



# Fische und Metalle

Schriftenreihe, Heft 17/2023



# Die Wirkung von Schwermetallbelastungen auf ausgewählte Fisch-/Rundmaulpopulatio- nen in sächsischen Fließgewässern: Recherchen, Datenanalysen und Anwendung von Bioligandenmodellen

Martin Halle (umweltbüro essen Bolle und Partner GbR)

Andreas Müller (chromgruen Planungs- und Beratungs-GmbH & Co KG)

Florian Kreische, Jan Lindner & Stefan Staas (LimnoPlan)

Endbericht  
14. Juli 2023



chromgruen



Im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung .....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>Literaturstudie.....</b>	<b>14</b>
2.1	Methodik & Ergebnisstatistik .....	14
2.2	Ergebnisdarstellung (Steckbriefe) .....	15
2.3	Kurzfasit der Literaturrecherche.....	16
<b>3</b>	<b>Ausgewertete Datengrundlagen .....</b>	<b>21</b>
3.1	Eingangsdaten für die statistischen Auswertungen (Chemie).....	21
3.2	Eingangsdaten für die statistischen Auswertungen (Fische/Rundmäuler) .....	23
3.3	Validierung und Aufbereitung der Eingangsdaten .....	23
3.3.1	Aufbereitung und Validierung der physiko-chemischen Daten .....	23
3.3.2	Datenaufbereitung und -validierung (Fische/Rundmäuler) .....	27
3.3.3	Datenbankaufbau für die Projektauswertungen .....	30
3.3.4	Anwendung der Bioligandenmodelle.....	30
3.3.5	Berechnung von Mischungstoxizitäten.....	31
3.3.6	Berechnung partikulär gebundener Anteile von Metallen .....	33
<b>4</b>	<b>Untersuchungsprogramm.....</b>	<b>34</b>
4.1	Analysen der Werteverteilungen der betrachteten Metalle .....	35
4.1.1	Methodik.....	35
4.1.2	Ergebnisse.....	36
4.2	Analysen der Zusammenhänge zwischen den betrachteten Metallen und zwischen diesen und anderen physiko-chemischen Begleitparametern.....	38
4.2.1	Methodik.....	38
4.2.2	Ergebnisse.....	38
4.3	Datenverknüpfungen: Stoffparameter- mit Fisch-/Rundmaulmesswerten.....	44
4.3.1	Methodik.....	44
4.4	Statistische Auswertungen der Präsenz-Absenz-Daten (1/0): A. Box-Whisker-Plots.....	45
4.4.1	Methodik.....	45
4.4.2	Ergebnisse.....	45
4.5	Statistische Auswertungen der Präsenz-Absenz-Daten (1/0): B. Binomiale Logistische Regressionen .....	48
4.5.1	Methodik.....	48
4.5.2	Ergebnisse.....	50
4.6	Statistische Auswertungen der Abundanzdaten der Fisch-/Rundmaularten: A. Box- Whisker-Plots und Regressionen über die Oberen Whisker.....	53
4.6.1	Methodik.....	53
4.6.2	Ergebnisse.....	55
4.7	Statistische Auswertungen der Abundanzdaten der Fisch-/Rundmaularten: B. Quantile Regressionen .....	56
4.7.1	Methodik.....	56
4.7.2	Ergebnisse.....	58
4.8	Einflüsse der Begleitparameter DOC, pH und Härte .....	62
4.8.1	Methodik.....	62
4.8.2	Ergebnisse.....	62

4.9	Abgeleitete fisch-/rundmaulartspezifische Konzentrationsschwellenwerte für die ausgewählten Metalle .....	71
4.10	Ergebnisdiskussion .....	76
4.10.1	Bedeutung der ausgewerteten Metallspezies für die untersuchten Fisch-/Rundmaularten .....	76
4.10.2	Bedeutung der ausgewerteten Metallfraktionen und Mischungstoxizitäten für die untersuchten Fisch-/Rundmaularten .....	79
4.10.3	Empfindlichkeiten der untersuchten Fisch-/Rundmaularten gegenüber den ausgewerteten Metallbelastungen.....	81
4.10.4	Bedeutung der Korrelationen zwischen den untersuchten Metallen .....	85
<b>5</b>	<b>Fallbeispiel Schwarzwasser-1</b> .....	<b>86</b>
5.1	Fischtypologische Zuordnung .....	86
5.2	Aktueller Fischbestand & potenzielle Wiederbesiedlungsquellen .....	88
5.3	Interpretation der Fischbestandsverhältnisse auf Grundlage der Projekt-Erkenntnisse .....	94
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>99</b>
<b>7</b>	<b>Literatur</b> .....	<b>104</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Werteverteilungen der relevanten Metall-Gelöst-Fractionen (y-Achse logarithmiert).....	25
Abbildung 2: Werteverteilungen der relevanten Metall – Gesamt-Fractionen (y-Achse logarithmiert).....	26
Abbildung 3: Mögliche Wirkmechanismen der Mischungstoxizität (aus: Nys et al., 2018).....	32
Abbildung 4: QQ-Plot von Arsen (gelöst) an Verbreitungsschwerpunkten der Äsche .....	36
Abbildung 5: Häufigkeitsverteilung von Arsen (gelöst) an Verbreitungsschwerpunkten der Äsche .....	36
Abbildung 6: QQ-Plot von Zink (gesamt) an Verbreitungsschwerpunkten der Schmerle.....	37
Abbildung 7: Häufigkeitsverteilung von Zink (gesamt) an Verbreitungsschwerpunkten der Schmerle ....	37
Abbildung 8: Streudiagramm mit Regressionsgerade zur Beziehung von Zink und Cadmium im Verbreitungsgebiet der Elritze. ....	39
Abbildung 9: Streudiagramm mit Regressionsgerade zur Beziehung von Blei und Arsen im Verbreitungsgebiet der Elritze. ....	40
Abbildung 10: Beispiel eines Box-Whisker-Plots mit Präsenz-Absenz-Daten .....	45
Abbildung 11: Boxplot der Präsenz-Absenzdaten der Äsche an ihren Verbreitungsschwerpunkten und der Nickel-gelöst-Konzentration .....	46
Abbildung 12: Logistische Regression zwischen Calcium Gesamt-Konzentration und dem Vor- kommen von Bachforellen .....	49
Abbildung 13: Logistische Regression zwischen Nickel (gelöst)-Konzentration und dem Vor- kommen von Bachforellen .....	50
Abbildung 14: Logistische Regression zwischen Nickel (gesamt)-Konzentration und dem Vor- kommen von Bachforellen .....	51
Abbildung 15: Logistische Regression zwischen bioverfügbarem Nickel und dem Vorkommen von Groppen.....	51
Abbildung 16: Logistische Regression zwischen bioverfügbarem Zink und dem Vorkommen von Groppen.....	52
Abbildung 17: Logistische Regression zwischen bioverfügbarem Zink und dem Vorkommen von Schmerlen.....	52
Abbildung 18: Beispiel eines Box-Whisker-Plots: Nickel (gesamt) gegen die 5 Abundanzklassen des Bachneunauges .....	54
Abbildung 19: Schematische Darstellung des optimierenden Prozesses bei der einfachen linearen Regression.....	57
Abbildung 20: Schematische Darstellung des optimierenden Prozesses bei der Quantilen Regression .....	57
Abbildung 21: Quantile Regression der Befischungsdichte von Bachneunauge und der Konzentration von Arsen (gesamt). Doppelt-logarithmische Darstellung.....	59
Abbildung 22: Bestimmung des Modalwertes als Maximum der Verteilungsfunktion .....	64
Abbildung 23: Vergleich der Verteilungen der Abundanzen bei Einhaltung und Überschreitung der CWQG-Schwellenwerte.....	66
Abbildung 24: Boxplot der Differenz von Jahresmitteln der Mess- und CWQG-Schwellenwerte von Cadmium (gelöst) im potenziellen Verbreitungsgebiet der Äsche.....	67
Abbildung 25: Boxplot der Differenz von Jahresmitteln der Mess- und CWQG-Schwellenwerte von Zink (gelöst) im potenziellen Verbreitungsgebiet der Bachforelle .....	68
Abbildung 26: Modalwert als Maximum der Verteilungsfunktion der CWQG-Schwellenwerte von Zink im potenziellen Verbreitungsgebiet der Elritze .....	69

Abbildung 27: Modalwert als Maximum der Verteilungsfunktion der CWQG-Schwellenwerte von Zink im potenziellen Verbreitungsgebiet der Schmerle.....	70
Abbildung 28: Kartenbeispiel aus den in den Steckbriefen enthaltenen Metall- und Fraktionsspezifischen Darstellungen der ermittelten artspezifischen Gefährdungsklassen. ....	75
Abbildung 29: Kartographische Verortung der Befischungsstellen im OWK Schwarzwasser-1 und benachbarten Wasserkörpern mit Angabe der fischzönotischen Grundausrüstung (FZG) für den WK Schwarzwasser-1. ....	89
Abbildung 30: Jahresdurchschnittswerte (JD-Werte) der Zink-Belastung (ges.) im WK Schwarzwasser-1 für die Jahre 2009 bis 2019 an der Messstelle OBF40900. ....	95
Abbildung 31: Jahresdurchschnittswerte (JD-Werte) der Arsen-Belastung (ges.) im WK Schwarzwasser-1 für die Jahre 2009 bis 2019 an der Messstelle OBF40900. ....	96
Abbildung 32: Jahresdurchschnittswerte (JD-Werte) der Cadmium-Belastung (ges.) im WK Schwarzwasser-1 für die Jahre 2009 bis 2019 an der Messstelle OBF40900. ....	96

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die recherchierten und verwendeten Literaturquellen. ....	15
Tabelle 2: Tabellarische Übersicht über Faktoren die nachweislich und in bedeutendem Maße die Toxizität des jeweiligen Metalls für Fische/Rundmäuler beeinflussen. ....	17
Tabelle 3: Tabellarische Gegenüberstellung der Wertespannen der Literaturrecherche mit den Belastungsspektren in sächsischen OWK (Gesamt-Konzentrationen im Betrachtungszeitraum 2015-2019) .....	19
Tabelle 4: Parameter der bereitgestellten physiko-chemischen Daten .....	21
Tabelle 5: Tabellarische Übersicht über die Individuenzahlen und die Anzahlen der Befischungen mit Artnachweisen für die sechs stellvertretend betrachteten Fokusarten.....	23
Tabelle 6: In den Analysen verwendete physiko-chemische Parameter .....	24
Tabelle 7: Werteverteilungen der relevanten Metalle – Gelöst-Fraktionen .....	26
Tabelle 8: Werteverteilungen der relevanten Metalle – Gesamt-Fraktionen .....	26
Tabelle 9: Übersichtstabelle mit den für die Analysen ausgewählten Clustern der Fischzönotischen Grundausrprägung (FZG) für jede der sechs Fokusarten .....	28
Tabelle 10: Zuordnung der Datenbankfelder zu den Spalten des BioMet-Tools.....	31
Tabelle 11: Ökotoxizitätsdaten für Fische zur Berechnung von „toxic units“ und Mischungstoxizität (B. Guhl, LANUV NRW, mdl. Mitt., Effektkonzentrationen als gelöste Konzentrationen .....	32
Tabelle 12: Mindestens mäßig untereinander korrelierte Metalle .....	38
Tabelle 13: Korrelationen von Arsen mit anderen physiko-chemischen Parametern .....	41
Tabelle 14: Korrelationen von Blei mit anderen physiko-chemischen Parametern .....	41
Tabelle 15: Korrelationen von Cadmium mit anderen physiko-chemischen Parametern .....	41
Tabelle 16: Korrelationen von Kupfer mit anderen physiko-chemischen Parametern.....	42
Tabelle 17: Korrelationen von Nickel mit anderen physiko-chemischen Parametern.....	42
Tabelle 18: Korrelationen von Quecksilber mit anderen physiko-chemischen Parametern.....	42
Tabelle 19: Korrelationen von Uran mit anderen physiko-chemischen Parametern.....	42
Tabelle 20: Korrelationen von Zink mit anderen physiko-chemischen Parametern.....	43
Tabelle 21: Obere Whisker der Boxplots von Metallkonzentrationen (Jahresmittel) über Präsenz-Absenz-Daten .....	46
Tabelle 22: Obere Whisker der Boxplots von bioverfügbaren Metallkonzentrationen (Jahresmittel) über Präsenz-Absenz-Daten .....	47
Tabelle 23: Artspezifische, flächenbezogene Abundanzklassifizierung anhand von Perzentilen zur Abgrenzung der Obergrenzen der Klassen 1 bis 4; Mindestindividuenzahl/Hektar der Klasse 1:>0 .....	53
Tabelle 24: Farbkodierung der Quantile .....	58
Tabelle 25: Anteile der Fälle mit starken und statistisch signifikanten Quantilen Regressionen zwischen Individuendichten und Metallkonzentrationen .....	60
Tabelle 26: Fälle mit plausibler Steigung und starken und statistisch signifikanten Quantilen Regressionen zwischen Individuendichten und Metallkonzentrationen bei 80-Perzentilen .....	60
Tabelle 27: Aus Box-Whisker-Plots abgeleitete Schwellenwerte für das Bachneunauge .....	61
Tabelle 28: Aus Box-Whisker-Plots abgeleitete Schwellenwerte für die Elritze .....	61
Tabelle 29: Aus Quantilen Regressionen berechnete Schwellenwerte für das Bachneunauge .....	61
Tabelle 30: Aus Quantilen Regressionen berechnete Schwellenwerte für die Elritze .....	61

Tabelle 31: Mittelwerte, Mediane und Modalwerte der CWQG-Schwellenwerte für Cadmium (gelöst) in den potenziellen Verbreitungsgebieten der betrachteten Fisch-/Rundmaulararten .....	63
Tabelle 32: Mittelwerte, Mediane und Modalwerte der CWQG-Schwellenwerte für Zink (gelöst) in den potenziellen Verbreitungsgebieten der betrachteten Fisch-/Rundmaulararten .....	63
Tabelle 33: Mittelwerte verschiedener Abundanzmaße differenziert nach Überschreitung und Einhaltung der CWQG-Schwellenwerte für Cadmium (gelöst) .....	64
Tabelle 34: Mittelwerte verschiedener Abundanzmaße differenziert nach Überschreitung und Einhaltung der CWQG-Schwellenwerte für Zink (gelöst) .....	65
Tabelle 35: Fisch-/Rundmaularspezifische Mittelwerte der Verhältnisse von gelösten zu bioverfügbaren Zink-Konzentration .....	68
Tabelle 36: Mittelwerte, Mediane und Modalwerte der auf Bioverfügbare Zink-Konzentrationen umgerechneten CWQG-Schwellenwerte für Zink (gelöst) in den potenziellen Verbreitungsgebieten der betrachteten Fisch-/Rundmaulararten .....	69
Tabelle 37: Abgeleitete Schwellenwerte (SW) mit Angaben zu den ausgewerteten Fallzahlen und Regressionstypen (Regr.-Typen: „P“: Potenzfunktion, „L“: Linearfunktion) mit den dazu gehörigen Bestimmtheits- ( $R^2$ ) und Signifikanzmaßen ( $p$ ), JD-UQN (OGewV) und Hintergrundschätzwerten nach LAWA (1998) .....	72
Tabelle 38: Anzahlen N der Metallfraktions-Fisch-/Rundmaulbeziehungen mit negativen Steigungen und Erfüllung der definierten Mindestsignifikanzanforderungen für die acht untersuchten Metallspezies .....	76
Tabelle 39: Quantile Regressionen von Cadmium mit Zink .....	77
Tabelle 40: Quantile Regressionen von Blei mit Arsen .....	77
Tabelle 41: Aufteilung der 38 für die Schwellenwertableitungen verwendeten best-off-Paarungen auf die untersuchten Metallfraktionen .....	80
Tabelle 42: Anzahlen der Metallfraktions-Fisch-/Rundmaulbeziehungen (inkl. RQ Mix) N mit negativen Steigungen und Erfüllung der definierten Mindestsignifikanzanforderung ( $p < 0,1$ ) für die sechs untersuchten Fisch-/Rundmaulararten .....	82
Tabelle 43: Übersicht der im WK Schwarzwasser-1 (fett) und in anliegenden bzw. parallelen Gewässern ( <i>kursiv</i> ) zugrundeliegenden fischzönotischen Grundausrprägungen (FZG). .....	87
Tabelle 44: Fischzönotische Grundausrprägungen im WK Schwarzwasser-1 sowie oberhalb und unterhalb angrenzenden bzw. parallel liegenden Wasserkörpern .....	88
Tabelle 45: Absolute Fangzahlen und Fischdichten (Individuen pro Hektar) der sechs Fokusarten für die seit 2007 durchgeführten Fischbestandsaufnahmen im WK Schwarzwasser-1. ....	90
Tabelle 46: Schematische Gegenüberstellung Artnachweise der Fokusarten im Umfeld des WK Schwarzwasser-1 seit 2007. Im Falle mehrerer Probestellen und Befischungsdurchgänge wurde über die Jahre und Probestellen gemittelt. ....	92
Tabelle 47: Legende (Klassifizierung gemäß der artspezifischen ermittelten Abundanzklassen) .....	93
Tabelle 48: Einstufung der Gefährdungsklasse der Fokusart Schmerle anhand der in den statistischen Analysen abgeleiteten Schwellenwerte. ....	95
Tabelle 49: Höchste Zink-, Arsen- und Cadmium-JD-Werte an Probestellen mit Schmerlen-, Groppen- oder Bachforellen-Nachweisen und langjährige Jahresmittelwerte im WK Schwarzwasser-1 auf Basis der in die statistischen Analysen eingeflossenen Datengrundlage .....	97

## Anlagen

Die Anlagen 1 - 13 enthalten eine vollständige Zusammenstellung der Ergebnisse aller durchgeführten Datenanalysen und sind nicht veröffentlicht. Bei Bedarf stellt das LfULG die Daten gern bereit. Die Kontaktadresse finden Sie im Impressum.

Die Anlagen 14 und 15 sind mit diesem Bericht veröffentlicht.

