur Entwicklung des Abbaupotentials für den Süßstoff Acesulfam, durchgeführt vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ),
- ▶ Analyse von Bisphenol A in allen Proben,
- ▶ Analyse weiterer Stoffe durch einzelne Länder.

Im Kern dieses Vorhabens konnten für 20 Stoffe, davon elf Stoffe der UQN-RL, deutschlandweit einheitliche mittlere Ablaufkonzentrationen bzw. Emissionsfaktoren für die Quantifizierung der Einträge aus kommunalen Kläranlagen abgeleitet werden. Mit dieser Datenbasis wurden bestehende Unsicherheiten in Bezug auf die Emissionsfaktoren reduziert und die Aussagekraft der Bestandsaufnahme für Deutschland signifikant verbessert. Für einzelne Stoffe hat sich bestätigt, dass die Ableitung eines deutschlandweiten mittleren Faktors nicht sinnvoll ist. Diese Stoffe wurden entweder nur in einzelnen Anlagen oder nur zeitlich begrenzt gefunden. In beiden Fällen führt die Anwendung eines deutschlandweiten mittleren Emissionsfaktors zu einer Überschätzung der berechneten Einträge.

Durch die detaillierte Betrachtung von fünf Anlagen konnte mit Blick auf die Datenauswertung ein verbessertes Systemverständnis für stoffliche Fragen auf kommunalen Kläranlagen gewonnen werden. Darüber hinaus erhöhte sich hierdurch die Interpretationssicherheit der Ergebnisse gegenüber einer reinen Ablaufbeprobung. Allerdings konnte das Vorhaben nicht alle offenen Fragen beantworten bzw. hat es neue Fragestellungen aufgeworfen und zukünftige Ansatzpunkte aufgedeckt. Es hat sich bspw. gezeigt, dass für einzelne Stoffe, insbesondere neue Stoffe der UQN-RL, die vorliegenden analytischen Methoden zu unempfindlich sind, um die niedrigen Umweltkonzentrationen zu erfassen bzw. die Anforderung BG = 30 % UQN zu erfüllen. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Die im Vorhaben erzeugte Datenbasis und die Erkenntnisse aus den Auswertungen der Daten bieten neben ihrer Verwendung im Rahmen der Bestandsaufnahme eine Reihe von Schnittstellen zu weiteren aktuellen politischen Prozessen.

Zu nennen wären hier insbesondere die auch bei der Abschlussveranstaltung zum Vorhaben angesprochenen Schnittstellen:

- 1) Stakeholderdialog Spurenstoffe des Bundesministeriums für Umwelt (BMU),
- 2) BMU-Wasserdialoge und BMU-Wasserstrategie,
- 3) Evaluierung der Kommunalabwasserrichtlinie (91/271/EWG),
- 4) Überprüfung der WRRL und der UQN-RL,
- 5) Water-Reuse-Verordnung (VERORDNUNG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES über Mindestanforderungen für die Wasserwiederverwendung (2020/741)): Mindestanforderungen an Bewässerungswasser nach einheitlichem EU-Standard (Kläranlagenablauf) und Risikomanagement (nach derzeitigem Entwurf Aufgabe der Mitgliedstaaten),
- 6) BVT-(Sevilla)-Prozess nach Industrieemissions-RL (IED).

Als wichtiges Fazit ist festzustellen, dass mit der Unterstützung Vieler ein in vielerlei Hinsicht anspruchsvolles Projekt erfolgreich abgeschlossen wurde. Das Vorhabenskonzept und seine koordinierte Umsetzung ist beispielgebend und hat zu einem über die primäre Zielsetzung hinausgehenden fachlichen Mehrwert geführt.

Das Primärziel war es, in einer einmaligen Aktion Emissionsfaktoren zu erzeugen, die auch für zukünftige Bestandsaufnahmen nutzbar sind. Dies ist für ein breites Spektrum von Stoffen überzeugend gelungen.

Für einzelne Stoffe können sich aber auch mit Blick auf bereits bestehende Anwendungs-, Nutzungs- oder Herstellungsverbote Änderungen in der Eintragungssituation ergeben. Gleiches gilt für Substitutionsprozesse und die damit verbundenen Einträge neuer Stoffe. Letztlich ist zu berücksichtigen, dass im Rahmen von kommenden Überprüfungen (Novellierungen) der UQN-RL neue Stoffe in den Fokus rücken. Die angesprochenen Punkte, wie auch die Frage, wie Anlagen mit 4. Reinigungsstufe bei der deutschlandweiten Quantifizierung der Einträge zu berücksichtigen sind, erfordern es, das Konzept weiterzudenken. Auch hierfür liefert das abgeschlossene Vorhaben die Grundlagen. Nicht nur aufgrund der erzeugten Datenbasis, sondern insbesondere auch wegen der initiierten Strukturen der Zusammenarbeit.

Danksagung

Wo viele Hände sind ist die Last nicht schwer. (aus Haiti)

Im Namen aller Projektnehmer geht unser ausdrücklicher Dank an die Kolleginnen und Kollegen der 49 am Projekt beteiligten Kläranlagen. Nur durch ihre Bereitschaft an dem Vorhaben aktiv teilzunehmen, ihre tatkräftige und zuverlässige Umsetzung der auf den Anlagen anfallenden Arbeiten (Probenahme, Probenversand, viele Telefonate und diverse Kleinigkeiten) und ihre Geduld sich zusammen mit uns auf sich ändernde Anforderungen/Situationen einzulassen, war dieses Vorhaben möglich.

Wir bedanken uns bei den Kolleginnen und Kollegen aus den Ländern für ihr Vertrauen und die Bereitschaft, ein solch großes Vorhaben zu finanzieren und gemeinsam zu gestalten.

Für die offenen Diskussionen und konstruktiven fachlichen Beiträge danken wir den Kolleginnen und Kollegen der Bund-Länder ad-hoc-Arbeitsgruppe Bestandsaufnahme. Innerhalb dieser Arbeitsgruppe gilt unser besonderer Dank Herrn Johannes Bischof, Frau Ute Arenholz und Frau Evamaria Burkart, die sich die Zeit genommen haben, bei allen Fragen, Problemen, Verfahrensschritten fachlich zu begleiten und zu beraten.

Ein großer Dank geht auch an die Kolleginnen und Kollegen aus dem Umweltbundesamt für die fachliche und vor allem auch administrative Unterstützung und Begleitung des Vorhabens. Dabei sind insbesondere für die fachliche Begleitung Frau Antje Ullrich und für die administrative Begleitung Herr Daniel Sommer zu nennen. Herr Sommer hat das Projekt mit Ruhe und Sorgfalt durch alle administrativen Untiefen gesteuert.

Nicht alle Menschen konnten uns von der Entwicklung und Umsetzung des Projektes bis zu seinem Abschluss begleiten. Wir möchten an dieser Stelle an Joachim Heidemeier als einen wichtigen Ideengeber und Unterstützer des Projektes erinnern.

Quellenverzeichnis

Abegglen, C.; Siegrist, H. (2012): Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser. Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen. Bern, 2012 (Nr. 1214).

Bachor, A.; Schumann, A.; Röpke, A.; Scharf, E.-M.; Dethloff, M.; Nakari, T. et al. (2011): COHIBA WP3, National Report. German Results. Güstrow, 2011.

BAFU (Bundesamt für Umwelt Schweiz) (2013): Datenlieferung zur Untersuchung von 54 kommunalen Kläranlagen in der Schweiz.

Barco-Bonilla, N.; Romero-González, R.; Plaza-Bolaños, P.; Martínez Vidal, J. L.; Castro, A. J.; Martín, I. et al. (2013): Priority organic compounds in wastewater effluents from the Mediterranean and Atlantic basins of Andalusia (Spain). In: *Environmental science. Processes & impacts* 15 (12), S. 2194–2203.

Becouze-Lareure, C.; Dembélé, A.; Coquery, M.; Cren-Olivé, C.; Bertrand-Krajewski, J.-L. (2019): Assessment of 34 dissolved and particulate organic and metallic micropollutants discharged at the two contrasted urban catchments. In: *Science of The Total Environment* (651), S. 1810–1818. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969718339159>.

Birch, H.; Mikkelsen, P. S.; Jensen, J. K.; Lützhøft, H.-C. H. (2011): Micropollutants in stormwater runoff and combined sewer overflow in the Copenhagen area, Denmark. In: *Water Science & Technology* 64 (2), S. 485.

Björklund, K.; Cousins, A. P.; Strömvall, A.-M.; Malmqvist, P.-A. (2009): Phthalates and nonylphenols in urban runoff: Occurrence, distribution and area emission factors. In: *Science of The Total Environment* 407 (16), S. 4665–4672.

Bollmann, U. E.; Vollertsen, J.; Carmeliet, J.; Bester, K. (2014): Dynamics of biocide emissions from buildings in a suburban stormwater catchment – Concentrations, mass loads and emission processes. In: *Water Research* 56, S. 66–76. Online verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135414001493>.

Bressy, A.; Gromaire, M.-C.; Lorgeoux, C.; Saad, M.; Leroy, F.; Chebbo, G. (2012): Towards the determination of an optimal scale for stormwater quality management: Micropollutants in a small residential catchment. In: *Water Research* (46), S. 6799–6810.

Brombach, H.; Dettmar, J. (2016): Im Spiegel der Statistik: Abwasserkanalisation und Regenwasserbehandlung in Deutschland. In: *KA - Korrespondenz Abwasser, Abfall* 63 (3), S. 176–186.

BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit) (2011, 2016): Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (OGewV). Online verfügbar unter <https://www.bmu.de/gesetz/verordnung-zum-schutz-der-oberflaechengewaesser/>, zuletzt geprüft am 07.07.2020

Burkhardt, M.; Junghans, M.; Zuleeg, S.; Boller, M.; Schoknecht, U.; Lamani, X. et al. (2009): Biozide in Gebäudefassaden – ökotoxikologische Effekte, Auswaschung und Belastungsabschätzung für Gewässer. In: *Umweltwiss Schadst Forsch* 21 (1), S. 36–47. Online verfügbar unter <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12302-008-0033-1>.

Campo, J.; Masiá, A.; Blasco, C.; Picó, Y. (2013): Occurrence and removal efficiency of pesticides in sewage treatment plants of four Mediterranean River Basins. In: *Journal of hazardous materials*, S. 146–157.

Cladière, M.; Gasperi, J.; Lorgeoux, C.; Bonhomme, C.; Rocher, V.; Tassin, B. (2013): Alkylphenolic compounds and bisphenol A contamination within a heavily urbanized area: case study of Paris. In: *Environ Sci Pollut Res* 20 (5), S. 2973–2983.

Clara, M.; Strenn, B.; Gans, O.; Martinez, E.; Kreuzinger, N.; Kroiss, H. (2005): Removal of selected pharmaceuticals, fragrances and endocrine disrupting compounds in a membrane bioreactor and conventional wastewater treatment plants. In: *Water Research* 39 (19), S. 4797–4807

Clara, M.; Windhofer, G.; Weilgony, P.; Gans, O.; Denner, M.; Chovanec, A.; Zessner, M. (2012): Identification of relevant micropollutants in Austrian municipal wastewater and their behaviour during wastewater treatment. In: *Chemosphere* 87 (11), S. 1265–1272. Online verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653512000999>.

Clara, M.; Gruber, G.; Humer, F.; Hofer, T.; Kretschmer, F.; Ertl, T. et al. (2014): Spurenstoffemissionen aus Siedlungsgebieten und von Verkehrsflächen. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Projektbericht SCHTURM. Wien, 2014.

Clara, M., Hanefeld, W., Scheffknecht, Ch. (2017a): Untersuchung ausgewählter prioritärer und sonstiger Stoffe in kommunalen Kläranlagen und Fließgewässern in Vorarlberg. Projektbericht. Bregenz. Online verfügbar unter https://vorarlberg.at/web/land-vorarlberg/contentdetailseite/-/asset_publisher/qA6A38txu0k/content/prioritaere-stoffe-in-kommunalen-kläranlagen-und-fließgewässern?article_id=117972.

Clara, M., Lenz, K., Spira, Y., Weiß, St. (2017b): Emissionen ausgewählter prioritärer und sonstiger Stoffe aus kommunalen Kläranlagen. Hrsg: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Österreich (BMLFUW). Online verfügbar unter <https://www.bmnt.gv.at/wasser/wasserqualitaet/abwasserreinigung/Emissionen-ausgewählter-priorit-rer-und-sonstiger-Stoffe.html>.

DWA (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.) (2018): 30. Leistungsvergleich kommunaler Kläranlagen. Hennef, 2018.

Engelmann, U.; Dittrich, S.; Enskat, K. (2016): Emissionsbericht Abwasser. Sechste Bestandsaufnahme der Abwasseremissionen im Freistaat Sachsen 2013/2014. Dresden, 2016. Online verfügbar unter <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/13687>.

Erftverband (2013): Datensatz zur Stoffkonzentrationen im Zulauf von einem Retentionsbodenfilter und einem Regenrückhaltebecken sowie Zu- und Ablaufkonzentrationen von vier Kläranlagen im Einzugsgebiet der Swist.

EU (1991): Europäischer Rat der Europäischen Union: Richtlinie 91/271/EWG des Rates vom 21. Mai 1991 über die Behandlung von kommunalem Abwasser.

EU (2008): Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union: Richtlinie 2008/105/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über Umweltqualitätsnormen im Bereich der Wasserpolitik.

EU (2013): Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union: Richtlinie 2013/39/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. August zur Änderung der Richtlinien

- 2000/60/EG und 2008/105/EG in Bezug auf prioritäre Stoffe im Bereich der Wasserpolitik. In: *Amtsblatt der Europäischen Union* (L226).
- Eyckmanns-Wolters, R.; Fuchs, S.; Maus, C.; Sommer, M.; Voßwinkel, N.; Mohn, R.; Uhl, M. (2013): Reduktion des Feststoffeintrags durch Niederschlagswassereinleitungen (REFENI). Phase 1. Projektbericht, 2013.
- Freeling, F. Alygiziakis, N.A., v.d. Ohe, P.C., Slobodnik, J., Oswald, P., Aalizadeh, R., Cirka, L., Thomaidis, N.S., Scheurer, M. (2019): Occurance and potential environmental risk of surfactants and their transformation products discharged by wastewater treatment plants. In: *Science of the Total Environment* 681, S 475-487.
- Fochtman, P.; Mielżyńska-Ńvach, D.; Nałęcz-Jaworsk, G.; Nakari, T.; Nowak, B. (2011): COHIBA WP3 National Report. Polish Results. COHIBA (Control of Hazardous Substances in the Baltic Sea Region). Katowice, 2011.
- Fuchs, S.; Lambert, B.; Grotehusmann, D. (2010): Neue Aspekte in der Behandlung von Siedlungsabflüssen. 1. Aufl. Online veröffentlicht: Springer-Verlag.
- Fuchs, S.; Mayer, I.; Haller, B.; Roth, H. (2014): Lamella settlers for storm water treatment - performance and design recommendations. In: *Water Science & Technology* 69 (2), S. 278–285.
- Fuchs, S.; Kaiser, M.; Kiemle, L.; Kittlaus, S.; Rothvoß, S.; Toshovski, S. et al. (2017): Modeling of Regionalized Emissions (MoRE) into Water Bodies. An Open-Source River Basin Management System. In: *Water* 9 (4), S. 239.
- Fuchs, S.; Nickel, J. P. (2019): Qualitative Untersuchung von Mischwasserentlastungen in Bayern. Vorläufige Ergebnisse aus laufendem Vorhaben. Stand Oktober 2019. Forschungsvorhaben im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU), 2019.
- Fuchs, S., Toshovski, S., Kaiser, M., Sacher, F., Thoma, A. (2020): Belastung der Umwelt mit Bioziden realistischer erfassen – Schwerpunkt Einträge über Kläranlagen, noch unveröffentlicht.
- Gardner, M.; Jones, V.; Comber, S.; Scrimshaw, M. D.; Coello-Garcia, T.; Cartmell, E. et al. (2013): Performance of UK wastewater treatment works with respect to trace contaminants. In: *The Science of the total environment* 456-457, S. 359–369.
- Gasperi, J.; Zgheib, S.; Cladière, M.; Rocher, V.; Moilleron, R.; Chebbo, G. (2012): Priority pollutants in urban stormwater: Part 2 – Case of combined sewers. In: *Water Research* 46 (20), S. 6693–6703. Online verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135411005719>.
- Helsel, D. R.; Hirsch, R. M. (2002): Statistical Methods in Water Resources. Hydrologic Analysis and Interpretation. 1. Aufl. (Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, 4).
- Henze, N. (2012): Statistik für Studierende der Biologie. Skript zur Vorlesung. Karlsruhe, 2012.
- Huhtala, S.; Munne, P.; Nakari, T.; Nuutinen, J.; Perkola, N.; Sainio, P. et al. (2011): WP3 Innovative Approaches To Chemical Controls Of Hazardous Substances. Country Report Of Finland. COHIBA (Control of Hazardous Substances in the Baltic Sea Region). Helsinki, 2011.
- Kaj, L.; Allard, A.-S.; Andersson, H.; Hageström, U. (2011): WP3 National Report Sweden. COHIBA (Control of Hazardous Substances in the Baltic Sea Region). Stockholm, 2011.
- Kalmykova, Y.; Björklund, K.; Strömvall, A.-M.; Blom, L. (2013): Partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons, alkylphenols, bisphenol A and phthalates in landfill leachates and

stormwater. In: *Water Research* 47 (3), S. 1317–1328. Online verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135412008664>.

Kemper, M.; Eyckmanns-Wolters, R.; Fuchs, S.; Ebbert, S.; Maus, C.; Uhl, M. et al. (2015): Analyse der Leistungsfähigkeit von Regenüberlaufbecken und Überwachung durch Online Messtechnik. Abschlussbericht, 2015. Online verfügbar unter https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/tx_mmkresearchprojects/2015_12_16_Schlussbericht_Monitoring.pdf, zuletzt geprüft am 07.07.2020

Körgmaa, V.; Laht, M.; Paasrand, K.; Parts, L.; Pöllumäe, A.; Volkov, E. et al. (2011): WP3 Innovative Approaches To Chemical Controls Of Hazardous Substances. National Report Of Estoni. COHIBA (Control of Hazardous Substances in the Baltic Sea Region). Helsinki, 2011.

Köck-Schulmeyer, M.; Villagrasa, M.; López de Alda, M.; Céspedes-Sánchez, R.; Ventura, F.; Barceló, D. (2013): Occurrence and behavior of pesticides in wastewater treatment plants and their environmental impact. In: *Science of The Total Environment* 458-460, S. 466–476. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.04.010.

Lambert, B.; Fuchs, S.; Toshovski, S.; Sacher, F.; Thoma, A. (2014): Entwicklung eines Bilanzierungsinstruments für den Eintrag von Schadstoffen aus kommunalen Kläranlagen in Gewässer. Forschungsvorhaben gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt und die Länder, 2014.

Lamprea, K.; Ruban, V. (2011): Pollutant concentrations and fluxes in both stormwater and wastewater at the outlet of two urban watersheds in Nantes (France). In: *Urban Water Journal* 8 (4), S. 219–231.

Launay, M.; Dittmer, U.; Steinmetz, H. (2016): Organic micropollutants discharged by combined sewer overflows - Characterisation of pollutant sources and stormwater-related processes. In: *Water research* (104), S. 82–92.

Limpert, E.; Stahel, W. A.; Abbt, M. (2001): Log-normal Distributions across the Sciences: Keys and Clues. In: *BioScience* 51 (5), S. 341–352.

Loos, R., Carvalho, R., Comero, S., António, D.C., Ghiani, M., Lettieri, T., Locoro, G., Paracchini, B., Tavazzi, S., Gawlik, B.M., Blaha, L., Jarosova, B., Voorspoels, St., Schwesig, D., Haglund, P., Fick, J., Gans, O. (2012): EU Wide Monitoring Survey on Waste Water Treatment Plant Effluents. JRC Scientific and Policy Reports.

LUBW (Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg) (2014): Spurenstoffinventar der Fließgewässer in Baden-Württemberg. Online verfügbar unter https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/3_Umwelt/Schutz_natuerlicher_Lebensgrundlagen/Wasser/Rechtsvorschriften/WRRL/Zyklus-2/Hintergrund-2/Spurenstoffinventar_Fliessgewaesser.pdf, zuletzt geprüft am 07.07.2020

LUBW (Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg) (2019): Sonderunteruntersuchungsprogramm an PRTR-berichtspflichtigen Kläranlagen. in Vorbereitung. unveröffentlicht, 2019.

Luo, Y.; Guo, W.; Ngo, H. H.; Nghiem, L. D.; Hai, F. I.; Zhang, J. et al. (2014): A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment. In: *The Science of the total environment* 473-474, S. 619–641.

- Maestre, A.; Pitt, R.; Durrans, S. R.; Chakraborti, S. (2004): Stormwater quality descriptions using the three parameter lognormal distribution, 2004. Online verfügbar unter <http://rpitt.eng.ua.edu/Research/ms4/Paper/maestre%20pitt%202004%20ds%20DRAFT.pdf>.
- Manusadžianas, L.; Nekrašaitė, G.; Pockevičiūtė, D.; Sadauskas, K. (2011): WP3 Innovative Approaches To Chemical Controls Of Hazardous Substances. National Report Of Lithuania. COHIBA (Control of Hazardous Substances in the Baltic Sea Region). Vilnius, 2011.
- Margot, J.; Kienle, C.; Magnet, A.; Weil, M.; Rossi, L.; de Alencastro, Luiz Felipe et al. (2013): Treatment of micropollutants in municipal wastewater: Ozone or powdered activated carbon? In: *Science of The Total Environment* 461-462, S. 480–498.
- Maus, C.; Ante, S.; Schulz, J. (2016): Machbarkeitsstudie zur Mikroschadstoffelimination auf der Kläranlage Hürth-Stotzheim, 2016. Online verfügbar unter https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/forschung/170815_Machbarkeitsstudie%20H%C3%BCrth-Stotzheim/161117_Studie_Kurzbericht_H%C3%BCrth_finale%20Version.pdf.
- Morasch, B.; Bonvin, F.; Reiser, H.; Grandjean, D.; Alencastro, L. F. de; Perazzolo, C. et al. (2010): Occurrence and Fate of Micropollutants in the Vidy Bay of Lake Geneva, Switzerland. Part II: Micropollutant Removal between Wastewater and Raw Drinking. In: *Environmental Toxicology and Chemistry* 29 (8), S. 1658–1668.
- Nielsen, U.; Fredskilde, J. W.L.; Madsen, K. B.; Rasmussen, J.; Rindel, K.; Fink, N. et al. (2011): WP3 Innovative Approaches To Chemical Controls Of Hazardous Substances. Results from chemical analysis, acute and chronic toxicity tests in Case Studies. Danish National Report. COHIBA (Control of Hazardous Substances in the Baltic Sea Region), 2011.
- Osborne, J. W.; Overbay, A. (2004): The power of outliers (and why researchers should always check for them). In: *Practical Assessment, Research & Evaluation* 9 (6).
- Rau, W.; Metzger, S. (2017): Bestandsaufnahme der Spurenstoffsituation von Kläranlagen in Baden-Württemberg. Untersuchungsbericht. UM-Vorhaben Nr. 367/2014, 2017.
- Schütte, M.; Schäpers, D.; Kasper, K. (2016): Machbarkeitsstudie zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Hopsten, 2016. Online verfügbar unter https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/forschung/161102_Machbarkeitsstudie_zur_Spurenstoffelimination_auf_der_Kl%C3%A4ranlage_Hopsten/KA661_Studie_Spurenstoffe_Hopsten_R09.pdf.
- Schütte, M.; Schäpers, D.; Schusser, A. (2017): Machbarkeitsstudie zur Spurenstoffelimination auf der Hauptkläranlage Münster. Abschlussbericht. Aachen, Vechta., 2017. Online verfügbar unter https://www.lanuv.nrw.de/landesamt/forschungsvorhaben/machbarkeitsstudien?tx_cartproducts_products%5Bproduct%5D=892&cHash=fa79bd48e2c1ca95b58f66f1d1eba684.
- Seel, P.; Knepper, T. P.; Gabriel, S.; Weber, A.; Haberer, K. (1994): Einträge von Pflanzenschutzmitteln in ein Fließgewässer - Versuch einer Bilanzierung. In: *Vom Wasser* 83, S. 357–372.
- Singer, H.; Jaus, S.; Hanke, I.; Lück, A.; Hollender, J.; Alder, A. C. (2010): Determination of biocides and pesticides by on-line solid phase extraction coupled with mass spectrometry and their behaviour in wastewater and surface water. In: *Environmental Pollution* 158 (10), S. 3054–3064.
- StaBu (Statistisches Bundesamt) (2013): Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung 2010. Fachserie 19 Reihe 2.1.2. Wiesbaden, 05.08.2013.
- StaBu (Statistisches Bundesamt) (2018): Öffentliche Wasserversorgung und öffentliche Abwasserentsorgung. Fachserie 19 Reihe 2.1.2, 18.12.2018.

Strāķe, S.; Poikāne, R.; Putna, I.; Pfeifere, M.; Jansons, M.; Balode, M. et al. (2011): WP3 Innovative Approaches To Chemical Controls Of Hazardous Substances. National Report Of Latvia. COHIBA (Control of Hazardous Substances in the Baltic Sea Region). Latvia, 2011.

Umweltbundesamt (UBA) (2008): e-Kommunalabwasser. Daten der Länder zur Berichterstattung zur Kommunalabwasserrichtlinie (Datenstand 2008).

UBA (Umweltbundesamt) (2016): Bestandsaufnahme der Emissionen, Einleitungen und Verluste nach Art. 5 der RL 2008/105/EG bzw. § 4 Abs. 2 OGeV in Deutschland. Abschlussbericht. UBA-Texte 12/2016. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/bestandsaufnahme-der-emissionen-einleitungen>.

UBA (Umweltbundesamt) (2018): e-Kommunalabwasser. Daten der Länder zur Berichterstattung zur Kommunalabwasserrichtlinie (Datenstand 2014 und 2016).

Walz, A.; Wendel, T.; Zedda, M. (2014): Abschlussbericht zum Projekt „Schadstoff-Screening in Klärschlamm“. Hg. v. Zentrum für Angewandte Geowissenschaften. Universität Tübingen. Tübingen.

Wick, A.; Fink, G.; Ternes, T. A. (2010): Comparison of electrospray ionization and atmospheric pressure chemical ionization for multi-residue analysis of biocides, UV-filters and benzothiazoles in aqueous matrices and activated sludge by liquid chromatography–tandem mass spectrometry. In: Journal of Chromatography A (1217), S. 2088–2103.

Wicke, D.; Matzinger, A.; Rouault, P. (2016): Relevanz organischer Spurenstoffe im Regenwasserabfluss Berlins. Berlin, 2016.

Yu, Jing; Hu, Jianguyong; Tanaka, Shuhei; Fujii, Shigeo (2009): Perfluorooctane sulfonate (PFOS) and perfluorooctanoic acid (PFOA) in sewage treatment plants. In: Water Research 43 (9), S. 2399–2408. DOI: 10.1016/j.watres.2009.03.009.

A Anhang Materialien

A.1 Statistische Analysen zur Versuchsplanung des Kläranlagenmonitorings

Um das bevorstehende deutschlandweite Kläranlagen-Monitoring mit dem Ziel der Ableitung robuster mittlerer Ablaufinformationen optimal zu gestalten und statistisch robuste Werte zu erhalten, wurde eine Vorstudie zur Versuchsplanung in Form einer statistischen Auswertung durchgeführt. Die zu untersuchenden Kläranlagen sollen durch verschiedene Charakteristika wie u.a. spezifische Landnutzung im Einzugsgebiet, Verteilung von Misch- und Trennsystem, Industrieanteil oder Größe gekennzeichnet sein, um eine mögliche Differenzierung der mittleren Ablaufkonzentrationen in Abhängigkeit von möglichen Einflussgrößen zu analysieren. Für die Planung des Monitorings waren die folgenden Fragen zu beantworten:

- ▶ Gibt es Einflussgrößen, die einen hohen Anteil der Schwankungen stofflicher Ablaufkonzentrationen erklären?
- ▶ Wie viele Kläranlagen sollen beprobt werden, um die Repräsentativität der Stichprobe abzusichern?
- ▶ Wie viele Proben sollen pro Stoff an jeder Kläranlage genommen werden, um einen robusten Mittelwert zu erhalten?

A.1.1 Datenbasis

Als Datengrundlage für die statistischen Analysen zur Versuchsplanung wurde, da für prioritäre Stoffe kein ausreichend großer und vergleichbarer Datensatz vorliegt, der Datensatz der Berichterstattung nach Kommunalabwasserrichtlinie (UWWTD) für das Jahr 2010 verwendet (UBA 2013). Eine zu geringe Datenbasis und teilweise systematische Fehler (bspw. bezogen auf unterschiedliche Probenahme, analytische Methoden und Bestimmungsgrenzen und unzureichende Dokumentation) führen zwangsläufig zu Fehleinschätzungen. Der Datensatz nach UWWTD weist die erläuterten Schwierigkeiten nicht in dem Maße auf. Um erste Anhaltspunkte für relevante Einflussgrößen auf die Stoffkonzentrationen im Abwasser von Kläranlagen zu erhalten, wurde die Fragestellung daher zuerst für den Parameter Stickstoff (N) anhand des umfangreichen, gut dokumentierten Datensatzes der UWWTD untersucht. In einem zweiten Schritt wurde die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf prioritäre Stoffe geprüft.

Für das Jahr 2010 waren deutschlandweit Informationen zu 3.981 Kläranlagen mit einer Nominalbelastung ≥ 2.000 EW (Einwohnerwerte) verfügbar. Für diese Anlagen sind Informationen zu Ausbaugröße, Abwassermenge, Informationen zur technischen Abwasserbehandlung von Stickstoff sowie Stickstofffrachten im Zu- und Ablauf verfügbar. Die Anlagen wurden nach Größenklasse (GK) geclustert³. Aus Ablauffrachten und Abwassermengen wurden Ablaufkonzentrationen berechnet sowie der Quotient aus der Abwassermenge und der Abwasserlast (EW) zur Normierung gebildet. Informationen zum Jahresniederschlag wurden den Anlagenstandorten zugewiesen. Darüber hinaus wurde über die Gemeindezugehörigkeit für jede Anlage der Anteil des Misch- und Trennsystems am Kanalnetz berechnet. Die Zuordnung

³Größenklasse 2: Ausbaugröße ≥ 2.000 EW und ≤ 5.000 EW;
 Größenklasse 3: Ausbaugröße > 5.000 EW und ≤ 10.000 EW;
 Größenklasse 4: Ausbaugröße > 10.000 EW und ≤ 100.000 EW; und
 Größenklasse 5: Ausbaugröße > 100.000 EW.

hat jedoch nur eingeschränkte Aussagekraft, da das genaue Einzugsgebiet der Kläranlagen aus den verfügbaren Daten nicht hervorgeht. Informationen zu anderen möglicherweise relevanten Charakteristika des Einzugsgebiets der Kläranlagen, z.B. spezifische Landnutzung im Einzugsgebiet oder Industrieanteil, konnten aufgrund fehlender Datengrundlagen nicht berücksichtigt werden.

A.1.2 Statistische Analyse

Regressionsanalyse

Für die Analyse wurde der Parameter Stickstoff (N) gewählt, da die Ablaufkonzentration von Stickstoff weit weniger durch betriebliche Eingriffe verändert wird als die Ablaufkonzentration von Phosphor. Kläranlagenspezifische und einzugsgebietsabhängige Einflüsse sollten daher am ehesten anhand des Stickstoffs identifizierbar sein.

Datentransformation

Da die Stickstoffkonzentrationen nicht normalverteilt sind, sondern die Verteilungskurve stark rechtsschief ist, wurden die logarithmierten Werte als Zielgröße verwendet. Eine geringe Anzahl von Messwerten, die sehr nahe bei null liegen, wurde dabei ausgeschlossen. Die verbleibende Stichprobe hat einen Umfang von 3.974 Kläranlagen.

Methodik der Regressionsanalyse

In einem ersten Schritt wurden die Zusammenhänge zwischen der N-Ablaufkonzentration (Zielgröße) und den folgenden Regressoren (Einflussgrößen) statistisch geprüft:

- ▶ Abwasserlast,
- ▶ Ausbaugröße,
- ▶ Größenklasse,
- ▶ Auslastungsgrad,
- ▶ Art der Behandlung,
- ▶ Vorhandensein einer N-Technik und
- ▶ Anteil des Mischsystems.

Für das verwendete lineare Regressionsmodell wurden die Regressoren durch ein schrittweises Modellwahlverfahren mit dem Bayesschen Informationskriterium (BIC) festgelegt. Modellgüte und zunehmende Komplexität werden dabei gegeneinander aufgewogen, um die Modellgröße und die verwendeten Regressoren zu optimieren.

Ergebnis und Schlussfolgerung der Regressionsanalyse

Das Modellwahlverfahren zeigte, dass es eine Vielzahl von Einflussgrößen gibt, die eine gewisse Erklärungskraft haben. Im Zusammenspiel mit den anderen Regressoren wurden drei der oben genannten Einflussgrößen in das optimierte Modell aufgenommen, da ihre Modellkoeffizienten statistisch hoch signifikant von Null abweichen. Dabei handelt es sich um die Einflussgrößen:

- ▶ technische Ausstattung (d.h. Vorhandensein einer N-Technik),

- ▶ Größenklasse sowie
- ▶ Anteil des Mischsystems.

Eine Analyse der Residuen zeigte keine besonderen Auffälligkeiten.

Die vom Modell vorhergesagten (logarithmierten) mittleren N-Konzentrationen unterscheiden sich bei verschiedenen Konstellationen durchaus deutlich um Werte von 0,3 - 0,7, jedoch sind diese Werte im Verhältnis zu einem residualen Standardfehler von 0,65 zu sehen. Der multiple Korrelationskoeffizient von $|R| = 0,4$ (bzw. das Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,16$) zeigt, dass der Einfluss der Regressoren durchaus praxisrelevant ist. Allerdings wird anhand dieser Werte auch deutlich, dass das Modell weit davon entfernt ist, einen funktionalen Zusammenhang zwischen Kläranlagentyp und N-Konzentrationen zu liefern; hier überwiegen die Schwankungen der individuellen Messungen.

Es kann daher geschlussfolgert werden, dass selbst aus diesem umfangreichen und vergleichsweise gut dokumentierten Datensatz keine Hinweise zur Differenzierung der Kläranlagen nach bestimmten Charakteristika abgeleitet werden können. Damit kann kein klassisches Versuchsdesign mit verschiedenen Gruppen von Kläranlagen erstellt oder eine erforderliche Anzahl der in einem Monitoringvorhaben zu berücksichtigenden Anzahl von Anlagen festgelegt werden. Weitere Betrachtungen sind notwendig.

Wahrscheinlichkeitsanalyse

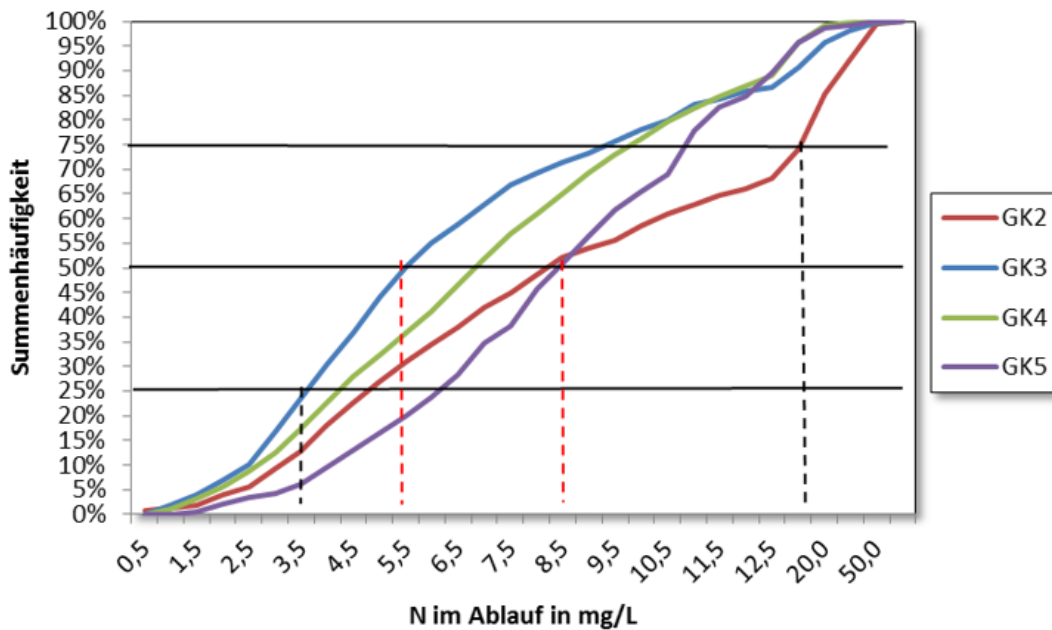
Die Verteilung der N-Ablaufkonzentrationen bildet die Grundlage für die Ableitung von Zielwerten (mit definierten Vertrauensbereichen) mittels Wahrscheinlichkeitsanalyse. Anhand dieser Zielwerte kann die Größe der Stichprobe der zu untersuchenden Kläranlagen ermittelt werden.

Methodik der Wahrscheinlichkeitsanalyse

Hierzu wurden anhand der Summenhäufigkeit für die erwarteten N-Ablaufkonzentrationen zwei Zielkorridore abgeleitet. Die Vorgehensweise ist anhand der N-Konzentrationen differenziert nach Größenklasse in Abbildung 40 dargestellt. Ein breiter und ein engerer Zielkorridor wurden abgeleitet:

- ▶ 5,5 bis 8,5 mg/l (Mediane der GK 2 bis 5)
- ▶ 3,5 bis 15 mg/l (niedrigstes, 1. Quartil und höchstes, 3. Quartil der betrachteten GK)

Abbildung 40: Summenhäufigkeit der Stickstoff-Konzentrationen im Kläranlagenablauf, differenziert nach Größenklassen



eigene Darstellung, KIT-IWG: Daten aus UBA (2013)

Um die Frage, wie groß der benötigte Stichprobenumfang sein muss, in einer ersten Approximation beantworten zu können, wurde der engere Zielkorridor für die Genauigkeit der Mittelwertschätzung (d) von $\log(8,5) - \log(5,5) = 0,44$ festgelegt.

Die übliche Form eines approximativen Konfidenzintervalls für den Erwartungswert einer Verteilung zu einer vorgegebenen Vertrauenswahrscheinlichkeit $1-\alpha$ lautet:

$$\left[\bar{x} - s \cdot \frac{z}{\sqrt{n}}, \bar{x} + s \cdot \frac{z}{\sqrt{n}}, \right],$$

mit:

- \bar{x} Mittelwert,
- s Standardabweichung,
- n Stichprobenumfang und
- z oberes $\alpha/2$ -Quantil der Standardnormalverteilung

Daraus lässt sich der benötigte Stichprobenumfang bezogen auf alle zu untersuchenden Kläranlagen bestimmen, wobei die Länge des Intervalls durch d beschränkt wird.

In einem ersten Schritt wurde mithilfe des approximativen Konfidenzintervalls der Stichprobenumfang geschätzt. Dabei wurden keine Regressoren berücksichtigt, so dass statistisch betrachtet eine Mischverteilung (unabhängig und identisch) über alle Kläranlagen untersucht wurde.

In einem zweiten Schritt wurden beispielhaft zwei Regressorkonstellationen berücksichtigt. Bei solchen linearen Modellen gibt es vergleichbare Konfidenzintervalle für den Erwartungswert der Zielgröße. In diesem Fall liegt keine explizite Abhängigkeit vom Stichprobenumfang vor, sondern eine kompliziertere Abhängigkeit von der Designmatrix. Dennoch können aus theoretischen Überlegungen Aussagen über benötigte Stichprobenumfänge bei strukturell

vergleichbaren Designs hergeleitet werden. Die benötigten Stichprobenumfänge hängen von der konkret betrachteten Konstellation der Regressoren ab (hier Kläranlagentyp), und sind größer, da die effektive Zahl der Messungen pro Gruppe kleiner ist.

Ergebnis und Schlussfolgerung der Wahrscheinlichkeitsanalyse

Unter Annahme einer Mischverteilung über alle Kläranlagen (keine Regressoren) im ersten Schritt resultierte aus dem Konfidenzintervall ein Stichprobenumfang von $n = 40$ bzw. $n = 70$ bei einer Vertrauenswahrscheinlichkeit von 0,95 bzw. 0,99. Bei diesen Stichprobenumfängen ist also die Ermittlung eines mittleren Konzentrationswertes über alle Kläranlagentypen hinweg mit der gewünschten Genauigkeit möglich.

Unter Berücksichtigung von zwei beispielhaften Regressorkonstellationen im zweiten Schritt ergaben sich für den betrachteten (kleinen) Wert $d=0,44$ Stichprobenumfänge von beispielsweise 72 und 453 Anlagen bei einer Vertrauenswahrscheinlichkeit von 0,95. Daraus folgt, dass die Erwartungswerte in einzelnen Unterklassen bei einem Stichprobenumfang von 50 Anlagen nur noch mit geringerer Genauigkeit geschätzt werden können.

Insgesamt ist zu beachten, dass auch bei den Modellen die Konvergenzgeschwindigkeit wie folgt beschrieben ist: das Vierteln eines Stichprobenumfangs von 200 auf 50 Proben führt nur zu einer Halbierung der Genauigkeit bzw. nur zu einer Verdoppelung der Intervalllänge.

Die Analyse hat gezeigt, dass man mit einem Stichprobenumfang von ca. 50 eine recht präzise Schätzung der mittleren N-Konzentration erhält, die außerdem erwarten lässt, dass die Einflüsse relevanter Regressoren zumindest qualitativ richtig beschrieben werden. Um eine ausreichend große Stichprobe für alle Merkmalskombinationen sicherzustellen, sollten möglichst wenige Merkmale (Einflussgrößen) in den Fokus gestellt werden. Darüber hinaus bildet der am schwierigsten zu erfassende Stoff den begrenzenden Parameter für den Umfang der Stichprobe.

A.1.3 Fazit und Empfehlungen für die Versuchsplanung

Aufgrund der sehr begrenzten Datengrundlage gestaltete sich die statistische Planung des Monitorings schwieriger als ursprünglich erwartet. Da keine ausreichend große, harmonisiert erhobene und dokumentierte Datenbasis zu Konzentrationen prioritärer Stoffe im Kläranlagenablauf vorlag, musste auf den umfassenden Datensatz der UWWTD mit N-Konzentrationen zurückgegriffen werden.

Aus dem Datensatz konnten keine relevanten Hinweise zur Differenzierung der Kläranlagen nach bestimmten Charakteristika abgeleitet werden, weshalb ein Versuchsdesign, welches bestimmte Merkmale von Kläranlagen oder Einzugsgebieten berücksichtigt, nicht sinnvoll erscheint. Zudem müsste der Stichprobenumfang stark erhöht werden, um eine ausreichend große Stichprobe pro Unterklasse zu gewährleisten. Eine explorative Analyse zur Untersuchung verschiedener Merkmale der Kläranlagen und zugehöriger Einzugsgebiete im Nachhinein bleibt dennoch möglich, auch wenn die Ergebnisse statistisch weniger belastbar sind. Somit kann mithilfe einer solchen explorativen Analyse möglicherweise trotzdem eine Differenzierung der Eintragsituation erfolgen.

Darüber hinaus bleibt zu überlegen, ob substanzspezifisches Umweltverhalten sowie Eintragspfade möglicherweise für den Eintrag in Gewässer entscheidender als die Charakteristika der Kläranlage sind. Gleichzeitig kann vermutet werden, dass möglicherweise eine große Anzahl unterschiedlicher Einflussgrößen bei den unterschiedlichen Stoffen zu betrachten sind.

Auch die Anzahl der benötigten Proben, um einen robusten Mittelwert zu bilden wurde aus dem Datensatz der UWWTD hergeleitet und mithilfe von Zielkorridoren ein Stichprobenumfang von 40 bis 70 Kläranlagen für Stickstoff-Konzentrationen ermittelt

Aus der statistischen Analyse ist abzuleiten, dass sich der bisher empfohlene Umfang von 50 zu untersuchenden Anlagen bestätigt. Des Weiteren wird ein vollständiges Beprobungsjahr mit einem monatlichen Beprobungszyklus (Erzeugung einer Mischprobe im Monat) vorgeschlagen, um auch saisonale Einflüsse, wie Fremdwasserzufluss, zu erfassen.

Um den möglichen Einfluss von Trenn- bzw. Mischkanalisation abbilden zu können, sollte die Stichprobe Anlagen enthalten, die eindeutig dem Trennsystem und eindeutig dem Mischsystem zuzuordnen sind. Für die Anlagen im Mischsystem sollte sowohl Regenwetter- als auch Trockenwetterabfluss beprobt werden, um den Probenumfang zu erhöhen und sichere Aussagen treffen zu können. Unter Annahme von 0 – 25 % Kläranlagen, die ausschließlich an die Trennkanalisation angeschlossen sind, ergibt sich bei monatlicher Beprobung von 50 Kläranlagen ein Probenumfang zwischen ca. 900 und 1.200 Proben pro Stoff.

Es wird empfohlen, dass sich die Anzahl der bundeslandspezifisch auszuwählenden Anlagen an der behandelten Abwassermenge im Bundesland im Vergleich zur insgesamt behandelten Abwassermenge orientiert. Es sollte ebenfalls berücksichtigt werden, dass Kläranlagen großer Größenklassen den mit Abstand größten Anteil des Abwassers behandeln.

A.2 Fragebogen zur Kläranlagencharakteristik zur Vorauswahl der Anlagen

Für alle zu untersuchenden Abwasserbehandlungsanlagen sollten zur Durchführung des abschließenden Auswahlverfahrens folgende Informationen einmalig mitgeliefert werden:

- ▶ Ausbaugröße der Kläranlage in Einwohnerwerten (EW)
- ▶ Reale Belastung der Kläranlage (behandelte Abwassermenge in Einwohnerwerten)
 - angeschlossene Einwohner
 - angeschlossene Einwohnergleichwerte (Gewerbe/Indirekteinleiteranteil)
- ▶ Art des Entwässerungssystems vor der Kläranlage (ggf. geschätzt)
 - Flächenanteil Mischsystem in %
 - Flächenanteil Trennsystem in %
- ▶ Realisierte Verfahrensstufen
 - Vorklärung vorhanden (Ja/Nein)
 - Phosphorelimination vorhanden (Ja/Nein)
 - ▶ chemisch (Ja/Nein)
 - ▶ biologisch (Ja/Nein)
 - eine der Nachklärung nachgeschaltete Filtration vorhanden (Ja/Nein)
- ▶ Besondere Reinigungsstufen (ggf. im Teilstrom)
- ▶ Fremdwasserbelastung
 - Art der Ermittlung des Fremdwasseranteils
 - Menge (z.B.: Fremdwasseranteil in v.H. der Jahresschmutzwassermenge)
- ▶ Besondere stoffliche Belastungen im Zulauf
- ▶ Nutzungsverteilung und Nutzungsschwerpunkte im Einzugsgebiet (Einzugsgebiet als angeschlossene Flächen (Kommunen, Ortsteile (versiegelte Flächen))) (ggf. geschätzt)
 - Anteil Abwasser aus landwirtschaftlichen Betrieben mit Anschluss an die Kanalisation in % im Einzugsgebiet der KA
 - Flächenanteil Siedlungsfläche in % im Einzugsgebiet der KA
 - Besonderheiten des Einzugsgebietes z.B. Weinanbau, Obstanbau
- ▶ Sind Gefriergeräte für die Probenlagerung verfügbar? (Ja/Nein)
- ▶ Sind ausreichend Gefrierkapazitäten vorhanden (ein bis drei 10 L-Edelstahlgefäße)? Ja/Nein und bitte angeben ob für 1x10 L bzw. 2x10 L und/oder 3x10 L

A.3 Erhebungsbogen zur Organisation, Kläranlagencharakteristik und Probenahme der ausgewählten Anlagen

Abbildung 41: Erhebungsbogen Kläranlagenmonitoring

Erhebungsbogen Kläranlagenmonitoring

1. - Organisatorisches -

Name der Kläranlage: _____

Straße _____ Hausnr. _____

PLZ _____ Ort _____

Tel _____ Fax _____

E-Mail _____

Anmerkungen zur Anfahrt _____

Adresse Anlieferung/Abholung der Probenahmekisten

(ausfüllen, wenn nicht mit Kläranlagenanschrift identisch)

Straße _____ Hausnr. _____

PLZ _____ Ort _____

Tel _____ Fax _____

E-Mail _____

Anmerkungen zur Anfahrt _____

Verantwortliche Person für Probenahme auf der Kläranlage:

Vorname _____ Name _____

Festnetz-Tel. _____ Mobil-Tel. _____

Vertretung:

Vorname _____ Name _____

Festnetz-Tel. _____ Mobil-Tel. _____

Verantwortliche Person für Probenversand:

Vorname _____ Name _____

Festnetz-Tel. _____ Mobil-Tel. _____

Vertretung:

Vorname _____ Name _____

Festnetz-Tel. _____ Mobil-Tel. _____

Probenkisten Anlieferung/ -abholung:

Mo – Do: von _____ bis _____ (Uhrzeit)

Fr: von _____ bis _____ (Uhrzeit)

Festlegung der Probenahmezuflüsse:

Trockenwetterzufluss (TW): _____ \leq m³/Tag

Regenwetterzufluss (RW): _____ \geq m³/Tag

Hinweis:

RW- Untergrenze sollte mehr als das 1,5-fache der TW- Obergrenze betragen!

Betriebsbedingungen während des Probenahmejahrs:

Sind während des Probenahmejahres (10/2017 – 09/2018) relevante Änderungen auf der Kläranlage oder im Einzugsgebiet zu erwarten?

(Baumaßnahmen, Änderungen im Regelbetrieb)

2 - Kläranlagencharakteristik -

Angaben bezogen auf das Jahr 2016

Ausbaugröße: _____ EGW

(1) Angeschlossene Einwohner: _____ EW

(2) Gesamtzulaufbelastung in BSB₆₀: _____
in CSB₁₂₀: _____

Angeschlossene, gewerbliche Zulaufbelastung:
als Differenz (2) - (1)

in BSB₆₀: _____
in CSB₁₂₀: _____

Jahresabwassermenge: _____ m³

Jahresschmutzwassermenge: _____ m³

mittlerer Tageszufluss: _____ m³/a

Flächenanteil Mischsystem: _____ %

Fremdwasseranteil von: _____ %

Angeschlossene Gesamtfläche: _____ ha

Angeschlossene versiegelte Fläche: _____ ha

Summe Speichervolumen Mischsystem: _____ m³

Besondere industriellen Einleiter (Bsp. Molkerei) _____

Verfahrensstufen:

- Rechen, Stababstand (in mm): _____
- Sandfang/Fettfang
- Vorklärung
- Vorgeschaltete Denitrifikation
- Nitrifikation/ Denitrifikation im BB

P-Fällung , Fällmittel: _____

Nachklärung

Schlammfäulung

Filtrationsstufe

(Schlamm-) Prozesswasserzugabe in _____

Polymerzugabe Überschussschlamm

Faulschlamm

Abweichende Verfahrensstufen: _____

Name des Einleitgewässers:

Verfahrenskennziffern:

Mittlere Aufenthaltszeit (in h)	TW	RW
Vorklärung		
Belebung		
Nachklärung		
Σ		

Mittleres Schlammalter (in Tagen): _____

Mittlerer feststoffgehalt BB (in gTR/l): _____

	Volumen in m ³ /d	TR in %	GV in %
Primärschlamm			
Faulschlamm			

3 - Routineprobenahme und Analysedaten -

Zulaufprobenahme:

Ort: _____

Mischprobenzeitraum: _____

Mischprobenanzahl pro Jahr: _____

Durchflussproportional Zeitproportional

Mischprobenvolumen (in l): _____

Abwasseranalysen Ø Jahr 2016 (Rohdaten)

n= Anzahl

Durchflussproportional Zeitproportional

Mischprobenvolumen (in l): _____

Ablaufprobenahme

Ort: _____

Mischprobenzeitraum: _____

Mischprobenanzahl pro Jahr: _____

	Zulauf		Ablauf	
	n	mg/l	n	mg/l
Abfiltrierbare Stoffe				
BSB ₅				
CSB				
TOC				
DOC				
NH ₄ - N				
NO ₂ - N				
NO ₃ - N				
N _{ges} , Ablauf: \sum N _{mineral}				
P _{ges}				

A.4 Untersuchte Regenwassereinleitungen (RKB) und Mischwasserentlastungen (RÜB)

Tabelle 53: Kennwerte der untersuchten Regenwassereinleitungen (RKB) und Mischwasserentlastungen (RÜB)

Kennwert	Einheit	RKB1	RKB2	RÜB1	RÜB2	RÜB3	RÜB4	RÜB5	RÜB6
Anzahl Proben	n	10	10	4	10	8	1	3	1
Standort	-	alleinstehend	vor Retentionsbodenfilter	auf der Kläranlage	auf der Kläranlage	auf der Kläranlage	kläranlagenfern	kläranlagenfern	auf der Kläranlage
Beckenart	-	Durchlaufbecken (DB), offen	Durchlaufbecken (DB), offen	Fangbecken (DB), offen	Durchlaufbecken (DB), offen	Durchlaufbecken (DB), offen	Durchlaufbecken (DB)	Fangbecken	Durchlaufbecken (DB)
Geometrie	-	Rechteckbecken	Rechteckbecken	zwei Rechteckbecken	Rechteckbecken	Rechteckbecken	Rechteckbecken, geschlossen	Rechteckbecken, geschlossen	Rundbecken, offen
Probenahme	-	Steuerungseinheit	automatischer Probenehmer	Steuerungseinheit	Steuerungseinheit	Steuerungseinheit	Steuerungseinheit	Steuerungseinheit	Steuerungseinheit
Becken-volumen	m ³	650	325	380	1.250	1.414	450	1.050	2.800
Abfluss-wirksame Fläche	ha	49	30	26	90	nicht bekannt	66	37	120
spezifisches Becken-volumen	m ³ /ha	13	11	15	14	nicht bekannt	22	53	23
Charakteristik EZG	-	städtisch, Industriegebiet	städtisch, Verkehrsflächen	städtisch	städtisch	städtisch	ländlich geprägtes Wohngebiet	ländlich geprägter Ortsteil	städtisch
Drossel-abfluss	l/s	keiner	keiner	242	500	330	64	60	240

Kennwert	Einheit	RKB1	RKB2	RÜB1	RÜB2	RÜB3	RÜB4	RÜB5	RÜB6
Verwendete Messsignale für die Ansteuerung der volumenproportionalen Beprobung und angewandte Abflussberechnung									
Messeinrichtung	-	NIVUS Durchflussmessung Zulauf	Abflussmessung im Zulaufkanal	Ultraschall-sonde am Klärüberlauf	Ultraschall-sonde am Klärüberlauf	Ultraschall-sonde am Klärüberlauf	Radarsonde	Ultraschall-sonde	Ultraschall-sonde
Signal	-	Durchfluss	Abflussmessung im Zulaufkanal	Wasserstand	Wasserstand	Wasserstand	Wasserstand	Winkel	Abfluss
Abflussberechnung	-	Linear	OCMpro	Poleni-Formel	Poleni-Formel	Polynom	Polynom	Lineare Kennlinie	Linear

A.5 Probenahmeprotokoll

Bei jeder Probenahme und für jede Mischprobe wird ein Probenahmeprotokoll erstellt, in dem die Entstehung der Mischprobe bis hin zum Probentransport dokumentiert wird.

Abbildung 42: Probennahmeprotokoll Kläranlagenmonitoring

Probenahmeprotokoll Kläranlagenmonitoring

Kläranlage:

Probenart: Trockenwetterbeprobung (TW)
 Regenwetterbeprobung (RW)
 keine Zuflussdifferenzierung (Trennsystem)

7-Tage-Mischproben-Nr.

24h-Teilprobe	Datum*	Probenehmer	Zufluss in m ³ /Tag
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			

* Datum der Abfüllung in 10l-Edelstahlkanne
 Festlegung bei Zuflussdifferenzierung:
 Trockenwetterzufluss: ≤ m³/Tag
 Regenwetterzufluss: ≥ m³/Tag

Bitte mailen oder faxen Sie das Probenahmeprotokoll an folgende Adresse:

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
 Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG)
 Fachbereich Siedlungswasser- und Wassergütewirtschaft
 Herr Philipp Witz
 Gotthard-Franz-Str. 3, Geb. 50.31
 76131 Karlsruhe
 Tel.: 01578/8062621
 Fax: 0721/608-44729
 email: philipp.witz@kit.edu

B Anhang Daten

B.1 Statistische Kenngrößen der Begleitparameter in Zu- und Ablauf der fünf Kläranlagen im Detailprogramm

Tabelle 54: Statistische Kenngrößen der Begleitparameter in Zu- und Ablauf der fünf Kläranlagen im Detailprogramm

Parameter	Anzahl Messwerte	Einheit	Minimum	25 %-Quantil	Median	Mittelwert	75 %-Quantil	Maximum
Zulauf								
Lf	96	μS/cm	595	1.067	1.274	1.371	1.551	2.990
Ks _{4,3}	96	mmol/l	0,62	6,15	7,14	7,67	9,76	13,50
AFS _{ges}	96	mg/l	64	126	172	186	230	365
GV AFS	96	%	41	60	73	69	78	85
CSB _{gel}	96	mg/l	42	87	139	166	194	593
CSB _{ges}	96	mg/l	108	246	357	427	569	1.154
NH ₄ -N	96	mg/l	8	19	29	39	51	108
NO ₂ -N	32	mg/l	0,01	0,03	0,04	0,24	0,31	1,67
NO ₃ -N	96	mg/l	0,02	0,07	0,11	0,54	0,55	3,74
N _{org}	96	mg/l	16	29	48	52	68	138
N _{ges}	96	mg/l	28	50	77	91	118	245
PO ₄ -P	96	mg/l	1,2	2,0	4,0	4,1	5,3	11,9
P _{ges}	96	mg/l	1,8	3,6	6,6	6,7	9,1	18,8

Parameter	Anzahl Messwerte	Einheit	Minimum	25 %-Quantil	Median	Mittelwert	75 %-Quantil	Maximum
Eisen	96	mg/l	0,25	0,68	0,89	1,33	1,47	5,78
Zink	96	mg/l	0,05	0,13	0,18	0,23	0,23	1,73
Ablauf								
Lf	100	µS/cm	593	921	1.049	1.120	1.166	2.460
Ks _{4,3}	100	mmol/l	1,2	2,1	2,5	2,6	3,0	4,3
CSB _{ges}	100	mg/l	9,5	16,0	22,9	24,9	29,9	81,5
NH ₄ -N	100	mg/l	0,09	0,52	0,88	1,72	2,30	22,0
NO ₂ -N	33	mg/l	0,01	0,05	0,09	0,10	0,15	0,28
NO ₃ -N	100	mg/l	1,1	4,2	6,2	6,6	8,6	21,5
N _{org}	100	mg/l	1,1	1,4	1,4	4,2	4,7	56,0
N _{ges}	99	mg/l	1,6	6,2	8,8	11,6	13,1	67,6
P _{ges}	100	mg/l	0,04	0,21	0,32	0,36	0,44	1,18
Eisen	100	mg/l	0,01	0,04	0,07	0,15	0,23	0,61
Zink	100	mg/l	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04	0,07

LF = Leitfähigkeit, Ks_{4,3} = Säurekapazität, AFS_{ges} = abfiltrierbare Stoffe gesamt, GV AFS = Glühverlust der abfiltrierbare Stoffe gesamt, CSB_{gel} = Chemischer Sauerstoffbedarf gelöst, CSB_{ges} = Chemischer Sauerstoffbedarf gesamt, NH₄-N = Ammonium-Stickstoff, NO₂-N = Nitrit-Stickstoff, NO₃-N = Nitrat-Stickstoff, N_{org} = gesamter organischer Stickstoff, N_{ges} = Gesamtstickstoff, PO₄-P = Phosphat-Phosphor, P_{ges} = Gesamt-Phosphor.

B.2 Statistische Kenngrößen der Begleitparameter in den Schlämmen der fünf Kläranlagen im Detailprogramm

Tabelle 55: Statistische Kenngrößen der Begleitparameter in den Schlämmen der fünf Kläranlagen im Detailprogramm

Parameter	Anzahl Messwerte	Einheit	Minimum	25 %-Quantil	Median	Mittelwert	75 %-Quantil	Maximum
Primärschlamm								
Glühverlust	28	%	58	78	81	81	87	89
Gesamt-Phosphor	57	mg/g	3,3	6,0	7,4	8,7	11,4	19,5
Kupfer	57	mg/kg	105	145	179	201	252	395
Aluminium	57	mg/g	3,5	4,3	5,3	7,3	8,9	24,6
Eisen	57	mg/g	1,5	2,5	4,1	6,6	7,8	35,6
Zink	57	mg/kg	292	404	498	506	575	989
Überschussschlamm								
Glühverlust	29	%	56	64	70	68	72	80
Gesamt-Phosphor	62	mg/g	12	24	32	29	36	43
Eisen	62	mg/g	4	13	18	22	31	55
Zink	62	mg/kg	275	522	630	666	827	1.125

B.3 Statistische Kenngrößen der gemessenen Schadstoffkonzentrationen

B.3.1 Konzentrationen im Zulauf der fünf untersuchten Kläranlagen

Tabelle 56: Statistische Kenngrößen der gemessenen Schadstoffkonzentrationen im Zulauf der fünf untersuchten Kläranlagen

Stoffe	Anzahl Messwerte	Anzahl > BG	BG (µg/l)	Minimum (µg/l)	10 %-Quantil (µg/l)	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	90 %-Quantil (µg/l)	Maximum (µg/l)	Schiefe	Varianzkoeffizient
Blei	96	95	0,1	< BG	1,85	2,3	3,1	3,9	4,9	6,5	30	5,0	0,86
Cadmium	96	95	0,002	< BG	0,07	0,09	0,11	0,12	0,14	0,18	0,49	2,7	0,52
Nickel	96	96	1	1,4	3,95	4,9	6,3	8,2	8,8	15	32	2,3	0,69
Quecksilber	96	95	0,001	< BG	0,015	0,019	0,029	0,036	0,043	0,064	0,17	2,3	0,75
4-iso-Nonylphenol	96	95	0,1	< BG	0,15	0,18	0,24	0,28	0,3125	0,50	0,94	1,8	0,53
4-tert.-Oktylphenol	96	11	0,05	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,05	0,38	8,3	1,16
Di-(2-ethylhexyl)phthalat	96	96	0,25	3,7	5,2	7,8	14	16	19	27	90	3,0	0,77
HBCDD (Summe)	96	36	0,01	< BG	< BG	< BG	< BG	0,01	0,012	0,0175	0,1	5,4	1,15
Perfluorbutanoat	96	24	0,01	< BG	< BG	< BG	< BG	0,0114	< BG	0,024	0,092	3,0	1,37
Perfluorpentanoat	96	1	0,01	-	-	-	-	-	-	-	0,05	-	-
Perfluorhexanoat	96	6	0,01	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,067	8,6	1,08
Perfluorheptanoat	96	3	0,01	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,027	5,4	0,63
Perfluoroctanoat	96	11	0,01	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,0125	0,11	4,9	1,81
Perfluornonanoat	96	1	0,01	-	-	-	-	-	-	-	0,051	-	-

Stoffe	Anzahl Messwerte	Anzahl > BG	BG (µg/l)	Minimum (µg/l)	10 %-Quantil (µg/l)	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	90 %-Quantil (µg/l)	Maximum (µg/l)	Schiefe	Varianzkoeffizient
Perfluordecanoat	96	2	0,01	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,024	8,5	0,39
Perfluorundecanoat	96	0	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Perfluordodecanoat	96	0	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Perfluorbutansulfonat	96	17	0,01	< BG	< BG	< BG	< BG	0,0157	< BG	0,035	0,17	3,5	2,02
Perfluorpentansulfonat	96	0	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Perfluorhexansulfonat	96	2	0,01	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,022	6,6	0,46
Perfluorheptansulfonat	96	0	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Perfluoroctansulfonat	96	12	0,01	< BG	< BG	< BG	< BG	0,0117	< BG	0,0175	0,17	4,7	2,23
Perfluordecansulfonat	96	0	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonat	96	10	0,01	< BG	< BG	< BG	< BG	0,0195	<BG	0,009	0,58	6,1	3,62
Naphthalin	96	56	0,025	< BG	< BG	< BG	0,028	0,034	0,043	0,053	0,39	6,1	1,28
Acenaphthylen	96	83	0,0025	< BG	< BG	0,003	0,0054	0,007	0,007	0,0125	0,044	3,2	0,96
Acenaphthen	96	96	0,0025	0,0043	0,0072	0,011	0,013	0,017	0,018	0,0235	0,14	5,5	1,11
Fluoren	96	96	0,0025	0,0059	0,008	0,011	0,0135	0,016	0,018	0,0225	0,1	4,3	0,74
Phenanthren	96	96	0,0025	0,011	0,0325	0,041	0,0615	0,078	0,089	0,12	0,6	4,7	0,92
Anthracen	96	79	0,0025	< BG	< BG	0,0029	0,0056	0,010	0,013	0,021	0,09	3,2	1,29
Fluoranthren	96	96	0,0025	0,02	0,025	0,031	0,047	0,082	0,086	0,15	1,1	6,1	1,51
Pyren	96	95	0,0025	< BG	0,023	0,029	0,0435	0,067	0,071	0,12	0,79	5,8	1,35
Benzo[a]anthracen	96	96	0,0025	0,0049	0,0067	0,0094	0,0145	0,0293	0,03	0,058	0,48	6,6	1,81

Stoffe	Anzahl Messwerte	Anzahl > BG	BG (µg/l)	Minimum (µg/l)	10 %-Quantil (µg/l)	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	90 %-Quantil (µg/l)	Maximum (µg/l)	Schiefe	Varianzkoeffizient
Chrysen	96	96	0,0025	0,0095	0,012	0,0148	0,024	0,042	0,04	0,0835	0,68	6,8	1,75
Benzo[b]fluoranthen	96	96	0,0025	0,0045	0,0071	0,009	0,015	0,028	0,025	0,0635	0,39	5,4	1,65
Benzo[k]fluoranthen	96	88	0,0025	< BG	0,0029	0,0038	0,0062	0,0125	0,012	0,027	0,17	5,1	1,66
Benzo[a]pyren	96	96	0,0013	0,0035	0,0057	0,0073	0,011	0,025	0,022	0,0585	0,34	5,0	1,67
Dibenz[a,h]anthracen	96	41	0,0025	< BG	< BG	< BG	< BG	0,005	0,004	0,013	0,091	6,3	2,08
Indeno[1,2,3-cd]pyren	96	96	0,0013	0,0025	0,0048	0,0062	0,0096	0,0204	0,018	0,047	0,26	4,7	1,62
Benzo[g,h,i]perylene	96	96	0,0013	0,0038	0,0061	0,0077	0,012	0,022	0,02	0,052	0,25	4,5	1,46
Aclonifen	96	1	0,05	-	-	-	-	-	-	-	0,098	-	-
Atrazin	96	1	0,01	-	-	-	-	-	-	-	0,03	-	-
Bifenox	96	0	0,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
cis-Heptachlorepoxyd	96	0	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cybutryn	96	0	0,025	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cypermethrin, gesamt	96	15	0,013	< BG	< BG	< BG	< BG	0,009	0,0065	0,0175	0,057	4,0	0,80
Dichlorvos	96	0	0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dicofol	96	0	0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Diuron	96	43	0,01	< BG	< BG	< BG	< BG	0,0135	0,02	0,0305	0,052	1,4	0,90
Heptachlor	96	0	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Isoproturon	96	79	0,01	< BG	< BG	0,014	0,0275	0,033	0,048	0,063	0,13	1,1	0,76
Quinoxifen	96	0	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Stoffe	Anzahl Messwerte	Anzahl > BG	BG (µg/l)	Minimum (µg/l)	10 %-Quantil (µg/l)	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	90 %-Quantil (µg/l)	Maximum (µg/l)	Schiefe	Varianzkoeffizient
Terbutryn	96	89	0,01	< BG	0,0125	0,024	0,0515	0,06	0,075	0,11	0,38	2,8	0,90
trans-Heptachlorepoxyd	96	0	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

BG = Bestimmungsgrenze

B.3.2 Konzentrationen im Ablauf der 49 untersuchten Kläranlagen

Tabelle 57: Statistische Kenngrößen der gemessenen Schadstoffkonzentrationen im Ablauf der 49 untersuchten Kläranlagen

Stoffe	Anzahl Messwerte	Anzahl > BG	BG (µg/l)	Minimum (µg/l)	10 %-Quantil (µg/l)	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	90 %-Quantil (µg/l)	Maximum (µg/l)	Schiefe	Varianz-koeffizient
Blei	1.000	679	0,1	< BG	< BG	< BG	0,14	0,18	0,22	0,33	7	15,2	1,58
Cadmium	1.000	930	0,002	< BG	0,002	0,003	0,006	0,009	0,01	0,015	1	23,5	3,83
Nickel	1.000	998	1	< BG	2,3	3,1	4,4	4,8	5,9	7,6	18	1,6	0,50
Quecksilber	1.000	891	0,001	< BG	< BG	0,001	0,002	0,006	0,003	0,005	1,1	17,6	8,89
4-iso-Nonylphenol	999	569	0,04	< BG	< BG	< BG	0,043	0,115	0,065	0,18	3,4	6,4	2,84
4-tert.-Oktylphenol	999	271	0,02	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,021	0,033	0,2	4,8	1,15
Di-(2-ethylhexyl)phthalat	999	995	0,1	< BG	0,56	0,95	1,7	3,1	3,0	6,4	120	10,5	2,13
HBCDD (Summe)	1.000	8	0,005	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,047	17,8	0,74
Perfluorbutanoat	1.000	912	0,001	< BG	0,001	0,002	0,004	0,0068	0,0073	0,012	0,22	8,8	1,85
Perfluorpentanoat	1.000	889	0,001	< BG	< BG	0,002	0,004	0,0083	0,006	0,013	0,36	9,6	3,17
Perfluorhexanoat	1.000	979	0,001	< BG	0,002	0,004	0,006	0,0176	0,01	0,018	0,72	6,4	3,11
Perfluorheptanoat	1.000	582	0,001	< BG	< BG	< BG	0,001	0,0020	0,002	0,004	0,032	4,5	1,32
Perfluoroctanoat	1.000	898	0,001	< BG	< BG	0,004	0,006	0,0093	0,008	0,011	0,26	7,6	2,62
Perfluornonanoat	1.000	165	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,001	0,012	6,3	1,28
Perfluordecanoat	1.000	238	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	0,0011	< BG	0,002	0,017	5,3	1,57
Perfluorundecanoat	1.000	2	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,001	22,3	0,04

Stoffe	Anzahl Mess-werte	Anzahl > BG	BG (µg/l)	Minimum (µg/l)	10 %-Quantil (µg/l)	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	90 %-Quantil (µg/l)	Maximum (µg/l)	Schiefe	Varianz-koeffizient
Perfluordodecanoat	1.000	4	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,006	18,9	0,52
Perfluorbutansulfonat	1.000	885	0,001	< BG	< BG	0,002	0,003	0,0074	0,006	0,013	0,15	5,2	2,07
Perfluorpentansulfonat	1.000	16	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	15,1	0,46
Perfluorhexansulfonat	1.000	329	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	0,0016	0,002	0,004	0,035	4,5	1,59
Perfluorheptansulfonat	1.000	16	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,006	14,5	0,49
Perfluoroctansulfonat	1.000	840	0,001	< BG	< BG	0,002	0,003	0,0079	0,006	0,011	0,82	18,3	4,01
Perfluordecansulfonat	1.000	0	0,001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonat	1.000	234	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,003	0,087	11,4	3,29
Naphthalin	999	432	0,01	< BG	< BG	< BG	< BG	0,01	0,013	0,018	0,065	2,3	0,71
Acenaphthylen	999	303	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,0011	0,0017	0,007	2,7	0,81
Acenaphthen	999	629	0,001	< BG	< BG	< BG	0,0012	0,0023	0,0021	0,0044	0,095	11,2	2,30
Fluoren	999	861	0,001	< BG	< BG	0,0012	0,0016	0,0022	0,0023	0,0037	0,08	14,5	1,76
Phenanthren	1.000	972	0,001	< BG	0,002	0,0029	0,0043	0,0058	0,0063	0,0098	0,13	11,2	1,48
Anthracen	999	38	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,013	13,4	1,19
Fluoranthren	999	834	0,001	< BG	< BG	0,0013	0,0021	0,0037	0,0036	0,0062	0,11	7,3	1,80
Pyren	999	804	0,001	< BG	< BG	0,0012	0,0019	0,0031	0,0031	0,0056	0,076	6,7	1,55
Benzo[a]anthracen	999	137	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	0,0009	< BG	0,0012	0,061	18,3	2,77
Chrysen	999	331	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	0,0013	0,0012	0,0022	0,1	17,6	3,03
Benzo[b]fluoranthren	999	148	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	0,001	< BG	0,0014	0,083	19,7	3,31

Stoffe	Anzahl Messwerte	Anzahl > BG	BG (µg/l)	Minimum (µg/l)	10 %-Quantil (µg/l)	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	90 %-Quantil (µg/l)	Maximum (µg/l)	Schiefe	Varianzkoeffizient
Benzo[k]fluoranthren	999	46	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,038	21,2	2,18
Benzo[a]pyren	999	327	0,0005	< BG	< BG	< BG	< BG	0,0007	0,0006	0,0012	0,057	18,8	3,26
Dibenz[a,h]anthracen	999	14	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,014	24,0	0,91
Indeno[1,2,3-cd]pyren	999	227	0,0005	< BG	< BG	< BG	< BG	0,0006	< BG	0,0009	0,053	20,2	3,47
Benzo[g,h,i]perylene	999	273	0,0005	< BG	< BG	< BG	< BG	0,0006	0,0005	0,001	0,05	19,3	3,22
Aclonifen	1.000	1	0,01	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,041	31,5	0,23
Atrazin	1.000	41	0,01	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,005	0,15	11,9	1,39
Bifenox	1.000	0	0,004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
cis-Heptachlorepoxyd	1.000	0	0,004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cybutryn	1.000	35	0,005	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,059	14,5	0,87
Cypermethrin, gesamt	999	0	0,005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dichlorvos	1.000	4	0,01	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,52	31,5	2,94
Dicofol	999	0	0,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Diuron	1.000	712	0,01	< BG	< BG	< BG	0,016	0,023	0,028	0,043	0,59	9,4	1,52
Heptachlor	999	0	0,004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Isoproturon	1.000	699	0,01	< BG	< BG	< BG	0,019	0,047	0,036	0,0661	5,2	16,1	5,45
Quinoxifen	1.000	0	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Terbutryn	1.000	893	0,01	< BG	< BG	0,018	0,035	0,044	0,055	0,086	0,29	2,6	0,91
trans-Heptachlorepoxyd	1.000	0	0,004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

B.3.3 Konzentrationen im Primärschlamm der fünf im Detail untersuchten Kläranlagen

Tabelle 58: Statistische Kenngrößen der gemessenen Schadstoffkonzentrationen im Primärschlamm der fünf untersuchten Kläranlagen