- Anlage 01: Deskriptive Statistik Chemie (Diagramme)
- Anlage 02 a: Boxplots Artnachweise Metalle (Tabelle)
- Anlage 02 b: Boxplots Artnachweise Metalle (Diagramme)
- Anlage 03 a: Boxplots Artnachweise Begleitparameter (Tabelle)
- Anlage 03 b: Boxplots Artnachweise Begleitparameter (Diagramme)
- Anlage 04 a: Logistische Regression Artnachweise Chemie (Tabelle)
- Anlage 04 b: Logistische Regression Artnachweise Chemie (Diagramme)
- Anlage 05 a: Boxplots Abundanzen Metalle Lineare Regressionen Obere Whisker (Tabelle)
- Anlage 05 b: Boxplots Abundanzen Metalle Potenz-Regressionen Obere Whisker (Tabelle)
- Anlage 05 c: Boxplots Abundanzen Metalle (Diagramme)
- Anlage 06 a: Boxplots Abundanzen Bioverfügbare Metalle Lineare Regressionen Obere Whisker (Tabelle)
- Anlage 06 b: Boxplots Abundanzen Bioverfügbare Metalle Potenz-Regressionen Obere Whisker (Tabelle)
- Anlage 06 c: Boxplots Abundanzen Bioverfügbare Metalle (Diagramme)
- Anlage 07 a: Lineare Quantile Regression Metalle mit Flächenbezug (Tabelle)
- Anlage 07 b: Lineare Quantile Regression Metalle mit Flächenbezug (Diagramme)
- Anlage 08 a: Lineare Quantile Regression Begleitparameter mit Flächenbezug (Tabelle)
- Anlage 08 b: Lineare Quantile Regression Begleitparameter mit Flächenbezug (Diagramme)
- Anlage 09: Boxplots für Lineare Quantile Regression Metalle mit Flächenbezug (Diagramme)
- Anlage 10: Boxplots für Lineare Quantile Regression Begleitparameter mit Flächenbezug (Diagramme)
- Anlage 11 a: Doppelt logarithmierte Quantile Regression Metalle mit Flächenbezug (Diagramme)
- Anlage 11 b: Doppelt logarithmierte Quantile Regression Begleitparameter mit Flächenbezug (Diagramme)
- Anlage 11 c: Doppelt logarithmierte Quantile Regression mit Flächenbezug (Tabelle)
- Anlage 12 a: Biologisch verfügbare Metalle, mit Biomet-Tool berechnet, Einzelwerte (Tabelle)
- Anlage 12 b: Biologisch verfügbare Metalle, mit Biomet-Tool berechnet, Jahresmittelwerte für aktuellstes Jahr (Tabelle)
- Anlage 12 c: Biologisch verfügbare Metalle, mit Biomet-Tool berechnet, langjährigen Mittelwerte (Tabelle)
- Anlage 13: Boxplots CWQG (Diagramme)
- Anlage 14: Steckbriefe Fische und Metalle
- Anlage 15: Gefährdungspotenzial-Karten (Uran)

## Abkürzungsverzeichnis

ACP	allgemeine chemische und physikalisch-chemische Parameter
As	Arsen
AWB	artificial water body / künstlicher Wasserkörper
BioF	Bioverfügbarkeitsfaktor
BLM	Bioligandenmodell
Cd	Cadmium
Cl <sup>-</sup>	Chlorid
Cu	Kupfer
EC <sub>10</sub>	10% Effekt Konzentration
EC <sub>50</sub>	mittlere effektive Konzentration (median effect concentration)
FG-Typ	Fließgewässertyp
HC <sub>5</sub>	5% hazardous concentration
HK	Häufigkeitsklassen
HMWB	heavily modified water body / erheblich veränderter Wasserkörper
JD	Jahresdurchschnitt
LAWA	Länderarbeitsgemeinschaft Wasser
LC <sub>50</sub>	mittlere letale Konzentration (median lethal concentration)
LF	Leitfähigkeit (25°C)
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Sachsen)
LOEC	lowest observed effect concentration
Max	Maximalwert
MGB	Mittelgebirgsbäche
MGF	Mittelgebirgsflüsse
Min	Minimalwert
MKZ	Messstellenkennzahl
MW	Mittelwert (arithmetisches Mittel)
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	Ammonium-Stickstoff
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	Nitrit-Stickstoff
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	Nitrat-Stickstoff
NOEC	no observed effect concentration
NWB	natural water body / natürlicher Wasserkörper
OGewV	Oberflächengewässerverordnung
o-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	ortho-Phosphat-Phosphor
OWK	Oberflächenwasserkörper
ÖZK	Ökologische Zustandsklasse
p-Wert	Statistische Überschreitungswahrscheinlichkeit oder Signifikanzwert zwischen 0 und 1, der ein Maß für die statistische Wahrscheinlichkeit der Glaubwürdigkeit der Nullhypothese beschreibt. Je kleiner der Wert ist (z.B. <0,05), desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Null-Hypothese verworfen werden kann (z.B. >95%), dass also kein, bzw. kein rein zufälliger Zusammenhang zwischen den geprüften Variablen besteht.
Pb	Blei
QBW	Querbauwerk

Q-Q-Plot	Quantil-Quantil-Plot, analytisches Diagramm, in dem die Quantile, die sich aus der Regressionsgleichung ergeben und die tatsächlichen Quantile der Messwerte gegeneinander aufgetragen werden.
$R^2$	Statistisches Bestimmtheitsmaß zwischen 0 und 1 (entspricht 0% bis 100%), das angibt, wie gut die unabhängige Variable geeignet ist, die Varianz der abhängigen zu erklären, das heißt, je höher der Wert ist, desto höher ist der prozentuale Erklärungsanteil.
RB	Repräsentative biologische Messstelle
RC	Repräsentative chemische Messstelle
RCR	Risikocharakterisierungsverhältnis
SSD	species sensitivity distribution
SWP-K	Schwerpunktkonzentration
TGD f. EQS	Technical guidance for deriving environmental quality standards
TLB	Tiefenbäche
TLF	Tiefenflüsse
TP	total phosphorus / Gesamtphosphor
TWa	Wassertemperatur
UQN	Umweltqualitätsnorm
UQN <sub>fw</sub>	Umweltqualitätsnorm für limnische Oberflächengewässer (Freshwater)
WGK	Wassergefährdungsklasse
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie
ZHK	Zulässige Höchstkonzentration
Zn	Zink

# 1 Einführung

Lediglich 7% der sächsischen 558 Fließgewässer-Wasserkörper erreichen derzeit den nach Wasserrahmenrichtlinie und Wasserhaushaltsgesetz geforderten guten ökologischen Zustand. 77% aller Fließgewässerswasserkörper weisen eine Fischzönose auf, die die Zielvorgaben der WRRL bezüglich eines guten ökologischen Zustands bzw. Potenzials nicht erreichen. Für mindestens 13% der Fließgewässer liegt mindestens eine Ursache der Zielverfehlung in den zum Teil sehr hohen Belastungen durch Halb- und Schwermetalle in der Region des Erzgebirges und insbesondere dessen jahrhundertealten Bergbaurevieren.

Mit dem vorliegend dokumentierten Projekt sollte mittels geeigneter statistischer Verfahren und naturwissenschaftlicher Auswertungen untersucht werden, welche spezifischen Belastungskonsequenzen erhöhte Schwer- und Halbmetallkonzentrationen für den Zustand der Populationen bestimmter Fisch-/Rundmaularten – insbesondere in den jahrhundertealten Bergbaurevieren des Erzgebirges – haben.

Dazu sollten, basierend auf vorhandenen Messwerten der Metallkonzentrationen und der Fisch-/Rundmaulbestandserfassungen Zusammenhänge ermittelt werden, die Rückschlüsse auf die Ausmaße der Schwer- und Halbmetallwirkungen auf die Fisch-/Rundmaulpopulationen unter Freilandbedingungen erlauben. Während ökotoxikologische Laborversuche artspezifische akute Vitalitätseinschränkungen oder Sterblichkeiten in alleiniger Abhängigkeit von der Konzentration des jeweils betrachteten Stoffes messen, sollten hier durch statistische Felddatenauswertungen die mittel- bis langfristigen Konsequenzen erhöhter Konzentrationen der zu untersuchenden Halb- und Schwermetalle für die Populationen verschiedener Fisch-/Rundmaularten ermittelt werden. Zusätzlich sollten die mittels Bioligandenmodellen unter Einbeziehung weiterer Parameter (Härte, DOC, pH) für einige der Metallspezies aus den Gelöstfraktionen berechenbaren sogenannten bioverfügbaren Metallkonzentrationen verwendet werden. Derartige Bioligandenmodelle, stehen für Blei, Nickel, Kupfer und Zink zur freien Verfügung. In Sachsen wurden sie bislang bereits für Nickel angewendet.

Da die Untersuchung auf einer felddatenbasierten statistischen Auswertung beruht, sollte durch Berücksichtigung weiterer physiko-chemischer Begleitparameter als zusätzliche Einflussgrößen auf die Fisch-/Rundmaulbestände eine Plausibilisierung der Untersuchungsergebnisse vorgenommen werden.

Die durchgeführten Auswertungen beziehen sich auf die folgenden Metalle (jeweils differenziert nach den Fraktionen gelöst, gesamt, partikulär, zusätzlich für Blei, Nickel, Kupfer und Zink der berechnete bioverfügbare Anteil der Gelöstfraktionen):

- Arsen
- Blei
- Cadmium
- Kupfer
- Nickel
- Uran
- Quecksilber
- Zink

Untersuchte Fisch-/Rundmaularten sind:

- Äsche
- Bachforelle
- Bachneunauge
- Elritze
- Groppe
- Schmerle

Im Sinne einer systematischen Aufbereitung des aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstandes zu Schwermetallwirkungen auf Fische/Rundmäuler wurde im Rahmen der Untersuchung eine umfangreiche Literaturstudie durchgeführt und die Ergebnisse für die genannten Metalle und Fisch-/Rundmaularten in separaten Steckbriefen für Arsen, Blei, Cadmium, Kupfer, Nickel und Zink dargestellt.

Das konkrete Ziel des Vorhabens bestand darin, die wirksamen Zusammenhänge zwischen Halb- und Schwermetallbelastungen von Fließgewässern und den Populationsstärken einzelner Fisch-/Rundmaularten in Sachsen zu ermitteln, um darauf basierend spezifische Schwellenwerte für die jeweiligen Metallspezies und -fraktionen hinsichtlich deren potenziellen Abundanz limitierenden Wirkungen für die untersuchten Arten abzuleiten. Die gewonnenen Erkenntnisse galt es beispielhaft auf einen Wasserkörper anzuwenden. Dazu wurde vom LfULG der, vor allem durch Zink belastete Fließgewässer-Wasserkörper Schwarzwasser-1 mit seinen Fischarten Groppe, Bachforelle und Schmerle als Fallbeispiel ausgewählt.

## 2 Literaturstudie

Die Auswirkungen von Schwermetallbelastungen auf verschiedene Fisch-/Rundmaularten waren und sind Gegenstand einer Vielzahl verschiedener wissenschaftlicher Untersuchungen. Meist liegt der Fokus in diesen Studien auf der Dokumentation und Ermittlung von Stoffkonzentrationen bei denen die Individuen einer Fisch-/Rundmaulart in einem klar definierten experimentellen Setup eine bestimmte Reaktion zeigen (z. B. letale Konzentrationen). Informationen über chronische Effekte langjähriger Schwermetallbelastungen in Gewässern und komplexe in der Natur vorkommende Belastungskombinationen lassen sich nur schwer aus den einzelnen Studien ableiten und auf die Bedingungen in den Fließgewässern Sachsens übertragen. Ziel der Literaturstudie war es daher die Kenntnisse zur Wirkung der Schwermetalle Arsen (As), Kupfer (Cu), Zink (Zn), Cadmium (Cd), Nickel (Ni) und Blei (Pb) auf die biologische Komponente Fische zu recherchieren, um eine Wissensbasis bezüglich der Sensitivität einzelner Fisch-/Rundmaulartenpopulationen und deren Lebensstadien unter Bedingungen erhöhter Schwermetallkonzentrationen zu schaffen. Die Fisch-/Rundmaularten die hierbei genauer betrachtet werden sollen umfassen die Arten Groppe (*Cottus gobio*), Schmerle (*Barbatula barbatula*), Bachneunauge (*Lampetra planeri*), Bachforelle (*Salmo trutta*) und Äsche (*Thymallus thymallus*).

Die Ergebnisse der Literaturrecherche wurden in metallspezifischen Steckbriefen in übersichtlicher Form zusammengefasst und sind dem Anhang des vorliegenden Berichtes beigelegt. In den folgenden Unterpunkten werden allgemeine Aspekte der Literaturrecherche erläutert und Hinweise zur Struktur und Interpretation der Steckbriefe gegeben.

### 2.1 Methodik & Ergebnisstatistik

Im Zuge der Literaturrecherche konnten die verschiedenen Wirkpfade und die auf die Toxizität wirkenden Einflussfaktoren der sechs betrachteten Metalle herausgearbeitet werden. Informationen zu experimentell ermittelten Grenz- oder Schwellenwerten wurden zusammengetragen und hierbei ein besonderes Augenmerk auf Studien mit artspezifischen Ergebnissen zu den sechs Fokusarten gelegt. Insbesondere letzteres gestaltete sich oftmals schwierig, da sich eine Vielzahl der wissenschaftlichen Arbeiten auf Arten konzentriert, die entweder von wirtschaftlichem Interesse sind (bspw. in der Aquakultur und fischereilich genutzte Arten) oder die im jeweiligen Betrachtungsraum von hoher ökologischer Bedeutung sind (bspw. Arten der nordamerikanischen Fischfauna). Sofern keine ausreichenden Informationen zu den sechs Fokusarten zur Verfügung standen, wurden auch Untersuchungsergebnisse für andere Fisch-/Rundmaularten zusammengetragen, wobei neben der Informationsverfügbarkeit auch möglichst die Verwandtschaft der Arten zu den Fokusarten berücksichtigt wurde, um eine gewisse Übertragbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

Insgesamt wurden im Zuge der Literaturrecherche 243 Publikationen über die gängigen Rechercheportale und Datenbanken (PubMed, ResearchGate, Google Scholar etc.) sowie aus dem eigenen Datenbestand abgerufen und ausgewertet. Zudem wurde eine Vielzahl weiterer Publikationen gesichtet, ohne dass diese Studien in die finale Ergebnisdarstellung dieses Berichtes einfließen. Die recherchierten Publikationen umfassen wissenschaftliche Arbeiten und sonstige Veröffentlichungen (behördliche Veröffentlichungen, Bücher und Reporte) aus 38 Ländern (siehe Tabelle 1). Hierbei lieferten die europäischen Veröffentlichungen erwartungsgemäß die meisten artspezifischen Informationen zu den sechs Fokusarten, während Publikationen aus Nordamerika und anderen Teilen der Welt Informationen zu verwandten Fisch-/Rundmaularten oder grundlegende Forschungsergebnisse zu der Wirkweise eines Schwermetalls auf Fische/Rundmäuler im Allgemeinen beitragen konnten.

**Tabelle 1: Übersicht über die recherchierten und verwendeten Literaturquellen.**

Länder	Anzahl wissenschaftl. Publikationen	Anzahl sonstiger Veröffentlichungen	Summe
UK	30	-	30
Deutschland	10	8	18
Niederlande	11	-	11
Schweden	8	-	8
Norwegen	9	-	9
Weitere (15 Länder)	31	4	35
<b>SUMME (Europa)</b>	<b>99</b>	<b>12</b>	<b>111</b>
USA	59	2	61
Kanada	26	1	27
Mexiko	1	-	1
<b>Summe (Nordamerika)</b>	<b>86</b>	<b>3</b>	<b>89</b>
Indien	14	-	14
Japan	5	-	5
Weitere (13 Länder)	24	-	24
<b>Summe (Sonstige Regionen)</b>	<b>43</b>	<b>0</b>	<b>43</b>
<b>Summe (Gesamt)</b>	<b>227</b>	<b>13</b>	<b>243</b>

## 2.2 Ergebnisdarstellung (Steckbriefe)

Die Darstellung der Ergebnisse der Literaturrecherche erfolgt für jedes der sechs betrachteten Metalle in einem separaten Steckbrief. Das Quellenverzeichnis der Steckbriefe umfasst die Literaturangaben aus allen Steckbriefen und ist am Ende der Steckbriefe aufgeführt. Die einzelnen Steckbriefe sind dem Anhang des vorliegenden Berichts beigelegt (siehe Anlage 14). Sie sind einheitlich strukturiert und umfassen, neben verschiedenen kartographischen Darstellungen des Bundeslandes Sachsen mit artspezifischen Metall-Gefährdungsklassen<sup>1</sup> (basierend auf den statistisch signifikanten Ergebnissen dieses Projekts), jeweils die folgenden Punkte:

### ***Eine kurze tabellarische Darstellung grundlegender Informationen***

Die Informationen umfassen die CAS-Nummer, die EG-Nummer, die Elementkategorie, einen Clarke-Wert, JD- und ZHK-UQN (sofern festgelegt) und die Wassergefährdungsklasse (sofern festgelegt).

### ***Tabellarische Auflistung der Wassergefährdungsklassen (WGK) einer Vielzahl von Verbindungen des betrachteten Metalls***

Die Tabelle enthält die WGK sämtlicher über die Informationsseite des Umweltbundesamtes (<http://web-rigoletto.uba.de/rigoletto>) abrufbarer Verbindungen, die das jeweilige Metall enthalten.

<sup>1</sup> Die zusätzlich erzeugten Kartendarstellungen der artspezifischen Uran-Gefährdungsklassen sind in Anlage 15 aufgeführt.

### **Allgemeine Informationen**

Hier werden in kurzen einleitenden Texten bspw. allgemeine Informationen zu Vorkommen und Eintragspfaden des betrachteten Metalls in Fließgewässer gegeben. Des Weiteren werden die Haupteintragspfade der Metalle in sächsischen Fließgewässern genannt.

### **Aufnahme von Arsen / Blei / Cadmium / Kupfer / Nickel / Zink**

Unter diesem Punkt werden Informationen zu den verschiedenen bekannten Aufnahmewegen des betrachteten Metalls durch Fische/Rundmäuler gegeben.

### **Toxische Wirkung**

Eine übersichtliche Zusammenstellung der in der Literatur für Fische/Rundmäuler dokumentierten toxischen Wirkweisen des jeweiligen Metalls.

### **Einflussfaktoren auf die Toxizität**

Beschreibung der Art und Weise, mit der verschiedene Faktoren die Toxizität eines betrachteten Metalls verstärken bzw. abschwächen können.

### **Grenz- & Literaturwerte**

Zumeist tabellarische Darstellungen verschiedener Grenz- und Schwellenwerte eines Metalls. Aufgeführt sind hierbei meist die in wissenschaftlichen Arbeiten ermittelten Schwellenwerte, bei denen ein bestimmtes Lebensstadium einer Fisch-/Rundmaulart unter experimentellen Bedingungen eine bestimmte Reaktion auf eine erhöhte Metallbelastung zeigte (bspw. LC-Werte).

### **Artspezifische Betrachtung ausgewählter Fokusarten**

Einzelne Textpassagen in denen die verfügbaren Informationen über die Auswirkungen des jeweiligen Metalls auf die Fokusarten (sofern vorhanden) zusammengetragen wurden.