Stoffe	Einheit	Anzahl Messwerte	Anzahl > BG	BG (µg/l)	Minimum (µg/l)	10 %-Quantil (µg/l)	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	90 %-Quantil (µg/l)	Maximum (µg/l)	Schiefe	Varianzkoeffizient
Blei	mg/kg	57	57	1	8	9,12	10	14	18	22	27,8	77	2,8	0,65
Cadmium	mg/kg	57	57	0,1	0,17	0,27	0,32	0,43	0,5	0,5	0,65	1,8	2,8	0,62
Nickel	mg/kg	57	57	1	5,2	7,0	10	13	16	19	23	80	3,4	0,73
Quecksilber	mg/kg	57	55	0,01	< BG	0,116	0,14	0,19	0,3	0,37	0,494	1,9	3,8	0,96
4-iso-Nonylphenol	µg/kg	57	56	100	< BG	176	250	350	448	500	1.028	1.300	1,3	0,70
4-tert.-Oktylphenol	µg/kg	57	1	50	-	-	-	-	-	-	-	52	-	-
Di-(2-ethylhexyl)phthalat	mg/kg	57	57	0,5	3,1	6,9	9,5	11	12	15	16	25	0,8	0,37
HBCDD (Summe)	µg/kg	57	53	10	< BG	10,6	15	26	43	36	89	300	3,0	1,35
Perfluorbutanoat	µg/kg	57	3	1	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	5	6,9	1,01
Perfluorpentanoat	µg/kg	57	1	1	-	-	-	-	-	-	-	6	-	-
Perfluorhexanoat	µg/kg	57	1	1	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-
Perfluorheptanoat	µg/kg	57	1	1	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-
Perfluoroctanoat	µg/kg	57	3	1	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	7	7,0	1,37
Perfluornonanoat	µg/kg	57	0	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Perfluordecanoat	µg/kg	57	1	1	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	3	7,2	0,61
Perfluorundecanoat	µg/kg	57	0	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Perfluordodecanoat	µg/kg	57	0	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Perfluorbutansulfonat	µg/kg	57	0	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Perfluorpentansulfonat	µg/kg	57	0	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Stoffe	Einheit	Anzahl Messwerte	Anzahl > BG	BG (µg/l)	Minimum (µg/l)	10 %-Quantil (µg/l)	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	90 %-Quantil (µg/l)	Maximum (µg/l)	Schiefe	Varianz-koeffizient
Perfluorhexansulfonat	µg/kg	57	0	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Perfluorheptansulfonat	µg/kg	57	0	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Perfluoroctansulfonat	µg/kg	57	33	1	< BG	< BG	< BG	2	4,3	4	8,8	50	3,5	2,05
Perfluordecansulfonat	µg/kg	57	0	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonat	µg/kg	57	4	1	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	7	4,2	1,46
Naphthalin	µg/kg	57	51	20	< BG	20	39	67	218	270	616	1300	2,1	1,45
Acenaphthylen	µg/kg	57	20	20	< BG	< BG	< BG	< BG	29	30	82	170	2,2	1,28
Acenaphthen	µg/kg	57	23	20	< BG	< BG	< BG	< BG	25	28	43	280	5,0	1,55
Fluoren	µg/kg	57	36	20	< BG	< BG	< BG	23	42	51	114	190	1,8	1,11
Phenanthren	µg/kg	57	57	20	50	71	100	160	193	230	318	850	2,4	0,75
Anthracen	µg/kg	57	37	20	< BG	< BG	< BG	24	30	41	61	110	1,4	0,77
Fluoranthen	µg/kg	57	57	20	82	110	140	180	225	250	328	1.300	4,2	0,82
Pyren	µg/kg	57	57	20	63	99	120	160	190	220	264	860	3,5	0,66
Benzo[a]anthracen	µg/kg	57	57	20	34	40	48	67	81	83	114	590	5,1	0,96
Chrysen	µg/kg	57	56	20	< BG	57	75	100	118	120	170	830	4,9	0,95
Benzo[b]fluoranthren	µg/kg	57	57	20	34	45	54	69	87	89	124	590	4,9	0,91
Benzo[k]fluoranthren	µg/kg	57	50	20	< BG	< BG	25	31	40	40	58	270	4,4	0,95
Benzo[a]pyren	µg/kg	57	57	20	21	36	45	58	72	80	110	430	4,2	0,83
Dibenz[a,h]anthracen	µg/kg	57	6	20	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	100	5,6	0,99
Indeno[1,2,3-cd]pyren	µg/kg	57	57	20	20	29	36	45	56	56	82	340	4,5	0,84
Benzo[g,h,i]perylen	µg/kg	57	57	20	24	34	45	58	68	76	96	340	3,7	0,73

Stoffe	Einheit	Anzahl Messwerte	Anzahl > BG	BG (µg/l)	Minimum (µg/l)	10 %-Quantil (µg/l)	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	90 %-Quantil (µg/l)	Maximum (µg/l)	Schiefe	Varianzkoeffizient
Aclonifen	µg/kg	57	0	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Atrazin	µg/kg	57	0	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bifenox	µg/kg	57	0	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
cis-Heptachlorepoxyd	µg/kg	57	0	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cybutryn	µg/kg	57	0	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cypermethrin, gesamt	µg/kg	57	0	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dichlorvos	µg/kg	57	0	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dicofol	µg/kg	57	0	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Diuron	µg/kg	57	8	10	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	14,4	50	3,6	1,06
Heptachlor	µg/kg	57	0	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Isoproturon	µg/kg	57	13	10	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	19	100	4,7	1,46
Quinoxifen	µg/kg	57	0	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Terbutryn	µg/kg	57	41	10	< BG	< BG	< BG	24	37,3	53	82,4	180	1,5	1,01
trans-Heptachlorepoxyd	µg/kg	57	0	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

BG = Bestimmungsgrenze

B.3.4 Konzentrationen Überschussschlamm der fünf im Detail untersuchten Kläranlagen

Tabelle 59: Statistische Kenngrößen der gemessenen Schadstoffkonzentrationen im Überschussschlamm der fünf untersuchten Kläranlagen

Stoffe	Einheit	Anzahl Messwerte	Anzahl > BG	BG (µg/l)	Minimum (µg/l)	10 %-Quantil (µg/l)	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	90 %-Quantil (µg/l)	Maximum (µg/l)	Schiefe	Varianzkoeffizient
Blei	mg/kg	65	65	1	7,1	11	13	22	23,3	30	38	73	1,3	0,50
Cadmium	mg/kg	65	65	0,1	0,24	0,374	0,49	0,56	0,64	0,77	0,96	2,4	3,1	0,47
Nickel	mg/kg	65	65	1	8,6	11	17	21	20	25	27	32	-0,2	0,29
Quecksilber	mg/kg	65	60	0,01	< BG	0,098	0,14	0,22	0,31	0,30	0,80	1,2	1,6	0,90
4-iso-Nonylphenol	µg/kg	65	44	100	< BG	< BG	< BG	130	216	290	454	970	1,8	0,99
4-tert.-Oktylphenol	µg/kg	65	1	50	-	-	-	-	-	-	-	54	-	-
Di-(2-ethylhexyl)phthalat	mg/kg	65	65	0,5	2,1	4,7	7,4	10	12	16	22	28	0,8	0,52
HBCDD (Summe)	µg/kg	65	61	10	< BG	13	15	19	24	29	39	100	2,5	0,61
Perfluorbutanoat	µg/kg	65	2	1	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	5	6,8	0,99
Perfluorpentanoat	µg/kg	65	2	1	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	2	5,3	0,48
Perfluorhexanoat	µg/kg	65	4	1	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	2	4,0	0,56
Perfluorheptanoat	µg/kg	65	0	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Perfluoroctanoat	µg/kg	65	8	1	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	1	3	3,2	0,73
Perfluorononanoat	µg/kg	65	3	1	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	2	5,0	0,48
Perfluordecanoat	µg/kg	65	56	1	< BG	< BG	2	3	4,13	5	9,6	17	1,6	0,91
Perfluorundecanoat	µg/kg	65	7	1	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	3	3,1	0,82
Perfluordodecanoat	µg/kg	65	16	1	< BG	< BG	< BG	< BG	0,95	< BG	2,6	5	2,6	1,11
Perfluorbutansulfonat	µg/kg	65	10	1	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	1	4	3,5	0,98

Stoffe	Einheit	Anzahl Messwerte	Anzahl > BG	BG (µg/l)	Minimum (µg/l)	10 %-Quantil (µg/l)	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	90 %-Quantil (µg/l)	Maximum (µg/l)	Schiefe	Varianzkoeffizient
Perfluorpentansulfonat	µg/kg	65	0	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Perfluorhexansulfonat	µg/kg	65	0	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Perfluorheptansulfonat	µg/kg	65	0	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Perfluoroctansulfonat	µg/kg	65	65	1	2	4	9	14	27	27	68,8	150	2,0	1,21
Perfluordecansulfonat	µg/kg	65	0	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonat	µg/kg	65	3	1	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	3	5,2	0,75
Naphthalin	µg/kg	65	43	20	< BG	< BG	< BG	29	50	49	112	390	2,9	1,36
Acenaphthylen	µg/kg	65	16	20	< BG	< BG	< BG	< BG	20	< BG	48	130	2,8	1,11
Acenaphthen	µg/kg	65	3	20	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	34	4,9	0,34
Fluoren	µg/kg	65	10	20	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	23	48	2,7	0,60
Phenanthren	µg/kg	65	63	20	< BG	30	42	58	66	78	110	170	1,1	0,53
Anthracen	µg/kg	65	15	20	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	31	66	2,6	0,74
Fluoranthen	µg/kg	65	65	20	20	50	85	130	145	170	256	450	1,2	0,60
Pyren	µg/kg	65	64	20	< BG	< BG	79	130	136	190	230	370	0,6	0,57
Benzo[a]anthracen	µg/kg	65	57	20	< BG	< BG	33	49	58	66	120	220	1,5	0,74
Chrysen	µg/kg	65	60	20	< BG	26	52	83	91	110	180	320	1,3	0,68
Benzo[b]fluoranthen	µg/kg	65	61	20	< BG	25	45	62	82	91	178	330	1,8	0,78
Benzo[k]fluoranthen	µg/kg	65	50	20	< BG	< BG	20	29	39	42	89	170	1,9	0,86
Benzo[a]pyren	µg/kg	65	58	20	< BG	< BG	36	49	68	72	156	300	1,9	0,86
Dibenz[a,h]anthracen	µg/kg	65	12	20	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	32	83	2,9	0,88
Indeno[1,2,3-cd]pyren	µg/kg	65	57	20	< BG	< BG	32	42	59	66	126	270	2,0	0,88

Stoffe	Einheit	Anzahl Messwerte	Anzahl > BG	BG (µg/l)	Minimum (µg/l)	10 %-Quantil (µg/l)	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	90 %-Quantil (µg/l)	Maximum (µg/l)	Schiefe	Varianzkoeffizient
Benzo[g,h,i]perylen	µg/kg	65	59	20	< BG	23	38	54	72	87	168	310	1,9	0,83
Aclonifen	µg/kg	65	0	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Atrazin	µg/kg	65	0	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bifenox	µg/kg	65	0	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
cis-Heptachlorepoxyd	µg/kg	65	0	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cybutryn	µg/kg	65	0	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cypermethrin, gesamt	µg/kg	65	0	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dichlorvos	µg/kg	65	0	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dicofol	µg/kg	65	0	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Diuron	µg/kg	65	7	10	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	23	3,1	0,60
Heptachlor	µg/kg	65	0	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Isoproturon	µg/kg	65	25	10	< BG	< BG	< BG	< BG	12	16	25	110	4,1	1,25
Quinoxifen	µg/kg	65	0	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Terbutryn	µg/kg	65	53	10	< BG	< BG	12	31	45	65	113	170	1,4	0,96
trans-Heptachlorepoxyd	µg/kg	65	0	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

B.4 Vergleich ausgewählter statistischer Kennwerte der Ablaufkonzentrationen unterschiedlicher Studien

Tabelle 60: Vergleich ausgewählter statistischer Kennwerte der Ablaufkonzentrationen der Kläranlagen (KA) unterschiedlicher Studien

Stoffe	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	Min - Max (µg/l)	Bemerkung	Literaturquelle
Blei	0,14	0,18	0,05 - 7	49 KA, n=1000, 2017-2019, Deutschland	dieses Monitoring
	0,2	7,9		91 KA, 2001-2010, Sachsen	Engelmann et al. (2016)
	1,2			9 KA, 1 Jahr, Österreich	Clara et al. (2012)
Cadmium	0,006	0,009	0,001 - 1	49 KA, n=1000, 2017-2019, Deutschland	dieses Monitoring
		0,00083 - 0,013		2 KA, Österreich	Clara et al. (2014)
	< 0,03 - 0,5		n.n. - 24	91 KA, 2001-2010, Sachsen	Engelmann et al. (2016)
	0,010	0,094		9 KA, 1 Jahr, Österreich	Clara et al. (2012)
Nickel	4,4	4,786	0,5 - 18	49 KA, n=1000, 2017-2019, Deutschland	dieses Monitoring
		4,4 - 4,7		2 KA, Österreich	Clara et al. (2014)
	4,3		n.n. - 200	91 KA, 2001-2010, Sachsen	Engelmann et al. (2016)
	4,1	5,6		9 KA, 1 Jahr, Österreich	Clara et al. (2012)
Quecksilber	0,002	0,006	0,0005 - 1,1	49 KA, n=1000, 2017-2019, Deutschland	dieses Monitoring
		0,01		2 KA, Österreich	Clara et al. (2014)
	< 0,02 - 0,2		n.n. - 0,5	91 KA, 2001-2010, Sachsen	Engelmann et al. (2016)
	0,01			9 KA, 1 Jahr, Österreich	Clara et al. (2012)
4-iso-Nonylphenol	0,043	0,115	0,02 - 3,4	49 KA, n=999, 2017-2019, Deutschland	dieses Monitoring
			< 0,03 - 7,8	weltweit, Literaturzusammenfassung	Luo et al. (2014)

Stoffe	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	Min - Max (µg/l)	Bemerkung	Literaturquelle
	0,18	0,25		9 KA, 1 Jahr, Österreich	Clara et al. (2012)
		0,364 0,37 0,285		3 KA, Österreich	Clara et al. (2005)
Di-(2-ethylhexyl)phthalat	1,7	3,12	0,05 - 12	49 KA, n=999, 2017-2019, Deutschland	dieses Monitoring
		< 2			Schütte et al. (2017)
			0,0001 - 54	weltweit, Literaturzusammenfassung	Luo et al. (2014)
	0,52			9 KA, 1 Jahr, Österreich	Clara et al. (2012)
Perfluorbutanoat	0,004	0,007	0,0005 - 0,22	49 KA, n=1000, 2017-2019, Deutschland	dieses Monitoring
			0,005 - 0,019	40 KA, 2015-2016, Baden-Württemberg	Rau und Metzger (2017)
		< 0,002			Maus et al. (2016)
Perfluoroctanoat	0,006	0,009	0,0005 - 0,26	49 KA, n=1000, 2017-2019, Deutschland	dieses Monitoring
			0,005 - 0,025	40 KA, 2015-2016, Baden-Württemberg	Rau und Metzger (2017)
		0,019		2 KA, Österreich	Clara et al. (2014)
			0,0158 - 0,139 0,0774 - 1,057	2 KA, 2006-2007, Singapur	Yu et al. (2009)
Perfluorbutansulfonat	0,003	0,007	0,0005 - 0,15	49 KA, n=1000, 2017-2019, Deutschland	dieses Monitoring
			0,011 - 0,05	40 KA, 2015-2016, Baden-Württemberg	Rau und Metzger (2017))
Perfluoroctansulfonat	0,003	0,008	0,0005 - 0,82	49 KA, n=1000, 2017-2019, Deutschland	dieses Monitoring
			0,005 - 0,04	40 KA, 2015-2016, Baden-Württemberg	Rau und Metzger (2017)
		0,007			Maus et al. (2016)

Stoffe	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	Min - Max (µg/l)	Bemerkung	Literaturquelle
		0,013		2 KA, Österreich	Clara et al. (2014)
			0,0073 - 0,017 0,096 - 0,462	2 KA, 2006-2007, Singapur	Yu et al. (2009)
Acenaphthen	0,001	0,002	0,0005 - 0,095	49 KA, n=999, 2017-2019, Deutschland	dieses Monitoring
		0,023		2 KA, Österreich	Clara et al. (2014)
		< 0,005		5 KA, Baden-Württemberg	Walz et al. (2014)
Fluoren	0,002	0,002	0,0005 - 0,08	49 KA, n=999, 2017-2019, Deutschland	dieses Monitoring
			0,0028 - 0,0084	2 KA, Österreich	Clara et al. (2014)
		0,100		30 KA, 2011, Andalusien	Barco-Bonilla et al. (2013)
		< 0,005		5 KA, Baden-Württemberg	Walz et al. (2014)
Phenanthren	0,004	0,006	0,0005 - 0,13	49 KA, n=1000, 2017-2019, Deutschland	dieses Monitoring
		<0,05			Schütte et al. (2017)
		0,007		5 KA, Baden-Württemberg	Walz et al. (2014)
		0,020		30 KA, 2011, Andalusien	Barco-Bonilla et al. (2013)
		< 0,005		5 KA, Baden-Württemberg	Walz et al. (2014)
	0,003		n.n. - 0,42	92 KA, 2001-2010, Sachsen	Engelmann et al. (2016)
Pyren	0,002	0,003	0,0005 - 0,076	49 KA, n=999, 2017-2019, Deutschland	dieses Monitoring
		0,020		30 KA, 2011, Andalusien	Barco-Bonilla et al. (2013)
			0,0022 - 0,0055	2 KA, Österreich	Clara et al. (2014)
		< 0,005		5 KA, Baden-Württemberg	Walz et al. (2014)
Diuron	0,016	0,023	0,005 - 0,59	49 KA, n=1000, 2017-2019, Deutschland	dieses Monitoring

Stoffe	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	Min - Max (µg/l)	Bemerkung	Literaturquelle
		0,094		2 KA, Österreich	Clara et al. (2014)
		0,32		30 KA, 2011, Andalusien	Barco-Bonilla et al. (2013)
			0,002 - 2,53	weltweit, Literaturzusammenfassung	Luo et al. (2014)
	0,014		n.n. - 6,6	92 KA, 2001-2010, Sachsen	Engelmann et al. (2016)
		0,127		3 KA, 2007-2009, Katalonien	Köck-Schulmeyer et al. (2013)
		0,07 ± 0,041		1 KA, 2009-2010, Schweiz	Margot et al. (2013)
	0,040	0,073		9 KA, 1 Jahr, Österreich	Clara et al. (2012)
		0,19 ± 0,23		1 KA, 2009, Schweiz	Morasch et al. (2010)
		0,025 ± 0,004 0,182 ± 0,015		2 KA, 2009, Koblenz	Wick et al. (2010)
Isoproturon	0,019	0,047	0,005 - 5,2	49 KA, n=1000, 2017-2019, Deutschland	dieses Monitoring
		0,084		Mittelwert, 88 KA, 2001-2010, Sachsen	Engelmann (2016)
			0,0063 - 0,031	2 KA, Österreich	Clara et al. (2014)
		0,050		30 KA, 2011, Andalusien	Barco-Bonilla et al. (2013)
	0,009		n.n. - 15	92 KA, 2001-2010, Sachsen	Engelmann et al. (2016)
		0,039 ± 0,032		1 KA, 2009-2010, Schweiz	Margot et al. (2013)
		0,013		3 KA, 2007-2009, Katalonien	Köck-Schulmeyer et al. (2013)
	0,022			9 KA, 1 Jahr, Österreich	Clara et al. (2012)
		0,34 ± 0,47		1 KA, 2009, Schweiz	Morasch et al. (2010)
		0,058 ± 0,005 0,05 ± 0,002		KA, 2009, Koblenz	Wick et al. (2010)

Stoffe	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	Min - Max (µg/l)	Bemerkung	Literaturquelle
Terbutryn	0,035	0,044	0,005 - 0,29	49 KA, n=1000, 2017-2019, Deutschland	dieses Monitoring
		0,190			Schütte et al. (2017)
			0,029 - 0,095	40 KA, 2015-2016, Baden-Württemberg	Rau und Metzger (2017)
		0,041		94 KA, 2001-2010, Sachsen	Engelmann (2016)
		0,054			Maus et al. (2016)
	0,024		n.n. - 0,64	94 KA, 2001-2010, Sachsen	Engelmann et al. (2016)
		0,019 ± 0,016		1 KA, 2009-2010, Schweiz	Margot et al. (2013)
		0,39 ± 0,53		1 KA, 2009, Schweiz	Morasch et al. (2010)
	0,028 ± 0,004		2 KA, 2009, Koblenz	Wick et al. (2010)	
	0,0123 ± 0,007				

n.n = nicht nachweisbar

B.5 Begleitparameter: statistische Auswertung der Ergebnisse der Beprobung von Mischwässerentlastungen und Regenwassereinleitungen für die Datenkollektive der volumenproportionalen und problembehafteten Proben

B.5.1 Statistische Auswertung der volumenproportionalen Proben – Feststoff-Konzentrationen und Glühverlust

Tabelle 61: Statistische Auswertung der Feststoff-Konzentrationen und Glühverlust in den volumenproportionalen Proben von Regenwassereinleitungen und Mischwässerentlastungen

Parameter	Anzahl Messwerte	Einheit	Minimum	25 %-Quantil	Median	Mittelwert	75 %-Quantil	Maximum
Regenwassereinleitung								
TR > 2.000	17	mg/l	0	0	0	0,03	0	0,5
AFS _{ges}	17	mg/l	9,8	24	37	36	43	81
AFS _{grob}	17	mg/l	0,2	1,7	3,3	4,4	6,2	13
AFS ₆₃	17	mg/l	9,4	22	30	31	38	65
GV AFS _{grob}	17	%	38	44	53	58	62	100
GV AFS ₆₃	17	%	33	39	43	44	46	64
Mischwässerentlastung								
TR > 2.000	14	mg/l	0	0	0	0	0	0
AFS _{ges}	14	mg/l	18	40	56	63	89	110
AFS _{grob}	14	mg/l	1,2	7,1	13	17	24	39
AFS ₆₃	14	mg/l	10	34	49	51	71	96
GV AFS _{grob}	13	%	41	50	67	65	78	90
GV AFS ₆₃	13	%	23	44	59	54	64	78

TR > 2.000 µm = Trockenrückstand der abfiltrierbaren Stoffe größer 2000 µm, AFS_{ges} = abfiltrierbare Stoffe gesamt, AFS_{grob} = abfiltrierbare Stoffe grob, AFS₆₃ = abfiltrierbare Stoffe zwischen 63 – 2000 µm, GV AFS_{grob} = Glühverlust der abfiltrierbaren Stoffe grob, GV AFS₆₃ = Glühverlust der abfiltrierbaren Stoffe 63 – 2000 µm.

B.5.2 Statistische Auswertung der volumenproportionalen Proben – Konventionelle Abwasserparameter

Tabelle 62: Statistische Auswertung der konventionellen Abwasserparameter in den volumenproportionalen Proben von Mischwasserentlastungen und Regenwassereinleitungen

Parameter	Anzahl Messwerte	Einheit	Minimum	25 %-Quantil	Median	Mittelwert	75 %-Quantil	Maximum
Regenwassereinleitung								
pH	18	-	5,8	6,6	6,7	6,8	7,0	7,7
Lf	18	µS/cm	4,3	241	364	1025	639	6660
Ks _{4,3}	17	mmol/L	0,6	0,8	1,0	1,4	1,7	3,9
CSB _{gel}	18	mg/l	11	16	20	24	25	59
CSB _{ges}	18	mg/l	21	33	44	45	52	92
NH ₄ -N	18	mg/l	0,06	0,3	0,6	0,8	1,0	2,9
NO ₃ -N	18	mg/l	0,35	0,63	0,96	1,06	1,19	2,5
N _{ges}	18	mg/l	1,7	2,7	3,3	3,2	3,8	5,1
o-PO ₄ -P	18	mg/l	0,003	0,025	0,05	0,09	0,11	0,6
P _{ges}	18	mg/l	0,07	0,20	0,25	0,25	0,29	0,48
Mischwasserentlastung								
pH	14	-	6,4	6,6	6,7	6,7	6,8	7,1
Lf	14	µS/cm	94	135	269	234	311	373
Ks _{4,3}	7	mmol/L	0,8	0,9	1	1,2	1,3	2
CSB _{gel}	7	mg/l	9,2	17	25	22	27	33
CSB _{ges}	14	mg/l	16	45	74	77	114	140
NH ₄ -N	7	mg/l	1,5	1,8	2,3	2,9	3,5	5,7
NO ₃ -N	7	mg/l	0,12	0,21	0,31	0,43	0,57	0,99
N _{ges}	14	mg/l	1,9	4,1	10	8,4	11	15
o-PO ₄ -P	14	mg/l	0,17	0,41	0,69	0,75	1,2	1,5
P _{ges}	14	mg/l	0,28	0,75	1,8	1,5	2,1	3,0

pH = pH-Wert, LF = Leitfähigkeit, Ks_{4,3} = Säurekapazität, CSB_{gel} = Chemischer Sauerstoffbedarf gelöst, CSB_{ges} = Chemischer Sauerstoffbedarf gesamt, NH₄-N = Ammonium-Stickstoff, NO₃-N = Nitrat-Stickstoff, N_{ges} = Gesamtstickstoff, o-PO₄-P = Orthophosphat-Phosphor, P_{ges} = Gesamt-Phosphor.

B.5.3 Statistische Auswertung der problembehafteten Proben – Feststoff-Konzentrationen und Glühverlust

Tabelle 63: Statistische Auswertung der Feststoff-Konzentrationen und Glühverlust der problembehafteten Proben von Mischwasserentlastungen

Parameter	Anzahl Messwerte	Einheit	Minimum	25 %-Quantil	Median	Mittelwert	75 %-Quantil	Maximum
Mischwasserentlastung								
TR > 2.000	13	mg/l	0	0	0	2,2	0	14
AFS _{ges}	13	mg/l	48	70	107	117	137	329
AFS _{grob}	13	mg/l	1,3	14	21	29	30	129
AFS ₆₃	13	mg/l	44	65	75	90	105	227
GV AFS _{grob}	12	%	57	62	78	76	86	94
GV AFS ₆₃	12	%	31	46	58	57	68	82

TR > 2.000 µm= Trockenrückstand der abfiltrierbaren Stoffe größer 2000 µm, AFS_{ges} = abfiltrierbare Stoffe gesamt, AFS_{ges} = abfiltrierbare Stoffe grob, AFS₆₃ = abfiltrierbare Stoffe zwischen 63 – 2000 µm, GV AFS_{grob} = Glühverlust der abfiltrierbaren Stoffe grob, GV AFS₆₃ = Glühverlust der abfiltrierbaren Stoffe zwischen 63 – 2000 µm.

B.5.4 Statistische Auswertung der problembehafteten Proben – Konventionelle Abwasserparameter

Tabelle 64: Statistische Auswertung der konventionellen Parameter der problembehafteten Proben von Mischwasserentlastungen

Parameter	Anzahl Messwerte	Einheit	Minimum	25 %-Quantil	Median	Mittelwert	75 %-Quantil	Maximum
Mischwasserentlastung								
pH	13	-	6,7	6,7	6,8	6,8	7,0	7,0
Lf	13	µS/cm	207	267	351	376	440	605
Ks _{4,3}	13	mmol/L	1,4	1,8	2,0	2,3	2,4	4,2
CSB _{gel}	13	mg/l	23	25	47	47	60	103
CSB _{ges}	13	mg/l	51	73	132	137	182	252
NH ₄ -N	13	mg/l	2,1	4,0	8,4	7,5	10	14
NO ₃ -N	13	mg/l	0,12	0,12	0,20	0,19	0,23	0,37
N _{ges}	13	mg/l	5,1	7,0	12	13	18	30
o-PO ₄ -P	13	mg/l	0,15	0,58	0,85	0,92	1,1	1,7
P _{ges}	13	mg/l	1,0	2,0	2,1	3,1	2,6	13

pH = pH-Wert, LF = Leitfähigkeit, Ks_{4,3} = Säurekapazität, CSB_{gel} = Chemischer Sauerstoffbedarf gelöst, CSB_{ges} = Chemischer Sauerstoffbedarf gesamt, NH₄-N = Ammonium-Stickstoff, NO₃-N = Nitrat-Stickstoff, N_{ges} = Gesamtstickstoff, o-PO₄-P = Orthophosphat-Phosphor, P_{ges} = Gesamt-Phosphor.

B.6 Statistische Kennwerte prioritärer Stoffe in Mischwasserentlastungen und Regenwassereinleitungen

B.6.1 Statistische Kennwerte der volumenproportionalen Proben - Regenwassereinleitungen

Tabelle 65: Konzentrationen für prioritäre Stoffe in den untersuchten Regenwassereinleitungen für die volumenproportionalen Proben in µg/l

Stoffe	Anzahl Messwerte	Anzahl Messwerte > BG	Anteil Messwerte > BG (%)	Bestimmungsgrenze (µg/l)	Minimum (µg/l)	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	Maximum (µg/l)
Blei	18	18	100	0,1	1,2	4,3	5,9	6,2	7,4	16
Cadmium	18	18	100	0,002	0,033	0,049	0,079	0,088	0,086	0,31
Nickel	18	18	100	1	3	3,8	4,5	4,8	5,7	7,1
Quecksilber	18	18	100	0,001	0,004	0,009	0,013	0,014	0,016	0,032
4-iso-Nonylphenol	18	14	78	0,04	< BG	0,045	0,065	0,089	0,1	0,46
4-tert.-Oktylphenol	18	16	89	0,02	< BG	0,034	0,1	0,12	0,19	0,3
Di-(2-ethylhexyl)phthalat	18	18	100	0,1	0,9	2	3,3	3,4	4,4	7
HBCDD (Summe)	18	9	50	0,005	< BG	< BG	< BG	0,0076	0,012	0,024
Perfluorbutanoat	18	16	89	0,001	< BG	0,0033	0,006	0,0064	0,009	0,015
Perfluorpentanoat	18	11	61	0,001	< BG	< BG	0,001	0,0018	0,003	0,005
Perfluorhexanoat	18	14	78	0,001	< BG	0,002	0,003	0,0034	0,005	0,008
Perfluorheptanoat	18	9	50	0,001	< BG	< BG	< BG	0,0013	0,002	0,004
Perfluoroctanoat	18	15	83	0,001	< BG	0,002	0,003	0,0037	0,0055	0,01
Perfluornonanoat	18	5	28	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	0,001	0,002

Stoffe	Anzahl Messwerte	Anzahl Messwerte > BG	Anteil Messwerte > BG (%)	Bestimmungsgrenze (µg/l)	Minimum (µg/l)	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	Maximum (µg/l)
Perfluordecanoat	18	8	44	0,001	< BG	< BG	< BG	0,0019	0,003	0,007
Perfluorundecanoat	18	0	0	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Perfluordodecanoat	18	0	0	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Perfluorbutansulfonat	18	12	67	0,001	< BG	< BG	0,002	0,0018	0,002	0,004
Perfluorpentansulfonat	18	1	6	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,001
Perfluorhexansulfonat	18	0	0	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Perfluorheptansulfonat	18	0	0	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Perfluoroctansulfonat	18	12	67	0,001	< BG	< BG	0,002	0,0023	0,0038	0,005
Perfluordecansulfonat	18	0	0	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonat	18	4	22	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,002
Naphthalin	18	8	44	0,01	< BG	< BG	< BG	0,012	0,017	0,031
Acenaphthylen	18	17	94	0,001	< BG	0,0027	0,0058	0,0061	0,0085	0,018
Acenaphthen	18	16	89	0,001	< BG	0,003	0,0065	0,0096	0,013	0,039
Fluoren	18	16	89	0,001	< BG	0,0021	0,0064	0,0082	0,014	0,024
Phenanthren	18	18	100	0,001	0,0066	0,027	0,046	0,054	0,079	0,15
Anthracen	18	16	89	0,001	< BG	0,0029	0,012	0,0092	0,014	0,019
Fluoranthren	18	18	100	0,001	0,021	0,05	0,12	0,13	0,21	0,29
Pyren	18	18	100	0,001	0,023	0,051	0,14	0,13	0,19	0,29

Stoffe	Anzahl Messwerte	Anzahl Messwerte > BG	Anteil Messwerte > BG (%)	Bestimmungsgrenze (µg/l)	Minimum (µg/l)	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	Maximum (µg/l)
Benzo[a]anthracen	18	18	100	0,001	0,0069	0,017	0,046	0,045	0,063	0,094
Chrysen	18	18	100	0,001	0,015	0,034	0,089	0,089	0,11	0,22
Benzo[b]fluoranthen	18	18	100	0,001	0,01	0,028	0,063	0,067	0,092	0,17
Benzo[k]fluoranthen	18	18	100	0,001	0,0036	0,013	0,022	0,026	0,034	0,071
Benzo[a]pyren	18	18	100	0,0005	0,0072	0,021	0,05	0,051	0,075	0,14
Dibenz[a,h]anthracen	18	18	100	0,001	0,0014	0,0048	0,0093	0,011	0,015	0,027
Indeno[1,2,3-cd]pyren	18	18	100	0,0005	0,0072	0,024	0,048	0,053	0,07	0,14
Benzo[g,h,i]perylene	18	18	100	0,0005	0,0091	0,027	0,063	0,065	0,093	0,13
Aclonifen	18	0	0	0,01	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Atrazin	18	0	0	0,01	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Bifenox	18	0	0	0,004	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
cis-Heptachlorepoxyd	18	0	0	0,004	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Cybutryn	18	0	0	0,005	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Cypermethrin, gesamt	18	1	6	0,005	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,0052
Dichlorvos	18	0	0	0,01	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Dicofol	18	0	0	0,02	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Diuron	18	16	89	0,01	< BG	0,014	0,024	0,086	0,1	0,56
Heptachlor	18	0	0	0,004	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG

Stoffe	Anzahl Messwerte	Anzahl Messwerte > BG	Anteil Messwerte > BG (%)	Bestimmungsgrenze (µg/l)	Minimum (µg/l)	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	Maximum (µg/l)
Isoproturon	18	9	50	0,01	< BG	< BG	< BG	0,028	0,03	0,18
Quinoxyfen	18	0	0	0,01	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Terbutryn	18	18	100	0,01	0,012	0,022	0,027	0,048	0,052	0,18
trans-Heptachlorepoxyd	18	0	0	0,004	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG

B.6.2 Statistische Auswertung der volumenproportionalen Proben - Mischwasserentlastungen

Tabelle 66: Konzentrationen für prioritäre Stoffe in den untersuchten Mischwasserentlastungen für die volumenproportionalen Proben in µg/l

Stoffe	Anzahl Messwerte	Anzahl Messwerte > BG	Anteil Messwerte > BG (%)	Bestimmungsgrenze (µg/l)	Minimum (µg/l)	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	Maximum (µg/l)
Blei	14	14	100	0,1	1,1	2,8	3,7	4,8	4,6	14
Cadmium	14	14	100	0,002	0,02	0,051	0,06	0,087	0,11	0,25
Nickel	14	13	93	1	< BG	1,6	2,5	5	3,9	30
Quecksilber	14	14	100	0,001	0,005	0,011	0,013	0,017	0,021	0,042
4-iso-Nonylphenol	14	9	64	0,04	< BG	< BG	0,084	0,096	0,13	0,31
4-tert.-Oktylphenol	14	6	43	0,02	< BG	< BG	0,01	0,018	0,027	0,037
Di-(2-ethylhexyl)phthalat	14	14	100	0,1	0,74	1,9	2,6	3,6	5	8,1
HBCDD (Summe)	14	6	43	0,005	< BG	< BG	< BG	0,006	0,008	0,016
Perfluorbutanoat	14	12	86	0,001	< BG	0,002	0,003	0,0037	0,0058	0,009
Perfluorpentanoat	14	9	64	0,001	< BG	< BG	0,002	0,0022	0,0038	0,005
Perfluorhexanoat	14	11	79	0,001	< BG	0,0013	0,003	0,003	0,004	0,01
Perfluorheptanoat	14	8	57	0,001	< BG	< BG	0,001	0,0014	0,002	0,004
Perfluoroctanoat	14	11	79	0,001	< BG	0,001	0,0025	0,0027	0,004	0,007
Perfluornonanoat	14	4	29	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,002
Perfluordecanoat	14	5	36	0,001	< BG	< BG	< BG	0,0011	0,001	0,005

Stoffe	Anzahl Messwerte	Anzahl Messwerte > BG	Anteil Messwerte > BG (%)	Bestimmungsgrenze (µg/l)	Minimum (µg/l)	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	Maximum (µg/l)
Perfluorundecanoat	14	0	0	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Perfluordodecanoat	14	0	0	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Perfluorbutansulfonat	14	5	36	0,001	< BG	< BG	< BG	0,0011	0,0018	0,004
Perfluorpentansulfonat	14	0	0	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Perfluorhexansulfonat	14	1	7	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,001
Perfluorheptansulfonat	14	0	0	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Perfluoroctansulfonat	14	9	64	0,001	< BG	< BG	0,002	0,0021	0,003	0,005
Perfluordecansulfonat	14	0	0	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonat	14	2	14	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,002
Naphthalin	14	10	71	0,01	< BG	< BG	0,018	0,02	0,028	0,047
Acenaphthylen	14	13	93	0,001	< BG	0,0082	0,012	0,011	0,014	0,021
Acenaphthen	14	14	100	0,001	0,0028	0,0062	0,0099	0,012	0,017	0,026
Fluoren	14	14	100	0,001	0,0025	0,0048	0,0067	0,0073	0,0098	0,013
Phenanthren	14	14	100	0,001	0,012	0,035	0,045	0,046	0,055	0,081
Anthracen	14	14	100	0,001	0,0018	0,0034	0,006	0,0055	0,0068	0,0094
Fluoranthren	14	14	100	0,001	0,034	0,054	0,075	0,073	0,08	0,12
Pyren	14	14	100	0,001	0,029	0,047	0,062	0,061	0,075	0,099
Benzo[a]anthracen	14	14	100	0,001	0,0095	0,017	0,026	0,024	0,031	0,037

Stoffe	Anzahl Messwerte	Anzahl Messwerte > BG	Anteil Messwerte > BG (%)	Bestimmungsgrenze (µg/l)	Minimum (µg/l)	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	Maximum (µg/l)
Chrysen	14	14	100	0,001	0,02	0,037	0,045	0,047	0,051	0,08
Benzo[b]fluoranthen	14	14	100	0,001	0,012	0,026	0,032	0,036	0,044	0,069
Benzo[k]fluoranthen	14	14	100	0,001	0,0045	0,0098	0,013	0,015	0,019	0,032
Benzo[a]pyren	14	14	100	0,0005	0,01	0,018	0,026	0,026	0,032	0,044
Dibenz[a,h]anthracen	14	14	100	0,001	0,0018	0,0041	0,0053	0,0057	0,0077	0,01
Indeno[1,2,3-cd]pyren	14	14	100	0,0005	0,0085	0,018	0,023	0,026	0,034	0,051
Benzo[g,h,i]perylen	14	14	100	0,0005	0,011	0,022	0,024	0,027	0,036	0,048
Aclonifen	14	0	0	0,01	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Atrazin	14	1	7	0,01	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,021
Bifenox	14	0	0	0,004	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
cis-Heptachlorepid	14	0	0	0,004	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Cybutryn	14	0	0	0,005	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Cypermethrin, gesamt	14	0	0	0,005	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Dichlorvos	14	0	0	0,01	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Dicofol	14	0	0	0,02	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Diuron	14	7	50	0,01	< BG	< BG	< BG	0,022	0,022	0,14
Heptachlor	14	0	0	0,004	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Isoproturon	14	7	50	0,01	< BG	< BG	< BG	0,013	0,018	0,032

Stoffe	Anzahl Messwerte	Anzahl Messwerte > BG	Anteil Messwerte > BG (%)	Bestimmungsgrenze (µg/l)	Minimum (µg/l)	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	Maximum (µg/l)
Quinoxyfen	14	0	0	0,01	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Terbutryn	14	12	86	0,01	< BG	0,021	0,029	0,033	0,039	0,1
trans-Heptachlorepid	14	0	0	0,004	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG

B.6.3 Statistische Auswertung der problembehafteten Proben - Mischwässerentlastungen

Tabelle 67: Statistische Kennwerte für prioritäre Stoffe in den untersuchten Mischwässerentlastungen für die problembehafteten Proben in µg/l

Stoffe	Anzahl Messwerte	Anzahl Messwerte > BG	Anteil Messwerte > BG (%)	Bestimmungsgrenze (µg/l)	Minimum (µg/l)	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	Maximum (µg/l)
Blei	13	13	100	0,1	4,1	4,9	7,2	13	10	66
Cadmium	13	13	100	0,002	0,07	0,15	0,29	0,87	0,65	4,8
Nickel	13	13	100	1	2,3	3,7	5,1	7,8	6,8	37
Quecksilber	13	13	100	0,001	0,013	0,025	0,029	0,049	0,051	0,19
4-iso-Nonylphenol	13	12	92	0,04	< BG	0,06	0,13	0,11	0,13	0,27
4-tert.-Oktylphenol	13	10	77	0,02	< BG	0,022	0,024	0,024	0,03	0,036
Di-(2-ethylhexyl)phthalat	13	13	100	0,1	1,2	2,5	6,4	5,8	7,9	11
HBCDD (Summe)	13	9	69	0,005	< BG	< BG	0,008	0,014	0,013	0,086
Perfluorbutanoat	13	13	100	0,001	0,001	0,003	0,003	0,0036	0,004	0,007
Perfluorpentanoat	13	7	54	0,001	< BG	< BG	0,001	0,0016	0,002	0,005
Perfluorhexanoat	13	12	92	0,001	< BG	0,003	0,003	0,0033	0,004	0,006
Perfluorheptanoat	13	6	46	0,001	< BG	< BG	<BG	0,0011	0,002	0,003
Perfluoroctanoat	13	13	100	0,001	0,002	0,003	0,003	0,0035	0,004	0,009
Perfluornonanoat	13	0	0	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Perfluordecanoat	13	6	46	0,001	< BG	< BG	< BG	0,0013	0,001	0,005
Perfluorundecanoat	13	0	0	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG

Stoffe	Anzahl Messwerte	Anzahl Messwerte > BG	Anteil Messwerte > BG (%)	Bestimmungsgrenze (µg/l)	Minimum (µg/l)	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	Maximum (µg/l)
Perfluordodecanoat	13	0	0	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Perfluorbutansulfonat	13	8	62	0,001	< BG	< BG	0,001	0,0015	0,002	0,004
Perfluorpentansulfonat	13	0	0	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Perfluorhexansulfonat	13	0	0	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Perfluorheptansulfonat	13	0	0	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Perfluoroctansulfonat	13	9	69	0,001	< BG	< BG	0,002	0,0025	0,004	0,007
Perfluordecansulfonat	13	0	0	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonat	13	4	31	0,001	< BG	< BG	< BG	0,0016	0,003	0,006
Naphthalin	13	12	92	0,01	< BG	0,02	0,023	0,038	0,047	0,12
Acenaphthylen	13	13	100	0,001	0,0028	0,0064	0,0089	0,0087	0,011	0,016
Acenaphthen	13	13	100	0,001	0,0045	0,014	0,017	0,021	0,024	0,053
Fluoren	13	13	100	0,001	0,004	0,0093	0,012	0,014	0,02	0,029
Phenanthren	13	13	100	0,001	0,017	0,058	0,068	0,079	0,1	0,14
Anthracen	13	13	100	0,001	0,0027	0,007	0,011	0,011	0,013	0,022
Fluoranthren	13	13	100	0,001	0,022	0,072	0,089	0,1	0,15	0,17
Pyren	13	13	100	0,001	0,017	0,062	0,073	0,085	0,13	0,16
Benzo[a]anthracen	13	13	100	0,001	0,0077	0,022	0,032	0,037	0,053	0,083
Chrysen	13	13	100	0,001	0,013	0,041	0,059	0,061	0,091	0,11

Stoffe	Anzahl Messwerte	Anzahl Messwerte > BG	Anteil Messwerte > BG (%)	Bestimmungsgrenze (µg/l)	Minimum (µg/l)	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	Maximum (µg/l)
Benzo[b]fluoranthen	13	13	100	0,001	0,0082	0,03	0,037	0,045	0,065	0,1
Benzo[k]fluoranthen	13	13	100	0,001	0,0041	0,014	0,017	0,02	0,026	0,046
Benzo[a]pyren	13	13	100	0,0005	0,0076	0,022	0,029	0,035	0,051	0,082
Dibenz[a,h]anthracen	13	13	100	0,001	0,0018	0,005	0,0069	0,0081	0,011	0,023
Indeno[1,2,3-cd]pyren	13	13	100	0,0005	0,0064	0,022	0,03	0,036	0,046	0,1
Benzo[g,h,i]perylen	13	13	100	0,0005	0,0074	0,022	0,033	0,038	0,054	0,089
Aclonifen	13	0	0	0,01	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Atrazin	13	0	0	0,01	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Bifenox	13	0	0	0,004	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
cis-Heptachlorepoxyd	13	0	0	0,004	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Cybutryn	13	0	0	0,005	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Cypermethrin, gesamt	13	4	31	0,005	< BG	< BG	< BG	0,012	0,0096	0,087
Dichlorvos	13	0	0	0,01	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Dicofol	13	0	0	0,02	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Diuron	13	9	69	0,01	< BG	< BG	0,015	0,016	0,021	0,031
Heptachlor	13	0	0	0,004	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Isoproturon	13	6	46	0,01	< BG	< BG	< BG	0,012	0,014	0,047
Quinoxifen	13	0	0	0,01	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG

Stoffe	Anzahl Messwerte	Anzahl Messwerte > BG	Anteil Messwerte > BG (%)	Bestimmungsgrenze (µg/l)	Minimum (µg/l)	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	Maximum (µg/l)
Terbutryn	13	13	100	0,01	0,021	0,024	0,028	0,032	0,033	0,069
trans-Heptachlorepoxid	13	0	0	0,004	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG

B.6.4 Statistische Kennwerte für prioritäre Stoffe in Regenwassereinleitungen unter Berücksichtigung aller Proben

Tabelle 68: Konzentrationen für prioritäre Stoffe in den untersuchten Regenwassereinleitungen unter Berücksichtigung aller Proben in µg/l

Stoffe	Anzahl Messwerte	Anzahl Messwerte > BG	Anteil Messwerte > BG (%)	Bestimmungsgrenze (µg/l)	Minimum (µg/l)	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	Maximum (µg/l)
Blei	20	20	100	0,1	1,2	4,2	5,9	6,5	7,7	16
Cadmium	20	20	100	0,002	0,033	0,05	0,079	0,089	0,09	0,31
Nickel	20	20	100	1	2	3,7	4,5	4,7	5,6	7,1
Quecksilber	20	20	100	0,001	0,004	0,009	0,013	0,014	0,017	0,032
4-iso-Nonylphenol	20	14	70	0,04	< BG	< BG	0,059	0,082	0,094	0,46
4-tert.-Oktylphenol	20	17	85	0,02	< BG	0,03	0,062	0,11	0,18	0,3
Di-(2-ethylhexyl)phthalat	20	20	100	0,1	0,9	1,9	3	3,3	4,3	7
HBCDD (Summe)	20	10	50	0,005	< BG	< BG	< BG	0,0075	0,011	0,024
Perfluorbutanoat	20	17	85	0,001	< BG	0,0025	0,006	0,0062	0,009	0,015
Perfluorpentanoat	20	12	60	0,001	< BG	< BG	0,001	0,0021	0,003	0,009
Perfluorhexanoat	20	15	75	0,001	< BG	0,0016	0,003	0,0035	0,0053	0,008
Perfluorheptanoat	20	10	50	0,001	< BG	< BG	0,0008	0,0015	0,002	0,005
Perfluoroctanoat	20	16	80	0,001	< BG	0,0018	0,003	0,0038	0,006	0,01
Perfluornonanoat	20	6	30	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	0,001	0,003
Perfluordecanoat	20	9	45	0,001	< BG	< BG	< BG	0,0019	0,003	0,007
Perfluorundecanoat	20	0	0	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG

Stoffe	Anzahl Messwerte	Anzahl Messwerte > BG	Anteil Messwerte > BG (%)	Bestimmungsgrenze (µg/l)	Minimum (µg/l)	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	Maximum (µg/l)
Perfluordodecanoat	20	0	0	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Perfluorbutansulfonat	20	13	65	0,001	< BG	< BG	0,002	0,0017	0,002	0,004
Perfluorpentansulfonat	20	1	5	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,001
Perfluorhexansulfonat	20	0	0	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Perfluorheptansulfonat	20	0	0	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Perfluoroctansulfonat	20	13	65	0,001	< BG	< BG	0,002	0,0023	0,004	0,005
Perfluordecansulfonat	20	0	0	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonat	20	5	25	0,001	< BG	< BG	< BG	0,0009	0,0006	0,006
Naphthalin	20	8	40	0,01	< BG	< BG	< BG	0,011	0,017	0,031
Acenaphthylen	20	19	95	0,001	< BG	0,0018	0,0056	0,0057	0,0079	0,018
Acenaphthen	20	18	90	0,001	< BG	0,0027	0,0064	0,009	0,012	0,039
Fluoren	20	17	85	0,001	< BG	0,0019	0,0058	0,0076	0,013	0,024
Phenanthren	20	20	100	0,001	0,0066	0,023	0,037	0,051	0,077	0,15
Anthracen	20	18	90	0,001	< BG	0,0028	0,0098	0,0086	0,013	0,019
Fluoranthren	20	20	100	0,001	0,021	0,047	0,11	0,12	0,19	0,29
Pyren	20	20	100	0,001	0,023	0,05	0,12	0,12	0,19	0,29
Benzo[a]anthracen	20	20	100	0,001	0,0069	0,016	0,046	0,043	0,062	0,094
Chrysen	20	20	100	0,001	0,015	0,031	0,084	0,085	0,1	0,22

Stoffe	Anzahl Messwerte	Anzahl Messwerte > BG	Anteil Messwerte > BG (%)	Bestimmungsgrenze (µg/l)	Minimum (µg/l)	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	Maximum (µg/l)
Benzo[b]fluoranthen	20	20	100	0,001	0,01	0,026	0,063	0,065	0,091	0,17
Benzo[k]fluoranthen	20	20	100	0,001	0,0036	0,012	0,022	0,026	0,033	0,071
Benzo[a]pyren	20	20	100	0,0005	0,0072	0,021	0,05	0,05	0,074	0,14
Dibenz[a,h]anthracen	20	20	100	0,001	0,0014	0,0048	0,0093	0,01	0,014	0,027
Indeno[1,2,3-cd]pyren	20	20	100	0,0005	0,0072	0,023	0,047	0,051	0,07	0,14
Benzo[g,h,i]perylen	20	20	100	0,0005	0,0091	0,026	0,059	0,062	0,088	0,13
Aclonifen	20	0	0	0,01	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Atrazin	20	0	0	0,01	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Bifenox	20	0	0	0,004	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
cis-Heptachlorepoxyd	20	0	0	0,004	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Cybutryn	20	0	0	0,005	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Cypermethrin, gesamt	20	1	5	0,005	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,0052
Dichlorvos	20	0	0	0,01	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Dicofol	20	0	0	0,02	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Diuron	20	18	90	0,01	< BG	0,015	0,025	0,097	0,13	0,56
Heptachlor	20	0	0	0,004	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Isoproturon	20	10	50	0,01	< BG	< BG	< BG	0,028	0,032	0,18
Quinoxifen	20	0	0	0,01	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG

Stoffe	Anzahl Messwerte	Anzahl Messwerte > BG	Anteil Messwerte > BG (%)	Bestimmungsgrenze (µg/l)	Minimum (µg/l)	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	Maximum (µg/l)
Terbutryn	20	20	100	0,01	0,012	0,022	0,027	0,048	0,057	0,18
trans-Heptachlorepoxyd	20	0	0	0,004	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG

B.6.5 Statistische Kennwerte für prioritäre Stoffe in Mischwässerentlastungen unter Berücksichtigung aller Proben

Tabelle 69: Konzentrationen für prioritäre Stoffe in den untersuchten Mischwässerentlastungen unter Berücksichtigung aller Proben in µg/l

Stoffe	Anzahl Messwerte	Anzahl Messwerte > BG	Anteil Messwerte > BG (%)	Bestimmungsgrenze (µg/l)	Minimum (µg/l)	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	Maximum (µg/l)
Blei	27	27	100	0,1	1,1	3,7	4,9	8,7	8,7	66
Cadmium	27	27	100	0,002	0,02	0,06	0,12	0,47	0,27	4,8
Nickel	27	26	96	1	< BG	2,3	3,7	6,3	5,5	37
Quecksilber	27	27	100	0,001	0,005	0,013	0,022	0,032	0,031	0,19
4-iso-Nonylphenol	27	21	78	0,04	< BG	0,05	0,11	0,1	0,13	0,31
4-tert.-Oktylphenol	27	16	59	0,02	< BG	< BG	0,023	0,021	0,03	0,037
Di-(2-ethylhexyl)phthalat	27	27	100	0,1	0,74	2,1	3,7	4,6	7,1	11
HBCDD (Summe)	27	15	56	0,005	< BG	< BG	0,008	0,01	0,011	0,086
Perfluorbutanoat	27	25	93	0,001	< BG	0,002	0,003	0,0037	0,0055	0,009
Perfluorpentanoat	27	16	59	0,001	< BG	< BG	0,002	0,0019	0,003	0,005
Perfluorhexanoat	27	23	85	0,001	< BG	0,002	0,003	0,0031	0,004	0,01
Perfluorheptanoat	27	14	52	0,001	< BG	< BG	0,001	0,0013	0,002	0,004
Perfluoroctanoat	27	24	89	0,001	< BG	0,002	0,003	0,0031	0,004	0,009
Perfluornonanoat	27	4	15	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,002
Perfluordecanoat	27	11	41	0,001	< BG	< BG	< BG	0,0012	0,001	0,005
Perfluorundecanoat	27	0	0	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG

Stoffe	Anzahl Messwerte	Anzahl Messwerte > BG	Anteil Messwerte > BG (%)	Bestimmungsgrenze (µg/l)	Minimum (µg/l)	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	Maximum (µg/l)
Perfluordodecanoat	27	0	0	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Perfluorbutansulfonat	27	13	48	0,001	< BG	< BG	< BG	0,0013	0,002	0,004
Perfluorpentansulfonat	27	0	0	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Perfluorhexansulfonat	27	1	4	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,001
Perfluorheptansulfonat	27	0	0	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Perfluoroctansulfonat	27	18	67	0,001	< BG	< BG	0,002	0,0023	0,0035	0,007
Perfluordecansulfonat	27	0	0	0,001	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonat	27	6	22	0,001	< BG	< BG	< BG	0,0011	< BG	0,006
Naphthalin	27	22	81	0,01	< BG	0,014	0,022	0,029	0,039	0,12
Acenaphthylen	27	26	96	0,001	< BG	0,0067	0,0098	0,0099	0,012	0,021
Acenaphthen	27	27	100	0,001	0,0028	0,0078	0,014	0,016	0,019	0,053
Fluoren	27	27	100	0,001	0,0025	0,0056	0,0093	0,011	0,013	0,029
Phenanthren	27	27	100	0,001	0,012	0,039	0,056	0,062	0,079	0,14
Anthracen	27	27	100	0,001	0,0018	0,0043	0,0068	0,0081	0,01	0,022
Fluoranthren	27	27	100	0,001	0,022	0,055	0,079	0,087	0,11	0,17
Pyren	27	27	100	0,001	0,017	0,048	0,072	0,073	0,078	0,16
Benzo[a]anthracen	27	27	100	0,001	0,0077	0,017	0,029	0,03	0,034	0,083
Chrysen	27	27	100	0,001	0,013	0,039	0,049	0,053	0,07	0,11

Stoffe	Anzahl Messwerte	Anzahl Messwerte > BG	Anteil Messwerte > BG (%)	Bestimmungsgrenze (µg/l)	Minimum (µg/l)	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	Maximum (µg/l)
Benzo[b]fluoranthen	27	27	100	0,001	0,0082	0,027	0,035	0,04	0,053	0,1
Benzo[k]fluoranthen	27	27	100	0,001	0,0041	0,01	0,014	0,017	0,023	0,046
Benzo[a]pyren	27	27	100	0,0005	0,0076	0,019	0,028	0,03	0,038	0,082
Dibenz[a,h]anthracen	27	27	100	0,001	0,0018	0,0043	0,0062	0,0069	0,0087	0,023
Indeno[1,2,3-cd]pyren	27	27	100	0,0005	0,0064	0,018	0,025	0,031	0,041	0,1
Benzo[g,h,i]perylen	27	27	100	0,0005	0,0074	0,022	0,03	0,032	0,042	0,089
Aclonifen	27	0	0	0,01	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Atrazin	27	1	4	0,01	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,021
Bifenox	27	0	0	0,004	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
cis-Heptachlorepoxyd	27	0	0	0,004	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Cybutryn	27	0	0	0,005	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Cypermethrin, gesamt	27	4	15	0,005	< BG	< BG	< BG	0,0072	< BG	0,087
Dichlorvos	27	0	0	0,01	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Dicofol	27	0	0	0,02	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Diuron	27	16	59	0,01	< BG	< BG	0,012	0,019	0,022	0,14
Heptachlor	27	0	0	0,004	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Isoproturon	27	13	48	0,01	< BG	< BG	< BG	0,012	0,016	0,047
Quinoxifen	27	0	0	0,01	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG

Stoffe	Anzahl Messwerte	Anzahl Messwerte > BG	Anteil Messwerte > BG (%)	Bestimmungsgrenze (µg/l)	Minimum (µg/l)	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	Maximum (µg/l)
Terbutryn	27	25	93	0,01	< BG	0,024	0,028	0,033	0,037	0,1
trans-Heptachlorepoxyd	27	0	0	0,004	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG

B.7 Stoffkonzentrationen in Regenwassereinleitungsproben im Vergleich mit Literaturwerten

Tabelle 70: Stoff-Konzentrationen in Regenwassereinleitungsproben (Regenklärbecken (RKB)) im Vergleich mit Literaturwerten

Stoffe	Mittelwert (µg/l)	Median (µg/l)	Min - Max (µg/l)	Bemerkung	Literaturquelle
Blei	6,5	5,9	1,2 - 16	2 RKB, 2018-2019, n=20, Deutschland	dieses Monitoring
	12,3			Regenwasser, 14 Proben, März 2008 - September 2009, abflussproportional, EMC, Frankreich	Becouze-Lareure et al. (2019)
			0,3 - 72,4	Regenwasser, 8 Proben, Oktober - November 2008, Dänemark	Birch et al. (2011)
			< 5 - 6,4	Regenwasser, 6 Proben, Juni - Dezember 2012, volumenproportional, Österreich	Clara et al. (2014)
			67,5 - 780	Regenwasser, 119 Proben, Mai 2014 - Juni 2015, volumenproportional, Berlin	Wicke et al. (2016)
			3,11 - 19 (gelöst)	Regenwasser, 28 Proben, Mai 2014 - Juni 2015, volumenproportional, Berlin	Wicke et al. (2016)
Cadmium	0,088	0,079	0,33 – 0,31	2 RKB, 2018-2019, n=20, Deutschland	dieses Monitoring
	0,49			Regenwasser, 14 Proben, März 2008 - September 2009, abflussproportional, EMC, Frankreich	Becouze-Lareure et al. (2019)
			0,0045 - 0,63	Regenwasser, 8 Proben, Oktober - November 2008, Dänemark	Birch et al. (2011)
			< 0,05 - 0,14	Regenwasser, 6 Proben, Juni - Dezember 2012, volumenproportional, Österreich	Clara et al. (2014)
	0,61		n.n. - 4	Regenwasser, 69 Proben, Mai 2014 - Juni 2015, volumenproportional, Berlin	Wicke et al. (2016)

Stoffe	Mittelwert (µg/l)	Median (µg/l)	Min - Max (µg/l)	Bemerkung	Literaturquelle
	0,15		n.n. - 0,72 (gelöst)	Regenwasser, 28 Proben, Mai 2014 - Juni 2015, volumenproportional, Berlin	Wicke et al. (2016)
	< 0,2 0,28			Regenwasser, 1 Probe, Oktober 2009 - Juni 2010, Stichprobe, Schweden	Kaj et al. (2011)
			< 0,05 - 0,13	städt. Regenwasser, 3 Proben, September 2009 - Juni 2010, abflussproportional, Dänemark	Nielsen et al. (2011)
	0,16 (Regenwasser) 0,05 (Schmelzwasser)			Regenwasser, 1 Probe, März - Mai 2010, Stichprobe, Estland	Kõrgmaa et al. (2011)
	< 0,10 0,06			Regenwasser, 1 Probe, November 2009 - April 2010, Stichprobe, Finnland	Huhtala et al. (2011)
	0,9			Regenwasser, 1 Probe, September 2010, Stichprobe, Lettland	Strāķe et al. (2011)
	< 0,05			Regenwasser, 1 Probe, November 2009 - Juni 2010, Stichprobe, Litauen	Manusadžianas et al. (2011)
	18,05 0,20			Regenwasser, Mischprobe aus 5 Proben, Dezember 2009 - Oktober 2010, Stichprobe, Polen	Fochtman et al. (2011)
Nickel	4,7	4,5	2 – 7,1	2 RKB, 2018-2019, n=20, Deutschland	dieses Monitoring
	9,6			Regenwasser, 14 Proben, März 2008 - September 2009, abflussproportional, EMC, Frankreich	Becouze-Lareure et al. (2019)
			0,91 - 40,5	Regenwasser, 8 Proben, Oktober - November 2008, Dänemark	Birch et al. (2011)
			< 2 - 4	Regenwasser, 6 Proben, Juni - Dezember 2012, volumenproportional, Österreich	Clara et al. (2014)

Stoffe	Mittelwert (µg/l)	Median (µg/l)	Min - Max (µg/l)	Bemerkung	Literaturquelle
	7,81		n.n. - 37	Regenwasser, 37 Proben, Mai 2014 - Juni 2015, volumenproportional, Berlin	Wicke et al. (2016)
	2,07		n.n. - 8,2 (gelöst)	Regenwasser, 28 Proben, Mai 2014 - Juni 2015, volumenproportional, Berlin	Wicke et al. (2016)
	2,8 8,8 4,1			städt. Regenwasser, 3 Proben, September 2009 - Juni 2010, abflussproportional, Dänemark	Nielsen et al. (2011)
Quecksilber	0,0144	0,0125	0,004 – 0,032	2 RKB, 2018-2019, n=20, Deutschland	dieses Monitoring
			0,0043 - 0,046	Regenwasser, 19 Proben, Juni - Dezember 2012, volumenproportional, Österreich	Clara et al. (2014)
4-iso-Nonylphenol	0,0822	0,0585	< 0,04 – 0,46	2 RKB, 2018-2019, n=20, Deutschland	dieses Monitoring
			0,17 - 0,43	Regenwasser, 3 Sites, Oktober - November 2008, Stichprobe, Dänemark	Birch et al. (2011)
	> 0,02			Regenkanal, Einzelwert, Juni + Oktober 2006, abflussproportional, Schweden	Björklund et al. (2009)
		0,47		Regenkanal, 11 Ereignisse, Januar 2008 - April 2009, abflussproportional, Frankreich	Bressy et al. (2012)
	0,4	0,398	0,27 - 0,53	Regenkanal, 4 Ereignisse, Juli - Oktober 2011, zeitproportional, Frankreich	Cladière et al. (2013)
	0,76 - 0,77			Regenwasser, 6 Proben, Juni - Dezember 2012, volumenproportional, Österreich	Clara et al. (2014)
	0,359			Regenwasser, 21 Ereignisse, Juli 2011- Mai 2013, abflussproportional, EMC, Frankreich	Gasperi et al. (2012)

Stoffe	Mittelwert (µg/l)	Median (µg/l)	Min - Max (µg/l)	Bemerkung	Literaturquelle
	1,1 0,27			Regenkanal, Einzelwert, Schweden	Kalmykova et al. (2013)
	2,17		n.n. - 15	Regenwasser, 72 Proben, Mai 2014 - Juni 2015, volumenproportional, Berlin	Wicke et al. (2016)
	0,19			städt. Regenwasser, 3 Proben, September 2009 - Juni 2010, abflussproportional, Dänemark	Nielsen et al. (2011)
4-tert.-Oktylphenol	0,1135	0,0615	< 0,02 – 0,3	2 RKB, 2018-2019, n=20, Deutschland	dieses Monitoring
	0,42 (gelöst)			Regenwasser, 14 Proben, März 2008 - September 2009, abflussproportional, EMC, Frankreich	Becouze-Lareure et al. (2019)
		0,036		Regenkanal, 11 Ereignisse, Januar 2008 - April 2009, abflussproportional, Frankreich	Bressy et al. (2012)
	0,015 - 0,15			Regenwasser, 6 Proben, Juni - Dezember 2012, volumenproportional, Österreich	Clara et al. (2014)
	0,061			Regenwasser, 21 Ereignisse, Juli 2011- Mai 2013, abflussproportional, EMC, Frankreich	Gasperi et al. (2012)
	0,82 0,11			Regenkanal, Einzelwert, Schweden	Kalmykova et al. (2013)
	0,1		n.n. - 1	Regenwasser, 72 Proben, Mai 2014 - Juni 2015, volumenproportional, Berlin	Wicke et al. (2016)
	< 0,1			städt. Regenwasser, 3 Proben, September 2009 - Juni 2010, abflussproportional, Dänemark	Nielsen et al. (2011)
	3,3	3	0,9 - 7	2 RKB, 2018-2019, n=20, Deutschland	dieses Monitoring

Stoffe	Mittelwert (µg/l)	Median (µg/l)	Min - Max (µg/l)	Bemerkung	Literaturquelle
Di-(2-ethylhexyl)phthalat			< 0,05 - 8,5	Regenwasser, 8 Proben, Oktober - November 2008, Stichprobe, Dänemark	Birch et al. (2011)
	<1			Regenkanal, Einzelwert, Juni + Oktober 2006, abflussproportional, Schweden	Björklund et al. (2009)
			< 0,35 - 1,9	Regenwasser, 19 Proben, Juni - Dezember 2012, volumenproportional, Österreich	Clara et al. (2014)
	3 2,3			Regenkanal, Einzelwert, Schweden	Kalmykova et al. (2013)
	1,67		n.n. - 14	Regenwasser, 92 Proben, Mai 2014 - Juni 2015, volumenproportional, Berlin	Wicke et al. (2016)
HBCDD	0,00745	< 0,005	< 0,005 – 0,024	2 RKB, 2018-2019, n=20, Deutschland	dieses Monitoring
	0,0013 < 0,001			Ausgleichsbecken, Stichproben, Oktober 2009 - Juni 2010, Schweden	Kaj et al. (2011)
	< 0,005			städt. Regenwasser, 3 Proben, September 2009 - Juni 2010, abflussproportional, Dänemark	Nielsen et al. (2011)
Perfluorbutanoat	0,0062	0,006	< 0,001 – 0,015	2 RKB, 2018-2019, n=20, Deutschland	dieses Monitoring
	< 0,003 0,0598			städt. Regenwasser, 3 Proben, September 2009 - Juni 2010, abflussproportional, Dänemark	Nielsen et al. (2011)
Perfluorpentanoat	0,0021	0,001	< 0,001 – 0,009	2 RKB, 2018-2019, n=20, Deutschland	dieses Monitoring
	0,184 0,0286			städt. Regenwasser, 3 Proben, September 2009 - Juni 2010, abflussproportional, Dänemark	Nielsen et al. (2011)

Stoffe	Mittelwert (µg/l)	Median (µg/l)	Min - Max (µg/l)	Bemerkung	Literaturquelle
Perfluorhexanoat	0,00345	0,003	< 0,001 – 0,008	2 RKB, 2018-2019, n=20, Deutschland	dieses Monitoring
	0,0051 0,02			Ausgleichsbecken, Stichproben, Oktober 2009 - Juni 2010, Schweden	Kaj et al. (2011)
	0,181 0,0391 < 0,0033			städt. Regenwasser, 3 Proben, September 2009 - Juni 2010, abflussproportional, Dänemark	Nielsen et al. (2011)
	0,00013 0,00038			städt. Regenwasser, Stichprobe, November 2009 - Juni 2010, Litauen	Manusadžianas et al. (2011)
	0,00006			städt. Regenwasser, Mischprobe aus 5 Stichproben, Dezember 2009 - Oktober 2010, Polen	Fochtman et al. (2011)
Perfluorheptanoat	0,00145	< 0,001	< 0,001 – 0,005	2 RKB, 2018-2019, n=20, Deutschland	dieses Monitoring
	< 0,003 0,0466 0,0075			städt. Regenwasser, 3 Proben, September 2009 - Juni 2010, abflussproportional, Dänemark	Nielsen et al. (2011)
Perfluoroctanoat	0,00375	0,003	< 0,001 – 0,1	2 RKB, 2018-2019, n=20, Deutschland	dieses Monitoring
	0,0064 0,048			Ausgleichsbecken, Stichproben, Oktober 2009 - Juni 2010, Schweden	Kaj et al. (2011)
	0,0037 0,0672 0,0086			städt. Regenwasser, 3 Proben, September 2009 - Juni 2010, abflussproportional, Dänemark	Nielsen et al. (2011)
	0,005			städt. Regenwasser, Stichprobe, März - Mai 2010, Estland	Körgmaa et al. (2011)

Stoffe	Mittelwert (µg/l)	Median (µg/l)	Min - Max (µg/l)	Bemerkung	Literaturquelle
	0,00036			städt. Regenwasser, Stichprobe, September 2010, Lettland	Strāķe et al. (2011)
	0,0015 0,0028			städt. Regenwasser, Stichprobe, November 2009 - Juni 2010, Litauen	Manusadžianas et al. (2011)
	0,001			städt. Regenwasser, Mischprobe aus 5 Stichproben, Dezember 2009 - Oktober 2010, Polen	Fochtman et al. (2011)
Perfluornonanoat	< 0,001	< 0,001	< 0,001 – 0,003	2 RKB, 2018-2019, n=20, Deutschland	dieses Monitoring
	< 0,005 0,0086			städt. Regenwasser, 3 Proben, September 2009 - Juni 2010, abflussproportional, Dänemark	Nielsen et al. (2011)
Perfluordecanoat	0,0019	< 0,001	< 0,001 – 0,007	2 RKB, 2018-2019, n=20, Deutschland	dieses Monitoring
	0,0011 0,02			Ausgleichsbecken, Stichproben, Oktober 2009 - Juni 2010, Schweden	Kaj et al. (2011)
	< 0,003 0,0054			städt. Regenwasser, 3 Proben, September 2009 - Juni 2010, abflussproportional, Dänemark	Nielsen et al. (2011)
	0,00015 0,0009			städt. Regenwasser, Stichprobe, November 2009 - Juni 2010, Litauen	Manusadžianas et al. (2011)
	0,0001			städt. Regenwasser, Mischprobe aus 5 Stichproben, Dezember 2009 - Oktober 2010, Polen	Fochtman et al. (2011)
Perfluorbutansulfonat	0,0017	0,002	< 0,001 – 0,004	2 RKB, 2018-2019, n=20, Deutschland	dieses Monitoring
	< 0,005			städt. Regenwasser, 3 Proben, September 2009 - Juni 2010, abflussproportional, Dänemark	Nielsen et al. (2011)

Stoffe	Mittelwert (µg/l)	Median (µg/l)	Min - Max (µg/l)	Bemerkung	Literaturquelle
Perfluorhexansulfonat	< 0,001	< 0,001	< 0,001	2 RKB, 2018-2019, n=20, Deutschland	dieses Monitoring
	< 0,005 0,058 0,050			städt. Regenwasser, 3 Proben, September 2009 - Juni 2010, abflussproportional, Dänemark	Nielsen et al. (2011)
Perfluoroctansulfonat	0,0023	0,002	< 0,001 – 0,005	2 RKB, 2018-2019, n=20, Deutschland	dieses Monitoring
	< 0,003 0,419 0,235			städt. Regenwasser, 3 Proben, September 2009 - Juni 2010, abflussproportional, Dänemark	Nielsen et al. (2011)
Acenaphthylen	0,0057	0,0056	< 0,001 – 0,018	2 RKB, 2018-2019, n=20, Deutschland	dieses Monitoring
			< 0,01 - 0,039	Regenwasser, 8 Proben, Oktober - November 2008, Stichprobe, Dänemark	Birch et al. (2011)
	< 0,02			Regenkanal, Einzelwert, Schweden	Kalmykova et al. (2013)
	0,01		n.n. - 0,058	Regenwasser, 94 Proben, Mai 2014 - Juni 2015, volumenproportional, Berlin	Wicke et al. (2016)
Acenaphthen	0,00896	0,00635	< 0,001 – 0,039	2 RKB, 2018-2019, n=20, Deutschland	dieses Monitoring
	< 0,01			Regenwasser, 8 Proben, Oktober - November 2008, Stichprobe, Dänemark	Birch et al. (2011)
	< 0,009			Regenwasser, 19 Proben, Juni - Dezember 2012, volumenproportional, Österreich	Clara et al. (2014)
	< 0,02			Regenkanal, Einzelwert, Schweden	Kalmykova et al. (2013)

Stoffe	Mittelwert (µg/l)	Median (µg/l)	Min - Max (µg/l)	Bemerkung	Literaturquelle
	< 0,05		n.n. - 0,056	Regenwasser, 94 Proben, Mai 2014 - Juni 2015, volumenproportional, Berlin	Wicke et al. (2016)
Phenanthren	0,051	0,037	0,0066 – 0,15	2 RKB, 2018-2019, n=20, Deutschland	dieses Monitoring
			< 0,01 - 0,29	Regenwasser, 8 Proben, Oktober - November 2008, Stichprobe, Dänemark	Birch et al. (2011)
			n.n. - 0,0083	Regenwasser, 19 Proben, Juni - Dezember 2012, volumenproportional, Österreich	Clara et al. (2014)
	0,03 0,12			Regenkanal, Einzelwert, Schweden	Kalmykova et al. (2013)
	0,16		n.n. - 0,7	Regenwasser, 94 Proben, Mai 2014 - Juni 2015, volumenproportional, Berlin	Wicke et al. (2016)
Anthracen	0,0086	0,00975	< 0,001 – 0,019	2 RKB, 2018-2019, n=20, Deutschland	dieses Monitoring
			< 0,01 - 0,84	Regenwasser, 8 Proben, Oktober - November 2008, Stichprobe, Dänemark	Birch et al. (2011)
	< 0,02 0,02			Regenkanal, Einzelwert, Schweden	Kalmykova et al. (2013)
	0,03		n.n.-0,24	Regenwasser, 94 Proben, Mai 2014 - Juni 2015, volumenproportional, Berlin	Wicke et al. (2016)
Fluoranthren	0,1225	0,105	0,021 – 0,29	2 RKB, 2018-2019, n=20, Deutschland	dieses Monitoring
			< 0,01 - 0,55	Regenwasser, 8 Proben, Oktober - November 2008, Stichprobe, Dänemark	Birch et al. (2011)