### **Zusammenfassung & Vergleiche mit sächsischem Belastungsspektrum**

Kurzzusammenfassung der aus dem Projekt gewonnenen Erkenntnisse, sowie eine vergleichende Betrachtung der in der Literaturstudie recherchierten Werte mit den tatsächlich in sächsischen Gewässern vorkommenden Metallkonzentrationen.

Die in den Steckbriefen festgehaltenen Informationen bieten eine Basis für ein Verständnis möglicher Auswirkungen erhöhter Schwermetallkonzentrationen auf einzelne Fisch-/Rundmaulartenpopulationen und deren Lebensstadien. Es sei an dieser Stelle jedoch darauf hingewiesen, dass eine direkte Übertragbarkeit der dargestellten Untersuchungsergebnisse auf natürliche Ökosysteme im Freiland in den meisten Fällen nicht möglich ist (dies betrifft insbesondere die verschiedenen in den Tabellen dargestellten Stoffkonzentrationen). Die Recherchen haben verdeutlicht, dass durch die Vielzahl von Faktoren, die die Toxizität eines Schwermetalls beeinflussen können (siehe auch 2.3 Kurzfazit) die zumeist unter Laborbedingungen ermittelten Werte auch in diesem Kontext zu interpretieren sind.

## **2.3 Kurzfazit der Literaturrecherche**

Die detaillierten Ergebnisse der Literaturrecherche können den Metall-spezifischen Steckbriefen im Anhang des vorliegenden Berichtes entnommen werden. Im Folgenden soll lediglich eine Kurzzusammenfassung der grundlegenden Rechercheergebnisse, sowie eine Einschätzung zum aktuellen Wissenstand, gegeben werden.

Die sechs im vorliegenden Bericht betrachteten Metalle umfassen die essenziellen Spurenelemente Kupfer, Nickel und Zink, sowie die potenziell bzw. nicht essenziellen Elemente Arsen (potenziell essenziell), Blei und Cadmium. Für Kupfer, Nickel, Zink und ggf. auch Arsen gibt es folglich für jeden aquatischen Organismus eine artspezifische „Konzentrationsspannbreite“, in der die Metallkonzentration zuträglich ist bzw. vom jeweiligen Organismus ohne Mangelerscheinungen oder Schädigungen toleriert wird, wobei sowohl eine zu hohe als auch eine zu niedrige Kupfer-, Nickel- oder Zinkkonzentration negative Auswirkungen haben kann. Für die nicht essenziellen Elemente gilt, dass geringe Stoffkonzentrationen ohne negative Folgen für aquatische Organismen bleiben. Sind die Konzentrationen jedoch „zu hoch“, so haben sowohl die essenziellen als auch die nicht essenziellen Schwermetalle negative Auswirkungen auf die Organismen.

Für Fische/Rundmäuler gibt es zwei grundlegende Wege, über die die Metalle aufgenommen werden können. Die Aufnahme kann entweder über die Kiemen oder die Haut (perkutan) oder den Darm (enteral) erfolgen. Ein wesentlicher Grund für die Toxizität der Metalle besteht darin, dass die Kationen der Metalle an verschiedenen Stellen in Konkurrenz zu den essenziellen Kationen Natrium (Na<sup>+</sup>), Calcium (Ca<sup>2+</sup>), und Magnesium (Mg<sup>2+</sup>) treten. Schädigungen des Ionenhaushaltes und der Osmoregulation, sowie Störungen des Energiestoffwechsels sind die Folge. Bedingungen, die begünstigen, dass die Metalle in Form von Kationen vorliegen, fördern folglich die Toxizität der Metalle. Vordergründig sind dies die Faktoren Wasserhärte und der pH-Wert. Die höchste Toxizität haben die Schwermetalle folglich bei einer geringen Wasserhärte und niedrigen pH-Werten.

Als Folge der genannten Schädigungen des Ionenhaushaltes, der Osmoregulation und des Energiestoffwechsels sind sowohl körperliche Beeinträchtigungen (bis hin zum Tod) als auch Verhaltensänderungen dokumentiert. Die Schädigungen betreffen zudem meist die an der Aufnahme beteiligten Organe (Kiemen, Leber, Niere) und außerdem sämtliche Entwicklungsstadien der Fische, wobei juvenile Stadien und Eier meist die größte Sensitivität aufweisen.

**Tabelle 2: Tabellarische Übersicht über Faktoren die nachweislich und in bedeutendem Maße die Toxizität des jeweiligen Metalls für Fische/Rundmäuler beeinflussen.**

Metall	Arsen	Blei	Cadmium	Kupfer	Nickel	Zink
Essenziell / nicht essenziell	Potenziell	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja
pH-Wert & Redoxpotential	X	X	X	X	X	X*
Wasserhärte	X	X	X	X	X	X
Temperatur	X		X	X		X
Konzentration suspendierter Feststoffe		X		X		X
Konzentration anderer Salze		X			X	X
O <sub>2</sub> -Konzentration	X					X
Toxische Metaboliten	X					

\* in Abhängigkeit von der vorliegenden Zinkverbindung

Die direkte Anwendung der im Zuge der Literaturrecherche zusammengetragenen Konzentrationen auf Fischpopulationen in sächsischen Fließgewässern ist kaum möglich. Eine direkte Übertragung der zumeist im Labor ermittelten Stoffkonzentrationen auf Fischpopulationen im Freiland scheint aufgrund der Komplexität der chemischen und gewässermorphologischen Randbedingungen nicht zielführend zu sein. Die Literaturwerte können dennoch eine Vorstellung darüber vermitteln, ob sich die Konzentrationen eines betrachteten Metalls in Bereichen bewegen in denen unter bestimmten Bedingungen negative Folgen für Fische/Rundmäuler zu erwarten wären.

Die überwiegende Anzahl der in sächsischen OWK im Zeitraum zwischen 2015 und 2019 gemessenen Metallkonzentrationen liegt unterhalb des Wertebereichs für den in verschiedenen wissenschaftlichen Untersuchungen (zumeist physiologische) Effekte auf bestimmte Lebensstadien einzelner Fisch-/Rundmaularten nachgewiesen wurden (siehe Tabelle 3). Nur in Einzelfällen wurden Konzentrationen erreicht, die eine direkte physiologische Schädigung der Fische/Rundmäuler und ihrer Larven in den betroffenen OWK vermuten lassen. Ob solche Schädigungen in den Gewässern tatsächlich vorkamen, könnte jedoch nur in einer detaillierten Einzelfallbetrachtung und unter Berücksichtigung weiterer Begleitparameter (mindestens Wasserhärte und pH) abschließend bewertet werden und übersteigt daher den Rahmen dieses Projekts.

Für die Metalle Blei, Cadmium, Kupfer, Nickel und Zink wurden in Einzelmessungen Werte erreicht, die toxische Wirkungen auf bestimmte Fisch-/Rundmaularten und Lebensstadien zum Zeitpunkt der Messung wahrscheinlich erscheinen lassen. Da auch Arsen an manchen Messstellen die recherchierten Grenzwerte deutlich übersteigt, lassen sich auch hier nachteilige Effekte für die dortige Fischzönose vermuten. Für Cadmium und Zink erreichen Einzelmessungen eine Größenordnung einzelner  $LC_{50}$ -Werte. Erhöhte Mortalitäten (zumindest bei Larven und Brütlingen) erscheinen in diesen Fällen daher denkbar. Jedoch können die unter Laborbedingungen und oftmals unter Verwendung von weichem und saurem Wasser ermittelten Werte (bspw. Sayer et al. 1989) nicht direkt auf die Gewässer Sachsens übertragen werden. Es ist zudem davon auszugehen, dass einzelne hohe Belastungen (sofern sie nicht genau im Reproduktionszeitraum der Fische/Rundmäuler auftreten) ggf. sogar folgenfrei bleiben könnten, wohingegen in Gewässern bzw. Gewässerabschnitten mit dauerhaft hohen Belastungen die Reproduktion sensibler Fisch-/Rundmaularten wahrscheinlich in stärkerem Maße negativ beeinflusst wird.

Des Weiteren gilt es zu bedenken, dass auch negative Einflüsse erhöhter Metallkonzentrationen auf andere aquatische Organismen Auswirkungen auf die Fischzönose eines Gewässers haben könnten. So wäre es denkbar, dass Verschiebungen des Artenspektrums oder sogar das Fehlen von bestimmten Fisch-/Rundmaularten auf geringe Dichten oder ein gänzlich Fehlen der jeweiligen bevorzugten Nahrung zurückzuführen sind. Verschiedene für Gewässer festgelegte Grenzwerte nehmen auf diesen Umstand Rücksicht indem um ein Vielfaches niedrigere Grenzwerte festgesetzt werden, um Schädigungen aquatischer Organismen im Allgemeinen zu vermeiden. So wurde bspw. in Australien und Neuseeland für verschiedene Metalle ein Grenzwert zum Schutz von 99 % der Arten im Süßwasser festgelegt (Australian and New Zealand Environment and Conservation Council 2020).

**Tabelle 3: Tabellarische Gegenüberstellung der Wertespanspannen der Literaturrecherche mit den Belastungsspektren in sächsischen OWK (Gesamt-Konzentrationen im Betrachtungszeitraum 2015-2019)**

<b>Metall</b>	<b>Spannbreite toxischer Wirkungen in speziellen Untersuchungen (Angaben zu Extremwerten der Spannbreite)*</b>	<b>Spannbreiten bei standardisierten Untersuchungen zu letalen Effekten bei adulten Individuen (LC<sub>50</sub>-Werte)*</b>	<b>Spannbreite recherchierter Grenzwerte** (Herkunft des Grenzwertes)</b>	<b>Mittleres Jahresmittel (Median) über den Betrachtungszeitraum</b>	<b>Spannbreite der Einzelmessungen (min. – max.)</b>
Arsen	<i>keine geeigneten Quellen für die Angabe einer Spannbreite vorhanden</i>	14.100 µg/l – 200.000 µg/l	1 µg/l (Australien & Neuseeland) – 50 µg/l (JD   Großbritannien)	3,434 µg/l (1,55 µg/l)	0,15 µg/l – 240 µg/l
Blei	4,1 µg/l (NOEC bei Regenbogenforellen-Larven) – 10,4 µg/l (100% Bachforellen-Larven-Mortalität nach 20 Tagen)	1.100 µg/l – 542.000 µg/l	1 µg/l (Australien & Neuseeland) – 14 µg/l (ZHK-UQN   Deutschland & EU)	1,395 µg/l (0,783 µg/l)	0,1 µg/l – 270 µg/l
Cadmium	0,14 µg/l (NOEC bei Bachforellen-Brütlingen) – 4.400 µg/l (Gewebeschäden bei Bachforellen in Niere und Kiemenepithel)	1,23 µg/l – 4.500 µg/l	0,06 µg/l (Australien & Neuseeland) – 1,5 µg/l (ZHK-UQN   Deutschland & EU)	0,212 µg/l (0,062 µg/l)	0,015 µg/l – 22 µg/l
Kupfer	5,1 µg/l (Kritische Schwimgeschwindigkeit bei Bachforellen reduziert) – 300 µg/l (94,6 % Bachforellen-Larven-Mortalität nach 40 Tagen)	2,65 µg/l – 760 µg/l	1 µg/l (Australien & Neuseeland) - 160 mg/kg <sup>3</sup> (JD-UQN   Deutschland & EU)	3,839 µg/l (3,3 µg/l)	1 µg/l – 110 µg/l
Nickel	35 µg/l (NOEC bei Eiern der Regenbogenforelle) – <i>keine geeigneten Quellen für Obergrenze der Spannbreite vorhanden</i>	830 µg/l – 95.000 µg/l	4 µg/l (JD-UQN   Deutschland & EU) - 34 µg/l (ZHK-UQN   Deutschland & EU)	5,217 µg/l (3,7 µg/l)	0,25 µg/l – 220 µg/l

<b>Metall</b>	<b>Spannbreite toxischer Wirkungen in speziellen Untersuchungen (Angaben zu Extremwerten der Spannbreite)*</b>	<b>Spannbreiten bei standardisierten Untersuchungen zu letalen Effekten bei adulten Individuen (LC<sub>50</sub>-Werte)*</b>	<b>Spannbreite recherchierter Grenzwerte** (Herkunft des Grenzwertes)</b>	<b>Mittleres Jahresmittel (Median) über den Betrachtungszeitraum</b>	<b>Spannbreite der Einzelmessungen (min. – max.)</b>
Zink	20 µg/l (12 % Mortalität bei Eiern der Elritze) – 260 µg/l (100 % Mortalität bei Dottersacklarven der Elritze nach 40 Tagen)	112 µg/l – 3.200 µg/l	2,4 µg/l (Australien & Neuseeland) – 33 µg/l (ZHK   Großbritannien)	32,374 µg/l (13,467µg/l)	1,5 µg/l – 3000 µg/l

- \* die dargestellten Spannbreiten umfassen Studien mit verschiedenen Expositionszeiten, Wasserhärten, pH-Werten und Fisch-/Rundmaularten. Genauere Informationen zu den einzelnen Werten sind den Steckbriefen zu entnehmen.
- \*\* die dargestellten Spannbreiten umfassen Grenzwerte deren Gültigkeit an weitere wasserchemische Parameter gekoppelt ist bzw. sich teilweise nur auf bioverfügbare Teilfraktionen bezieht.

### 3 Ausgewertete Datengrundlagen

#### 3.1 Eingangsdaten für die statistischen Auswertungen (Chemie)

Grundlage der statistischen Auswertungen bildeten Befischungsdaten und physiko-chemische Messdaten aus dem sächsischen Fließgewässermonitoring.

Die Daten wurden durch das LfULG in Form von Excel-Dateien bereitgestellt und in eine Projektdatenbank (PostgreSQL 9.6 mit Erweiterung PostGIS 2.3) übernommen.

Als weitere Informationen wurden Gewässerstrukturdaten und der daraus abgeleitete Habitatindex, Bauwerksdaten sowie Daten zu kommunalen Kläranlagen übernommen.

Die bereitgestellten physiko-chemischen Daten umfassten die folgenden Parameter (Tabelle 4).

**Tabelle 4: Parameter der bereitgestellten physiko-chemischen Daten**

Parameter	Parameter	Parameter
Abfiltrierbare Stoffe gesamt [mg/l]	Coffein gesamt [ng/l]	Nickel Fr_<0,02mm [mg/kg]
Acesulfam gesamt [ng/l]	Diclofenac gesamt [ng/l]	Nickel Fr_<0,063mm [mg/kg]
Acetochlorsulfonsäure gesamt [ng/l]	Eisen 2+ gelöst [mg/l]	Nickel gelöst [µg/l]
Acetochlorsäure gesamt [ng/l]	Eisen Fr_<0,02mm [mg/kg]	Nickel gesamt [µg/l]
Alachlorsulfonsäure gesamt [ng/l]	Eisen Fr_<0,063mm [mg/kg]	Nickel säurelöslich [µg/l]
Ammonium gelöst [mg/l]	Eisen gelöst [mg/l]	Nitrat gelöst [mg/l]
Ammonium-Stickstoff gelöst [mg/l]	Eisen gesamt [mg/l]	Nitrat-Stickstoff gelöst [mg/l]
Arsen Fr_<0,02mm [mg/kg]	Eisen säurelöslich [mg/l]	Nitrit gelöst [mg/l]
Arsen Fr_<0,063mm [mg/kg]	Elektrische Leitfähigkeit (25°C) [µS/cm]	Nitrit-Stickstoff gelöst [mg/l]
Arsen gelöst [µg/l]	Flufenacet ESA gesamt [ng/l]	Quecksilber FISCHF [µg/kg]
Arsen gesamt [µg/l]	Fluoranthen Feinb_<2mm [µg/kg]	Quecksilber Fr_<0,02mm [mg/kg]
Arsen säurelöslich [µg/l]	Fluoranthen Fr_<0,063mm [µg/kg]	Quecksilber Fr_<0,063mm [mg/kg]
Benzo(a)pyren Feinb_<2mm [µg/kg]	Fluoranthen gesamt [ng/l]	Quecksilber gelöst [µg/l]
Benzo(a)pyren Fr_<0,063mm [µg/kg]	Gesamt-Phosphor gesamt [mg/l]	Quecksilber gesamt [µg/l]
Benzo(a)pyren gesamt [ng/l]	Gesamthärte gel_ mmol/l	Sauerstoffgehalt gesamt [mg/l]
Bis(1,3-dichlor-2-propyl)ether gesamt [µg/l]	HCH, gamma (Lindan) FISCHF [µg/kg]	Sauerstoffsättigung gesamt [%]
Bis(2,3-dichlor-1-propyl)ether gesamt [µg/l]	HCH, gamma (Lindan) Feinb_<2mm [µg/kg]	BSB <sub>5</sub> ohne Hemmer gesamt [mg/l]

Parameter	Parameter	Parameter
Blei FISCHF [µg/kg]	HCH, gamma (Lindan) Fr_<0,063mm [µg/kg]	Sulfat gelöst [mg/l]
Blei Fr_<0,02mm [mg/kg]	HCH, gamma (Lindan) gesamt [ng/l]	Trübung (physiko-chem_ Messung)
Blei Fr_<0,063mm [mg/kg]	Hexachlorbenzen FISCHF [µg/kg]	Uran Fr_<0,02mm [mg/kg]
Blei gelöst [µg/l]	Hexachlorbenzen Feinb_<2mm [µg/kg]	Uran Fr_<0,063mm [mg/kg]
Blei gesamt [µg/l]	Hexachlorbenzen Fr_<0,063mm [µg/kg]	Uran gelöst [µg/l]
Blei säurelöslich [µg/l]	Hexachlorbenzen gesamt [ng/l]	Uran gesamt [µg/l]
Bor Fr_<0,02mm [mg/kg]	Hexachlorbutadien FISCHF [µg/kg]	Uran säurelöslich [µg/l]
Bor Fr_<0,063mm [mg/kg]	Hexachlorbutadien Feinb_<2mm [µg/kg]	Wassertemperatur [°C]
Bor gelöst [µg/l]	Hexachlorbutadien Fr_<0,063mm [µg/kg]	Zink Fr_<0,02mm [mg/kg]
Bor gesamt [µg/l]	Hexachlorbutadien gesamt [ng/l]	Zink Fr_<0,063mm [mg/kg]
Bor säurelöslich [µg/l]	Kalium gelöst [mg/l]	Zink gelöst [µg/l]
Cadmium FISCHF [µg/kg]	Kalium gesamt [mg/l]	Zink gesamt [µg/l]
Cadmium Fr_<0,02mm [mg/kg]	Kalium säurelöslich [mg/l]	Zink säurelöslich [µg/l]
Cadmium Fr_<0,063mm [mg/kg]	Kupfer Fr_<0,02mm [mg/kg]	anorganisch gebundener Stickstoff ge- löst [mg/l]
Cadmium gelöst [µg/l]	Kupfer Fr_<0,063mm [mg/kg]	gelöster organisch gebundener Kohlen- stoff gelöst [mg/l]
Cadmium gesamt [µg/l]	Kupfer gelöst [µg/l]	gesamter organisch gebundener Koh- lenstoff Feinb_<2mm %
Cadmium säurelöslich [µg/l]	Kupfer gesamt [µg/l]	gesamter organisch gebundener Koh- lenstoff Fr_<0,02mm %
Calcium Fr_<0,02mm [mg/kg]	Kupfer säurelöslich [µg/l]	gesamter organisch gebundener Koh- lenstoff Fr_<0,063mm %
Calcium Fr_<0,063mm [mg/kg]	Magnesium gelöst [mg/l]	gesamter organisch gebundener Koh- lenstoff gesamt [mg/l]
Calcium gelöst [mg/l]	Magnesium gesamt [mg/l]	gesamter organisch gebundener Stick- stoff gesamt [mg/l]
Calcium gesamt [mg/l]	Magnesium säurelöslich [mg/l]	Ammoniak-Stickstoff gelöst [mg/l]
Calcium säurelöslich [mg/l]	Natrium gelöst [mg/l]	o-Phosphat-P gelöst [mg/l]
Carbamazepin gesamt [ng/l]	Natrium gesamt [mg/l]	ortho-Phosphat gelöst [mg/l]
Carbofuran gesamt [ng/l]	Natrium säurelöslich [mg/l]	pH-Wert (Labor) [-]
Chlorid gelöst [mg/l]		

## 3.2 Eingangsdaten für die statistischen Auswertungen (Fische/Rundmäuler)

Ein großer Teil der sächsischen Fließgewässer erreicht aktuell im Betrachtungszeitraum 2015 – 2019 in der ökologischen Qualitätskomponente Fische nicht den guten ökologischen Zustand. Es wird vermutet, dass die Defizite in der Fischzönose in Teilen auf die hohen Halb- und Schwermetallbelastungen der Gewässer in der Region des Erzgebirges zurückzuführen sind. Ein wichtiges Ziel dieser Studie war es daher eventuelle Zusammenhänge zwischen dem Zustand der Fischzönose und ausgewählten Halb- und Schwermetallbelastungen anhand statistischer Untersuchungen zu prüfen.

Die fischseitige Datengrundlage für die statistischen Auswertungen bilden die durch den Auftraggeber zur Verfügung gestellten langjährigen Befischungsdaten. Die Daten umfassen Ergebnisse aus Fischbestandsaufnahmen (vorwiegend Elektrobefischungen) die in den Jahren 2003 bis 2020 durchgeführt wurden. Insgesamt umfasst der Datensatz 5.791 Einzelbefischungen, während derer insgesamt 65 verschiedene Fisch-/Rundmaularten und 524.497 Individuen nachgewiesen wurden. Im Projekt ist eine eingehendere Betrachtung der Arten Bachforelle, Groppe, Schmerle, Elritze, Äsche und Bachneunauge im Hinblick auf eventuelle Auswirkungen der Metalle auf die jeweiligen Populationen vorgesehen. Aufgrund der „Fokussierung“ auf diese Arten wird im Folgenden der Begriff „Fokusarten“ verwendet, wenn auf die Gesamtheit der sechs Arten Bezug genommen wird.

Betrachtet man allein die ausgewählten Fokusarten, so umfassen die Daten insgesamt 296.568 Individuen. Die häufigste Art im Datensatz ist die Bachforelle, gefolgt von den Arten Schmerle, Elritze, Groppe, Bachneunauge und Äsche (siehe Tabelle 5).

Für weiterführende Informationen und für Einzelbeschreibungen der sechs Fokusarten, sowie weiteren in Sachsen vorkommenden Fisch-/Rundmaularten, sei auf den „Atlas der Fische Sachsens“ (<https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/13442/lesen>) und die unter [https://www.landwirtschaft.sachsen.de/download/Vollbild\\_Verbreitungskarten\\_Sachsens\\_geschuetzt.pdf](https://www.landwirtschaft.sachsen.de/download/Vollbild_Verbreitungskarten_Sachsens_geschuetzt.pdf) einzusehenden Verbreitungskarten verwiesen.

**Tabelle 5: Tabellarische Übersicht über die Individuenzahlen und die Anzahlen der Befischungen mit Artnachweisen für die sechs stellvertretend betrachteten Fokusarten.**

Fokusart	Gesamtanzahl Individuen im Datensatz	Anzahl Befischungen mit Artnachweis
Groppe	16840	823
Bachforelle	131209	2733
Schmerle	78105	2261
Äsche	1024	151
Elritze	57700	978
Bachneunauge	11690	636

## 3.3 Validierung und Aufbereitung der Eingangsdaten

### 3.3.1 Aufbereitung und Validierung der physiko-chemischen Daten

Die bereitgestellten Daten umfassten Messwerte von wasser-, feststoff- und biotabezogenen Proben. Da die statistischen Analysen zunächst anhand von Messdaten der Wasserphase durchgeführt werden sollten, wurden Messdaten zu Sediment und Biota aus der auszuwertenden Datenmenge entfernt. Daten zur Schwebstofffraktion wurden beibehalten, um damit ggf. Validierungen durchführen zu können.

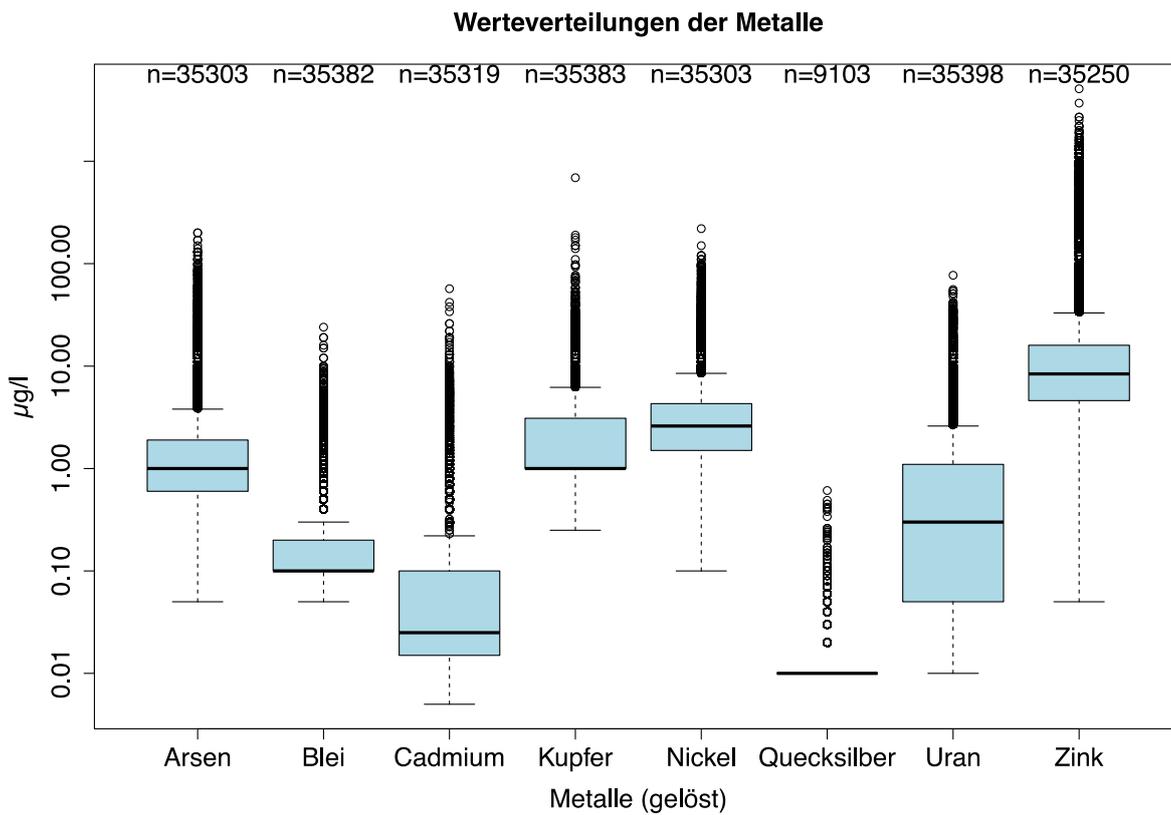
Die verbliebenen Daten wurden mittels SQL-Abfragen hinsichtlich ihrer Wertebereiche geprüft. Die in den Analysen verwendeten physiko-chemischen Parameter sind in Tabelle 6 dargestellt.

**Tabelle 6: In den Analysen verwendete physiko-chemische Parameter**

Parameter	Parameter	Parameter
Abfiltrierbare Stoffe gesamt [mg/l]	Eisen gesamt [mg/l]	Nitrit-Stickstoff gelöst [mg/l]
Acesulfam gesamt [ng/l]	Elektrische Leitfähigkeit (25°C) [µS/cm]	pH-Wert (Labor) [-]
Ammoniak-Stickstoff gelöst [mg/l]	Fluoranthen gesamt [ng/l]	Quecksilber gelöst [µg/l]
Ammonium-Stickstoff gelöst [mg/l]	Gesamt-Phosphor gesamt [mg/l]	Quecksilber gesamt [µg/l]
Arsen gelöst [µg/l]	Gesamthärte [mmol/l]	Quecksilber Schwebstoff < 0,063 mm [mg/kg]
Arsen gesamt [µg/l]	HCH, gamma (Lindan) gesamt [ng/l]	Sauerstoffgehalt gesamt [mg/l]
Arsen Schwebstoff < 0,063 mm [mg/kg]	Hexachlorbenzen gesamt [ng/l]	Sauerstoffsättigung gesamt [%]
Benzo(a)pyren gesamt [ng/l]	Hexachlorbutadien gesamt [ng/l]	BSB <sub>5</sub> ohne Hemmer [mg/l]
Blei gelöst [µg/l]	Kalium gelöst [mg/l]	Sulfat gelöst [mg/l]
Blei gesamt [µg/l]	Kalium gesamt [mg/l]	Trübung (physiko-chem- Messung)
Blei Schwebstoff < 0,063 mm [mg/kg]	Kupfer gelöst [µg/l]	Uran gelöst [µg/l]
Cadmium gelöst [µg/l]	Kupfer gesamt [µg/l]	Uran gesamt [µg/l]
Cadmium gesamt [µg/l]	Kupfer Schwebstoff < 0,063 mm [mg/kg]	Wassertemperatur [°C]
Cadmium Schwebstoff < 0,063 mm [mg/kg]	Magnesium gelöst [mg/l]	Zink gelöst [µg/l]
Calcium gelöst [mg/l]	Magnesium gesamt [mg/l]	Zink gesamt [µg/l],
Calcium gesamt [mg/l]	Natrium gelöst [mg/l]	Zink Schwebstoff < 0,063 mm [mg/kg]
Carbamazepin gesamt [ng/l]	Natrium gesamt [mg/l]	Stickstoff-Gesamt gelöst [mg/l]
Chlorid gelöst [mg/l]	Nickel gelöst [µg/l]	DOC [mg/l]
Coffein gesamt [ng/l]	Nickel gesamt [µg/l]	TOC [mg/l]
Diclofenac gesamt [ng/l]	Nickel Schwebstoff < 0,063 mm [mg/kg]	
Eisen gelöst [mg/l]	Nitrat-Stickstoff gelöst [mg/l]	

Die Wertebereiche der relevanten Metalle Arsen, Blei, Cadmium, Kupfer, Nickel, Quecksilber, Uran und Zink sind in den folgenden Abbildungen als Box-Whisker-Plots dargestellt. Dabei zeigt Abbildung 1 die Verteilungen der Gelöst-Fractionen, während Abbildung 2 die Verteilungen der Gesamtgehalte darstellt. Da sich die Wertebereiche der verschiedenen Metalle sehr stark unterscheiden, wurde eine logarithmierte Darstellung (y-Achse) gewählt.

Die Kenngrößen der Boxplots – Unterer Whisker, 25-Perzentil, Median, 75-Perzentil und Oberer Whisker – sind in Tabelle 7 und Tabelle 8 dargestellt.



**Abbildung 1: Werteverteilungen der relevanten Metall-Gelöst-Fractionen (y-Achse logarithmiert)**

### Werteverteilungen der Metalle

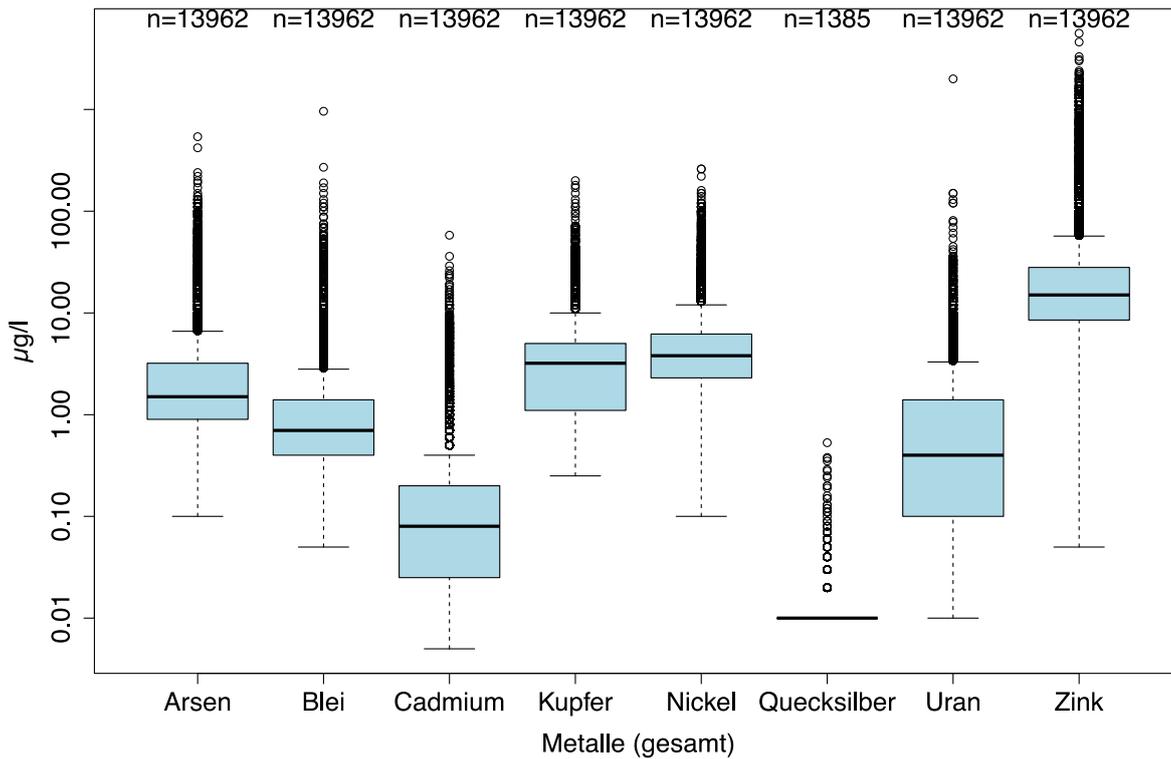


Abbildung 2: Werteverteilungen der relevanten Metall - Gesamt-Fractionen (y-Achse logarithmiert)

Tabelle 7: Werteverteilungen der relevanten Metalle – Gelöst-Fractionen (µg/l)

Werttyp	Arsen	Blei	Cad-mium	Kupfer	Nickel	Queck-silber	Uran	Zink
Unterer Whisker	0,05	0,05	0,005	0,25	0,1	0,01	0,01	0,05
25-Perzentil	0,60	0,10	0,015	1,00	1,5	0,01	0,05	4,60
Median	1,00	0,10	0,025	1,00	2,6	0,01	0,30	8,40
75-Perzentil	1,90	0,20	0,100	3,10	4,3	0,01	1,10	16,00
Oberer Whisker	3,80	0,30	0,220	6,20	8,5	0,01	2,60	33,00

Tabelle 8: Werteverteilungen der relevanten Metalle – Gesamt-Fractionen (µg/l)

Werttyp	Arsen	Blei	Cad-mium	Kupfer	Nickel	Queck-silber	Uran	Zink
Unterer Whisker	0,1	0,05	0,005	0,25	0,1	0,01	0,01	0,05
25-Perzentil	0,9	0,40	0,025	1,10	2,3	0,01	0,10	8,50
Median	1,5	0,70	0,080	3,20	3,8	0,01	0,40	15,00
75-Perzentil	3,2	1,40	0,200	5,00	6,2	0,01	1,40	28,00
Oberer Whisker	6,6	2,80	0,400	10,00	12,0	0,01	3,30	57,00

### 3.3.2 Datenaufbereitung und -validierung (Fische/Rundmäuler)

Um den Zustand der Fischzönose in einem Gewässerabschnitt auf Basis von Befischungsdaten zu bewerten, stehen verschiedene Parameter zur Verfügung. Einen grundlegenden und gängigen Ansatz für eine solche Bewertung liefert das fischbasierte Bewertungssystem für Fließgewässer (fiBS). Viele der in fiBS verwendeten Parameter sind jedoch ungeeignet, um Aussagen über den Zustand einer einzelnen Art in einem Gewässerabschnitt treffen zu können bzw. eignen sich, da das System speziell für die Betrachtung einzelner vordefinierter Flussabschnitte mit individuellen Referenz-Fischzönosen konzipiert wurde, nicht für die großräumige Betrachtung auf Ebene eines Bundeslandes mit zahlreichen verschiedenen Oberflächenwasserkörpern, wie sie in diesem Projekt benötigt wird. Um dennoch eine Datengrundlage für die statistischen Auswertungen zu erhalten, wurden daher einzelne Teilaspekte, denen auch eine entscheidende Rolle in der fiBS-Bewertung zukommt, genauer beleuchtet und die Daten wurden in einer Form aufbereitet, die die bestmögliche Basis für die statistischen Betrachtungen bietet.