Stoffe	Mittelwert (µg/l)	Median (µg/l)	Min - Max (µg/l)	Bemerkung	Literaturquelle
			< 0,033 - 0,019	Mischwasser behandelt, 6 Proben, Juni - Dezember 2012, Österreich	Clara et al. (2014)
			0,016 - 0,067	Mischwasser unbehandelt, 9 Proben, Juni - Dezember 2012, Österreich	Clara et al. (2014)
	0,03 0,12			Regenkanal, Einzelwert, Schweden	Kalmykova et al. (2013)
	0,084 0,057 <0,01			städt. Regenwasser, 3 Proben, September 2009 - Juni 2010, abflussproportional, Dänemark	Nielsen et al. (2011)
Pyren	0,124	0,12	0,023 – 0,29	2 RKB, 2018-2019, n=20, Deutschland	dieses Monitoring
	0,088 0,104 0,176			Regenwasser, 19 Proben, Juli 2011- Mai 2013, abflussproportional, EMC, Frankreich	Gasperi et al. (2012)
	0,05 0,19			Regenkanal, Einzelwert, Schweden	Kalmykova et al. (2013)
	0,076 0,073 < 0,01			städt. Regenwasser, 3 Proben, September 2009 - Juni 2010, abflussproportional, Dänemark	Nielsen et al. (2011)
			< 0,01 - 0,56	Regenwasser, 8 Proben, Oktober - November 2008, Stichprobe, Dänemark	Birch et al. (2011)
			0,047 - 0,006	Regenwasser, 19 Proben, Juni - Dezember 2012, volumenproportional, Österreich	Clara et al. (2014)
	0,34		n.n. - 2,9	Regenwasser, 92 Proben, Mai 2014 - Juni 2015, volumenproportional, Berlin	Wicke et al. (2016)

Stoffe	Mittelwert (µg/l)	Median (µg/l)	Min - Max (µg/l)	Bemerkung	Literaturquelle
Benzo[a]anthracen	0,043	0,0455	0,0069 – 0,094	2 RKB, 2018-2019, n=20, Deutschland	dieses Monitoring
			< 0,01 - 0,066	Regenwasser, 8 Proben, Oktober - November 2008, Stichprobe, Dänemark	Birch et al. (2011)
			0,00053 - 0,0017	Regenwasser, 19 Proben, Juni - Dezember 2012, volumenproportional, Österreich	Clara et al. (2014)
	< 0,02 0,02			Regenkanal, Einzelwert, Schweden	Kalmykova et al. (2013)
	0,14		n.n. - 0,65	Regenwasser, 92 Proben, Mai 2014 - Juni 2015, volumenproportional, Berlin	Wicke et al. (2016)
Chrysen	0,085	0,0835	0,015 – 0,22	2 RKB, 2018-2019, n=20, Deutschland	dieses Monitoring
			0,0014 - 0,002	Regenwasser, 19 Proben, Juni - Dezember 2012, volumenproportional, Österreich	Clara et al. (2014)
	0,06 0,09			Regenkanal, Einzelwert, Schweden	Kalmykova et al. (2013)
	0,17		n.n. - 0,99	Regenwasser, 94 Proben, Mai 2014 - Juni 2015, volumenproportional, Berlin	Wicke et al. (2016)
Benzo[b]fluoranthen	0,0645	0,0625	0,01 – 0,17	2 RKB, 2018-2019, n=20, Deutschland	dieses Monitoring
	0,138			Regenwasser, 14 Proben, März 2008 - September 2009, abflussproportional, EMC, Frankreich	Becouze-Lareure et al. (2019)
			0,0013 - 0,0041	Regenwasser behandelt, 19 Proben, Juni - Dezember 2012, volumenproportional, Österreich	Clara et al. (2014)

Stoffe	Mittelwert (µg/l)	Median (µg/l)	Min - Max (µg/l)	Bemerkung	Literaturquelle
	0,16		n.n. - 0,64	Regenwasser, 94 Proben, Mai 2014 - Juni 2015, volumenproportional, Berlin	Wicke et al. (2016)
	0,154			Regenwasser, 14 Proben, März 2008 - September 2009, abflussproportional, EMC, Frankreich	Becouze-Lareure et al. (2019)
			< 0,0033 - 0,0039	Regenwasser behandelt, 19 Proben, Juni - Dezember 2012, volumenproportional, Österreich	Clara et al. (2014)
	0,06		n.n. - 0,57	Regenwasser, 94 Proben, Mai 2014 - Juni 2015, volumenproportional, Berlin	Wicke et al. (2016)
Benzo[a]pyren	0,05	0,0495	0,0072 – 0,14	2 RKB, 2018-2019, n=20, Deutschland	dieses Monitoring
			< 0,01 - 0,06	Regenwasser, 8 Proben, Oktober - November 2008, Stichprobe, Dänemark	Birch et al. (2011)
			0,0038 - 0,013	Regenwasser unbehandelt, 19 Proben, Juni - Dezember 2012, volumenproportional, Österreich	Clara et al. (2014)
	< 0,02 0,02			Regenkanal, Einzelwert, Schweden	Kalmykova et al. (2013)
	0,09		n.n. - 0,77	Regenwasser, 94 Proben, Mai 2014 - Juni 2015, volumenproportional, Berlin	Wicke et al. (2016)
	0,046 0,016 < 0,010			städt. Regenwasser, 3 Proben, September 2009 - Juni 2010, abflussproportional, Dänemark	Nielsen et al. (2011)
Dibenz[a,h]anthracen	0,01	0,0093	0,0014 – 0,027	2 RKB, 2018-2019, n=20, Deutschland	dieses Monitoring
	< 0,01			Regenwasser, 8 Proben, Oktober - November 2008, Stichprobe, Dänemark	Birch et al. (2011)

Stoffe	Mittelwert (µg/l)	Median (µg/l)	Min - Max (µg/l)	Bemerkung	Literaturquelle
	< 0,02			Regenkanal, Einzelwert, Schweden	Kalmykova et al. (2013)
	0,02		n.n.- 0,14	Regenwasser, 94 Proben, Mai 2014 - Juni 2015, volumenproportional, Berlin	Wicke et al. (2016)
Indeno[1,2,3-cd]pyren	0,051	0,047	0,0072 – 0,14	2 RKB, 2018-2019, n=20, Deutschland	dieses Monitoring
	0,27			Regenwasser, 14 Proben, März 2008 - September 2009, abflussproportional, EMC, Frankreich	Becouze-Lareure et al. (2019)
			< 0,01 - 0,12	Regenwasser, 8 Proben, Oktober - November 2008, Stichprobe, Dänemark	Birch et al. (2011)
			0,00027 - 0,00073 0,00035 - 0,00077	Regenwasser, 19 Proben, Juni - Dezember 2012, volumenproportional, Österreich	Clara et al. (2014)
	< 0,02 0,02			Regenkanal, Einzelwert, Schweden	Kalmykova et al. (2013)
	0,07		n.n. - 0,37	Regenwasser, 94 Proben, Mai 2014 - Juni 2015, volumenproportional, Berlin	Wicke et al. (2016)
	< 0,01 0,015			städt. Regenwasser, 3 Proben, September 2009 - Juni 2010, abflussproportional, Dänemark	Nielsen et al. (2011)
Benzo[g,h,i]perylen	0,062	0,059	0,0091 – 0,13	2 RKB, 2018-2019, n=20, Deutschland	dieses Monitoring
	0,124 (gesamt) 1.055 ng/g (partikulär)			Regenwasser, 14 Proben, März 2008 - September 2009, abflussproportional, EMC, Frankreich	Becouze-Lareure et al. (2019)

Stoffe	Mittelwert (µg/l)	Median (µg/l)	Min - Max (µg/l)	Bemerkung	Literaturquelle
	< 0,01 - 0,16			Regenwasser, 8 Proben, Oktober - November 2008, Stichprobe, Dänemark	Birch et al. (2011)
			0,00026 - 0,00072 0,00063 - 0,00097	Regenwasser, 19 Proben, Juni - Dezember 2012, volumenproportional, Österreich	Clara et al. (2014)
	0,02 0,05			Regenkanal, Einzelwert, Schweden	Kalmykova et al. (2013)
	0,06		n.n. - 0,46	Regenwasser, 94 Proben, Mai 2014 - Juni 2015, volumenproportional, Berlin	Wicke et al. (2016)
	0,029 0,04 < 0,10			städt. Regenwasser, 3 Proben, September 2009 - Juni 2010, abflussproportional, Dänemark	Nielsen et al. (2011)
Atrazin	< 0,01	< 0,1	< 0,1	2 RKB, 2018-2019, n=20, Deutschland	dieses Monitoring
	< 0,05			Regenrückhaltebecken, 370 Proben, September 2010 - September 2012, zeitproportional, Deutschland	Erftverband (2013)
	0,0013			Regenwasser, 14 Proben, März 2008 - September 2009, abflussproportional, EMC, Frankreich	Becouze-Lareure et al. (2019)
Diuron	0,0965	0,0245	< 0,01 – 0,56	2 RKB, 2018-2019, n=20, Deutschland	dieses Monitoring
	0,019			Regenrückhaltebecken, 14 Proben, März 2008 - September 2009, abflussproportional, EMC, Frankreich	Becouze-Lareure et al. (2019)
	0,027 (Okt) < 0,01 (Nov)			Regenwasser, 1 Stichprobe, Oktober - November 2008, Dänemark	Birch et al. (2011)

Stoffe	Mittelwert (µg/l)	Median (µg/l)	Min - Max (µg/l)	Bemerkung	Literaturquelle
	0,08		n.n. - 0,06	Regenwasser, 94 Proben, Mai 2014 - Juni 2015, volumenproportional, Berlin	Wicke et al. (2016)
	< 0,01			Regenwasser, 1 Probe, September 2009 - Juni 2010, abflussproportional, Dänemark	Nielsen et al. (2011)
		0,007		Regenwasser, 191 Proben, 12 Ereignisse, Oktober 2011 - Juni 2012, abflussproportional, Dänemark	Bollmann et al. (2014)
			< 0,05 - 0,7	Regenrückhaltebecken, 370 Proben, September 2010 - September 2012, zeitproportional, Deutschland	Erftverband (2013)
Isoproturon	0,0276	0,0075	< 0,01 – 0,18	2 RKB, 2018-2019, n=20, Deutschland	dieses Monitoring
	0,0016			Regenrückhaltebecken, 14 Proben, März 2008 - September 2009, abflussproportional, EMC, Frankreich	Becouze-Lareure et al. (2019)
	< 0,01			Regenwasser, 1 Stichprobe, Oktober - November 2008, Dänemark	Birch et al. (2011)
			0,0028 - 0,028	Straßenabwasser unbehandelt, 4 Proben, Juni - Dezember 2012, volumenproportional, Österreich	Clara et al. (2014)
	0,088			Regenwasser, 19 Proben, Juli 2011- Mai 2013, abflussproportional, EMC, Frankreich	Gasperi et al. (2012)
	0,02		n.n. - 0,12	Regenwasser, 94 Proben, Mai 2014 - Juni 2015, volumenproportional, Berlin	Wicke et al. (2016)
			< 0,05 - 0,22	Regenrückhaltebecken, 370 Proben, September 2010 - September 2012, zeitproportional, Deutschland	Erftverband (2013)
		0,002		Regenwasser, 191 Proben, 12 Ereignisse, Oktober 2011 - Juni 2012, abflussproportional, Dänemark	Bollmann et al. (2014)
Terbutryn	0,0457	0,027	0,012 – 0,18	2 RKB, 2018-2019, n=20, Deutschland	dieses Monitoring

Stoffe	Mittelwert (µg/l)	Median (µg/l)	Min - Max (µg/l)	Bemerkung	Literaturquelle
			< 0,05 - 0	Regenrückhaltebecken, 370 Proben, September 2010 - September 2012, zeitproportional, Deutschland	Erftverband (2013)
	0,05		n.n. - 0,36	Regenwasser, 94 Proben, Mai 2014 - Juni 2015, volumenproportional, Berlin	Wicke et al. (2016)
		0,052		Regenwasser, 191 Proben, 12 Ereignisse, Oktober 2011 - Juni 2012, abflussproportional, Dänemark	Bollmann et al. (2014)

EMC = Event Mean Concentration (mittlere Ereigniskonzentration); n.n. = nicht nachweisbar

B.8 Stoffkonzentrationen in Überlaufmischproben im Vergleich mit Literaturwerten

Tabelle 71: Stoff-Konzentrationen in Überlaufmischproben (Regenüberlaufbecken (RÜB)) im Vergleich mit Literaturwerten

Stoffe	Mittelwert (µg/l)	Median (µg/l)	Min - Max (µg/l)	Bemerkung	Literaturquelle
Blei	8,7	4,9	1,1 - 66	6 RÜB, 2018-2019, n=27, Deutschland	dieses Monitoring
	5,1	3,5	0,66 - 44	EMC, 10 RÜB, 2017-2019, n=127, Bayern	Fuchs und Nickel (2019)
	5,3			Mischwasserüberlauf, 12 Proben, März 2008 - September 2009, abflussproportional, EMC, Frankreich	Becouze-Lareure et al. (2019)
	19,2			Mischwasserüberlauf, Einzelwert, 1 Probe, September 2009, volumenproportional, Dänemark	Birch et al. (2011)
			46 - 175 (partikulär)	Mischwasser, gelöst, Juli - September 2010, abflussproportional, Frankreich	Gasperi et al. (2012)
			< 5 - 12	Mischwasser unbehandelt, 7 Proben, Juni - Dezember 2012, Österreich	Clara et al. (2014)
			< 5 - 23	Mischwasser behandelt, 7 Proben, Juni - Dezember 2012, Österreich	Clara et al. (2014)
		3	n.n. - 220	Mischwasserentlastung, 11 Anlagen, n=48, 2001-2010, Sachsen	Engelmann et al. (2016)
Cadmium	0,466	0,12	0,02 – 4,8	6 RÜB, 2018-2019, n=27, Deutschland	dieses Monitoring
	0,085	0,062	0,018 – 0,59	EMC, 10 RÜB, 2017-2019, n=127, Bayern	Fuchs und Nickel (2019)
	0,27 < 0,2			Regenrückhaltebecken, 1 Probe, November 2009 - Juni 2010, abflussproportional, Deutschland	Bachor et al. (2011)

Stoffe	Mittelwert (µg/l)	Median (µg/l)	Min - Max (µg/l)	Bemerkung	Literaturquelle
	0,27 0,17 < 0,05 0,14 (Stichprobe) 0,28 (Stichprobe)			CSO, 1 Probe, September 2009 - Juni 2010, abflussproportional, Dänemark	Nielsen et al. (2011)
	0,09			Mischwasserüberlauf, 12 Proben, März 2008 - September 2009, abflussproportional, EMC, Frankreich	Becouze-Lareure et al. (2019)
	0,28			Mischwasserüberlauf, Einzelwert, 1 Probe, September 2009, volumenproportional, Dänemark	Birch et al. (2011)
			0,055 - 0,12	Mischwasser unbehandelt, 7 Proben, Juni - Dezember 2012, Österreich	Clara et al. (2014)
			< 0,05 - 0,12	Mischwasser behandelt, 7 Proben, Juni - Dezember 2012, Österreich	Clara et al. (2014)
		< 0,3	n.n. - 12	Mischwasserentlastung, 11 Anlagen, n=48, 2001-2010, Sachsen	Engelmann et al. (2016)
Nickel	6,3	3,7	< 1 - 37	6 RÜB, 2018-2019, n=27, Deutschland	dieses Monitoring
	3,66	2,5	0,24 - 30	EMC, 10 RÜB, 2017-2019, n=127, Bayern	Fuchs und Nickel (2019)
	2,4			Mischwasserüberlauf, 12 Proben, März 2008 - September 2009, abflussproportional, EMC, Frankreich	Becouze-Lareure et al. (2019)
	13,4			Mischwasserüberlauf, Einzelwert, 1 Probe, September 2009, volumenproportional, Dänemark	Birch et al. (2011)
			< 2 - 5,4	Mischwasser unbehandelt, 7 Proben, Juni - Dezember 2012, Österreich	Clara et al. (2014)

Stoffe	Mittelwert (µg/l)	Median (µg/l)	Min - Max (µg/l)	Bemerkung	Literaturquelle
			< 2 - 20	Mischwasser behandelt, 7 Proben, Juni - Dezember 2012, Österreich	Clara et al. (2014)
	8,3 4,5 < 1 2,6 (Stichprobe) 9,3 (Stichprobe)			CSO, 1 Probe, September 2009 - Juni 2010, abflussproportional, Dänemark	Nielsen et al. (2011)
	0,037		0,0053 - 0,67	Mischwasser unbehandelt, 6 Proben, Juni - Dezember 2012, Österreich	Clara et al. (2014)
		< 5 - < 7	n.n. - 45	Mischwasserentlastung, 11 Anlagen, n=48, 2001-2010, Sachsen	Engelmann et al. (2016)
Quecksilber	0,032	0,022	< 0,001 – 0,19	6 RÜB, 2018-2019, n=27, Deutschland	dieses Monitoring
	0,0162	0,012	0,002 – 0,064	EMC, 10 RÜB, 2017-2019, n=127, Bayern	Fuchs und Nickel (2019)
	0,15		0,014 - 0,083	Mischwasser behandelt, 7 Proben, Juni - Dezember 2012, Österreich	Clara et al. (2014)
		< 0,05 - < 0,3	n.n. - 0,063	Mischwasserentlastung, 11 Anlagen, n=48, 2001-2010, Sachsen	Engelmann et al. (2016)
4-iso-Nonylphenol	0,1	0,11	< 0,4 – 0,31	6 RÜB, 2018-2019, n=27, Deutschland	dieses Monitoring
	0,138			Mischwasserüberlauf, 12 Proben, März 2008 - September 2009, abflussproportional, EMC, Frankreich	Becouze-Lareure et al. (2019)
	< 0,1			Mischwasserüberlauf, Einzelwert, 1 Probe, September 2009, volumenproportional, Dänemark	Birch et al. (2011)

Stoffe	Mittelwert (µg/l)	Median (µg/l)	Min - Max (µg/l)	Bemerkung	Literaturquelle
	0,46		0,16 - 1	Mischwasser behandelt, Einzelwerte, Juni - Dezember 2012, Österreich	Clara et al. (2014)
	1		0,2 - 3,6	Mischwasser unbehandelt, Einzelwerte, Juni - Dezember 2012, Österreich	Clara et al. (2014)
	0,96 0,45 1,89 0,4			Mischwasser, partikulär, Juli - September 2010, abflussproportional, Frankreich	Gasperi et al. (2012)
	0,39 0,33 0,3 0,24			Mischwasser, gelöst, Juli - September 2010, abflussproportional, Frankreich	Gasperi et al. (2012)
	0,41	0,46	0,08 - 0,6	Mischwasserüberlauf, 7 Proben, Juli - Oktober 2014, volumenproportional, EMC, Stuttgart	Launay et al. (2016)
	0,28 < 0,1 0,51			CSO, 1 Probe, September 2009 - Juni 2010, abflussproportional, Dänemark	Nielsen et al. (2011)
4-tert.-Oktylphenol	0,02	0,023	< 0,02 – 0,037	6 RÜB, 2018-2019, n=27, Deutschland	dieses Monitoring
	3,2			Mischwasserüberlauf, 12 Proben, März 2008 - September 2009, abflussproportional, EMC, Frankreich	Becouze-Lareure et al. (2019)
	0,053 - 0,067			Mischwasser behandelt, Einzelwerte, Juni - Dezember 2012, Österreich	Clara et al. (2014)
	0,12 - 0,13			Mischwasser unbehandelt, Einzelwerte, Juni - Dezember 2012, Österreich	Clara et al. (2014)
	0,099 0,022			Mischwasser, partikulär, Juli - September 2010, abflussproportional, Frankreich	Gasperi et al. (2012)

Stoffe	Mittelwert (µg/l)	Median (µg/l)	Min - Max (µg/l)	Bemerkung	Literaturquelle
	0,21 0,045				
	<0,1			CSO, 1 Probe, September 2009 - Juni 2010, abflussproportional, Dänemark	Nielsen et al. (2011)
Di-(2-ethylhexyl)phthalat	4,6	3,7	0,74 - 11	6 RÜB, 2018-2019, n=27, Deutschland	dieses Monitoring
	2,6	1,8	0,24 - 11	EMC, 10 RÜB, 2017-2019, n=127, Bayern	Fuchs und Nickel (2019)
	57			Mischwasserüberlauf, Einzelwert, 1 Probe, September 2009, volumenproportional, Dänemark	Birch et al. (2011)
			< 0,35 - 0,98	Mischwasser unbehandelt, 6 Proben, Juni - Dezember 2012, Österreich	Clara et al. (2014)
			< 0,35 - 5,1	Mischwasser behandelt, 7 Proben, Juni - Dezember 2012, Österreich	Clara et al. (2014)
			3,75 - 14,82 (partikulär)	Mischwasser, gelöst, Juli - September 2010, abflussproportional, Frankreich	Gasperi et al. (2012)
	2,643	2,108	0,7 - 5,4	Mischwasserüberlauf, 7 Proben, Juli - Oktober 2014, volumenproportional, EMC, Stuttgart	Launay et al. (2016)
HBCDD	0,0099	0,008	< 0,005 – 0,086	6 RÜB, 2018-2019, n=27, Deutschland	dieses Monitoring
	< BG 0,0066			CSO, 1 Probe, September 2009 - Juni 2010, abflussproportional, Dänemark	Nielsen et al. (2011)
Perfluorbutanoat	0,0037	0,003	< 0,001 – 0,009	6 RÜB, 2018-2019, n=27, Deutschland	dieses Monitoring
	< 0,01 0,005 0,0053			CSO, 1 Probe, September 2009 - Juni 2010, abflussproportional, Dänemark	Nielsen et al. (2011)

Stoffe	Mittelwert (µg/l)	Median (µg/l)	Min - Max (µg/l)	Bemerkung	Literaturquelle
	0,209 < 0,0046			CSO, 1 Probe, September 2009 - Juni 2010, Stichprobe, Dänemark	Nielsen et al. (2011)
Perfluorpentanoat	0,0019 < 0,005	0,002	< 0,001 – 0,005	6 RÜB, 2018-2019, n=27, Deutschland CSO, 1 Probe, September 2009 - Juni 2010, Stichprobe, Dänemark	dieses Monitoring Nielsen et al. (2011)
Perfluorhexanoat	0,0031 < 0,005 0,0007 0,0018	0,003	< 0,001 – 0,01	6 RÜB, 2018-2019, n=27, Deutschland CSO, 1 Probe, September 2009 - Juni 2010, Stichprobe, Dänemark Regenrückhaltebecken, Mischprobe, November 2009 -Juni 2010, Wismar	dieses Monitoring Nielsen et al. (2011) Bachor et al. (2011)
Perfluorheptanoat	0,0013 < 0,005	0,001	< 0,001 – 0,004	6 RÜB, 2018-2019, n=27, Deutschland CSO, 1 Probe, September 2009 - Juni 2010, abflussproportional, Dänemark	dieses Monitoring Nielsen et al. (2011)
Perfluoroctanoat	0,0031 0,0076 0,009 0,102 (Stichprobe) 0,0019 0,004	0,003	< 0,001 – 0,009	6 RÜB, 2018-2019, n=27, Deutschland CSO, 1 Probe, September 2009 - Juni 2010, abflussproportional, Dänemark Regenrückhaltebecken, Mischprobe, November 2009 -Juni 2010, Wismar	dieses Monitoring Nielsen et al. (2011) Bachor et al. (2011)
Perfluornonanoat	< 0,001 < 0,005	<0,001	< 0,001 – 0,002	6 RÜB, 2018-2019, n=27, Deutschland CSO, 1 Probe, September 2009 - Juni 2010, abflussproportional, Dänemark	dieses Monitoring Nielsen et al. (2011)
Perfluordecanoat	0,0012	< 0,001	< 0,001 – 0,005	6 RÜB, 2018-2019, n=27, Deutschland	dieses Monitoring

Stoffe	Mittelwert (µg/l)	Median (µg/l)	Min - Max (µg/l)	Bemerkung	Literaturquelle
	< 0,005			CSO, 1 Probe, September 2009 - Juni 2010, abflussproportional, Dänemark	Nielsen et al. (2011)
	0,001 0,0001			Regenrückhaltebecken, Mischprobe, November 2009 -Juni 2010, Wismar	Bachor et al. (2011)
Perfluorbutansulfonat	0,0013	< 0,001	< 0,001 – 0,004	6 RÜB, 2018-2019, n=27, Deutschland	dieses Monitoring
	< 0,005			CSO, 1 Probe, September 2009 - Juni 2010, abflussproportional, Dänemark	Nielsen et al. (2011)
Perfluorhexansulfonat	< 0,001	< 0,001	< 0,001 – 0,001	6 RÜB, 2018-2019, n=27, Deutschland	dieses Monitoring
	< 0,005			CSO, 1 Probe, September 2009 - Juni 2010, abflussproportional, Dänemark	Nielsen et al. (2011)
Perfluoroctansulfonat	0,0023	0,002	< 0,001 – 0,007	6 RÜB, 2018-2019, n=27, Deutschland	dieses Monitoring
	< 0,005			CSO, 1 Probe, September 2009 - Juni 2010, abflussproportional, Dänemark	Nielsen et al. (2011)
Naphthalin	0,029	0,022	< 0,01 – 0,12	6 RÜB, 2018-2019, n=27, Deutschland	dieses Monitoring
	0,0254	0,021	< 0,01 – 0,15	EMC, 10 RÜB, 2017-2019, n=127, Bayern	Fuchs und Nickel (2019)
Acenaphthylen	0,0099	0,0098	< 0,001 – 0,021	6 RÜB, 2018-2019, n=27, Deutschland	dieses Monitoring
	0,0177	0,017	< 0,001 – 0,061	EMC, 10 RÜB, 2017-2019, n=127, Bayern	Fuchs und Nickel (2019)
	0,029			Mischwasserüberlauf, Einzelwert, 1 Probe, September 2009, volumenproportional, Dänemark	Birch et al. (2011)
	0,01 (partikulär)			Mischwasser, gelöst, Juli - September 2010, abflussproportional, Frankreich	Gasperi et al. (2012)

Stoffe	Mittelwert (µg/l)	Median (µg/l)	Min - Max (µg/l)	Bemerkung	Literaturquelle
	0,009 (partikulär)				
	0,015	0,013	0,005 - 0,025	Mischwasserüberlauf, 7 Proben, Juli - Oktober 2014, volumenproportional, EMC, Stuttgart	Launay et al. (2016)
Acenaphthen	0,016	0,014	0,0028 – 0,053	6 RÜB, 2018-2019, n=27, Deutschland	dieses Monitoring
	0,01	0,0063	< 0,001 – 0,061	EMC, 10 RÜB, 2017-2019, n=127, Bayern	Fuchs und Nickel (2019)
	< 0,01			Mischwasserüberlauf, Einzelwert, 1 Probe, September 2009, volumenproportional, Dänemark	Birch et al. (2011)
			0,0031 - 0,007	Mischwasser behandelt, 7 Proben, Juni - Dezember 2012, Österreich	Clara et al. (2014)
			0,0058 - 0,0093	Mischwasser unbehandelt, 6 Proben, Juni - Dezember 2012, Österreich	Clara et al. (2014)
	0,005	0,003	0,002 - 0,011	Mischwasserüberlauf, 7 Proben, Juli - Oktober 2014, volumenproportional, EMC, Stuttgart	Launay et al. (2016)
Fluoren	0,011	0,0093	0,0025 – 0,029	6 RÜB, 2018-2019, n=27, Deutschland	dieses Monitoring
	0,0089	0,0067	0,0013 – 0,071	EMC, 10 RÜB, 2017-2019, n=127, Bayern	Fuchs und Nickel (2019)
Phenanthren	0,062	0,056	0,012 – 0,14	6 RÜB, 2018-2019, n=27, Deutschland	dieses Monitoring
	0,0629	0,045	0,0038 – 0,66	EMC, 10 RÜB, 2017-2019, n=127, Bayern	Fuchs und Nickel (2019)
	0,82			Mischwasserüberlauf, Einzelwert, 1 Probe, September 2009, volumenproportional, Dänemark	Birch et al. (2011)

Stoffe	Mittelwert (µg/l)	Median (µg/l)	Min - Max (µg/l)	Bemerkung	Literaturquelle
	0,015		< 0,0026 - 0,03	Mischwasser behandelt, 7 Proben, Juni - Dezember 2012, Österreich	Clara et al. (2014)
	0,018		0,006 - 0,32	Mischwasser unbehandelt, 6 Proben, Juni - Dezember 2012, Österreich	Clara et al. (2014)
			0,019 - 0,085 (gelöst) 0,045 - 0,179 (partikulär)	Mischwasser, gelöst, Juli - September 2010, abflussproportional, Frankreich	Gasperi et al. (2012)
	0,091	0,066	0,055-0,185	Mischwasserüberlauf, 7 Proben, Juli - Oktober 2014, volumenproportional, EMC, Stuttgart	Launay et al. (2016)
Anthracen	0,008	0,0068	0,0018 – 0,022	6 RÜB, 2018-2019, n=27, Deutschland	dieses Monitoring
	0,0091	0,0055	< 0,001 – 0,13	EMC, 10 RÜB, 2017-2019, n=127, Bayern	Fuchs und Nickel (2019)
	0,128			Mischwasserüberlauf, 12 Proben, März 2008 - September 2009, abflussproportional, EMC, Frankreich	Becouze-Lareure et al. (2019)
	0,22			Mischwasserüberlauf, Einzelwert, 1 Probe, September 2009, volumenproportional, Dänemark	Birch et al. (2011)
			0,0047 - 0,021	Mischwasser unbehandelt, 7 Proben, Juni - Dezember 2012, Österreich	Clara et al. (2014)
			0,014 - 0,031 (partikulär) 0,007 - 0,009 (gelöst)	Mischwasser, gelöst, Juli - September 2010, abflussproportional, Frankreich	Gasperi et al. (2012)
	0,027	0,016	0,014 - 0,067	Mischwasserüberlauf, 7 Proben, Juli - Oktober 2014, volumenproportional, EMC, Stuttgart	Launay et al. (2016)

Stoffe	Mittelwert (µg/l)	Median (µg/l)	Min - Max (µg/l)	Bemerkung	Literaturquelle
Fluoranthen	0,087	0,079	0,022 – 0,17	6 RÜB, 2018-2019, n=27, Deutschland	dieses Monitoring
	0,1	0,073	0,012 – 1,1	EMC, 10 RÜB, 2017-2019, n=127, Bayern	Fuchs und Nickel (2019)
	0,0882			Mischwasserüberlauf, 12 Proben, März 2008 - September 2009, abflussproportional, EMC, Frankreich	Becouze-Lareure et al. (2019)
	2			Mischwasserüberlauf, Einzelwert, 1 Probe, September 2009, volumenproportional, Dänemark	Birch et al. (2011)
			0,003 - 0,02	Mischwasser behandelt, 7 Proben, Juni - Dezember 2012, Österreich	Clara et al. (2014)
			0,0071 - 0,024	Mischwasser unbehandelt, 7 Proben, Juni - Dezember 2012, Österreich	Clara et al. (2014)
			0,009 - 0,025 (gelöst) 0,111 - 0,364 (partikulär)	Mischwasser, gelöst, Juli - September 2010, abflussproportional, Frankreich	Gasperi et al. (2012)
	0,175	0,139	0,073 - 0,340	Mischwasserüberlauf, 7 Proben, Juli - Oktober 2014, volumenproportional, EMC, Stuttgart	Launay et al. (2016)
0,19 0,041 (Stichprobe) 0,22 (Stichprobe)			CSO, 1 Probe, September 2009 - Juni 2010, abflussproportional, Dänemark	Nielsen et al. (2011)	
Pyren	0,0725	0,072	0,017 – 0,16	6 RÜB, 2018-2019, n=27, Deutschland	dieses Monitoring
	0,084	0,063	0,012 – 0,82	EMC, 10 RÜB, 2017-2019, n=127, Bayern	Fuchs und Nickel (2019)

Stoffe	Mittelwert (µg/l)	Median (µg/l)	Min - Max (µg/l)	Bemerkung	Literaturquelle
	2,1			Mischwasserüberlauf, Einzelwert, 1 Probe, September 2009, volumenproportional, Dänemark	Birch et al. (2011)
			0,012 - 0,014	Mischwasser behandelt, 5 Proben, Juni - Dezember 2012, Österreich	Clara et al. (2014)
			< 0,0066 - 0,043	Mischwasser unbehandelt, 7 Proben, Juni - Dezember 2012, Österreich	Clara et al. (2014)
			0,122 - 0,399 (partikulär) 0,009 - 0,021 (gelöst)	Mischwasser, gelöst, Juli - September 2010, abflussproportional, Frankreich	Gasperi et al. (2012)
	0,153	0,113	0,058 - 0,320	Mischwasserüberlauf, 7 Proben, Juli - Oktober 2014, volumenproportional, EMC, Stuttgart	Launay et al. (2016)
	0,2 0,036 (Stichprobe) 0,19 (Stichprobe)			CSO, 1 Probe, September 2009 - Juni 2010, abflussproportional, Dänemark	Nielsen et al. (2011)
Benzo[a]anthracen	0,03	0,029	0,0077 – 0,083	6 RÜB, 2018-2019, n=27, Deutschland	dieses Monitoring
	0,035	0,02	0,0016 – 0,47	EMC, 10 RÜB, 2017-2019, n=127, Bayern	Fuchs und Nickel (2019)
	1			Mischwasserüberlauf, Einzelwert, 1 Probe, September 2009, volumenproportional, Dänemark	Birch et al. (2011)
			0,0022 - 0,0024	Mischwasser behandelt, 5 Proben, Juni - Dezember 2012, Österreich	Clara et al. (2014)
			0,0056 - 0,0057	Mischwasser unbehandelt, 7 Proben, Juni - Dezember 2012, Österreich	Clara et al. (2014)

Stoffe	Mittelwert (µg/l)	Median (µg/l)	Min - Max (µg/l)	Bemerkung	Literaturquelle
	0,174 (partikulär) 0,105 (partikulär) 0,168 (partikulär) 0,054 (partikulär)			Mischwasser, partikulär, Juli - September 2010, abflussproportional, Frankreich	Gasperi et al. (2012)
	0,091	0,056	0,038 - 0, 220	Mischwasserüberlauf, 7 Proben, Juli - Oktober 2014, volumenproportional, EMC, Stuttgart	Launay et al. (2016)
Chrysen	0,053	0,049	0,013 – 0,11	6 RÜB, 2018-2019, n=27, Deutschland	dieses Monitoring
	0,0587	0,04	0,0035 – 0,71	EMC, 10 RÜB, 2017-2019, n=127, Bayern	Fuchs und Nickel (2019)
			< 0,002 - 0,0058	Mischwasser behandelt, 5 Proben, Juni - Dezember 2012, Österreich	Clara et al. (2014)
			0,0025 - 0,044	Mischwasser unbehandelt, 7 Proben, Juni - Dezember 2012, Österreich	Clara et al. (2014)
	0,252 (partikulär) 0,146 (partikulär) 0,273 (partikulär) 0,081 (partikulär)			Mischwasser, partikulär, Juli - September 2010, abflussproportional, Frankreich	Gasperi et al. (2012)
	0,111	0,065	0,049 - 0,230	Mischwasserüberlauf, 7 Proben, Juli - Oktober 2014, volumenproportional, EMC, Stuttgart	Launay et al. (2016)
Benzo[b]fluoranthen	0,04	0,035	0,0082 – 0,1	6 RÜB, 2018-2019, n=27	dieses Monitoring

Stoffe	Mittelwert (µg/l)	Median (µg/l)	Min - Max (µg/l)	Bemerkung	Literaturquelle
	0,046	0,029	0,0018 – 0,52	EMC, 10 RÜB, 2017-2019, n=127, Bayern	Fuchs und Nickel (2019)
	0,035			Mischwasserüberlauf, 12 Proben, März 2008 - September 2009, abflussproportional, EMC, Frankreich	Becouze-Lareure et al. (2019)
			0,00066 - 0,004	Mischwasser behandelt, 5 Proben, Juni - Dezember 2012, Österreich	Clara et al. (2014)
			0,0017 - 0,0045	Mischwasser unbehandelt, 7 Proben, Juni - Dezember 2012, Österreich	Clara et al. (2014)
	0,286 (partikulär) 0,0,17 (partikulär) 0,371 (partikulär) 0,098 (partikulär)			Mischwasser, partikulär, Juli - September 2010, abflussproportional, Frankreich	Gasperi et al. (2012)
	0,157	0,109	0,067 - 0,360	Mischwasserüberlauf, 7 Proben, Juli - Oktober 2014, volumenproportional, EMC, Stuttgart	Launay et al. (2016)
Benzo[k]fluoranthen	0,017	0,014	0,0041 – 0,046	6 RÜB, 2018-2019, n=27, Deutschland	dieses Monitoring
	0,0214	0,013	< 0,001 – 0,26	EMC, 10 RÜB, 2017-2019, n=127, Bayern	Fuchs und Nickel (2019)
	0,044			Mischwasserüberlauf, 12 Proben, März 2008 - September 2009, abflussproportional, EMC, Frankreich	Becouze-Lareure et al. (2019)
			0,0014 - 0,0047	Mischwasser unbehandelt, 7 Proben, Juni - Dezember 2012, Österreich	Clara et al. (2014)