Bei der Auswahl geeigneter Parameter bestehen mehrere grundlegende Problematiken:

1. Die Befischungsdaten wurden nicht mit dem Ziel einer Gegenüberstellung mit chemischen Parametern erhoben. Sowohl zeitlich als auch räumlich sind die Probestellen daher nicht in idealer Weise verortet.
2. Es kann davon ausgegangen werden, dass sämtliche Kenngrößen die für eine statistische Gegenüberstellung mit den Metallen in Frage kämen durch eine Vielzahl an verschiedenen Faktoren beeinflusst werden. Neben den chemischen Parametern sind hier vor allem die Gewässermorphologie (Habitatqualität, Habitatgröße, Habitatverfügbarkeit) und die Durchgängigkeit (Habitaterreichbarkeit, Lebensraumvernetzung) zu nennen.
3. Die Daten können in Teilen durch Fischbesatzmaßnahmen verfälscht sein, oder durch methodisch bedingte Einschränkungen gewisse Ungenauigkeiten enthalten. So kann bspw. die Lage einer Probestrecke den Fang bestimmter Arten begünstigen und die Nachweiswahrscheinlichkeit für andere Arten verringern. Selbiges gilt für die von verschiedenen Arten in unterschiedlichen Mengen besiedelten Habitate innerhalb einer Probestrecke, die für den Bearbeiter ggf. nicht in gleichem Maße gut zu befischen sind (z. B. tiefe Kolke und flache Riffle).

Auf Basis dieser Überlegungen wurde die Notwendigkeit möglichst grundlegende Parameter auszuwählen, sowie die Notwendigkeit einer Datenaufbereitung im Vorfeld der statistischen Auswertungen offensichtlich. Die Entscheidung fiel auf die Parameter „Artnachweis“, „Abundanz“ und „Reproduktion“. Der Parameter „Reproduktion“ wurde nach Sichtung der Analyseergebnisse jedoch verworfen und es wurde auf eine Darstellung der Ergebnisse im vorliegenden Bericht verzichtet, da keine nennenswerten Erkenntnisse gewonnen werden konnten, die über die Erkenntnisse der Artnachweis-Auswertungen hinausgingen. Es ist möglich, dass die Zuweisung der Altersklasse 0+ über den Zeitpunkt der Befischung und die Längensklasse der Fische/Rundmäuler nicht die nötige Genauigkeit für eine solche Analyse bietet. Wahrscheinlicher ist aber, dass, insbesondere für die Fokusarten Groppe, Schmerle und Elritze, die Probestellen mit Artnachweis in den meisten Fällen gleichzeitig Probestellen mit Reproduktionsnachweis darstellen und somit in den statistischen Auswertungen kaum ein Unterschied zu der Betrachtung der Artnachweise besteht. Das genaue Vorgehen während der Aufbereitung der Eingangsdaten für die statistischen Analysen der Parameter „Artnachweis“ und „Abundanz“ wird im Folgenden erläutert.

Im Gegensatz zu Laborversuchen, ist es bei Untersuchungen im Freiland nur schwer möglich die verschiedenen Einflussfaktoren, die neben dem eigentlich im Fokus stehenden Parameter auf die zu untersuchende Kenngröße wirken, zu reduzieren. Hierbei kann eine begleitende Datenaufnahme von Einflussfaktoren, denen im Vorfeld eine hohe Bedeutung beigemessen wurde, hilfreich sein, um in einer späteren Auswertung zusätzliche Möglichkeiten in der Aufbereitung und Interpretation der Daten zu haben. Da jedoch in diesem Projekt weder die chemischen noch die biologischen Parameter mit dem Ziel einer späteren gemeinsamen und in Bezug setzenden statistischen Auswertung aufgenommen wurden, sind die Möglichkeiten in der Aufbereitung der Daten begrenzt.

Um dennoch eine möglichst gute Datenbasis für die statistischen Auswertungen zu schaffen und um das Risiko einer Ergebnisverfälschung durch methodische Ungenauigkeiten zu minimieren, wurde der Datensatz auf Basis der fischzönotischen Grundausrprägungen (gemäß Dußling 2009) für jede der Fokusarten so zugeschnitten, dass für jede Art ausschließlich die Cluster in die Auswertungen eingeflossen sind in denen die betrachtete Fokusart mindestens den Status einer Leitart (Bachforelle, Groppe, Schmerle, Elritze) oder typspezifischen Art (Äsche, Bachneunaugen) hat. Durch diesen Schritt soll die Gefahr minimiert werden, dass methodische Defizite (bspw. der Nicht-Nachweis einer Art während einer Befischung obwohl die Art in Wahrheit in geringen Bestandsdichten im Gewässer vorkommt) die Auswertungen verzerren. Zudem bietet die Beschränkung der Analysen auf Gewässerabschnitte, in denen die jeweilige Fokusart eine bestimmte Mindesthäufigkeit aufweisen sollte, den Vorteil, dass bei der Betrachtung der Abundanzen (in Individuen pro Hektar) nicht einzelne gefangene Individuen für artifizielle Unterschiede sorgen wie es durch die Hochrechnungen sehr geringer Fangzahlen oft der Fall ist.

Die nachfolgende Tabelle 9 bietet eine Übersicht über die für die Analysen ausgewählten Cluster der Fischzönotischen Grundausrprägung (FZG) für jede der sechs Fokusarten.

**Tabelle 9: Übersichtstabelle mit den für die Analysen ausgewählten Clustern der Fischzönotischen Grundausrprägung (FZG) für jede der sechs Fokusarten**

<b>Fokusart</b>	<b>Cluster der Fischzönotischen Grundausrprägung (FZG)</b>	<b>Dominanz (bzw. Dominanzspannbreite) der Fokusart im Cluster</b>	<b>Filterkriterium</b>
	Mono-Bachforellen-Gewässer	100 %	
	Bachforellen-Groppen-Gewässer I	62,0 – 70,0 %	
	Bachforellen-Groppen-Gewässer II	56,0 – 61,5 %	
	Bachforellen-Groppen-Gewässer III	39,0 – 43,0 %	
	Bachforellen-Groppen-Schmerlen-Gewässer	42,0 – 47,0 %	
	Bachforellen-Schmerlen-Gewässer I	69,5 %	
Bachforelle	Bachforellen-Schmerlen-Gewässer II	38,9 – 50,0 %	Dominanz-Anteil immer > 5 % (Referenz-Niveau einer Leitart)
	Bachforellen-Schmerlen-Gewässer III	57,0 %	
	Bachforellen-Schmerlen-Gewässer IV	32,0 – 33,4 %	
	Äschen-Bachforellen-Gewässer	21,7 – 22,2 %	
	Elritzen-Schmerlen-Gewässer I	24,0 – 28,7	
	Elritzen-Schmerlen-Gewässer II	18,0 – 20 %	
	Gründling-Schmerlen-Gewässer I	10,0 – 14,5 %	

<b>Fokusart</b>	<b>Cluster der Fischzönotischen Grundausprägung (FZG)</b>	<b>Dominanz (bzw. Dominanzspannbreite) der Fokusart im Cluster</b>	<b>Filterkriterium</b>
Groppe	Bachforellen-Groppen-Gewässer I	62,0 – 30,0 %	Dominanz-Anteil immer > 5 % (Referenz-Niveau einer Leitart)
	Bachforellen-Groppen-Gewässer II	23,0 – 24,4 %	
	Bachforellen-Groppen-Gewässer III	18,0 – 23,0 %	
	Bachforellen-Groppen-Schmerlen-Gewässer	16,0 – 23,6 %	
	Bachforellen-Schmerlen-Gewässer III	6,0 – 12,0 %	
	Bachforellen-Schmerlen-Gewässer IV	13,0 – 15,0 %	
	Äschen-Bachforellen-Gewässer	6,0 – 14,2 %	
Elritzen-Schmerlen-Gewässer I	6,0 – 12,0 %		
Elritze	Bachforellen-Schmerlen-Gewässer III	6,0 %	Dominanz-Anteil immer > 5 % (Referenz-Niveau einer Leitart)
	Bachforellen-Schmerlen-Gewässer IV	7,0 %	
	Elritzen-Schmerlen-Gewässer I	24,0 – 28,7 %	
	Elritzen-Schmerlen-Gewässer II	33,3 – 40,0 %	
	Elritzen-Schmerlen-Gewässer III	36,0 %	
	Gründling-Schmerlen-Gewässer I	17,5 – 21,0 %	
	Gründling-Schmerlen-Gewässer II	8,0 – 12,4 %	
Gräben	7,5 %		
Schmerle	Bachforellen-Groppen-Gewässer III	6,0 – 12,0 %	Dominanz-Anteil immer > 5 % (Referenz-Niveau einer Leitart)
	Bachforellen-Groppen-Schmerlen-Gewässer	16,0 – 23,6 %	
	Bachforellen-Schmerlen-Gewässer I	24,5 %	
	Bachforellen-Schmerlen-Gewässer II	37,5 – 40,0 %	
	Bachforellen-Schmerlen-Gewässer III	23,0 – 27,0 %	
	Bachforellen-Schmerlen-Gewässer IV	32,0 – 33,4 %	
	Äschen-Bachforellen-Gewässer	6,0 – 10,0 %	
	Elritzen-Schmerlen-Gewässer I	24,0 – 28,7 %	
	Elritzen-Schmerlen-Gewässer II	33,3 – 40,0 %	
	Elritzen-Schmerlen-Gewässer III	36,0 %	
	Gründling-Schmerlen-Gewässer I	17,5 – 21,0 %	
	Gründling-Schmerlen-Gewässer II	14,3 – 20,5 %	
	Gräben	22,5 %	
Barsch-Rotaugen-Gewässer	6,0 %		
Äsche	Bachforellen-Groppen-Gewässer II	2,0 – 4,0 %	Dominanz-Anteil immer > 1 % (Referenz-Niveau einer typspezifischen Art)
	Bachforellen-Groppen-Gewässer III	12,0 – 15,0 %	
	Bachforellen-Schmerlen-Gewässer IV	4,0 %	
	Äschen-Bachforellen-Gewässer	21,7 – 22,2 %	
	Gründling-Schmerlen-Gewässer II	4,0 – 8,2 %	
	Lausitzer Neiße	1,5 – 4,5 %	
Bachneunauge	Bachforellen-Groppen-Gewässer II	2,0 – 6,0 %	Dominanz-Anteil immer > 1 % (Referenz-Niveau einer typspezifischen Art)
	Bachforellen-Groppen-Gewässer III	2,0 – 4,0 %	
	Bachforellen-Schmerlen-Gewässer I	2,0 %	
	Bachforellen-Schmerlen-Gewässer II	2,0 %	
	Bachforellen-Schmerlen-Gewässer III	2,0 – 4,0 %	
	Bachforellen-Schmerlen-Gewässer IV	2,0 %	
	Äschen-Bachforellen-Gewässer	2,0 %	
	Elritzen-Schmerlen-Gewässer I	1,9 – 2,0 %	
	Elritzen-Schmerlen-Gewässer II	2,0 %	
Elritzen-Schmerlen-Gewässer III	2,0 %		

### 3.3.3 Datenbankaufbau für die Projektauswertungen

Die Projektdatenbank wurde in mehrere Schemata unterteilt. Das Schema „chemie“ enthält alle physikochemischen Rohdaten als Tabellen sowie Datenbanksichten (Views), mit denen die Daten für die Auswertungen aufbereitet wurden. Das Schema "fische" enthält die bereitgestellten Befischungsergebnisse sowie die Datenbanksichten (Views), mit denen die Daten für die Auswertungen aufbereitet wurden. Das Schema „basisdaten“ enthält die für die Visualisierung und etwaige raumbezogene Auswertungen benötigten Geodaten wie z.B. das Gewässernetz, die Oberflächenwasserkörper und die Messstellen. In das Schema „sonstige\_faktoren“ wurden die Gewässerstrukturdaten, Bauwerksdaten sowie Daten zu kommunalen Kläranlagen übernommen.

In dem Schema „analysen“ wurden Datenbanksichten abgelegt, auf die mit der Statistik-Software R (Version 4.2.0) zugegriffen wurde.

### 3.3.4 Anwendung der Bioligandenmodelle

Mit Hilfe des frei verfügbaren Tools Bio-Met (<https://bio-met.net/>) wurden für alle 558 sächsischen Fließgewässerkörper für die Metalle Blei, Kupfer, Nickel und Zink Bioligandenmodelle erstellt.

Dazu wurden die bereitgestellten Daten (Einzelwerte) mittels einer SQL-Abfrage in die von dem Excel-basierten Werkzeug benötigte Struktur überführt:

```
SELECT row_number() OVER () AS id, (owk_id || ' - ' || mkz AS samplename,
    pdatum AS samplingdate,
    "Kupfer gelöst" AS "Copper dissolved [µg/l]",
    "Nickel gelöst" AS "Nickel dissolved [µg/l]",
    "Zink gelöst" AS "Zinc dissolved [µg/l]",
    "Blei gelöst" AS "Lead dissolved [µg/l]",
    "pH-Wert (Labor) gel_ _-" AS "pH",
    "gelöster organisch gebundener Kohlenstoff gel_ mg/l" AS "DOC [mg/l]",
    "Calcium gel_ mg/l" AS "Calcium dissolved [mg/l]"
FROM chemie.chemie_ow_clean
WHERE "Kupfer gelöst" IS NOT NULL OR "Nickel gelöst" IS NOT NULL OR "Zink gelöst" IS NOT NULL OR
"Blei gelöst" IS NOT NULL and ("pH-Wert (Labor) gel_ _-" IS NOT NULL and "gelöster organisch ge-
bundener Kohlenstoff gel_ mg/l" IS NOT NULL and "Calcium gel_ mg/l" IS NOT NULL) ORDER BY owk_id,
mkz_, pdatum
```

Es wurden ausschließlich Datensätze exportiert, bei denen mindestens für eines der relevanten Metalle ein Messergebnis vorliegt und bei dem für alle Begleitgrößen (pH, DOC, Ca) Messwerte vorliegen.

Im Projekt wurde die gelöst-Fraktion verwendet, da dies am plausibelsten erschien.

Außerdem kann das Tool (abweichend von der Dokumentation) nicht 2.000 Datensätze, sondern nur 1988 Datensätze verarbeiten. Daher wurden die Abfrageergebnisse (34.815 Datensätze) in einem weiteren Datenbankview entsprechend für 18 Einzeldateien aufgeteilt. Tabelle 10 enthält die Zuordnung der Datenbankfelder zu den Spalten des BioMet-Tools.

**Tabelle 10: Zuordnung der Datenbankfelder zu den Spalten des BioMet-Tools**

Benötigtes Feld	Quellfeld
ID	Automatisch aus Sequenz erzeugt
Sample Name	aus Messstelle und OWK erzeugt
Sample Number	Automatisch aus Sequenz erzeugt
Date	Datum der Probenahme
Measured Copper Conc (dissolved) [ $\mu\text{g/L}$ ]	Kupfer gelöst [ $\mu\text{g/l}$ ]
Measured Nickel Conc (dissolved) [ $\mu\text{g/L}$ ]	Nickel gelöst [ $\mu\text{g/l}$ ]
Measured Zinc Conc (dissolved) [ $\mu\text{g/L}$ ]	Zink gelöst [ $\mu\text{g/l}$ ]
Measured Lead Conc (dissolved) [ $\mu\text{g/L}$ ]	Blei gelöst [ $\mu\text{g/l}$ ]
pH	pH
DOC [ $\text{mg/L}$ ]	gelöster organisch gebundener Kohlenstoff
Ca [ $\text{mg/L}$ ]	Calcium gelöst

Die Berechnungen wurden gemäß den Vorgaben des Excel-Tools durchgeführt, und die Ergebnisse wurden in die Projektdatenbank importiert. Dort wurden sie mit den Oberflächenwasserkörpergeometrien verknüpft und als Shapefile exportiert.

### 3.3.5 Berechnung von Mischungstoxizitäten

Statt nur einzelne Metalle getrennt zu betrachten, kann auch die gemeinsame Wirkung mehrerer Metalle untersucht werden. Die beiden typischen Ansätze zur Abschätzung von Mischungstoxizitäten sind z.B. bei Nys et al. (2018) dargestellt. Das additive Modell geht davon aus, dass die verschiedenen Wirkstoffe in dem Gemisch denselben Toxizitätsmechanismus und denselben Endpunkt haben, aber sich nicht gegenseitig in ihrer Toxizität beeinflussen. Daher tragen alle Bestandteile des Gemischs in Abhängigkeit von ihrer Konzentration und Wirksamkeit zur Gesamttoxizität bei, so dass das gesamte Gemisch aufgrund der additiven Wirkung toxisch ist, selbst wenn alle Bestandteile unterhalb der Toxizitätsschwelle liegen. Das Prinzip der unabhängigen Wirkung bezieht sich auf Chemikalien, die unterschiedliche Arten von Toxizität aufweisen und daher unterschiedliche biologische Zielorte („Endpunkte“) beeinflussen. Die Bestandteile des Gemischs wirken unabhängig voneinander und haben somit keinen Einfluss auf die Toxizität der jeweils anderen Bestandteile. Bei einem Gemisch, bei dem die Bestandteile unabhängig voneinander wirken, wird daher davon ausgegangen, dass das Gesamtgemisch keine Toxizität aufweist, wenn alle Einzelstoffe subtoxische Werte aufweisen. Beiden Ansätzen liegt dabei das Modell der Nicht-Wechselwirkung zugrunde, so dass die Toxizität eines Gemischs auf der Grundlage der Annahme vorhergesagt wird, dass die Bestandteile eines Gemischs nicht miteinander wechselwirken oder sich gegenseitig beeinflussen.

Bei Metallen wird gemeinhin von einer Konzentrationsaddition ausgegangen (Abbildung 3).

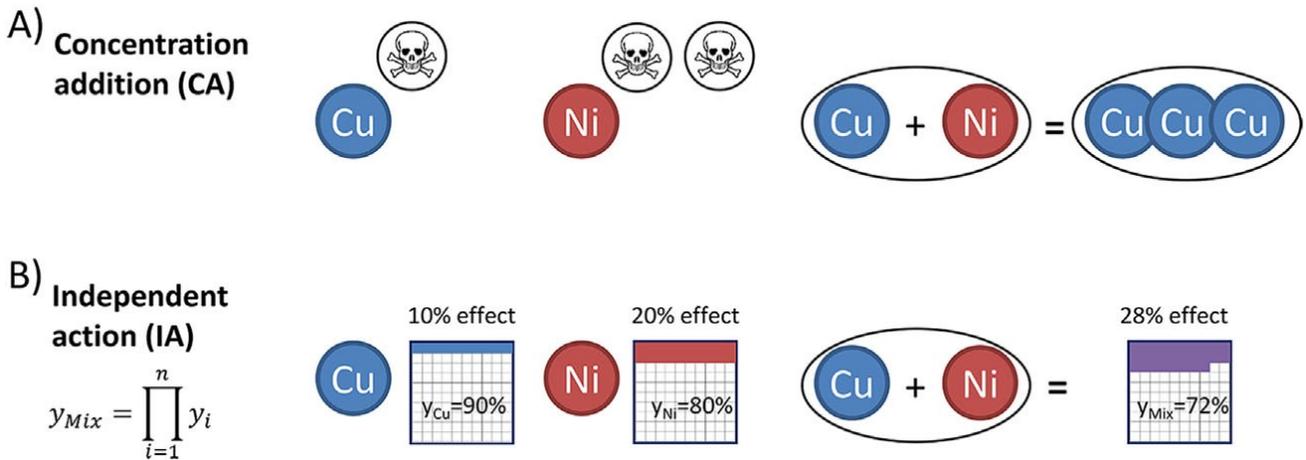


Abbildung 3: Mögliche Wirkmechanismen der Mischungstoxizität (aus: Nys et al., 2018)

Dazu wird ein sogenannter Risikoquotient ( $RQ_{mix}$ ) der Mischung berechnet. Er ergibt sich als Summe der Quotienten aus den betrachteten Metallen und geeigneten Effektkonzentrationen – im Falle chronischer Toxizitäten z.B. der  $EC_{10}$  (siehe Tabelle 11). Jeder einzelne Quotient wird dabei als „toxic unit“ bezeichnet.

Tabelle 11: Ökotoxizitätsdaten für Fische zur Berechnung von „toxic units“ und Mischungstoxizität (B. Guhl, LANUV NRW, mdl. Mitt., Effektkonzentrationen als gelöste Konzentrationen [mg/l])

CAS	Stoff	Akute Toxizität (EC50)	Art	Chronische Toxizität (EC10/NOE C)	Art	Referenz
7440-50-8	Kupfer	0,03470	<i>On-corhynchus mykiss</i>	0,01220	<i>On-corhynchus mykiss</i>	UBA EQS Datasheet 2014
7440-66-6	Zink	0,13600	<i>On-corhynchus mykiss</i>	0,07800	<i>Pimephales promelas</i>	UBA EQS Datasheet Zinc 2014
7440-02-0	Nickel	2,80000	<i>Cyprinus carpio</i>	0,04000	<i>Danio rerio</i>	EQS Dossier 2011, EU RAR 2008
7439-92-1	Blei	0,46560	<i>Pimephales promelas</i>	0,02929	<i>Pimephales promelas</i>	EQS Dossier 2011
7440-43-9	Cadmium	0,00260	<i>Salvelinus fontinalis</i>	0,00090	<i>Salvelinus fontinalis</i>	EU RAR 2007
7440-22-4	Silber	0,00310	<i>Pimephales promelas</i>	0,00017	<i>On-corhynchus mykiss</i>	JRC EQS-Datasheet Draft 2021

Konkret wurde der  $RQ_{mix}$  berechnet aus den Metallen Blei, Cadmium, Kupfer, Nickel und Zink (jeweils gelöst-Fraktion):

$$RQ_{mix} = \frac{[Pb]}{EC_{10}} + \frac{[Cd]}{EC_{10}} + \frac{[Cu]}{EC_{10}} + \frac{[Ni]}{EC_{10}} + \frac{[Zn]}{EC_{10}}$$

### 3.3.6 Berechnung partikulär gebundener Anteile von Metallen

Um ggf. Unterschiede zwischen den Zusammenhängen von gelösten Anteilen bzw. Gesamtgehalten von Metallen und der Fischzönose zu erklären, wurden die partikulär gebundenen Anteile als Differenz zwischen Gesamt- und gelösten Gehalten ermittelt.

## 4 Untersuchungsprogramm

Im Folgenden wird zunächst das Untersuchungsprogramm hergeleitet und strukturell beschrieben. Anschließend werden die Werteverteilungen der ausgewerteten Datengrundlagen sowie die verschiedenen angewandten Auswertungsmethoden erläutert, begründet und die jeweiligen Ergebnisse dargestellt und interpretiert.

Zur Erfüllung der Aufgabenstellung des Projektes, das darin besteht, die wirksamen Zusammenhänge zwischen Halb- und Schwermetallbelastungen von Fließgewässern und dem Zustand der Populationen sechs ausgewählter Fisch-/Rundmaularten in Sachsen felddatenbasiert zu ermitteln, wurden zunächst die folgenden im Rahmen der Bearbeitung zu überprüfenden Ausgangsannahmen formuliert:

- a. Ein einfacher linearer Zusammenhang zwischen Metallkonzentrationen und den Individuendichten ist nicht zu erwarten, da die Individuendichten letztlich die Folge aller Habitatfaktoren sind und nicht zu erwarten ist, dass die Metallbelastung quasi als Superfaktor (vergleichbar mit der Strömung, der Wassermindesttiefe oder der Wassertemperatur) wirkt.
- b. Das Fehlen einer Fisch-/Rundmaulart kann, muss aber nicht die Folge einer zu hohen Metallkonzentration sein, während das Vorkommen der Art nur möglich ist, wenn diese kritische Konzentrationsgrenze nicht verletzt ist. Ob der höchstmögliche Konzentrationswert in der Gruppe der Messstellen mit Artnachweis jedoch erreicht ist und damit die maximale Belastungsgrenze der Art markiert oder ob auch noch höhere Metallbelastungen vertragen werden könnten, lässt sich allein aus den Präsenz-Absenz-Vergleichen der Metallkonzentrationen nicht ableiten.
- c. Mittels Binomialer Logistischer Regressionsanalysen lassen sich für Präsenz-Absenz-Daten die Wahrscheinlichkeiten für das Vorkommen einer Art bei bestimmten Metall-Belastungsgraden ermitteln.
- d. Nicht nur das Artvorkommen als solches, sondern auch die maximal möglichen Individuendichten der zu untersuchenden Fisch-/Rundmaularten können durch bestimmte Konzentrationen der zu untersuchenden Metallfraktionen (gelöst, bioverfügbar, gesamt) limitiert sein.
- e. Mittels quantiler Regressionen lassen sich für frei wählbare Perzentile lineare Regressionen zwischen der Individuendichte der Fisch-/Rundmaularten und den Jahresdurchschnittskonzentrationen der verschiedenen Metalle bzw. Metall-Fraktionen ermitteln.
- f. Bei einer Klassifikation der Individuendichten können die jeder Individuendichteklasse (Abundanzklasse) zuzuordnenden höchsten Jahresdurchschnittswerte der Metallkonzentrationen die maximale Toleranzgrenze der betreffenden Abundanzklasse markieren, wenn die Grundgesamtheit der Messstellen hinreichend viele Fälle mit ansonsten guten Habitatbedingungen der jeweiligen Art enthält und wenn statistische Ausreißer ausgeschlossen werden. Ein Indiz dafür kann eine systematisch mit zunehmender Individuendichte verknüpfte Abnahme der maximalen Metallkonzentrationen (Obere Whisker) sein.
- g. Je weniger die Metallaufnahme partikulär über die Nahrung (direkte Aufnahme metallbelasteter organischer Feinpartikel oder indirekt über die Nahrungskette) erfolgt, desto größer sollte die Belastungswirkung der Gelöst- oder sogar der bioverfügbaren Metallkonzentrationen sein.

Aufbauend auf diesen Ausgangsannahmen wurden folgende aufeinander aufbauende Arbeitsziele formuliert:

- I. Felddatenbasierte Ableitung wahrscheinlicher grundsätzlicher Belastungswirkungen der ausgewählten Metalle und Metall-Fraktionen für die betrachteten Fisch-/Rundmaularten anhand geeigneter statistischer Verfahren.
- II. Felddatenbasierte Ableitung von Schwellenwerten als Metalloberggrenzen für das Vorkommen der untersuchten Fisch-/Rundmaularten und sofern möglich, von abundanzklassenspezifischen Metall-Schwellenwerten (jeweils pro Metallspezies und -fraktion sowie pro Fisch-/Rundmaulart), bei deren Überschreitungen die Individuendichten der jeweiligen Fisch-/Rundmaularten in ihren natürlichen Verbreitungsgebieten mit hoher Wahrscheinlichkeit keine größeren Abundanzklassen erreichen können.
- III. Ökologisch-fachliche Validierung und Bedeutungseinschätzung der statistisch ermittelten Fisch/Rundmaul-Metallbeziehungen.
- IV. Nutzbarkeit der abgeleiteten abundanzklassenbezogenen Schwellenwerte als Grundlage für fisch-/rundmaulartsspezifische Belastungsklassifikationen der gemessenen Konzentrationen der verschiedenen Metallspezies und -fraktionen zur Erstellung entsprechender Metallbelastungskarten für Fische/Rundmäuler.

Das zur Erreichung dieser Ziele umgesetzte Untersuchungsprogramm umfasst die folgenden Analyse- und Auswertungsschritte:

1. Analysen der Werteverteilungen der betrachteten Metalle (differenziert nach Fraktionen) als Grundlage für die Auswahl der geeigneten statistischen Verfahren
2. Analysen der Zusammenhänge zwischen den betrachteten Metallen (differenziert nach Fraktionen) und zwischen diesen und anderen physiko-chemischen Begleitparametern
3. Analysen der Zusammenhänge zwischen den betrachteten Metallen (differenziert nach Fraktionen) sowie anderen physiko-chemischen Begleitparametern und dem Vorkommen bzw. den Individuendichten (Abundanzen) der untersuchten Fisch-/Rundmaularten
4. Ableitung von vorkommen- bzw. abundanzlimitierenden Schwellenwerten für die betrachteten Metalle (differenziert nach Fraktionen) und untersuchten Fisch-/Rundmaularten
5. Erstellung von fisch-/rundmaulartsspezifischen Metallbelastungskarten auf der Grundlage der abgeleiteten abundanzlimitierenden Schwellenwerte (s. Steckbriefe).

In den Unterkapiteln werden die angewandten Analyseverfahren zunächst methodisch dargestellt und erklärt, anschließend die jeweiligen Ergebnisse beschrieben und fachlich interpretiert.

## **4.1 Analysen der Werteverteilungen der betrachteten Metalle**

### **4.1.1 Methodik**

Als Grundlage für die Auswahl der statistischen Methoden wurden alle relevanten Metalle einer Verteilungsanalyse unterzogen.

Viele gängige Verfahren sind auf Eigenschaften wie Normalverteilung, Homogenität von Residuenverteilungen etc. angewiesen. Eine Anwendung der Verfahren, ohne dass ihre grundlegenden Randbedingungen erfüllt sind, kann zu Fehlschlüssen führen. Zur Prüfung wurden als Methoden zur Visualisierung der Verteilungen QQ-Plots und Histogramme erstellt. Aus QQ-Plots ist die Abweichung der tatsächlichen Quantile von den theoretischen Quantilen einer Normalverteilung abzulesen.

### 4.1.2 Ergebnisse

Exemplarisch sind hier QQ-Plots und Histogramme für  $\text{Arsen}_{\text{gel}}$  im Verbreitungsgebiet der Äsche sowie  $\text{Zink}_{\text{ges}}$  im Verbreitungsgebiet der Schmerle dargestellt (Abbildung 4 bis Abbildung 7).

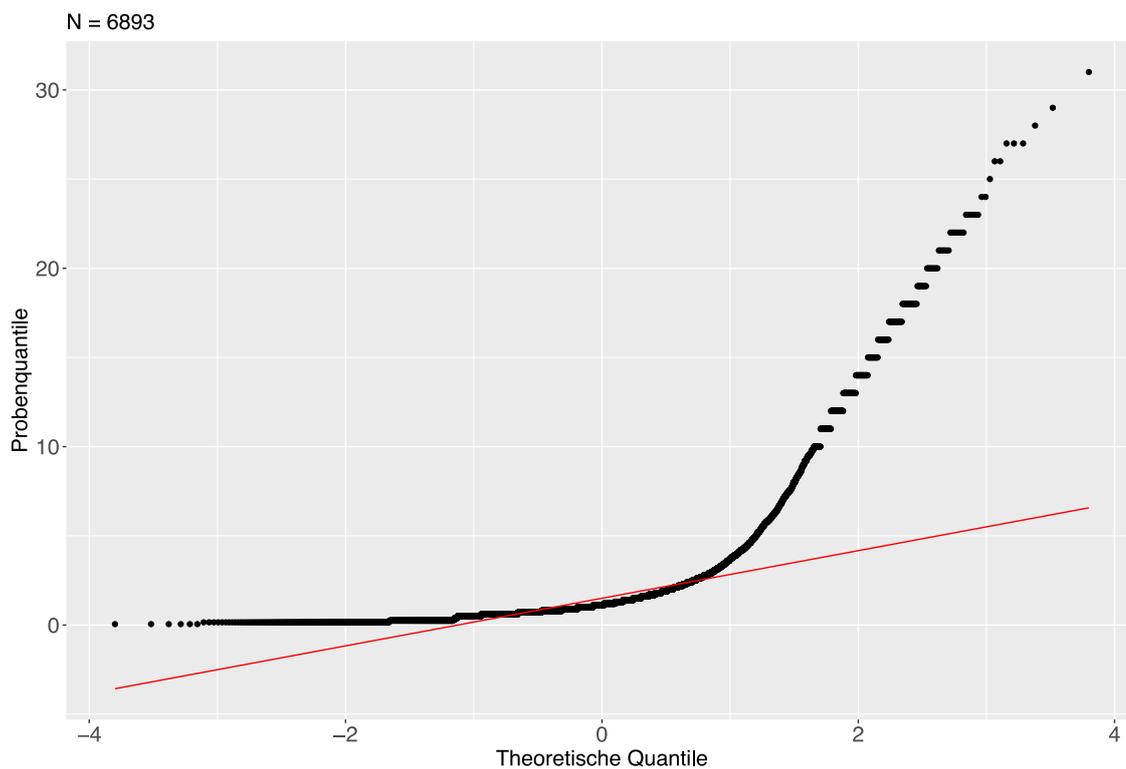


Abbildung 4: QQ-Plot von Arsen (gelöst) an Verbreitungsschwerpunkten der Äsche

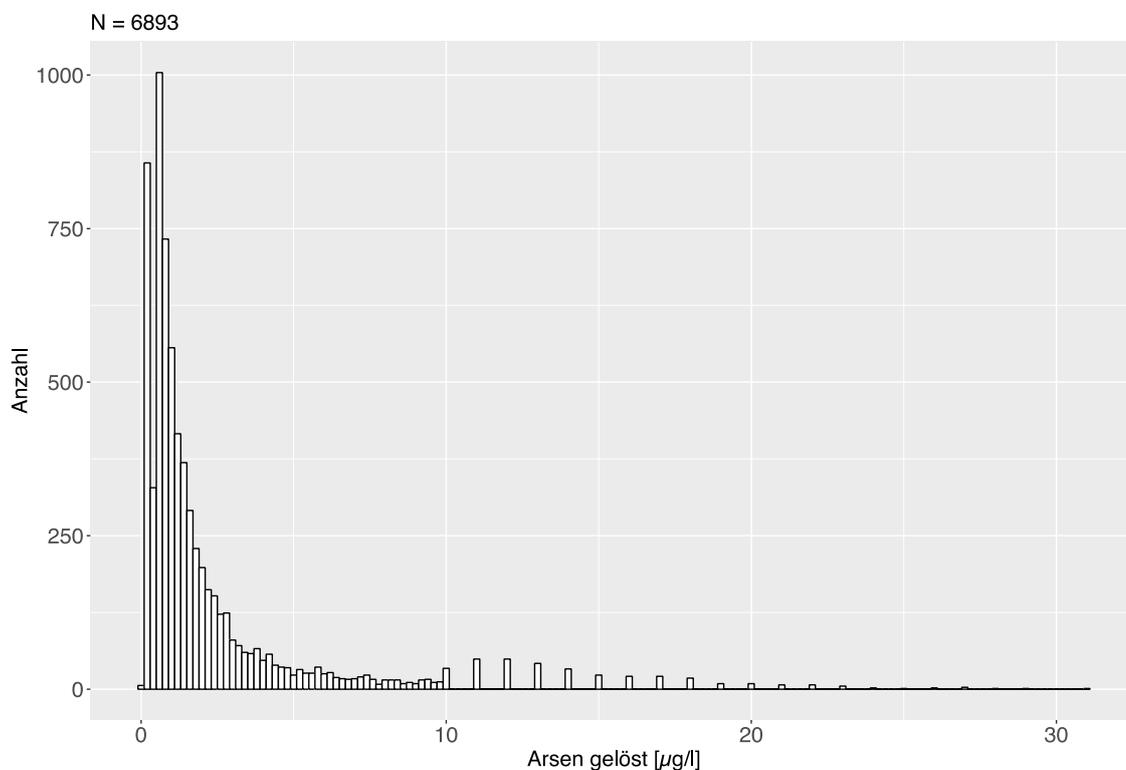
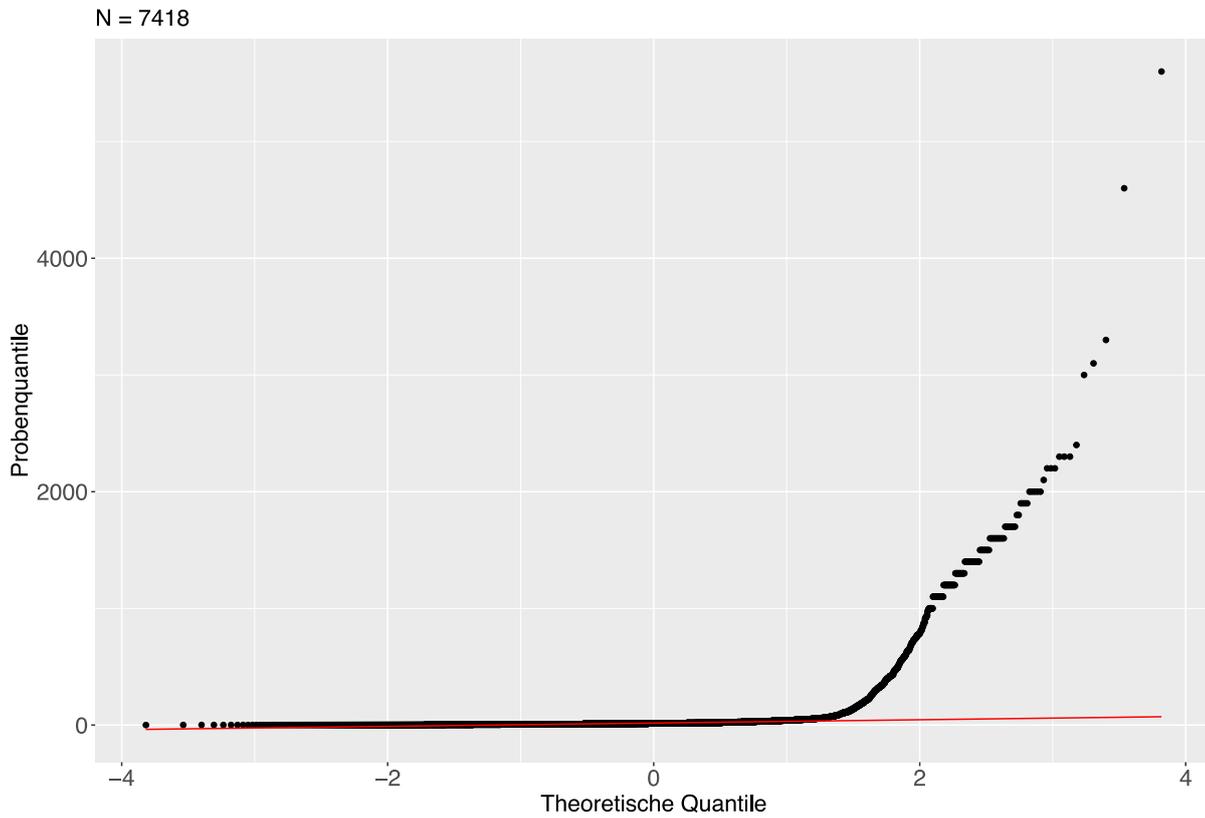
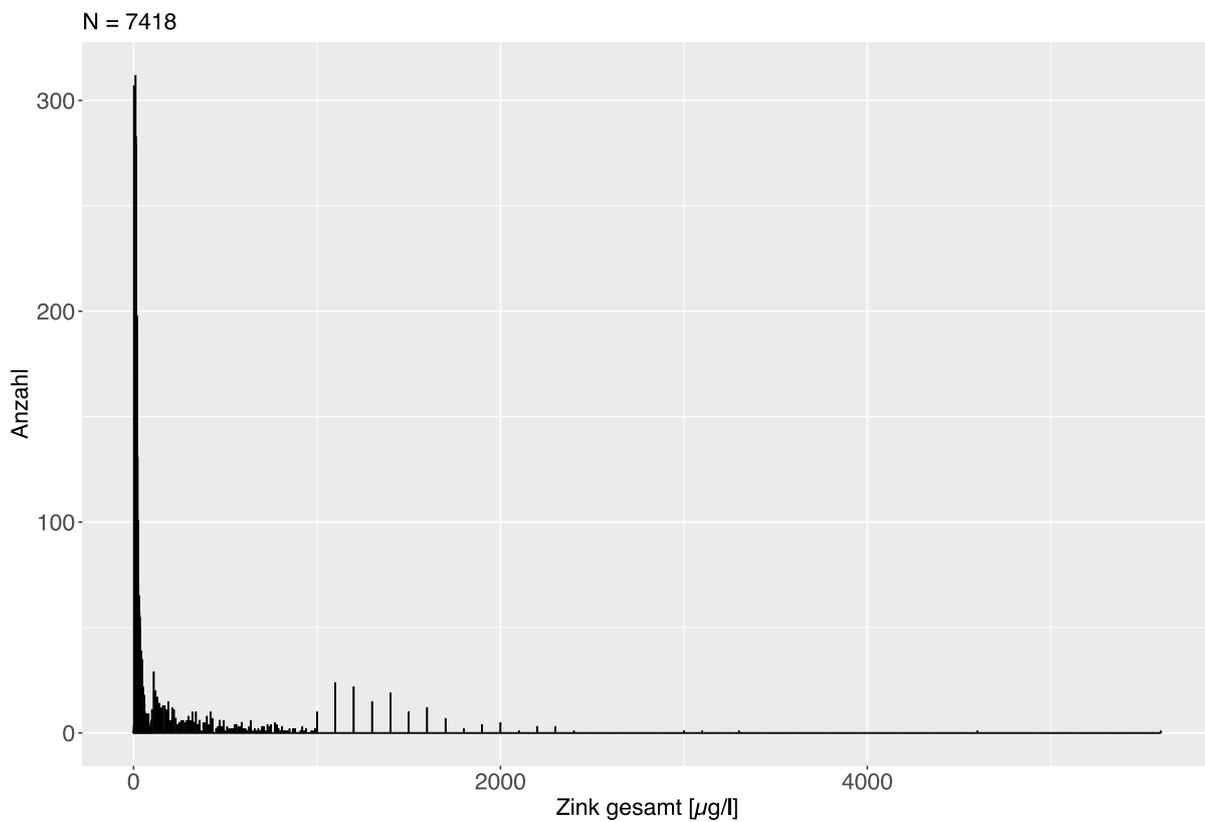