Stoffe	Mittelwert (µg/l)	Median (µg/l)	Min - Max (µg/l)	Bemerkung	Literaturquelle
	0,062	0,044	0,025 - 0,160	Mischwasserüberlauf, 7 Proben, Juli - Oktober 2014, volumenproportional, EMC, Stuttgart	Launay et al. (2016)
Benzo[a]pyren	0,03	0,028	0,0076 – 0,082	6 RÜB, 2018-2019, n=27, Deutschland	dieses Monitoring
	0,0353	0,021	0,0014 – 0,44	EMC, 10 RÜB, 2017-2019, n=127, Bayern	Fuchs und Nickel (2019)
	1,6			Mischwasserüberlauf, Einzelwert, 1 Probe, September 2009, volumenproportional, Dänemark	Birch et al. (2011)
	0,138 (partikulär) 0,1 (partikulär) 0,203 (partikulär) 0,057 (partikulär)			Mischwasser, partikulär, Juli - September 2010, abflussproportional, Frankreich	Gasperi et al. (2012)
	0,003 (gelöst) 0,001 (gelöst) 0,005 (gelöst)			Mischwasser, gelöst, Juli - September 2010, abflussproportional, Frankreich	Gasperi et al. (2012)
	0,091	0,08	0,03 - 0,21	Mischwasserüberlauf, 7 Proben, Juli - Oktober 2014, volumenproportional, EMC, Stuttgart	Launay et al. (2016)
	0,092 (Stichprobe) 0,014 (Stichprobe) 0,083 (Stichprobe)			CSO, 1 Probe, September 2009 - Juni 2010, abflussproportional, Dänemark	Nielsen et al. (2011)
Dibenz[a,h]anthracen	0,0069	0,0062	0,0018 – 0,023	6 RÜB, 2018-2019, n=27, Deutschland	dieses Monitoring
	0,0076	0,0044	< 0,001 – 0,12	EMC, 10 RÜB, 2017-2019, n=127, Bayern	Fuchs und Nickel (2019)

Stoffe	Mittelwert (µg/l)	Median (µg/l)	Min - Max (µg/l)	Bemerkung	Literaturquelle
	0,19			Mischwasserüberlauf, Einzelwert, 1 Probe, September 2009, volumenproportional, Dänemark	Birch et al. (2011)
	0,036 (partikulär) 0,091 (partikulär) 0,024 (partikulär)			Mischwasser, partikulär, Juli - September 2010, abflussproportional, Frankreich	Gasperi et al. (2012)
	0,018	0,008	0,007 - 0,035	Mischwasserüberlauf, 7 Proben, Juli - Oktober 2014, volumenproportional, EMC, Stuttgart	Launay et al. (2016)
Indeno[1,2,3-cd]pyren	0,03	0,025	0,0064 – 0,1	6 RÜB, 2018-2019, n=27, Deutschland	dieses Monitoring
	0,0364	0,02	0,0015 – 0,52	EMC, 10 RÜB, 2017-2019, n=127, Bayern	Fuchs und Nickel (2019)
	0,0381			Mischwasserüberlauf, 12 Proben, März 2008 - September 2009, abflussproportional, EMC, Frankreich	Becouze-Lareure et al. (2019)
	2,6			Mischwasserüberlauf, Einzelwert, 1 Probe, September 2009, volumenproportional, Dänemark	Birch et al. (2011)
			0,0014 - 0,0015	Mischwasser behandelt, 5 Proben, Juni - Dezember 2012, Österreich	Clara et al. (2014)
			0,0017 - 0,0019	Mischwasser unbehandelt, 7 Proben, Juni - Dezember 2012, Österreich	Clara et al. (2014)
	0,133 (partikulär) 0,102 (partikulär) 0,245 (partikulär)			Mischwasser, partikulär, Juli - September 2010, abflussproportional, Frankreich	Gasperi et al. (2012)

Stoffe	Mittelwert (µg/l)	Median (µg/l)	Min - Max (µg/l)	Bemerkung	Literaturquelle
	0,06 (partikulär) 0,008 (gelöst)				
	0,088	0,045	0,034 - 0,211	Mischwasserüberlauf, 7 Proben, Juli - Oktober 2014, volumenproportional, EMC, Stuttgart	Launay et al. (2016)
	0,072 < 0,01 (Stichprobe) 0,067 (Stichprobe)			CSO, 1 Probe, September 2009 - Juni 2010, abflussproportional, Dänemark	Nielsen et al. (2011)
Benzo[g,h,i]perylen	0,032	0,03	0,0074 – 0,089	6 RÜB, 2018-2019, n=27, Deutschland	dieses Monitoring
	0,0383	0,023	0,019 – 0,46	EMC, 10 RÜB, 2017-2019, n=127, Bayern	Fuchs und Nickel (2019)
	0,251			Mischwasserüberlauf, 12 Proben, März 2008 - September 2009, abflussproportional, EMC, Frankreich	Becouze-Lareure et al. (2019)
	0,01			Mischwasserüberlauf, Einzelwert, 1 Probe, September 2009, volumenproportional, Dänemark	Birch et al. (2011)
			0,0016 - 0,0017	Mischwasser behandelt, 5 Proben, Juni - Dezember 2012, Österreich	Clara et al. (2014)
			0,0025 - 0,0026	Mischwasser unbehandelt, 7 Proben, Juni - Dezember 2012, Österreich	Clara et al. (2014)
	0,143 (partikulär) 0,104 (partikulär) 0,259 (partikulär)			Mischwasser, partikulär, Juli - September 2010, abflussproportional, Frankreich	Gasperi et al. (2012)

Stoffe	Mittelwert (µg/l)	Median (µg/l)	Min - Max (µg/l)	Bemerkung	Literaturquelle
	0,06 (partikulär) 0,006 (gelöst)				
	0,094	0,073	0,059 - 0,18	Mischwasserüberlauf, 7 Proben, Juli - Oktober 2014, volumenproportional, EMC, Stuttgart	Launay et al. (2016)
	0,11 <0,010 (Stichprobe) 0,099 (Stichprobe)			CSO, 1 Probe, September 2009 - Juni 2010, abflussproportional, Dänemark	Nielsen et al. (2011)
Atrazin	< 0,01	< 0,01	< 0,01 – 0,021	6 RÜB, 2018-2019, n=27, Deutschland	dieses Monitoring
	< 0,1	< 0,1	< 0,01 – 0,045	EMC, 10 RÜB, 2017-2019, n=127, Bayern	Fuchs und Nickel (2019)
	0,0023			Mischwasserüberlauf, 12 Proben, März 2008 - September 2009, abflussproportional, EMC, Frankreich	Becouze-Lareure et al. (2019)
	0,03 (gelöst)			Mischwasser, partikulär, Juli - September 2010, abflussproportional, Frankreich	Gasperi et al. (2012)
Diuron	0,019	0,012	< 0,01 – 0,14	6 RÜB, 2018-2019, n=27, Deutschland	dieses Monitoring
	0,019	< 0,01	< 0,01 – 0,2	EMC, 10 RÜB, 2017-2019, n=127, Bayern	Fuchs und Nickel (2019)
	0,0722			Mischwasserüberlauf, 12 Proben, März 2008 - September 2009, abflussproportional, EMC, Frankreich	Becouze-Lareure et al. (2019)
	0,48			Einzelwert, 1 Probe, September 2009, volumenproportional, Dänemark	Birch et al. (2011)

Stoffe	Mittelwert (µg/l)	Median (µg/l)	Min - Max (µg/l)	Bemerkung	Literaturquelle
			0,11 - 0,21	Mischwasser unbehandelt, 4 Proben, Juni - Dezember 2012, Österreich	Clara et al. (2014)
			< 0,05 - 0,22	Mischwasser behandelt, 6 Proben, Juni - Dezember 2012, Österreich	Clara et al. (2014)
	0,321	0,26	0,068 - 0,681	Mischwasserüberlauf, 7 Proben, Juli - Oktober 2014, volumenproportional, Stuttgart	Launay et al. (2016)
			< 0,05 - 2,68	Regenrückhaltebecken, 370 Proben, September 2010 - September 2012, zeitproportional, Deutschland	Erftverband (2013)
	0,47 0,37 0,05 0,19			Mischwasser, Juli - September 2010, abflussproportional, Frankreich	Gasperi et al. (2012)
		0,1 0,21		Regenwasserkanal, September 2007 - Oktober 2008, abflussproportional, Regenwetter, Frankreich	Lamprea und Ruban (2011)
		0,16 0,1		Regenwasserkanal, September 2007 - Oktober 2008, abflussproportional, Trockenwetter, Frankreich	Lamprea und Ruban (2011)
	0,037			RÜB, 1 Probe, September 2009 - Juni 2010, abflussproportional, Dänemark	Nielsen et al. (2011)
	0,043 0,055			RÜB, 1 Probe, September 2009 - Juni 2010, Stichprobe, Dänemark	Nielsen et al. (2011)
		< 0,01- 0,07	n.n. - 0,23	Mischwasserentlastung, 11 Anlagen, n=48, 2001-2010, Sachsen	Engelmann et al. (2016)
Isoproturon	0,012	< 0,01	<0,01 – 0,047	6 RÜB, 2018-2019, n=27, Deutschland	dieses Monitoring
	0,017	< 0,01	<0,01 – 0,17	EMC, 10 RÜB, 2017-2019, n=127, Bayern	Fuchs und Nickel (2019)

Stoffe	Mittelwert (µg/l)	Median (µg/l)	Min - Max (µg/l)	Bemerkung	Literaturquelle
	0,0015			Mischwasserüberlauf, 12 Proben, März 2008 - September 2009, abflussproportional, EMC, Frankreich	Becouze-Lareure et al. (2019)
	0,2			RÜB, Einzelwert, 1 Probe, September 2009, volumenproportional, Dänemark	Birch et al. (2011)
			< 0,05 - 6,37	Regenrückhaltebecken, 370 Proben, September 2010 - September 2012, zeitproportional, Deutschland	Erftverband (2013)
	0,04 0,04 0,02 0,02			Mischwasser, gelöst, Juli - September 2010, abflussproportional, Frankreich	Gasperi et al. (2012)
	0,098	0,093	0,025 - 0,18	Mischwasserüberlauf, 7 Proben, Juli - Oktober 2014, volumenproportional, EMC, Stuttgart	Launay et al. (2016)
			0,02 - 0,04	Mischwasser unbehandelt, 4 Proben, Juni - Dezember 2012, Österreich	Clara et al. (2014)
		< 0,1	n.n. - 0,25	Mischwasserentlastung, 11 Anlagen, n=48, 2001-2010, Sachsen	Engelmann et al. (2016)
Terbutryn	0,033	0,028	< 0,01 – 0,1	6 RÜB, 2018-2019, n=27, Deutschland	dieses Monitoring
	0,026	0,02	< 0,01 – 0,099	EMC, 10 RÜB, 2017-2019, n=127, Bayern	Fuchs und Nickel (2019)
			<0,05	Regenrückhaltebecken, 370 Proben, September 2010 - September 2012, zeitproportional, Deutschland	Erftverband (2013)
	0,085	0,083	0,055 - 0,122	Mischwasserüberlauf, 7 Proben, Juli - Oktober 2014, volumenproportional, EMC, Stuttgart	Launay et al. (2016)
		< 0,01	n.n. - 0,78	Mischwasserentlastung, 11 Anlagen, n=48, 2001-2010, Sachsen	Engelmann et al. (2016)

EMC = Event Mean Concentration (mittlere Ereigniskonzentration); n.n. = nicht nachweisbar; BG = Bestimmungsgrenze

B.9 Vergleich der Reinigungsleistung konventioneller Kläranlagen mit Literaturwerten

Tabelle 72: Vergleich der Reinigungsleistung konventioneller Kläranlagen (KA) mit Literaturwerten

Stoffe	Reinigungsleistung (%)	Bemerkung	Literaturquelle
Blei	94	5 KA, n=93, 2017-2019, Deutschland	dieses Monitoring
	90-100	2 KA, Österreich	Clara et al. (2014)
	90	16 KA, 2010-2011, Großbritannien	Gardner et al. (2013)
Cadmium	92	5 KA, n=93, 2017-2019, Deutschland	dieses Monitoring
	92-100	2 KA, Österreich	Clara et al. (2014)
	88	16 KA, 2010-2011, Großbritannien	Gardner et al. (2013)
Nickel	44	5 KA, n=94, 2017-2019, Deutschland	dieses Monitoring
	25-30	2 KA, Österreich	Clara et al. (2014)
	29	16 KA, 2010-2011, Großbritannien	Gardner et al. (2013)
Quecksilber	89	5 KA, n=93, 2017-2019, Deutschland	dieses Monitoring
	90	2 KA, Österreich	Clara et al. (2014)
	79	16 KA, 2010-2011, Großbritannien	Gardner et al. (2013)
4-iso-Nonylphenol	78	5 KA, n=93, 2017-2019, Deutschland	dieses Monitoring
	21,7 - 99	weltweit, Literaturzusammenfassung	Luo et al. (2014)
	89	3 KA, Österreich	Clara et al. (2005)
	81		
78			

Stoffe	Reinigungsleistung (%)	Bemerkung	Literaturquelle
Di-(2-ethylhexyl)phthalat	88	5 KA, n=94, 2017-2019, Deutschland	dieses Monitoring
	87		Schütte et al. (2017)
	63		Schütte et al. (2016)
	25 - 97	weltweit, Literaturzusammenfassung	Luo et al. (2014)
Perfluorbutanoat	71	5 KA, n=924, 2017-2019, Deutschland	dieses Monitoring
	15	40 KA, 2015-2016, Baden-Württemberg	Rau und Metzger (2017)
Perfluoroctanoat	62	5 KA, n=11, 2017-2019, Deutschland	dieses Monitoring
	19	40 KA, 2015-2016, Baden-Württemberg	Rau und Metzger (2017)
	8	2 KA, Österreich	Clara et al. (2014)
Perfluorbutansulfonat	17	5 KA, n=17, 2017-2019, Deutschland	dieses Monitoring
	32	40 KA, 2015-2016, Baden-Württemberg	Rau und Metzger (2017)
Perfluoroctansulfonat	67	5 KA, n=12, 2017-2019, Deutschland	dieses Monitoring
	38	40 KA, 2015-2016, Baden-Württemberg	Rau und Metzger (2017)
	73		Maus et al. (2016)
	40	2 KA, Österreich	Clara et al. (2014)
Acenaphthen	90	5 KA, n=94, 2017-2019, Deutschland	dieses Monitoring
	76-100	2 KA, Österreich	Clara et al. (2014)
Fluoren	86	5 KA, n=94, 2017-2019, Deutschland	dieses Monitoring
	55 - 85	30 KA, 2011, Andalusien	Barco-Bonilla et al. (2013)

Stoffe	Reinigungsleistung (%)	Bemerkung	Literaturquelle
Phenanthren	94	5 KA, n=94, 2017-2019, Deutschland	dieses Monitoring
	72		Schütte et al. (2017)
Diuron	13	5 KA, n=42, 2017-2019, Deutschland	dieses Monitoring
	49	16 KA, Spanien, Stichprobe oder 24-Stunden-Mischprobe, 2011	Campo et al. (2013)
	1	2 KA, Österreich	Clara et al. (2014)
	26,7 - 71,9	weltweit, Literaturzusammenfassung	Luo et al. (2014)
	46 (±16)	Literatur-Review	Luo et al. (2014)
	10 (±16)	24-h-Mischproben, Juni 2009 - Oktober 2010, n=9	Margot et al. (2013)
	15		Abegglen und Siegrist (2012)
	22		Clara et al. (2012)
Isoproturon	0		Seel et al. (1994)
	15	5 KA, n=77, 2017-2019, Deutschland	dieses Monitoring
	55,8	16 KA, Spanien, Stichprobe oder 24-Stunden-Mischprobe, 2011	Campo et al. (2013)
	27 (±22)	24-h-Mischproben, Juni 2009 - Oktober 2010, n=16	Margot et al. (2013)
	0-35		Abegglen und Siegrist (2012)
	9		Clara et al. (2012)
Terbutryn	15		Seel et al. (1994)
	29	5 KA, n=87, 2017-2019, Deutschland	dieses Monitoring
	1	40 KA, 2015-2016, Baden-Württemberg	Rau und Metzger (2017)

Stoffe	Reinigungsleistung (%)	Bemerkung	Literaturquelle
	ca. 30	2 Probenahmetage im August 2015, KA Münster	Schütte et al. (2017)
	35		Maus et al. (2016)
	<20	6 KA, Baden-Württemberg	LUBW (2014)
	65	16 KA, Spanien, Stichprobe oder 24-Stunden-Mischprobe, 2011	Campo et al. (2013)
	49 (±25)	24-h-Mischproben, Juni 2009 - Oktober 2010, n=37	Margot et al. (2013)
	38	Wertebereich 25 % bis knapp 60 %; nicht nitrifizierenden biologischen Reinigung, Schweiz	Abegglen und Siegrist (2012)
	48	Wertebereich 25 % - 70 %, nitrifizierenden biologischen Reinigung (Schweiz)	Abegglen und Siegrist (2012)
	47	1 KA, 24v-h-Mischprobe, 2009, Schweiz, n=7	Morasch et al. (2010)
	72±14	KA Regensdorf, Schweiz	Singer et al. (2010)

B.10 Anteil der Messwerte oberhalb des BUW bzw. des halben BUW für die Schnittstellen zwischen Siedlungsentwässerung und Gewässerkörper

B.10.1 Auswertung Kläranlagenablauf

Tabelle 73: Auswertung des Anteils der Messwerte oberhalb des BUW bzw. des halben BUW für den Kläranlagenablauf

Stoffe	Anzahl Messwerte	Anteil Messwerte > BG (%)	BG (µg/l)	BUW (µg/l)	Art BeBUW	Anteil Messwerte > BUW (%)	Anteil Messwerte > ½ BUW (%)
Blein	1.000	67,9	0,1	-	-	-	-
Cadmium	1.000	93	0,002	-	-	-	-
Nickel	1.000	99,8	1	-	-	-	-
Quecksilber	1.000	89,1	0,001	-	-	-	-
4-iso-Nonylphenol	999	57	0,04	0,3	JD-UQN	6,1	11,8
4-tert.-Oktylphenol	999	27,1	0,02	0,1	JD-UQN	1,6	4
Di-(2-ethylhexyl)phthalat	999	99,6	0,1	1,3	JD-UQN	59,1	86,9
HBCDD	1.000	0,8	0,005	0,0016	JD-UQN	mind. 0,8	mind. 0,8
Perfluorbutanoat	1.000	91,2	0,001	1260	PNEC _{Wasser}	0	0
Perfluorhexanoat	1.000	97,9	0,001	1000	PNEC _{Wasser}	0	0
Perfluorbutansulfonat	1.000	88,5	0,001	3700	PNEC _{Wasser}	0	0
Perfluorhexansulfonat	1.000	32,9	0,001	250	PNEC _{Wasser}	0	0
Perfluoroctansulfonat	1.000	84	0,001	0,0007	JD-UQN	mind. 84	mind. 84
Naphthalin	999	43,2	0,01	2	JD-UQN	0	0

Stoffe	Anzahl Messwerte	Anteil Messwerte > BG (%)	BG (µg/l)	BUW (µg/l)	Art BeBUW	Anteil Messwerte > BUW (%)	Anteil Messwerte > ½ BUW (%)
Acenaphthylen	999	30,3	0,001	1,3	PNEC _{Wasser}	0	0
Acenaphthen	999	63	0,001	3,8	PNEC _{Wasser}	0	0
Fluoren	999	86,2	0,001	2,5	PNEC _{Wasser}	0	0
Phenanthren	1.000	97,2	0,001	0,5	JD-UQN	0	0
Anthracen	999	3,8	0,001	0,1	JD-UQN	0	0
Fluoranthen	999	83,5	0,001	0,0063	JD-UQN	9,7	31
Pyren	999	80,5	0,001	0,023	PNEC _{Wasser}	1,2	4
Benzo[a]anthracen	999	13,7	0,001	0,012	PNEC _{Wasser}	0,4	1,2
Chrysen	999	33,1	0,001	0,07	PNEC _{Wasser}	0,1	0,2
Benzo[b]fluoranthen	999	14,8	0,001	0,017	PNEC _{Wasser}	0,2	1,3
Benzo[k]fluoranthen	999	4,6	0,001	0,017	PNEC _{Wasser}	0,1	0,2
Benzo[a]pyren	999	32,7	0,0005	0,00017	JD-UQN	mind. 33	mind. 33
Dibenz[a,h]anthracen	999	1,4	0,001	0,0014	PNEC _{Wasser}	0,7	1,4
Indeno[1,2,3-cd]pyren	999	22,7	0,0005	0,0027	PNEC _{Wasser}	2,3	5,9
Benzo[g,h,i]perylen	999	27,3	0,0005	0,0082	PNEC _{Wasser}	0,4	1,5
Aclonifen	1.000	0,1	0,01	0,12	JD-UQN	0	0
Atrazin	1.000	4,1	0,01	0,6	JD-UQN	0	0
Bifenox	1.000	0	0,004	0,012	JD-UQN	0	0
cis-Heptachlorepid	999	0	0,004	0,0000002	JD-UQN	BG > BUW	BG > BUW
Cybutryn	1.000	3,5	0,005	0,0025	JD-UQN	mind. 3,5	mind. 3,5

Stoffe	Anzahl Messwerte	Anteil Messwerte > BG (%)	BG (µg/l)	BUW (µg/l)	Art BeBUW	Anteil Messwerte > BUW (%)	Anteil Messwerte > ½ BUW (%)
Cypermethrin, gesamt	999	0	0,005	0,00008	JD-UQN	BG > BUW	BG > BUW
Dichlorvos	1.000	0,4	0,01	0,0006	JD-UQN	mind. 0,4	mind. 0,4
Dicofol	999	0	0,02	0,0013	JD-UQN	BG > BUW	BG > BUW
Diuron	1.000	71,2	0,01	0,2	JD-UQN	0,5	1,5
Heptachlor	999	0	0,004	0,0000002	JD-UQN	BG > BUW	BG > BUW
Isoproturon	1.000	69,9	0,01	0,3	JD-UQN	0,8	2,4
Quinoxifen	1.000	0	0,01	0,15	JD-UQN	0	0
Terbutryn	1.000	89,3	0,01	0,065	JD-UQN	18,3	53,3
trans-Heptachlorepoxyd	999	0	0,004	0,0000002	JD-UQN	BG > BUW	BG > BUW

BG = Bestimmungsgrenze; BUW = Beurteilungswert

B.10.2 Auswertung Regenwassereinleitungen

Tabelle 74: Auswertung des Anteils der Messwerte oberhalb des BUW bzw. des halben BUW für die Regenwassereinleitungen

Stoffe	Anzahl Meswerte	Anteil Messwerte > BG (%)	BG (µg/l)	BUW (µg/l)	Art BUW	Anteil Messwerte > BUW (%)	Anteil Messwerte > ½ BUW (%)
Blei	20	100	0,1	-	-	-	-
Cadmium	20	100	0,002	-	-	-	-
Nickel	20	100	1	-	-	-	-
Quecksilber	20	100	0,001	-	-	-	-
4-iso-Nonylphenol	20	70	0,04	0,3	JD-UQN	5	5
4-tert.-Oktylphenol	20	85	0,02	0,1	JD-UQN	45	55
Di-(2-ethylhexyl)phthalat	20	100	0,1	1,3	JD-UQN	90	100
HBCDD (Summe)	20	50	0,005	0,0016	JD-UQN	mind. 50	mind. 50
Perfluorbutanoat	20	85	0,001	1260	PNEC _{Wasser}	0	0
Perfluorhexanoat	20	75	0,001	1000	PNEC _{Wasser}	0	0
Perfluorbutansulfonat	20	65	0,001	3700	PNEC _{Wasser}	0	0
Perfluorhexansulfonat	20	0	0,001	250	PNEC _{Wasser}	0	0
Perfluoroctansulfonat	20	65	0,001	0,0007	JD-UQN	mind. 65	mind. 65
Naphthalin	20	40	0,01	2	JD-UQN	0	0
Acenaphthylen	20	95	0,001	1,3	PNEC _{Wasser}	0	0
Acenaphthen	20	90	0,001	3,8	PNEC _{Wasser}	0	0
Fluoren	20	85	0,001	2,5	PNEC _{Wasser}	0	0

Stoffe	Anzahl Meswerte	Anteil Messwerte > BG (%)	BG (µg/l)	BUW (µg/l)	Art BUW	Anteil Messwerte > BUW (%)	Anteil Messwerte > ½ BUW (%)
Phenanthren	20	100	0,001	0,5	JD-UQN	0	0
Anthracen	20	90	0,001	0,1	JD-UQN	0	0
Fluoranthen	20	100	0,001	0,0063	JD-UQN	100	100
Pyren	20	100	0,001	0,023	PNEC _{Wasser}	95	100
Benzo[a]anthracen	20	100	0,001	0,012	PNEC _{Wasser}	85	100
Chrysen	20	100	0,001	0,07	PNEC _{Wasser}	65	70
Benzo[b]fluoranthen	20	100	0,001	0,017	PNEC _{Wasser}	85	100
Benzo[k]fluoranthen	20	100	0,001	0,017	PNEC _{Wasser}	65	80
Benzo[a]pyren	20	100	0,0005	0,00017	JD-UQN	100	100
Dibenz[a,h]anthracen	20	100	0,001	0,0014	PNEC _{Wasser}	95	100
Indeno[1,2,3-cd]pyren	20	100	0,0005	0,0027	PNEC _{Wasser}	100	100
Benzo[g,h,i]perylen	20	100	0,0005	0,0082	PNEC _{Wasser}	100	100
Aclonifen	20	0	0,01	0,12	JD-UQN	0	0
Atrazin	20	0	0,01	0,6	JD-UQN	0	0
Bifenox	20	0	0,004	0,012	JD-UQN	0	0
cis-Heptachlorepoxid	20	0	0,004	0,0000002	JD-UQN	BG > BUW	BG > BUW
Cybutryn	20	0	0,005	0,0025	JD-UQN	BG > BUW	BG > BUW
Cypermethrin, gesamt	20	5	0,005	0,00008	JD-UQN	mind. 5	mind. 5
Dichlorvos	20	0	0,01	0,0006	JD-UQN	BG > BUW	BG > BUW
Dicofol	20	0	0,02	0,0013	JD-UQN	BG > BUW	BG > BUW

Stoffe	Anzahl Meswerte	Anteil Messwerte > BG (%)	BG (µg/l)	BUW (µg/l)	Art BUW	Anteil Messwerte > BUW (%)	Anteil Messwerte > ½ BUW (%)
Diuron	20	90	0,01	0,2	JD-UQN	20	30
Heptachlor	20	0	0,004	0,0000002	JD-UQN	BG > BUW	BG > BUW
Isoproturon	20	50	0,01	0,3	JD-UQN	0	5
Quinoxifen	20	0	0,01	0,15	JD-UQN	0	0
Terbutryn	20	100	0,01	0,065	JD-UQN	20	45
trans-Heptachlorepoxyd	20	0	0,004	0,0000002	JD-UQN	BG > BUW	BG > BUW

BG = Bestimmungsgrenze; BUW = Beurteilungswert

B.10.3 Auswertung Mischwassereinleitungen

Tabelle 75: Auswertung des Anteils der Messwerte oberhalb des BUW bzw. des halben BUW für die Mischwassereinleitungen

Stoffe	Anzahl Messwerte	Anteil Messwerte > BG (%)	BG (µg/l)	BUW (µg/l)	Art BUW	Anteil Messwerte > BUW (%)	Anteil Messwerte > ½ BUW (%)
Blei	27	100	0,1	-	-	-	-
Cadmium	27	100	0,002	-	-	-	-
Nickel	27	96	1	-	-	-	-
Quecksilber	27	100	0,001	-	-	-	-
4-iso-Nonylphenol	27	78	0,04	0,3	JD-UQN	4	11
4-tert.-Oktylphenol	27	59	0,02	0,1	JD-UQN	0	0
Di-(2-ethylhexyl)phthalat	27	100	0,1	1,3	JD-UQN	85	100
HBCDD (Summe)	27	56	0,005	0,0016	JD-UQN	mind. 56	mind. 56
Perfluorbutanoat	27	93	0,001	1260	PNEC _{Wasser}	0	0
Perfluorhexanoat	27	85	0,001	1000	PNEC _{Wasser}	0	0
Perfluorbutansulfonat	27	48	0,001	3700	PNEC _{Wasser}	0	0
Perfluorhexansulfonat	27	4	0,001	250	PNEC _{Wasser}	0	0
Perfluoroctansulfonat	27	67	0,001	0,0007	JD-UQN	mind. 67	mind. 67
Naphthalin	27	82	0,01	2	JD-UQN	0	0
Acenaphthylen	27	96	0,001	1,3	PNEC _{Wasser}	0	0
Acenaphthen	27	100	0,001	3,8	PNEC _{Wasser}	0	0
Fluoren	27	100	0,001	2,5	PNEC _{Wasser}	0	0

Stoffe	Anzahl Messwerte	Anteil Messwerte > BG (%)	BG (µg/l)	BUW (µg/l)	Art BUW	Anteil Messwerte > BUW (%)	Anteil Messwerte > ½ BUW (%)
Phenanthren	27	100	0,001	0,5	JD-UQN	0	0
Anthracen	27	100	0,001	0,1	JD-UQN	0	0
Fluoranthren	27	100	0,001	0,0063	JD-UQN	100	100
Pyren	27	100	0,001	0,023	PNEC _{Wasser}	96	100
Benzo[a]anthracen	27	100	0,001	0,012	PNEC _{Wasser}	93	100
Chryse	27	100	0,001	0,07	PNEC _{Wasser}	26	78
Benzo[b]fluoranthrenBbF	27	100	0,001	0,017	PNEC _{Wasser}	93	96
Benzo[k]fluoranthren	27	100	0,001	0,017	PNEC _{Wasser}	37	85
Benzo[a]pyren	27	100	0,0005	0,00017	JD-UQN	100	100
Dibenz[a,h]anthracen	27	100	0,001	0,0014	PNEC _{Wasser}	100	100
Indeno[1,2,3-cd]pyren	27	100	0,0005	0,0027	PNEC _{Wasser}	100	100
Benzo[g,h,i]perylene	27	100	0,0005	0,0082	PNEC _{Wasser}	96	100
Aclonifen	27	0	0,01	0,12	JD-UQN	0	0
Atrazin	27	4	0,01	0,6	JD-UQN	0	0
Bifenox	27	0	0,004	0,012	JD-UQN	0	0
cis-Heptachlorepoxyd	27	0	0,004	0,0000002	JD-UQN	BG > BUW	BG > BUW
Cybutryn	27	0	0,005	0,0025	JD-UQN	BG > BUW	BG > BUW
Cypermethrin, gesamt	27	15	0,005	0,00008	JD-UQN	mind. 15	mind. 15
Dichlorvos	27	0	0,01	0,0006	JD-UQN	BG > BUW	BG > BUW
Dicofol	27	0	0,02	0,0013	JD-UQN	BG > BUW	BG > BUW

Stoffe	Anzahl Messwerte	Anteil Messwerte > BG (%)	BG (µg/l)	BUW (µg/l)	Art BUW	Anteil Messwerte > BUW (%)	Anteil Messwerte > ½ BUW (%)
Diuron	27	59	0,01	0,2	JD-UQN	0	4
Heptachlor	27	0	0,004	0,0000002	JD-UQN	BG > BUW	BG > BUW
Isoproturon	27	48	0,01	0,3	JD-UQN	0	0
Quinoxifen	27	0	0,01	0,15	JD-UQN	0	0
Terbutryn	27	93	0,01	0,065	JD-UQN	7	30
trans-Heptachlorepoxyd	27	0	0,004	0,0000002	JD-UQN	BG > BUW	BG > BUW

BG = Bestimmungsgrenze; BUW = Beurteilungswert

B.11 Grundlagen für die Ableitung von differenzierten Ablaufkonzentrationen

B.11.1 Ausprägung der Stoffeigenschaften Sorption, Abbaubarkeit und Volatilisation sowie Verwendung und Herkunftsbereiche, Haupteintragspfad im Siedlungsgebiet und Rückhalt in der Kläranlage

Tabelle 76: Ausprägung der Stoffeigenschaften Sorption, Abbaubarkeit und Volatilisation sowie Verwendung und Herkunftsbereiche, Haupteintragspfad im Siedlungsgebiet und Rückhalt in der Kläranlage

Gruppe	Stoffe	Sorption	Abbaubarkeit	Volatilisation	Herkunftsbereich/Verwendung	Haupteintragspfad im Siedlungsgebiet	Rückhalt in der Kläranlage
Schwermetalle	Blei	++	-	-	Verwendung: Dachabdeckung, Kabelmäntel, Strahlen- u. Schallschutz Herkunft: Verkehr, Gebäude	Regenwasser	+++ (94 %)
	Cadmium	+	-	-	Verwendung: Batterieherstellung, Pigment, Stabilisator in PVC-Produkten, Solarzellen Herkunft: Verbrennungsprozesse, Düngung	Regenwasser	+++ (92 %)
	Nickel	++	-	-	Verwendung: Stahlveredelung, Legierung, Buntpigmenten, Reifen- u. Bremsabrieb Herkunft: Verbrennungsprozesse, Verkehr, geogener Hintergrund	Regenwasser	+ (44 %)
	Quecksilber	++	-	-	Verwendung: Herkunft: Verbrennungsprozesse	Regenwasser	++ (89 %)
Phenol	4-iso-Nonylphenol	+	-	-	Verwendung: Textil- und Lederverarbeitung, Metallverarbeitung, Herstellung von Zellstoff und Papier, Herstellung von Pestiziden, Wasch- und Reinigungsmittel Herkunft: Haushalt, Indirekteinleiter	Schmutzwasser	++ (78 %)
Phthalat	Di-(2-ethylhexyl)phthalat	++	-	-/+	Verwendung: Weichmacher in PVC-Produkten Herkunft: Ausgasung und Abrieb von Kunststoffen	Schmutzwasser und Regenwasser	+++ (88 %)
Perfluorierete Verbindungen	Perfluorbutanoat	(-)	-	-	Verwendung: n.b. Herkunft: industrielle Indirekteinleiter, Haushalt	Schmutzwasser	+ (71 %)
	Perfluorpentanoat		-	-	Verwendung: n.b.	Schmutzwasser	n.b.