Abbildung 5: Häufigkeitsverteilung von Arsen (gelöst) an Verbreitungsschwerpunkten der Äsche



**Abbildung 6: QQ-Plot von Zink (gesamt) an Verbreitungsschwerpunkten der Schmerle**



**Abbildung 7: Häufigkeitsverteilung von Zink (gesamt) an Verbreitungsschwerpunkten der Schmerle**

Bei normalverteilten Daten sollten bei QQ-Plots die Punkte auf oder nahe bei der roten Linie liegen und etwa symmetrisch verteilt sein. Im Falle der vorliegenden Daten sieht man eine starke Abweichung bei den höheren Quantilen. Dies deckt sich mit der Form der Histogramme: sehr viele Datensätze mit geringen Konzentrationen und wenige Fälle mit hohen Konzentrationen (siehe Anlage 01).

### Fazit

Als Fazit lässt sich festhalten, dass die Konzentrationen aller untersuchungsrelevanten Metalle (differenziert nach Fraktionen) in allen sechs Verbreitungsgebieten signifikant von der Normalverteilung abweichen (siehe Anlage 1), so dass statistische Methoden, die derartige Verteilungen benötigen, nicht angewendet werden können.

## 4.2 Analysen der Zusammenhänge zwischen den betrachteten Metallen und zwischen diesen und anderen physiko-chemischen Begleitparametern

### 4.2.1 Methodik

Aufgrund der Vielfalt der potenziellen Einflussgrößen in den Gewässern sind Scheinkorrelationen möglich. Besteht zwischen zwei Einflussgrößen ein starker Zusammenhang und wird ein starker Zusammenhang einer der beiden Größen mit der Zielgröße ermittelt, kann tatsächlich die andere Zielgröße den gemessenen Effekt verursachen.

Um die dadurch bedingten Fehlschlüsse möglichst auszuschließen, wurde analysiert, ob bzw. welche anderen physiko-chemischen Begleitparameter mit den betrachteten Metallen korreliert sind.

Daher wurden von allen Paarungen physiko-chemischer Parameter für die jeweilige Grundgesamtheit Spearman-Korrelationskoeffizienten und lineare Regressionsmodelle berechnet. In den Fällen, in denen der Korrelationskoeffizient  $p$  betragsmäßig größer als 0,3 ist und das Signifikanzniveau  $p = 0,05$  eingehalten ist, wurden Streudiagramme erstellt. Die Analyse erfolgte auf Basis der gemessenen Einzelwerte.

### 4.2.2 Ergebnisse

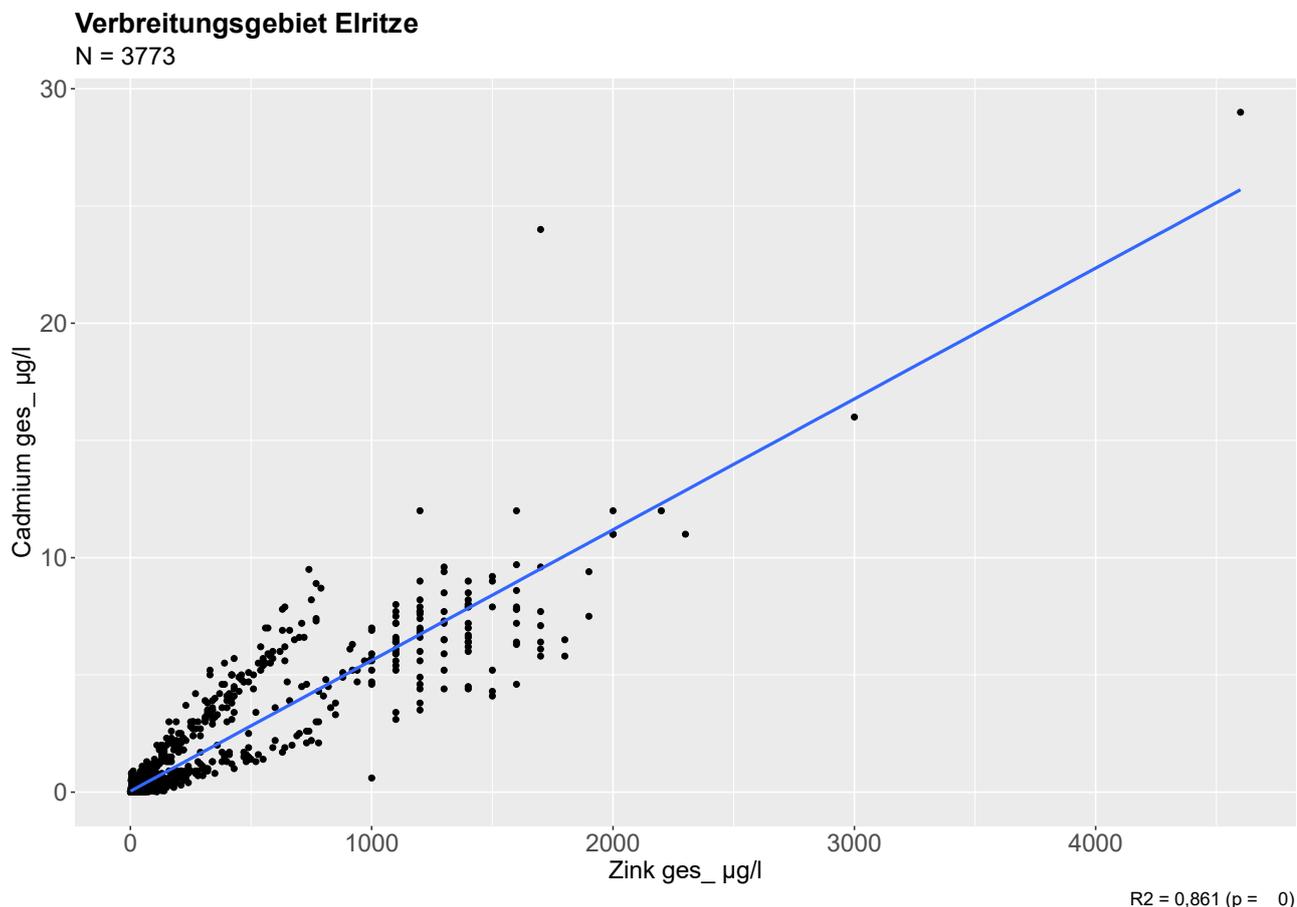
Im Folgenden sind die Auswertungen der Linearen Regressionen der für diese Untersuchung relevanten Metalle untereinander dargestellt soweit diese mindestens als mäßig stark einzustufen sind ( $R^2 > 0,3$  mit  $p < 0,05$ ). Dabei wurden die Grundgesamtheiten anhand der jeweiligen Verbreitungsschwerpunkte der Arten gewählt. Alle aufgeführten Metalle sind jeweils positiv miteinander korreliert.

**Tabelle 12: Mindestens mäßig untereinander korrelierte Metalle**

Verbreitungsgebiet	Positive Korrelationsbeziehungen
Äsche	Arsen – Blei, Blei – Cadmium, Blei – Kupfer, Cadmium – Zink
Bachforelle	Cadmium – Zink
Bachneunauge	Blei – Kupfer, Cadmium – Zink
Elritze	Arsen – Blei, Arsen – Kupfer, Blei – Kupfer, Cadmium – Zink, Cadmium – Kupfer
Schmerle	Arsen – Blei, Cadmium – Zink, Cadmium – Kupfer

Neben dem starken positiven Zusammenhang zwischen den verschiedenen Cadmium- und Zink-Fraktionen (mit Bestimmtheitsmaßen von zumeist über 0,7) wird nur noch ein weiterer Fall mit vergleichbar hohem Bestimmtheitsmaß (Arsen gesamt zu Blei gesamt im Gebiet der Elritze mit  $R^2 = 0,77$ ) festgestellt.

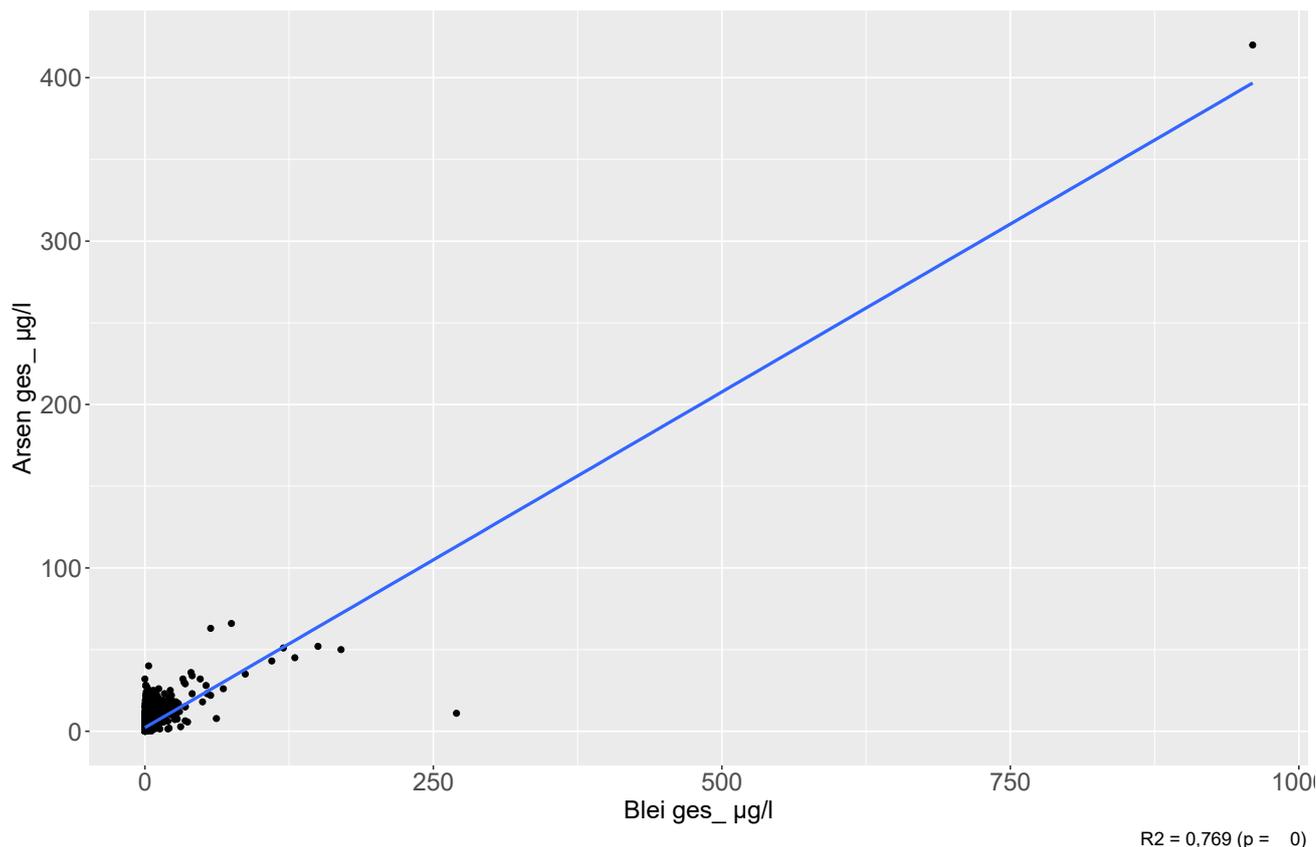
In den folgenden beiden exemplarisch dargestellten Streudiagrammen mit Regressionsgeraden (Abbildung 8 und Abbildung 9) wird allerdings deutlich, dass diese sehr starken Zusammenhänge maßgeblich von Ausreißern geprägt sind.



**Abbildung 8: Streudiagramm mit Regressionsgerade zur Beziehung von Zink und Cadmium im Verbreitungsgebiet der Elritze.**

## Verbreitungsgebiet Elritze

N = 3773



**Abbildung 9: Streudiagramm mit Regressionsgerade zur Beziehung von Blei und Arsen im Verbreitungsgebiet der Elritze.**

Entfernt man die Ausreißer, resultieren Bestimmtheitsmaße von rund 0,3 bis 0,4, was auch dem Größenordnungsbereich der übrigen positiven Zusammenhänge entspricht.

Uran ist mit keinem der Metalle korreliert. Die Korrelationen zwischen den in der Untersuchung betrachteten Metallen spiegeln grundsätzlich vor allem die Vergesellschaftungen in den entsprechenden Mineralien wider. Daraus lässt sich folgern, dass in erster Linie von geogenen Quellen auszugehen ist, welche natürlich durch bergbauliche Aktivitäten in besonderem Maße während der jahrhundertelangen Bergbauaktivitäten freigesetzt wurden.

Im Folgenden sind die Korrelationen der für diese Untersuchung relevanten Metalle mit anderen physikochemischen Parametern dargestellt soweit diese mindestens als mäßig stark einzustufen sind ( $|\rho| > 0,3$  mit  $p < 0,05$ ). Dabei wurden die Grundgesamtheiten anhand der jeweiligen Verbreitungsschwerpunkte der Arten gewählt. Tabelle 13 bis Tabelle 20 zeigen die Ergebnisse für die einzelnen Metalle.