Gruppe	Stoffe	Sorption	Abbau- barkeit	Volati- lisation	Herkunftsbereich/Verwendung	Haupteintragspfad im Siedlungsbereich	Rückhalt in der Kläranlage
					Herkunft: industrielle Indirekteinleiter, Haushalt		
	Perfluorhexanoat	(-)	-	-	Verwendung: n.b. Herkunft: industrielle Indirekteinleiter, Haushalt	Schmutzwasser	(22 %)
	Perfluorheptanoat		-	-	Verwendung: n.b. Herkunft: industrielle Indirekteinleiter, Haushalt	Schmutzwasser	n.b.
	Perfluoroctanoat	(+/-)	-	-	Verwendung: Hilfsmittel (Emulgator) für die Herstellung von Polymeren wie Polytetrafluorethylen (bei DuPont: Teflon); schmutz- und wasserabstoßend ausgerüstete Teppiche und Textilien, Feuerlöschschaum. Herkunft: industrielle Indirekteinleiter, Haushalt	Schmutzwasser	+ (62 %)
	Perfluorbutansulfonat	(-)	-	-	Verwendung: Ersatzstoff von PFOS Herkunft: industrielle Indirekteinleiter, Haushalt	Schmutzwasser	+/- (17 %)
	Perfluoroctansulfonat	(+/-)	-	-	Verwendung: Fotografie, Galvanik, medizinische Geräte, Luftfahrt, Imprägnierungsmittel, Möbelleder, Beschichtung für Papiere Herkunft: Indirekteinleiter, Haushaltsabwasser	Schmutzwasser	+ (67 %)
PAK	Naphthalin	+	+	+	Verwendung: Steinkohlenteer, Verbrennungsprozesse, Holzimprägnierung, Straßenbeläge, Reifenabrieb Herkunft: Verbrennungsprozesse	Regenwasser	++ (78 %)
	Acenaphthen	++	+	+	Verwendung: Verbrennungsprozesse, Holzimprägnierung, Straßenbeläge, Reifenabrieb Herkunft: Verbrennungsprozesse	Regenwasser	++ (90 %)
	Fluoren	++	+	+	Verwendung: Verbrennungsprozesse, Holzimprägnierung, Straßenbeläge, Reifenabrieb Herkunft: Verbrennungsprozesse	Regenwasser	++ (86 %)
	Phenanthren	++	+	+	Verwendung: Verbrennungsprozesse, Holzimprägnierung, Straßenbeläge, Reifenabrieb Herkunft: Verbrennungsprozesse	Regenwasser	+++ (94 %)

Gruppe	Stoffe	Sorption	Abbaubarkeit	Volatilisation	Herkunftsbereich/Verwendung	Haupteintragspfad im Siedlungsbereich	Rückhalt in der Kläranlage
Pflanzenschutzmittel/Biozide	Fluoranthen	++	+	+	Verwendung: Steinkohlenteer, Zwischenprodukt für Farbstoffe und Arzneimittel Herkunft: Verbrennungsprozesse	Regenwasser	+++ (97 %)
	Pyren	++	-	-	Verwendung: Verbrennungsprozesse, Holzimprägnierung, Straßenbeläge, Reifenabrieb Herkunft: Verbrennungsprozesse	Regenwasser	+++ (96 %)
	Diuron [^]	-/+	-	-	Verwendung: Schutzmittel für Baumaterialien, Filmschutzmittel Herkunft: Schmutzwasser, Gebäude, landwirtschaftliche Nutzung, Industrie (?)	Schmutzwasser und Regenwasser	+/- (13 %)
	Isoproturon	-	-	-	Verwendung: Filmschutzmittel, Schutzmittel für Baumaterialien Herkunft: Schmutzwasser, Gebäude	Regenwasser	+/- (15 %)
	Terbutryn	-/+	-	-	Verwendung: Filmschutzmittel, Schutzmittel für Materialien (Leder, Textilien etc.), Schutzmittel für Baumaterialien Herkunft: Schmutzwasser, Gebäude, Industrie (?)	Regenwasser	+/- (29 %)

Abkürzungen: Angaben von Ausprägung nicht vorhanden (-) bis Ausprägung sehr stark (+++); n.b. = nicht bekannt;

[^]) Verwendung auch in anderen Bereichen (PSM, AZM, Industriechemikalie)

Erklärung: **Sorption:** auf Basis des Koc

- ++ für Stoffe mit Koc ab >5.000
- + für Stoffe <5.000
- +/- für Stoffe <500
- für Stoffe <150
- für Stoffe <50

Abbaubarkeit: qualitative Angaben zur leichten biologischen Abbaubarkeit

Volatilisation: auf Basis des Dampfdrucks

- ++ für Stoffe mit $VP < 10E-1$ Pa bei 20°C
- + für Stoffe mit $VP > 10E-2$
- +/- für Stoffe mit $VP > 10E-5$
- für Stoffe mit $VP < 10E-5$

Rückhalt in der Kläranlage: auf Basis der aktuellen Projektergebnisse und Berücksichtigung von Literaturangaben

- +++ für Stoffe über 90 %
- ++ für Stoffe mit über 70 %
- + für Stoffe zwischen 30 – 70 %
- +/- für Stoffe zwischen 10 – 30 %
- für Stoffe ohne Rückhalt

B.11.2 Statistische Kennwerte der Ablaufkonzentrationen in Abhängigkeit vom Differenzierungsmerkmal Art des dominanten Entwässerungssystems im Einzugsgebiet (Trennsystem (TS) oder Mischsystem (MS))

Tabelle 77: Statistische Kennwerte der Ablaufkonzentrationen in µg/l bezogen auf die Art des dominanten Entwässerungssystems im Einzugsgebiet (Trenn- oder Mischsystem)

Stoffe	Signifikanz ¹⁾	System	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	Interquartilsabstand (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	Anzahl Messwerte
Blei		MS	0,05	0,14	0,18	0,17	0,22	908
		TS	0,05	0,12	0,23	0,16	0,21	92
Cadmium		MS	0,003	0,006	0,0085	0,007	0,01	908
		TS	0,0038	0,006	0,018	0,0053	0,009	92
Nickel		MS	3,1	4,4	4,8	2,8	5,9	908
		TS	2,8	4,1	4,7	3,2	6	92
Quecksilber	***	MS	0,001	0,002	0,0067	0,002	0,003	908
		TS	0,001	0,002	0,0017	0,001	0,002	92
4-iso-Nonylphenol		MS	0,02	0,043	0,11	0,044	0,064	907
		TS	0,02	0,049	0,2	0,14	0,16	92
Di-(2-ethylhexyl)phthalat		MS	0,95	1,7	3,1	2	2,9	907
		TS	1	1,7	3,3	2,2	3,2	92
Perfluorbutanoat	***	MS	0,002	0,004	0,007	0,006	0,008	908
		TS	0,001	0,0025	0,0057	0,004	0,005	92

Stoffe	Signifikanz ¹⁾	System	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	Interquartilsabstand (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	Anzahl Messwerte
Perfluorpentanoat		MS	0,002	0,004	0,0084	0,004	0,006	908
		TS	0,0028	0,004	0,0067	0,0063	0,009	92
Perfluorhexanoat	**	MS	0,004	0,006	0,018	0,005	0,009	908
		TS	0,004	0,007	0,012	0,013	0,017	92
Perfluorheptanoat	*	MS	0,0005	0,001	0,0021	0,0015	0,002	908
		TS	0,0005	0,001	0,0014	0,0015	0,002	92
Perfluoroctanoat	**	MS	0,004	0,006	0,0098	0,004	0,008	908
		TS	0,003	0,005	0,0048	0,004	0,007	92
Perfluorbutansulfonat		MS	0,002	0,003	0,0066	0,004	0,006	908
		TS	0,002	0,003	0,015	0,0043	0,0063	92
Perfluoroctansulfonat		MS	0,002	0,003	0,0082	0,004	0,006	908
		TS	0,0018	0,003	0,0052	0,0033	0,005	92
Acenaphthen		MS	0,0005	0,0012	0,0024	0,0016	0,0021	907
		TS	0,0005	0,0015	0,0017	0,0015	0,002	92
Fluoren	***	MS	0,0012	0,0016	0,0022	0,0011	0,0023	907
		TS	0,0016	0,002	0,0025	0,0018	0,0034	92
Phenanthren		MS	0,003	0,0043	0,0058	0,0032	0,0062	908
		TS	0,0026	0,0041	0,0059	0,0073	0,0098	92
Fluoranthren	***	MS	0,0013	0,0022	0,0039	0,0025	0,0038	907

Stoffe	Signifikanz ¹⁾	System	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	Interquartilsabstand (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	Anzahl Messwerte
		TS	0,0005	0,0014	0,0017	0,0016	0,0021	92
Pyren	***	MS	0,0013	0,002	0,0033	0,002	0,0033	907
		TS	0,0005	0,0011	0,0014	0,0013	0,0018	92
Diuron		MS	0,005	0,016	0,023	0,023	0,028	908
		TS	0,005	0,013	0,021	0,026	0,031	92
Isoproturon	***	MS	0,005	0,02	0,04	0,033	0,038	908
		TS	0,005	0,005	0,11	0,016	0,021	92
Terbutryn	***	MS	0,02	0,036	0,045	0,037	0,057	908
		TS	0,011	0,024	0,028	0,026	0,037	92

¹⁾Ergebnisse der qualitativen Auswertung der statistischen Tests auf Unterschiede; signifikante Unterschiede in der zentralen Tendenz sind mit Sternchen gekennzeichnet: ***: p-Wert < 0,001; **: p-Wert zwischen 0,001 und 0,01; *: p-Wert zwischen 0,01 und 0,05

B.11.3 Statistische Kennwerte der Ablaufkonzentrationen in Abhängigkeit vom Differenzierungsmerkmal Trockenwetter-(TW) oder Regenwettersituation (RW) bei Mischsystem-Anlagen

Tabelle 78: Statistische Kennwerte der Ablaufkonzentrationen in µg/l bezogen auf Trocken- oder Regenwettersituation bei den Mischsystem-Anlagen

Stoffe	Signifikanz ¹⁾	System	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	Interquartilsabstand (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	Anzahl Messwerte
Blei	***	RW	0,1	0,17	0,21	0,17	0,27	284
		TW	0,05	0,12	0,15	0,14	0,19	336
Cadmium	***	RW	0,004	0,007	0,0089	0,007	0,011	284
		TW	0,003	0,005	0,0082	0,006	0,009	336
Nickel	***	RW	3	4,1	4,3	2,4	5,4	284
		TW	3,5	4,7	5	2,6	6,1	336
Quecksilber	***	RW	0,002	0,003	0,0033	0,002	0,004	284
		TW	0,001	0,002	0,013	0,002	0,003	336
4-iso-Nonylphenol	*	RW	0,02	0,02	0,071	0,035	0,055	283
		TW	0,02	0,044	0,079	0,04	0,06	336
Di-(2-ethylhexyl)phthalat		RW	1,2	1,9	3,2	2,3	3,5	283
		TW	1	1,8	3,9	2,3	3,3	336
Perfluorbutanoat		RW	0,003	0,004	0,0067	0,004	0,007	284
		TW	0,002	0,005	0,0081	0,006	0,008	336
Perfluorpentanoat	***	RW	0,002	0,003	0,0086	0,003	0,005	284

Stoffe	Signifikanz ¹⁾	System	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	Interquartilsabstand (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	Anzahl Messwerte
		TW	0,003	0,005	0,012	0,006	0,009	336
Perfluorhexanoat	***	RW	0,004	0,005	0,019	0,005	0,009	284
		TW	0,005	0,007	0,028	0,007	0,012	336
Perfluorheptanoat		RW	0,0005	0,001	0,0019	0,0015	0,002	284
		TW	0,0005	0,001	0,0026	0,0025	0,003	336
Perfluoroctanoat	*	RW	0,003	0,005	0,008	0,005	0,008	284
		TW	0,004	0,006	0,014	0,005	0,009	336
Perfluorbutansulfonat	*	RW	0,002	0,003	0,0053	0,003	0,005	284
		TW	0,002	0,003	0,0073	0,004	0,006	336
Perfluoroctansulfonat		RW	0,002	0,003	0,012	0,004	0,006	284
		TW	0,002	0,003	0,0085	0,004	0,006	336
Acenaphthen	**	RW	0,0005	0,0013	0,0026	0,0017	0,0022	283
		TW	0,0005	0,0011	0,0022	0,0012	0,0017	336
Fluoren	**	RW	0,0012	0,0016	0,0026	0,0013	0,0025	283
		TW	0,0011	0,0015	0,0021	0,0009	0,002	336
Phenanthren	***	RW	0,0035	0,005	0,0072	0,0037	0,0072	284
		TW	0,0029	0,0042	0,0053	0,003	0,0059	336
Fluoranthren	***	RW	0,0018	0,0032	0,0052	0,0034	0,0052	283
		TW	0,0012	0,002	0,0034	0,0019	0,0031	336

Stoffe	Signifikanz ¹⁾	System	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	Interquartilsabstand (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	Anzahl Messwerte
Pyren	***	RW	0,0016	0,0025	0,0041	0,0028	0,0044	283
		TW	0,0012	0,0019	0,0028	0,0016	0,0028	336
Diuron		RW	0,005	0,017	0,024	0,022	0,027	284
		TW	0,005	0,018	0,025	0,026	0,031	336
Isoproturon	**	RW	0,005	0,019	0,048	0,035	0,04	284
		TW	0,012	0,026	0,048	0,036	0,048	336
Terbutryn	**	RW	0,02	0,036	0,044	0,036	0,056	284
		TW	0,026	0,042	0,056	0,044	0,07	336

¹⁾Ergebnisse der qualitativen Auswertung der statistischen Tests auf Unterschiede; signifikante Unterschiede in der zentralen Tendenz sind mit Sternchen gekennzeichnet: ***: p-Wert < 0,001; **: p-Wert zwischen 0,001 und 0,01; *: p-Wert zwischen 0,01 und 0,05

B.11.4 Statistische Kennwerte der Ablaufkonzentrationen in Abhängigkeit vom Differenzierungsmerkmal Lage des Einzugsgebietes innerhalb oder außerhalb vom Agglomerationsraum

Tabelle 79: Statistische Kennwerte der Ablaufkonzentrationen in µg/l bezogen auf die Lage des Einzugsgebietes (innerhalb oder außerhalb von Agglomerationsraum)

Stoffe	Signifikanz ¹⁾	System	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	Interquartilsabstand (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	Anzahl Messwerte
Blei	***	außerhalb	0,05	0,12	0,17	0,15	0,2	669
		innerhalb	0,05	0,17	0,21	0,21	0,26	331
Cadmium	**	außerhalb	0,003	0,006	0,0097	0,006	0,009	669
		innerhalb	0,004	0,006	0,0087	0,007	0,011	331
Nickel	***	außerhalb	2,8	4	4,3	2,5	5,3	669
		innerhalb	4,1	5,1	5,9	2,8	6,9	331
Quecksilber	***	außerhalb	0,001	0,002	0,0079	0,002	0,003	669
		innerhalb	0,002	0,002	0,003	0,001	0,003	331
4-iso-Nonylphenol	***	außerhalb	0,02	0,046	0,15	0,057	0,077	668
		innerhalb	0,02	0,02	0,044	0,031	0,051	331
Di-(2-ethylhexyl)phthalat		außerhalb	0,97	1,7	3,5	2,3	3,2	668
		innerhalb	0,88	1,6	2,3	1,7	2,6	331
Perfluorbutanoat	***	außerhalb	0,002	0,003	0,0057	0,004	0,006	669
		innerhalb	0,004	0,006	0,0092	0,005	0,009	331

Stoffe	Signifikanz ¹⁾	System	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	Interquartilsabstand (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	Anzahl Messwerte
Perfluorpentanoat	***	außerhalb	0,002	0,003	0,0097	0,004	0,006	669
		innerhalb	0,003	0,005	0,0053	0,004	0,007	331
Perfluorhexanoat	***	außerhalb	0,003	0,005	0,022	0,006	0,009	669
		innerhalb	0,006	0,008	0,008	0,004	0,01	331
Perfluorheptanoat	***	außerhalb	0,0005	0,0005	0,002	0,0015	0,002	669
		innerhalb	0,001	0,002	0,0021	0,002	0,003	331
Perfluoroctanoat	***	außerhalb	0,003	0,005	0,0097	0,004	0,007	669
		innerhalb	0,006	0,007	0,0084	0,004	0,01	331
Perfluorbutansulfonat	***	außerhalb	0,001	0,002	0,0067	0,003	0,004	669
		innerhalb	0,003	0,005	0,0088	0,007	0,01	331
Perfluoroctansulfonat	***	außerhalb	0,001	0,003	0,0043	0,003	0,004	669
		innerhalb	0,003	0,005	0,015	0,005	0,008	331
Acenaphthen	***	außerhalb	0,0005	0,00075	0,0013	0,001	0,0015	668
		innerhalb	0,0014	0,0023	0,0042	0,0029	0,0043	331
Fluoren	***	außerhalb	0,0011	0,0015	0,0017	0,0008	0,0019	668
		innerhalb	0,0016	0,0022	0,0033	0,0016	0,0032	331
Phenanthren	***	außerhalb	0,0027	0,0039	0,0047	0,0027	0,0054	669
		innerhalb	0,0039	0,0055	0,0079	0,0041	0,008	331
Fluoranthren	***	außerhalb	0,0012	0,0019	0,003	0,0017	0,0029	668

Stoffe	Signifikanz ¹⁾	System	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	Interquartilsabstand (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	Anzahl Messwerte
		innerhalb	0,0015	0,0032	0,0052	0,0037	0,0052	331
Pyren	***	außerhalb	0,0011	0,0018	0,0026	0,0016	0,0027	668
		innerhalb	0,0014	0,0025	0,0041	0,003	0,0044	331
Diuron	***	außerhalb	0,005	0,015	0,021	0,021	0,026	669
		innerhalb	0,013	0,019	0,026	0,017	0,029	331
Isoproturon	**	außerhalb	0,005	0,017	0,056	0,031	0,036	669
		innerhalb	0,012	0,021	0,028	0,025	0,037	331
Terbutryn	***	außerhalb	0,015	0,03	0,041	0,037	0,052	669
		innerhalb	0,028	0,041	0,049	0,033	0,061	331

¹⁾Ergebnisse der qualitativen Auswertung der statistischen Tests auf Unterschiede; signifikante Unterschiede in der zentralen Tendenz sind mit Sternchen gekennzeichnet: ***: p-Wert < 0,001; **: p-Wert zwischen 0,001 und 0,01; *: p-Wert zwischen 0,01 und 0,05

B.11.5 Statistische Kennwerte der Ablaufkonzentrationen in Abhängigkeit vom Differenzierungsmerkmal Größenklasse (GK) bezogen auf die behandelte Abwasserlast in Einwohnerwerten

Tabelle 80: Statistische Kennwerte der Ablaufkonzentrationen in µg/l für verschiedene Größenklassen bezogen auf die Abwasserlast (EW)

Stoffe	Signifikanz ¹⁾	System	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	Interquartilsabstand (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	Anzahl Messwerte
Blei	***	GK2	0,075	0,16	0,18	0,13	0,21	51
		GK3	0,05	0,14	0,17	0,17	0,22	48
		GK4	0,05	0,15	0,19	0,19	0,24	566
		GK5	0,05	0,12	0,16	0,15	0,2	335
Cadmium	**	GK2	0,003	0,004	0,006	0,005	0,008	51
		GK3	0,003	0,0045	0,0052	0,004	0,007	48
		GK4	0,003	0,007	0,011	0,008	0,011	566
		GK5	0,004	0,005	0,0082	0,005	0,009	335
Nickel	***	GK2	1,7	2,2	2,5	0,9	2,6	51
		GK3	3,6	4,6	4,8	2,3	5,9	48
		GK4	3	4,1	4,6	2,6	5,6	566
		GK5	4	5	5,5	2,5	6,5	335
Quecksilber	***	GK2	0,001	0,002	0,058	0,0025	0,0035	51
		GK3	0,001	0,002	0,0025	0,001	0,002	48
		GK4	0,001	0,002	0,0024	0,002	0,003	566

Stoffe	Signifikanz ¹⁾	System	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	Interquartilsabstand (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	Anzahl Messwerte
		GK5	0,002	0,002	0,0055	0,0015	0,0035	335
4-iso-Nonylphenol	***	GK2	0,02	0,048	0,051	0,048	0,068	51
		GK3	0,02	0,02	0,026	#ZAHL!	0,02	48
		GK4	0,02	0,047	0,17	0,066	0,086	565
		GK5	0,02	0,041	0,044	0,03	0,05	335
Di-(2-ethylhexyl)phthalat		GK2	0,87	2	3,9	5,4	6,3	51
		GK3	0,95	1,6	2,9	3,1	4	48
		GK4	0,99	1,7	3,3	2	3	565
		GK5	0,92	1,6	2,7	1,7	2,7	335
Perfluorbutanoat	***	GK2	0,002	0,003	0,0047	0,002	0,004	51
		GK3	0,002	0,003	0,0053	0,0033	0,0053	48
		GK4	0,002	0,003	0,0065	0,004	0,006	566
		GK5	0,004	0,006	0,008	0,005	0,009	335
Perfluorpentanoat	***	GK2	0,003	0,004	0,0041	0,002	0,005	51
		GK3	0,0005	0,002	0,0035	0,0025	0,003	48
		GK4	0,002	0,003	0,01	0,004	0,006	566
		GK5	0,003	0,005	0,006	0,005	0,008	335
Perfluorhexanoat	***	GK2	0,004	0,005	0,0048	0,002	0,006	51
		GK3	0,002	0,003	0,0053	0,0023	0,0043	48

Stoffe	Signifikanz ¹⁾	System	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	Interquartilsabstand (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	Anzahl Messwerte
		GK4	0,003	0,005	0,025	0,007	0,01	566
		GK5	0,005	0,008	0,0086	0,0055	0,011	335
Perfluorheptanoat	***	GK2	0,0005	0,0005	0,00084	0,0005	0,001	51
		GK3	0,0005	0,0005	0,00092	0,0005	0,001	48
		GK4	0,0005	0,001	0,0022	0,0015	0,002	566
		GK5	0,0005	0,002	0,002	0,0025	0,003	335
Perfluoroctanoat	***	GK2	0,003	0,004	0,0039	0,002	0,005	51
		GK3	0,003	0,004	0,0042	0,003	0,006	48
		GK4	0,003	0,005	0,012	0,005	0,008	566
		GK5	0,004	0,007	0,007	0,005	0,009	335
Perfluorbutansulfonat	***	GK2	0,0005	0,001	0,0019	0,0015	0,002	51
		GK3	0,0005	0,002	0,0018	0,0015	0,002	48
		GK4	0,002	0,003	0,0079	0,003	0,005	566
		GK5	0,003	0,005	0,0082	0,006	0,009	335
Perfluoroctansulfonat	***	GK2	0,0005	0,0005	0,0012	0,0015	0,002	51
		GK3	0,0005	0,002	0,0021	0,0025	0,003	48
		GK4	0,002	0,003	0,0048	0,003	0,005	566
		GK5	0,003	0,005	0,015	0,005	0,008	335
Acenaphthen	***	GK2	0,0005	0,0005	0,0011	0,00075	0,0013	51

Stoffe	Signifikanz ¹⁾	System	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	Interquartilsabstand (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	Anzahl Messwerte
		GK3	0,0005	0,0005	0,00092	0,0007	0,0012	48
		GK4	0,0005	0,0012	0,0023	0,0014	0,0019	565
		GK5	0,001	0,0016	0,0027	0,0024	0,0034	335
Fluoren	***	GK2	0,0013	0,0016	0,0017	0,0007	0,002	51
		GK3	0,0014	0,0017	0,0018	0,00075	0,0022	48
		GK4	0,0011	0,0016	0,0022	0,0011	0,0022	565
		GK5	0,0013	0,0018	0,0023	0,0015	0,0028	335
Phenanthren	***	GK2	0,0031	0,0045	0,0048	0,0034	0,0064	51
		GK3	0,0024	0,0039	0,0044	0,0033	0,0057	48
		GK4	0,0027	0,004	0,0058	0,0033	0,006	566
		GK5	0,0035	0,0049	0,0062	0,0035	0,007	335
Fluoranthren	***	GK2	0,0005	0,0013	0,0016	0,0017	0,0022	51
		GK3	0,0013	0,0021	0,0023	0,0014	0,0027	48
		GK4	0,0013	0,0021	0,004	0,0024	0,0037	565
		GK5	0,0013	0,0022	0,0037	0,0026	0,0039	335
Pyren	***	GK2	0,0005	0,0005	0,0013	0,0014	0,0019	51
		GK3	0,001	0,0015	0,002	0,0015	0,0025	48
		GK4	0,0013	0,0021	0,0033	0,002	0,0033	565
		GK5	0,0012	0,0019	0,0032	0,0019	0,0031	335

Stoffe	Signifikanz ¹⁾	System	25 %-Quantil (µg/l)	Median (µg/l)	Mittelwert (µg/l)	Interquartilsabstand (µg/l)	75 %-Quantil (µg/l)	Anzahl Messwerte
Diuron	***	GK2	0,005	0,005	0,012	0,011	0,016	51
		GK3	0,005	0,005	0,014	0,01	0,015	48
		GK4	0,005	0,015	0,023	0,022	0,027	566
		GK5	0,013	0,02	0,026	0,018	0,031	335
Isoproturon	***	GK2	0,005	0,013	0,032	0,028	0,033	51
		GK3	0,005	0,005	0,2	0,013	0,018	48
		GK4	0,005	0,019	0,035	0,036	0,041	566
		GK5	0,005	0,02	0,047	0,028	0,033	335
Terbutryn	***	GK2	0,005	0,018	0,064	0,11	0,11	51
		GK3	0,005	0,015	0,017	0,017	0,022	48
		GK4	0,019	0,037	0,047	0,042	0,061	566
		GK5	0,023	0,035	0,039	0,028	0,051	335

¹⁾Ergebnisse der qualitativen Auswertung der statistischen Tests auf Unterschiede; signifikante Unterschiede in der zentralen Tendenz sind mit Sternchen gekennzeichnet: ***: p-Wert < 0,001; **: p-Wert zwischen 0,001 und 0,01; *: p-Wert zwischen 0,01 und 0,05

B.11.6 Graphiken für die Verteilung der Ablaufkonzentrationen in Abhängigkeit von den Differenzierungsmerkmalen

Abbildung 43: Graphiken für die Verteilung der Ablaufkonzentrationen von Blei und Cadmium in µg/l in Abhängigkeit von den Differenzierungsmerkmalen

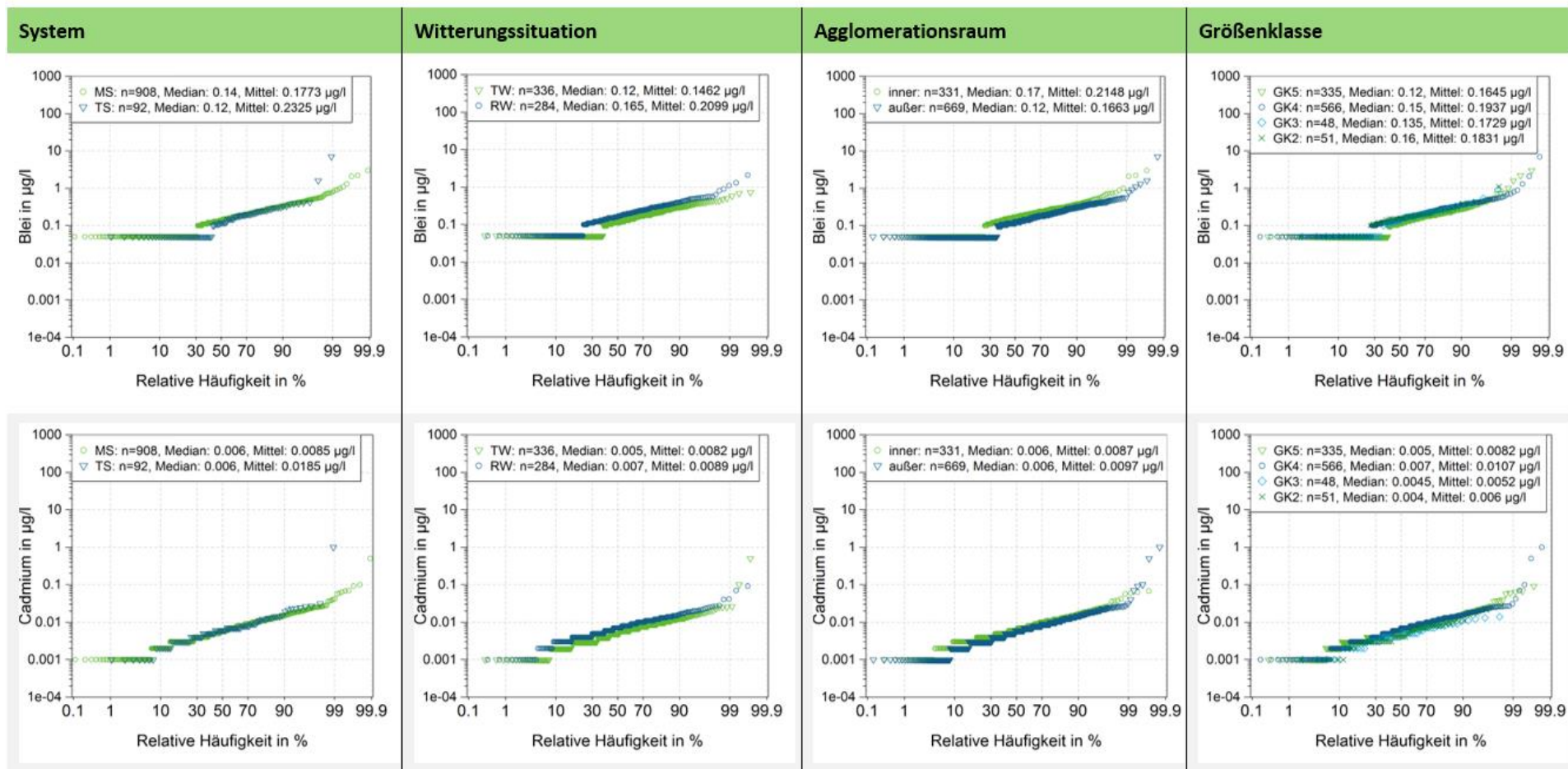


Abbildung 44: Graphiken für die Verteilung der Ablaufkonzentrationen von Nickel und Quecksilber in $\mu\text{g/l}$ in Abhängigkeit von den Differenzierungsmerkmalen

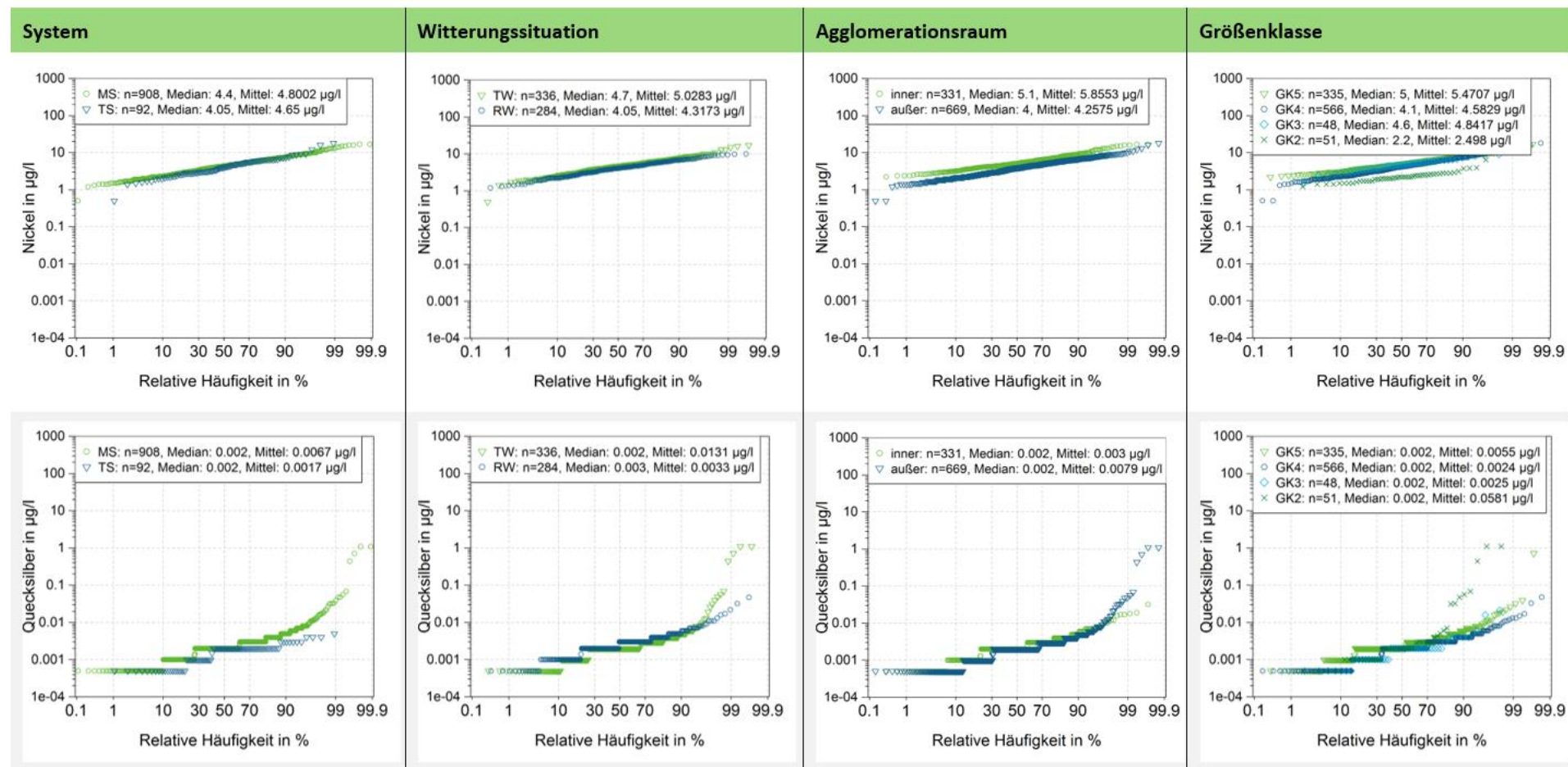


Abbildung 45: Graphiken für die Verteilung der Ablaufkonzentrationen von 4-iso-Nonylphenol und Di-(2-ethylhexyl)phthalat in µg/l in Abhängigkeit von den Differenzierungsmerkmalen

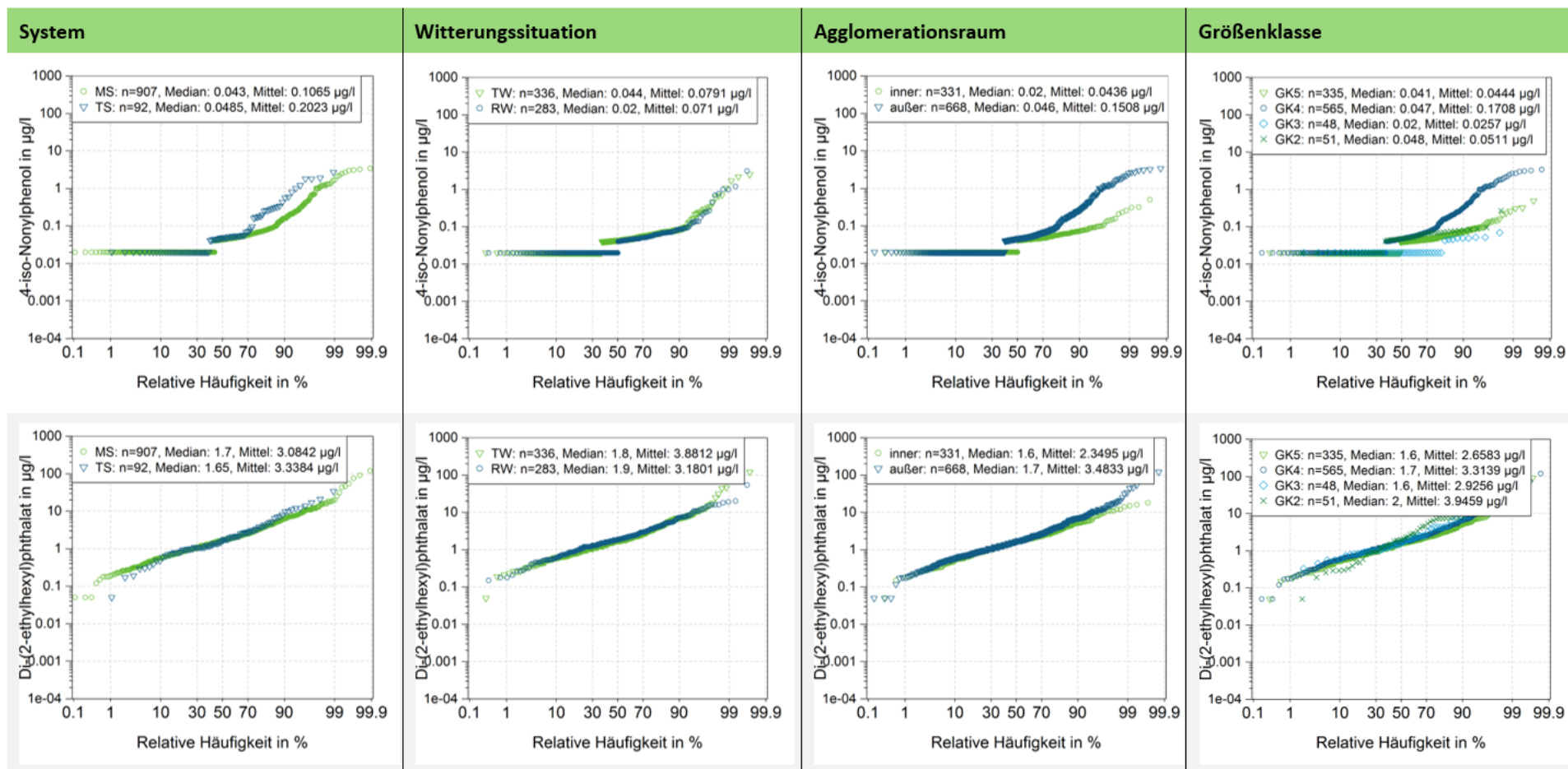


Abbildung 46: Graphiken für die Verteilung der Ablaufkonzentrationen von Perfluorbutanoat (PFBA) und Perfluorpentanoat (PFPA) in µg/l in Abhängigkeit von den Differenzierungsmerkmalen

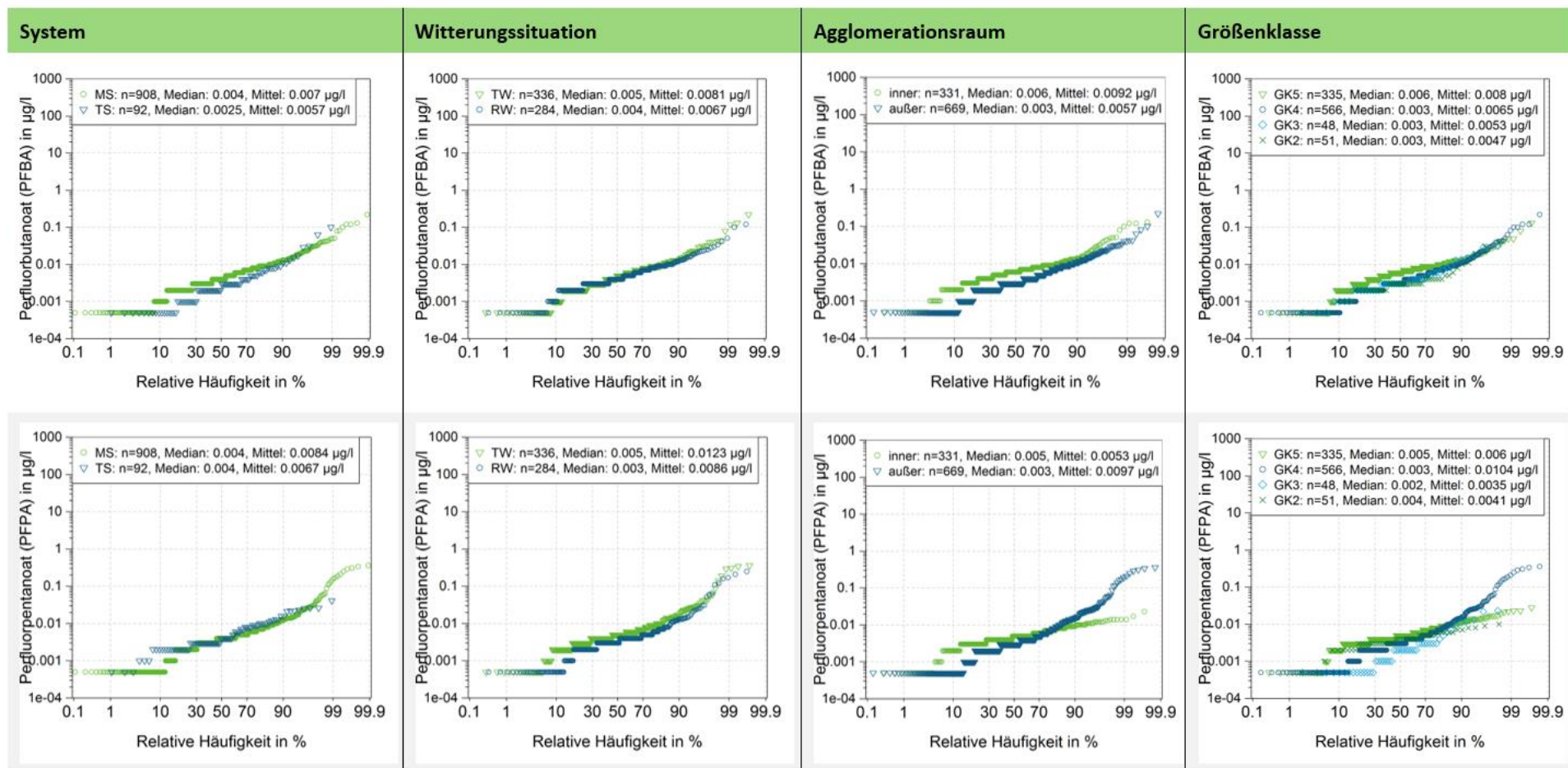


Abbildung 47: Graphiken für die Verteilung der Ablaufkonzentrationen von Perfluorhexanoat (PFHxA) und Perfluorheptanoat (PFHpA) in µg/l in Abhängigkeit von den Differenzierungsmerkmalen

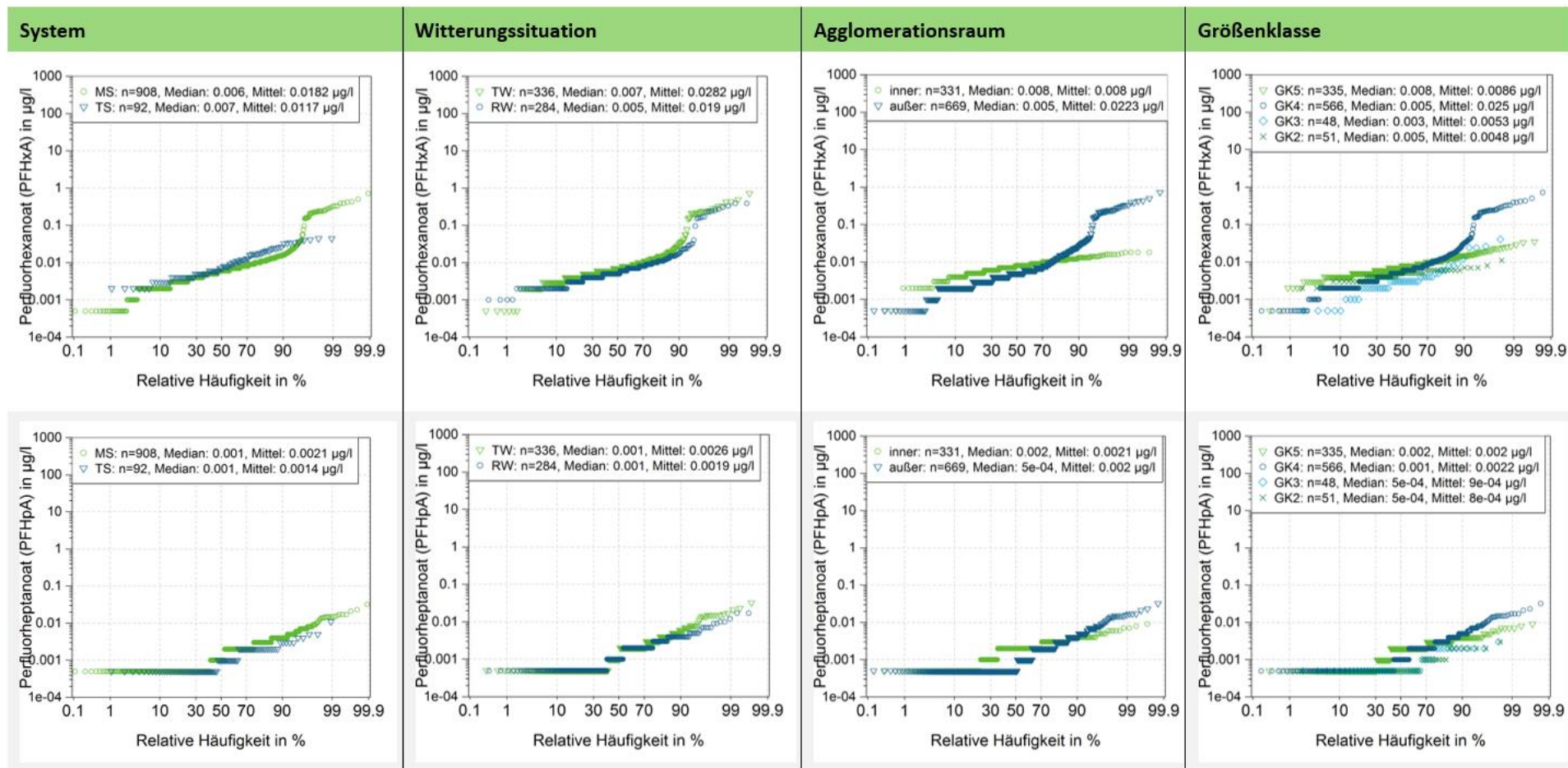


Abbildung 48: Graphiken für die Verteilung der Ablaufkonzentrationen von Perfluoroctanoat (PFOA) und Perfluorbutansulfonat (PFBS) in µg/l in Abhängigkeit von den Differenzierungsmerkmalen

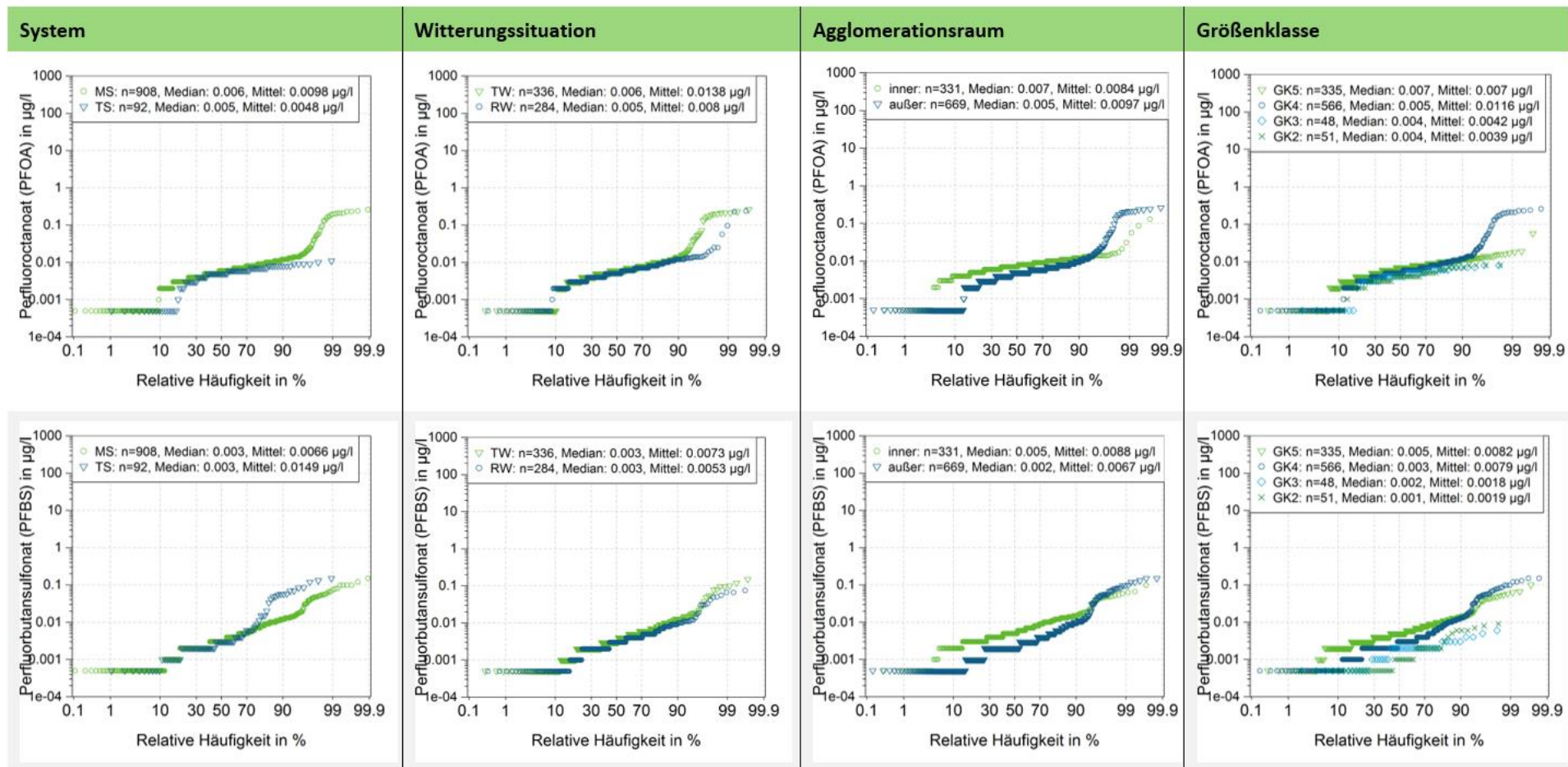


Abbildung 49: Graphiken für die Verteilung der Ablaufkonzentrationen von Perfluorooctansulfonat (PFOS) und Acenaphthen in µg/l in Abhängigkeit von den Differenzierungsmerkmalen

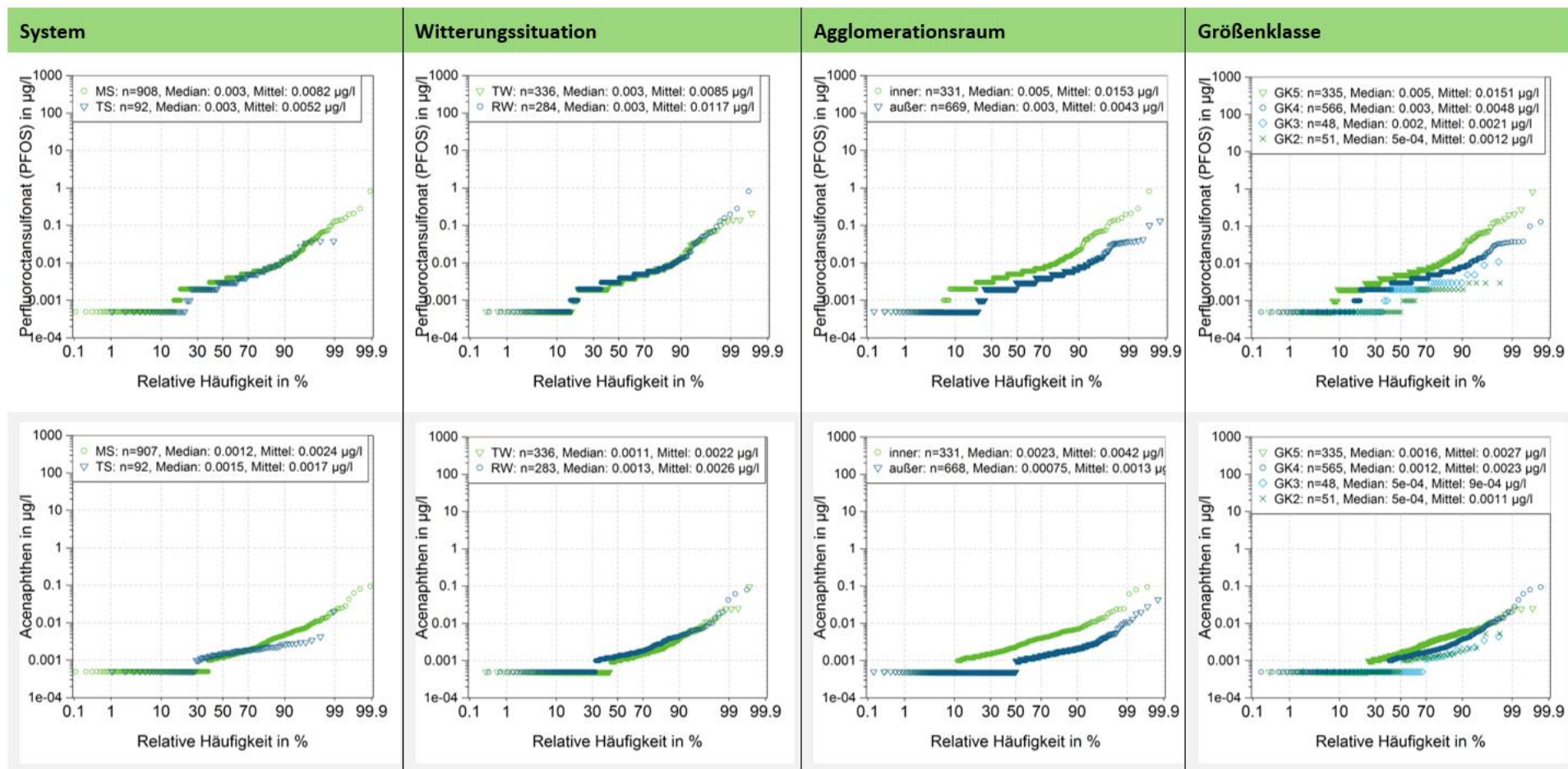


Abbildung 50: Graphiken für die Verteilung der Ablaufkonzentrationen von Fluoren und Phenanthren in $\mu\text{g/l}$ in Abhängigkeit von den Differenzierungsmerkmalen

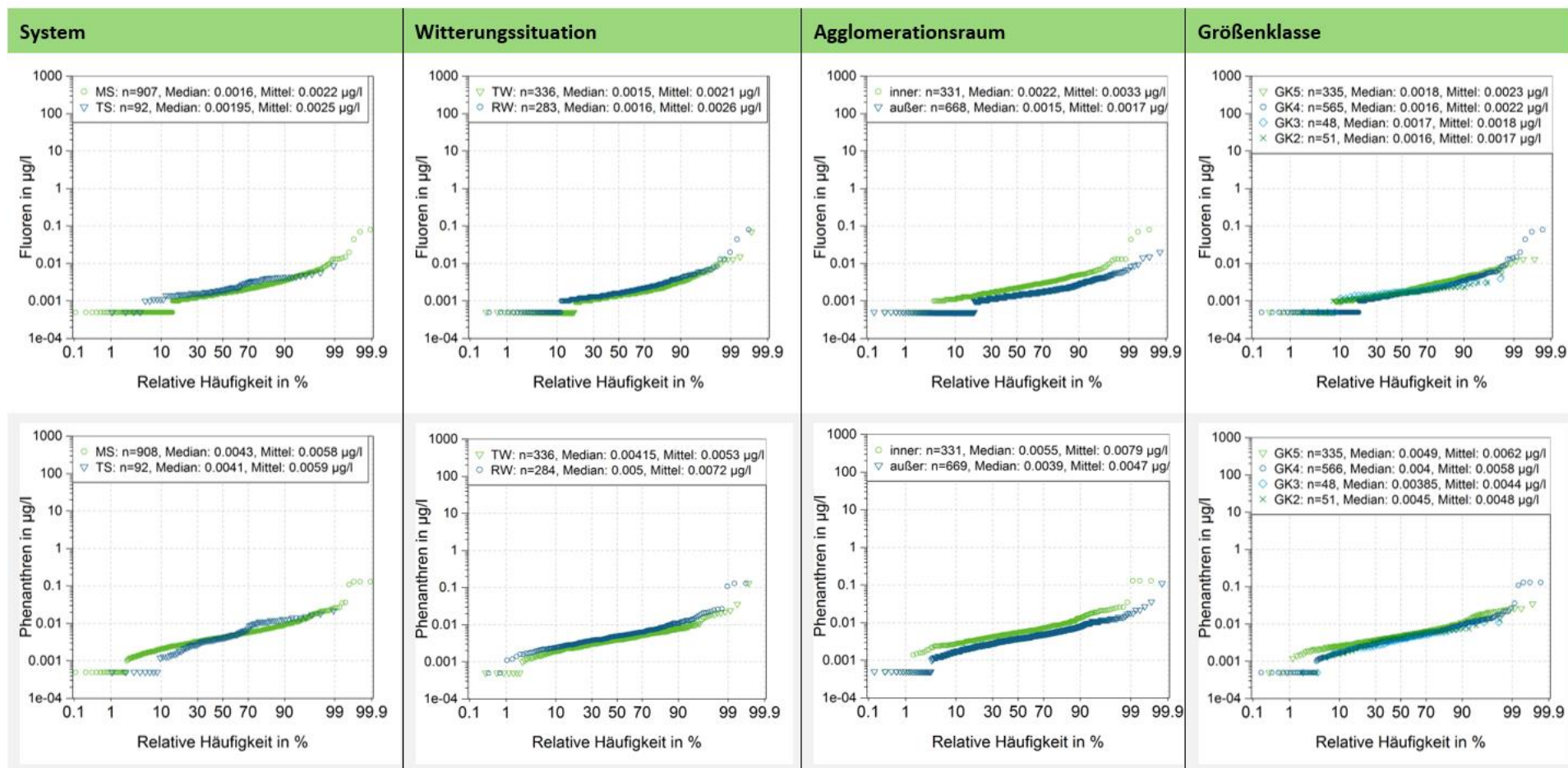


Abbildung 51: Graphiken für die Verteilung der Ablaufkonzentrationen von Fluoranthen und Pyren in $\mu\text{g/l}$ in Abhängigkeit von den Differenzierungsmerkmalen

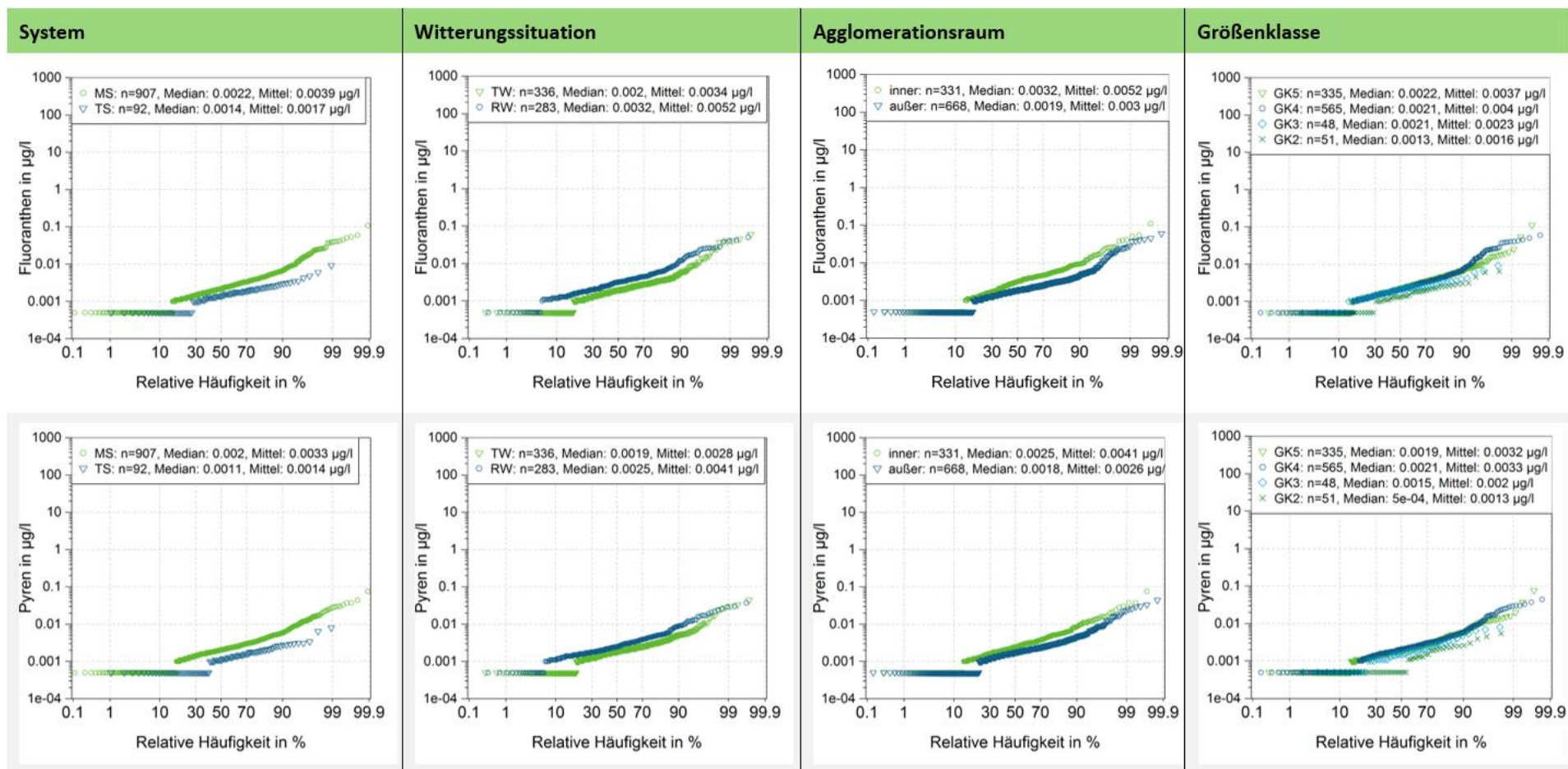


Abbildung 52: Graphiken für die Verteilung der Ablaufkonzentrationen von Diuron und Isoproturon in $\mu\text{g/l}$ in Abhängigkeit von den Differenzierungsmerkmalen

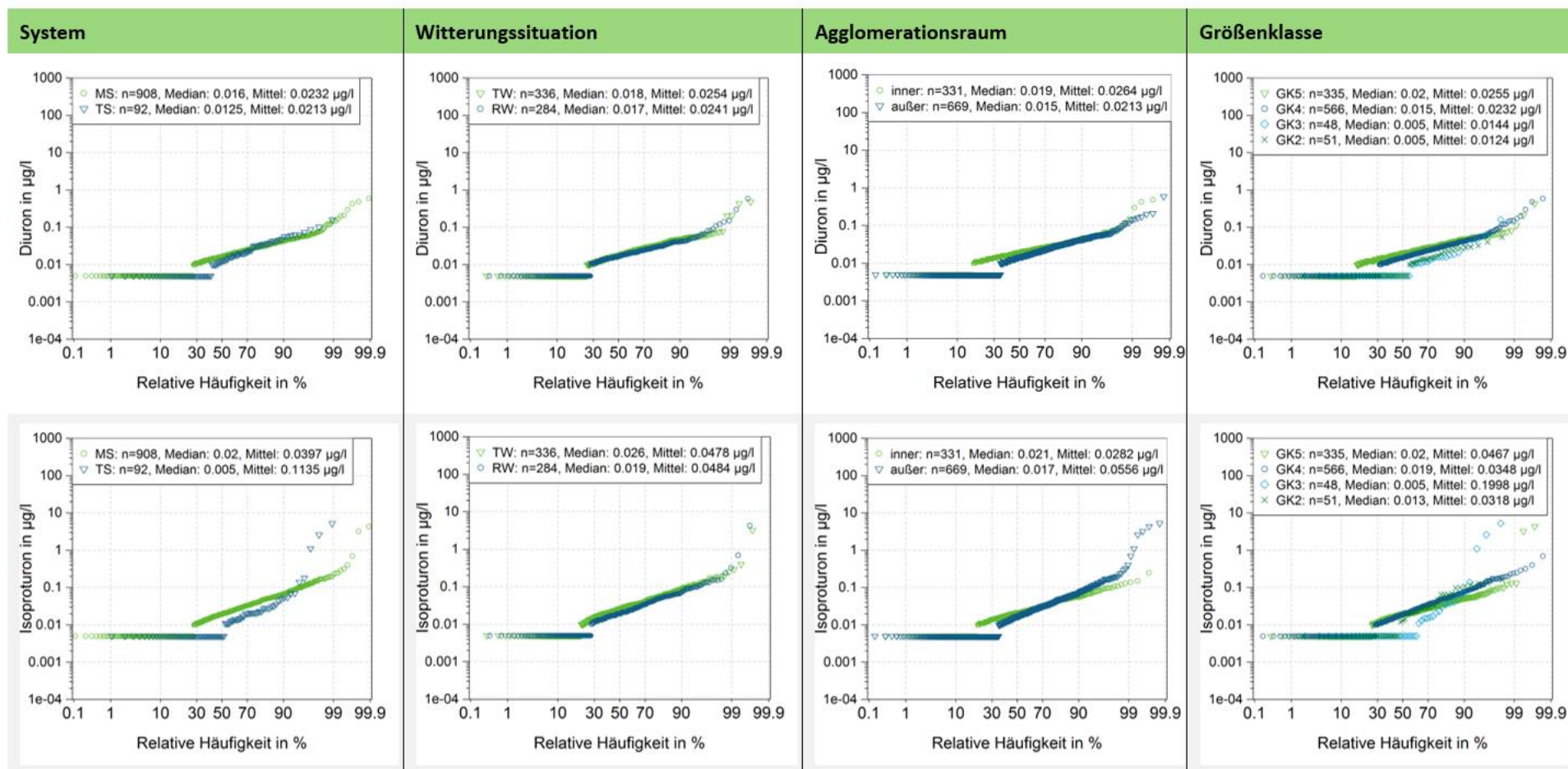
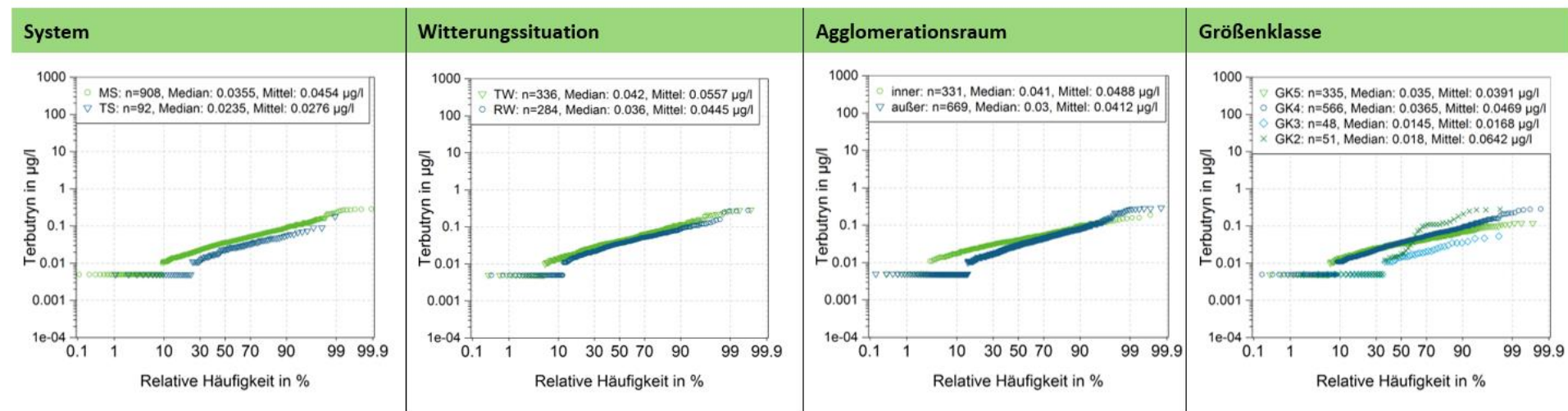


Abbildung 53: Graphiken für die Verteilung der Ablaufkonzentrationen von Terbutryn in $\mu\text{g/l}$ in Abhängigkeit von den Differenzierungsmerkmalen



B.11.7 Bewertungsmatrix für die Ableitung von differenzierten Ablaufkonzentrationen je nach Differenzierungsmerkmal

Abbildung 54: Bewertungsmatrix für die Ableitung von differenzierten Ablaufkonzentrationen je nach Differenzierungsmerkmal

Kriterien	System					Witterungssituation					Agglomerationsraum					Größenklasse				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Blei			X		☞	*** RW > TW	Med RW > IQA TW	v RW > TW	!	VV	*** a < i	Med i > IQA a	v a < i	(ok)	VV	*** ☞	☞	X	!	☞
Cadmium			X		☞	*** RW > TW	Med RW > IQA TW	v RW > TW	!	VV	*** a = i	Med i = IQA a	X	!	VV	*** ☞	☞	X	!	☞
Nickel			X		☞	*** RW < TW	(-)	v RW < TW	!	☞	*** a < i	(-)	v a < i	ok	VV	*** ☞	☞	X	!	☞
Quecksilber	*** MS = TS	Med MS > IQA TS	X	!	☞	** RW > TW	Med RW > IQA TW	X	!	VV	*** a = i	Med i = IQA a	X	!	VV	*** ☞	☞	X	!	☞
4-iso-Nonylphenol			X		☞	* RW < TW	Med TW > IQA RW	X	!	VV	*** a > i	Med a > IQA i	X	(ok)	☞	*** ☞	☞	X	!	☞
Di-(2-ethylhexyl)perfluorbutanoat (PFBA)	*** MS > TS	Med MS = IQA TS	v MS > TS	!	☞			X		☞	*** a < i	Med i > IQA a	v a < i	!	VV	*** Gk2-4 < 5	> IQA Gk2-4	X	!	VV
Perfluorpentanoat (PFPA)			X		☞	*** RW < TW	Med TW > IQA RW	v RW < TW	!	VV	*** a < i	Med i > IQA a	X	!	VV	*** ☞	> IQA Gk2-4	X	!	☞
Perfluorhexanoat (PFHxA)	** MS < TS	> IQA MS	X	!	VV	*** RW < TW	Med TW > IQA RW	v RW < TW	!	☞	*** a < i	Med i > IQA a	X	!	VV	*** ☞	≥ IQA Gk2-4	X	!	☞
Perfluorheptanoat (PFHpA)	* MS = TS	(-)	X	!	☞			X		☞	*** a < i	Med i > IQA a	X	!	VV	Gk2 = 3 < 4 < 5	> IQA Gk2-4	X	!	VV
Perfluoroctanoat (PFOA)	** MS > TS	(-)	X	!	☞	* RW < TW	(-)	X	!	VV	*** a < i	Med i > IQA a	X	!	VV	Gk2 = 3 < 4 < 5	> IQA Gk2-4	X	!	VV
Perfluorbutansulfonat (PFBS)			X		☞	* RW = TW	(-)	X	!	☞	*** a < i	Med i > IQA a	X	!	VV	Gk2 < 3 < 4 < 5	> IQA Gk2-4	v Gk2 < 3 < 4 < 5	!	VV
Perfluoroctansulfonat (PFOS)			X		☞			X		☞	*** a < i	Med i > IQA a	v a < i	(ok)	VV	Gk2 < 3 < 4 < 5	> IQA Gk2-4	Gk2 < 3 < 4 < 5	!	VV
Acenaphthen			X		☞	** RW > TW	Med RW > IQA TW	v RW > TW	!	VV	*** a < i	Med i > IQA a	v a < i	ok	VV	Gk2 = 3 < 4 < 5	> IQA Gk2-4	X	!	VV
Fluoren	*** MS < TS	> IQA MS	X	!	☞	** RW > TW	(-)	v RW > TW	!	VV	*** a < i	Med i > IQA a	v a < i	ok	VV	*** ☞	> IQA Gk2-4	X	!	☞
Phenanthren			X		☞	*** RW > TW	(-)	v RW > TW	!	VV	*** a < i	Med i > IQA a	v a < i	ok	VV	*** ☞	> IQA Gk2-4	X	!	☞
Fluoranthen	*** MS > TS	Med MS > IQA TS	v MS > TS	!	VV	*** RW > TW	Med RW > IQA TW	v RW > TW	!	VV	*** a < i	Med i > IQA a	v a < i	ok	VV	Gk2 < 3 < 4 < 5	☞	X	!	VV
Pyren	*** MS > TS	Med MS > IQA TS	v MS > TS	!	VV	*** RW > TW	Med RW > IQA TW	v RW > TW	!	VV	*** a < i	Med i > IQA a	v a < i	!	VV	*** ☞	☞	X	!	☞
Diuron			X		☞			X		☞	*** a < i	(-)	X	!	VV	Gk2 = 3 < 4 < 5	☞	X	!	VV
Isoproturon	*** MS > TS	Med MS > IQA TS	v MS > TS	(ok)	VV	** RW < TW	(-)	v RW < TW	!	☞	*** a < i	(-)	X	!	VV	*** ☞	☞	X	!	☞
Terbutryn	*** MS > TS	Med MS > IQA TS	v MS > TS	!	VV	** RW < TW	Med TW > IQA RW	v RW < TW	!	☞	*** a < i	Med i > IQA a	X	!	VV	*** ☞	☞	X	!	☞

***: p-Wert < 0,001; **: p-Wert zwischen 0,001 und 0,01; *: p-Wert zwischen 0,01 und 0,05

MS: Mischsystem; **TS**: Trennsystem;

TW: Trockenwetter; **RW**: Regenwetter;

Med: Median; **IQA**: Interquartilsabstand;

a: Einzugsgebiet außerhalb von Agglomerationsraum; **i**: Einzugsgebiet innerhalb von Agglomerationsraum

Gk4: Kläranlagen mit einer Abwasserlast < 100.00 EW; **Gk5**: Kläranlagen mit einer Abwasserlast > 100.00 EW

⊗ keine signifikanten Unterschiede

(-) Mediane der Datenkollektive sind kleiner als die IQA oder sind größer als die IQA

X keine visuellen Unterschiede bei der Betrachtung der Plots sichtbar, bzw. nicht auswertbar

√ eindeutige Unterschiede bei der Betrachtung der Plots sichtbar

! nicht signifikante Unterschiede aus Sicht der Analytik

ok signifikante Unterschiede aus Sicht der Analytik

(ok) grenzwertiger Fall bzw. signifikante Unterschiede aus Sicht der Analytik resultieren durch wenigen Proben

⇌ keine eindeutige Tendenz in eine Richtung

↯ Erwartungstrend und Befund stimmen nicht überein

√√ Erwartungstrend und Befund stimmen überein

B.12 Prüfung saisonaler Einflüsse auf die Ableitung der Emissionsfaktoren

B.12.1 Monatliche Ablaufkonzentrationen und Ablauffrachten für Diuron, Isoproturon und Terbutryn

Tabelle 81: Berechnung monatlicher Ablauffrachten für die Pestizide Diuron, Isoproturon und Terbutryn

Parameter	Einheit	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	Novemver	Dezember	Summe
Mittlerer Niederschlag (18 Jahre)	mm	67	47	48	41	69	70	87	77	61	51	64	65	747
Faktor	-	0,09	0,06	0,06	0,06	0,09	0,09	0,12	0,1	0,08	0,07	0,09	0,09	-
Diuron-Konzentration (Median)	µg/l	0,011	0,005	0,005	0,016	0,027	0,023	0,024	0,024	0,022	0,021	0,018	0,013	-
Diuron-Konzentration (Mittelwert)	µg/l	0,015	0,012	0,012	0,035	0,037	0,027	0,031	0,030	0,027	0,025	0,022	0,018	-
Diuron-Fracht (Median)	kg/a	10	3	3	9	24	21	27	24	17	14	15	11	179
Diuron-Fracht (Mittelwert)	kg/a	13	7	8	19	33	25	36	31	22	17	18	15	242
Isoproturon-Konzentration (Median)	µg/l	0,011	0,005	0,005	0,018	0,034	0,028	0,031	0,022	0,020	0,03	0,024	0,017	-
Isoproturon -Konzentration (Mittelwert)	µg/l	0,014	0,009	0,017	0,038	0,040	0,119	0,076	0,053	0,035	0,045	0,110	0,025	-
Isoproturon -Fracht (Median)	kg/a	10	3	3	10	31	25	35	22	16	20	20	14	209
Isoproturon -Fracht (Mittelwert)	kg/a	12	6	10	21	37	110	86	53	28	30	92	22	506
Terbutryn-Konzentration (Median)	µg/l	0,021	0,013	0,020	0,034	0,043	0,047	0,050	0,055	0,051	0,048	0,041	0,029	-
Terbutryn -Konzentration (Mittelwert)	µg/l	0,022	0,015	0,027	0,037	0,053	0,049	0,062	0,067	0,064	0,067	0,049	0,035	-
Terbutryn -Fracht (Median)	kg/a	18	8	12	18	39	43	56	55	40	32	34	25	382
Terbutryn -Fracht (Mittelwert)	kg/a	20	9	17	20	49	46	70	68	51	45	41	30	465

B.12.2 Monatliche Ablaufkonzentrationen und Ablauffrachten für Fluoranthen und Pyren

Tabelle 82: Berechnung monatlicher Ablauffrachten für die PAK Fluoranthen und Pyren

Parameter	Einheit	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	Novemver	Dezember	Summe
Mittlerer Niederschlag (18 Jahre)	mm	67	47	48	41	69	70	87	77	61	51	64	65	747
Faktor	-	0,09	0,06	0,06	0,06	0,09	0,09	0,12	0,1	0,08	0,07	0,09	0,09	-
Fluoranthen-Konzentration (Median)	µg/l	0,0028	0,0024	0,0033	0,0025	0,0019	0,0017	0,0016	0,0014	0,0013	0,0016	0,0022	0,0023	-
Fluoranthen -Konzentration (Mittelwert)	µg/l	0,0046	0,0040	0,0060	0,0035	0,0029	0,0028	0,0027	0,0029	0,0029	0,0023	0,0032	0,0048	-
Fluoranthen -Fracht (Median)	kg/a	2,4	1,5	2,0	1,4	1,7	1,6	1,8	1,4	1,0	1,1	1,8	2,0	19,6
Fluoranthen -Fracht (Mittelwert)	kg/a	4,0	2,5	3,8	1,9	2,7	2,6	3,0	3,0	2,4	1,5	2,7	4,1	34
Pyren-Konzentration (Median)	µg/l	0,0025	0,0022	0,0026	0,0023	0,0021	0,0018	0,0016	0,0017	0,0013	0,0013	0,0019	0,0020	-
Pyren -Konzentration (Mittelwert)	µg/l	0,0035	0,0030	0,0047	0,0033	0,0029	0,0029	0,0026	0,0029	0,0025	0,0020	0,0025	0,0036	-
Pyren -Fracht (Median)	kg/a	2,2	1,4	1,6	1,2	1,9	1,7	1,8	1,7	1,0	0,9	1,6	1,7	18,7
Pyren -Fracht (Mittelwert)	kg/a	3,1	1,9	2,9	1,8	2,6	2,6	3,0	2,9	2,0	1,3	2,1	3,0	29,3