**Tabelle 13: Korrelationen von Arsen mit anderen physiko-chemischen Parametern**

Verbreitungsgebiet	Positiv korreliert	Negativ korreliert
Äsche	o-Phosphat-P, Uran	Eisen
Bachforelle	o-Phosphat-P, Uran	
Bachneunauge	Acesulfam, Gesamt-Phosphor, o-Phosphat-P, pH-Wert, Uran, Wassertemperatur	
Elritze	Acesulfam, o-Phosphat-P, pH-Wert, Uran	Eisen
Groppe	o-Phosphat-P, Uran	
Schmerle	Acesulfam, Gesamt-Phosphor, o-Phosphat-P, pH-Wert, Uran, Wassertemperatur	

**Tabelle 14: Korrelationen von Blei mit anderen physiko-chemischen Parametern**

Verbreitungsgebiet	Positiv korreliert
Äsche	Abfiltrierbare Stoffe, Benzo(a)pyren, Eisen, Fluoranthen, gesamter organisch gebundener Kohlenstoff, Trübung
Bachforelle	Abfiltrierbare Stoffe, Benzo(a)pyren, Eisen, Fluoranthen, gesamter organisch gebundener Kohlenstoff, Trübung
Bachneunauge	Benzo(a)pyren, Eisen, Fluoranthen
Elritze	Abfiltrierbare Stoffe, Benzo(a)pyren, Eisen, Fluoranthen, gesamter organisch gebundener Kohlenstoff, Trübung
Groppe	Abfiltrierbare Stoffe, Benzo(a)pyren, Eisen, Fluoranthen, gesamter organisch gebundener Kohlenstoff, Trübung
Schmerle	Abfiltrierbare Stoffe, Benzo(a)pyren, Eisen, Fluoranthen, gesamter organisch gebundener Kohlenstoff, Trübung

**Tabelle 15: Korrelationen von Cadmium mit anderen physiko-chemischen Parametern**

Verbreitungsgebiet	Negativ korreliert
Äsche	Calcium, Carbamazepin, Gesamthärte, Magnesium, Sulfat
Bachforelle	Calcium, Chlorid, Elektrische Leitfähigkeit, Gesamthärte, Magnesium, Nitrit-Stickstoff, pH-Wert
Bachneunauge	Calcium, Elektrische Leitfähigkeit, Gesamthärte, Magnesium
Elritze	Calcium
Groppe	Calcium, Chlorid, Elektrische Leitfähigkeit, Magnesium, Nitrit-Stickstoff, Sulfat
Schmerle	Calcium, Gesamthärte, Magnesium

**Tabelle 16: Korrelationen von Kupfer mit anderen physiko-chemischen Parametern**

Verbreitungsgebiet	Positiv korreliert	Negativ korreliert
Äsche	Benzo(a)pyren, Fluoranthen	
Bachforelle	Benzo(a)pyren, Fluoranthen	
Bachneunauge	Benzo(a)pyren, Eisen, Fluoranthen	
Elritze	Benzo(a)pyren, Fluoranthen	
Groppe	Benzo(a)pyren, Fluoranthen	
Schmerle	Benzo(a)pyren, Fluoranthen	Magnesium

**Tabelle 17: Korrelationen von Nickel mit anderen physiko-chemischen Parametern**

Verbreitungsgebiet	Positiv korreliert	Negativ korreliert
Äsche	Ammonium-Stickstoff	
Bachforelle	-	-
Bachneunauge		pH-Wert
Elritze		pH-Wert
Groppe	Eisen	
Schmerle	Ammonium-Stickstoff	pH-Wert

**Tabelle 18: Korrelationen von Quecksilber mit anderen physiko-chemischen Parametern**

Verbreitungsgebiet	Positiv korreliert
Äsche	
Bachforelle	Acesulfam
Bachneunauge	Acesulfam
Elritze	
Groppe	Acesulfam
Schmerle	Acesulfam

**Tabelle 19: Korrelationen von Uran mit anderen physiko-chemischen Parametern**

Verbreitungsgebiet	Positiv korreliert
Äsche	pH-Wert, Elektrische Leitfähigkeit, Lindan, Magnesium
Bachforelle	pH-Wert, Sulfat, nicht ionisiertes Ammonium (NH <sub>3</sub> -N), Calcium, Chlorid, Elektrische Leitfähigkeit, Gesamthärte, Magnesium, Natrium
Bachneunauge	pH-Wert, Sulfat, nicht ionisiertes Ammonium (NH <sub>3</sub> -N), Calcium, Chlorid, Elektrische Leitfähigkeit, Gesamthärte, Magnesium, Natrium
Elritze	pH-Wert, Sulfat, nicht ionisiertes Ammonium (NH <sub>3</sub> -N), Calcium, Chlorid, Elektrische Leitfähigkeit, Gesamthärte, Magnesium, Natrium, Lindan, o-Phosphat-P
Groppe	pH-Wert, Sulfat, nicht ionisiertes Ammonium (NH <sub>3</sub> -N), Calcium, Chlorid, Elektrische Leitfähigkeit, Gesamthärte, Magnesium, Kalium
Schmerle	pH-Wert, Sulfat, nicht ionisiertes Ammonium (NH <sub>3</sub> -N), Calcium, Chlorid, Elektrische Leitfähigkeit, Gesamthärte, Magnesium, Natrium

**Tabelle 20: Korrelationen von Zink mit anderen physiko-chemischen Parametern**

Verbreitungsgebiet	Positiv korreliert	Negativ korreliert
Äsche	Benzo(a)pyren, Fluoranthen	
Bachforelle		pH-Wert
Bachneunauge	Fluoranthen	pH-Wert
Elritze	Benzo(a)pyren, Fluoranthen	pH-Wert
Groppe	Fluoranthen	pH-Wert
Schmerle	Fluoranthen	pH-Wert

Zwischen den in der Untersuchung betrachteten Metallen und anderen ggf. für die Ausprägung der Fischfauna relevanten physiko-chemischen Parametern bestehen relativ wenige stärkere Korrelationen. Diese waren jedoch bei der Interpretation statistisch ermittelter Zusammenhänge zwischen den Metallkonzentrationen und den Fisch-/Rundmaulabundanzten dahingehend zu berücksichtigen, dass sie bei positiv korrelierten Begleitparametern zur Ermittlung ggf. zu starker Belastungswirkungen der jeweiligen Metalle führen und zum Gegenteil bei negativ korrelierten Parametern.

### Fazit

Die ermittelten Korrelationsbeziehungen entsprechen grundsätzlich insofern den Erwartungen als sie, bezogen auf Metall-Metall-Beziehungen, jeweils die mineralogischen Zusammenhänge (am prominentesten Cadmium – Zink) widerspiegeln. Zusammenhänge zwischen Metallen und anderen chemischen Kenngrößen sind eher selten. Die positiven Beziehungen zwischen Blei, Kupfer oder Zink zu den polyzyklischen Aromaten Benzo(a)pyren und Fluoranthen scheinen am ehesten über straßenbürtige Einträge erklärbar. Die negativen Zusammenhänge zwischen Cadmium und den verschiedenen Härte-zeigenden Parametern entsprechen dem Löslichkeitsverhalten dieses Metalls. Die negativen Zusammenhänge von Nickel und Zink mit dem pH-Wert zeigen das Gleiche an.

Auffällig ist der negative Zusammenhang zwischen Carbamazepin und Cadmium im Verbreitungsgebiet der Äsche, der darauf hinweist, dass das Cadmium nicht über gereinigtes Abwasser eingetragen wird. Umgekehrt indiziert der positive Zusammenhang zwischen Acesulfam und Quecksilber, dass letzteres abwasserbürtig in die Gewässer gelangt.

Die übrigen Fälle wirken eher zufällig.

Für die weiteren Auswertungen bedeutete dies, dass im Einzelfall geprüft werden musste, ob miteinander korrelierte Parameter jeweils ähnliche Zusammenhänge zu Fisch-/Rundmaulabundanzten zeigen. In solchen Fällen kann jedenfalls nicht einfach auf Wirkzusammenhänge geschlossen werden.

Allerdings verringert die geringe Zahl von signifikanten Korrelationen der Metalle untereinander bzw. mit anderen physiko-chemischen Parametern die Wahrscheinlichkeit, dass bei erkannten Zusammenhängen zwischen Metallen und der Ausprägung der Fischfauna Scheinkorrelationen eine Rolle spielen. Zu berücksichtigen sind jedoch auf jeden Fall die Korrelationen einiger Metalle untereinander, was eine Effektrennung erschwert.

## **4.3 Datenverknüpfungen: Stoffparameter- mit Fisch-/Rundmaulmesswerten**

### **4.3.1 Methodik**

Als Voraussetzung für die Analyse von Zusammenhängen zwischen den gewählten Fisch-/Rundmaularten und Konzentrationen der betrachteten Metalle (differenziert nach Fraktionen) sowie anderen physiko-chemischen Begleitparametern wurde eine vorherige Aufbereitung der Datenbasis dahingehend vorgenommen, dass nur solche Stellen in die Auswertung einbezogen wurden, bei denen die jeweilige Fisch-/Rundmaulart aufgrund der natürlichen Gewässereigenschaften auch mit hinreichender Sicherheit vorkommen kann. Diese Selektion wird anhand der sogenannten Referenzkulissen vorgenommen. Die in den Analysen berücksichtigten Untersuchungsstellen wurden je betrachteter Fokusart auf einen artspezifischen Verbreitungsschwerpunkt zugeschnitten (s. Kapitel 3.3.2). Die übrigen Stellen wurden a priori ausgeschlossen, um nicht „false negatives“ zu produzieren. Diese Aufbereitung und Datenselektion galt auch für alle folgenden Schritte und wird daher nicht mehr speziell erwähnt.

Den durchgeführten Analysen wurden auf der abhängigen Seite sowohl Präsenz-Absenz-Daten (1/0) der Fisch-/Rundmaularten, als auch deren Individuendichten (Ind./ha) (=Abundanzen) zugrunde gelegt und Jahresmittelwerten der Konzentrationen der zu betrachtenden Metalle (differenziert nach Fraktionen) sowie anderen physiko-chemischen Begleitparametern als unabhängige Größen gegenübergestellt. Die Zuordnung von chemischen Messwerten (bzw. deren Jahresmittelwerte) zu den Befischungsdaten erfolgte anhand des Untersuchungsjahres und der Wasserkörperidentifikation. Das bedeutet, dass bei zwei Befischungsstrecken und nur einer Chemie-Messstelle pro Wasserkörper beide Befischungsstrecken räumlich mit derselben Chemie-Messstelle verknüpft wurden. Ob dadurch auch tatsächlich die Befischungen beider Befischungsstrecken mit denselben Chemie-Messungen bzw. deren Jahresmittelwerten verknüpft wurden, hängt davon ab, ob beide Befischungsstrecken auch tatsächlich in denselben Jahren befischt wurden.

## 4.4 Statistische Auswertungen der Präsenz-Absenz-Daten (1/0): A. Box-Whisker-Plots

### 4.4.1 Methodik

Für die, wie oben beschrieben selektierten Präsenz-Absenz-Daten (1/0) der gewählten Fisch-/Rundmaularten, wurden zunächst bedingte Verteilungen in Form von **Box-Whisker-Plots** erstellt. Die Präsenz-Absenz-Daten (1/0) wurden also für jede untersuchte Parameter-Fisch-/Rundmaulbeziehung mit zwei Box-Whisker-Plots pro Diagramm dargestellt (s. Beispieldiagramm in Abbildung 10).

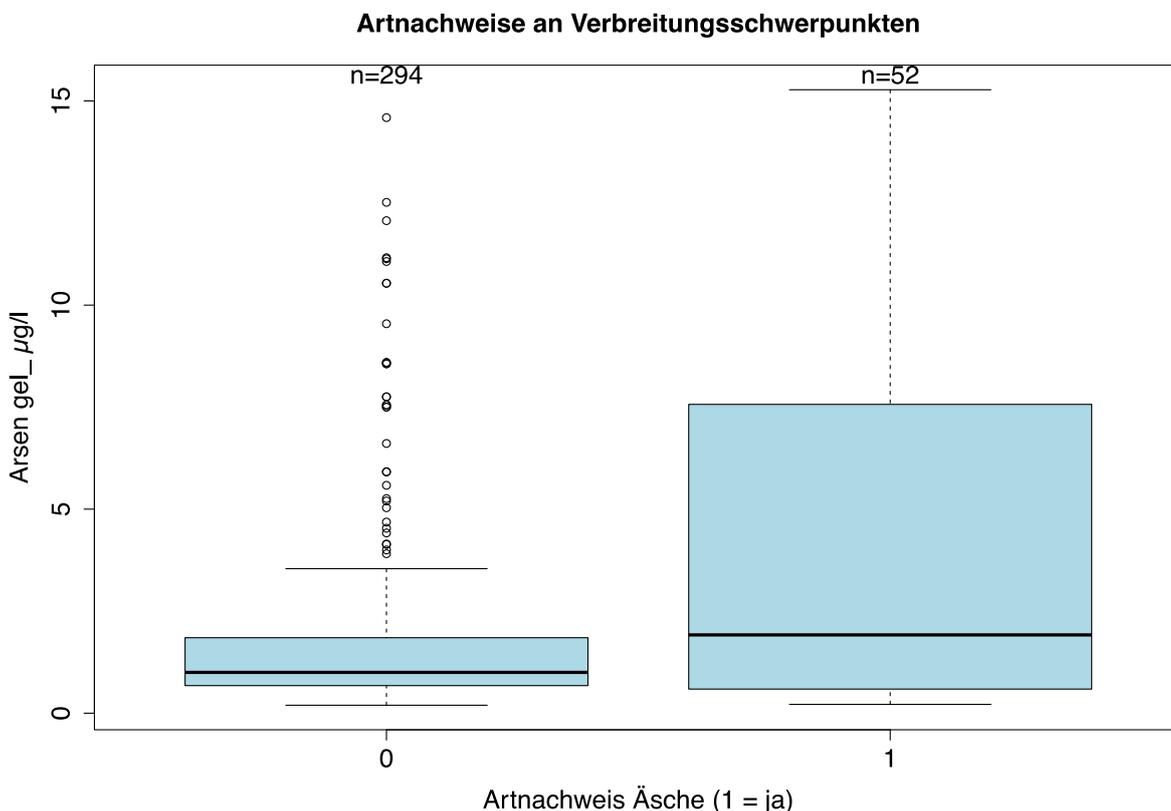
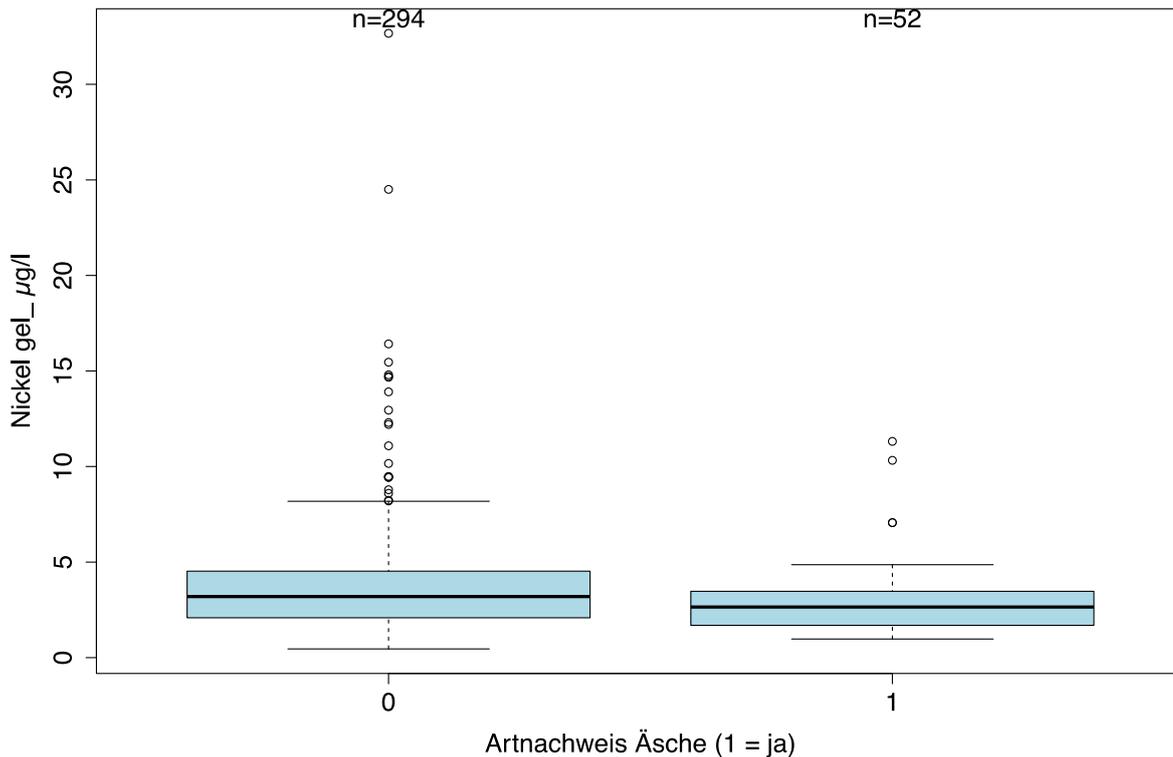


Abbildung 10: Beispiel eines Box-Whisker-Plots mit Präsenz-Absenz-Daten

Um zu prüfen, ob sich die ausgewerteten Messwerte der Präsenz-Parameterkonzentrationen (1) von denen der Absenz-Daten (0) statistisch signifikant unterscheiden, wurden **Kolmogorow-Smirnow-Tests** durchgeführt.

### 4.4.2 Ergebnisse

Die folgende Abbildung zeigt exemplarisch einen Boxplot von Metallkonzentrationen (Jahresmittel) über Präsenz-Absenz-Daten. Hier ließe sich beispielsweise der obere Nickelschwellenwert des Vorkommens von Äschen anhand des Oberen Whiskers der Box der positiven Artnachweise abschätzen (Klasse 1 in Abbildung 11). Weitere Ergebnisse können den Boxplots in Anlagen 2 a und 2 b (Metalle) sowie 3 a und 3 b (Begleitparameter) entnommen werden.



**Abbildung 11: Boxplot der Präsenz-Absenzdaten der Äsche an ihren Verbreitungsschwerpunkten und der Nickel-gelöst-Konzentration**

Alle Fälle, bei denen der Kolmogorow-Smirnow-Test auf dem Signifikanzniveau  $p < 0,05$  anzeigte, dass sich die Verteilungen in den beiden Gruppen signifikant unterscheiden und bei denen die Ausbildung der Oberen Whisker plausibel erscheint, sind in der folgenden Tabelle 21 dargestellt. In allen dargestellten Fällen liegen die Oberen Whisker der Präsenz-Daten unterhalb von 90 % des Oberen Whiskers der Absenzdaten. Soweit vorhanden, sind zur besseren Einordnung der Größenordnungen die Umweltqualitätsnormen (Jahresdurchschnitt) gemäß OGewV angegeben.

**Tabelle 21: Obere Whisker der Boxplots von Metallkonzentrationen (Jahresmittel) über Präsenz-Absenz-Daten**

Parameter	Art	Obere Whisker Absenz [ $\mu\text{g/l}$ ]	Obere Whisker Präsenz [ $\mu\text{g/l}$ ]	JD-UQN [ $\mu\text{g/l}$ ]
Cadmium gelöst	Äsche	1,02	0,35	0,08 – 0,25*
Cadmium gesamt	Äsche	3,50	0,51	
Nickel gelöst	Äsche	9,45	7,06	
Blei gelöst	Bachforelle	0,56	0,45	1,2
Cadmium gesamt	Bachforelle	1,01	0,90	
Kupfer gelöst	Bachforelle	5,15	4,79	
Nickel gelöst	Bachforelle	12,6	7,54	4
Zink gelöst	Bachforelle	72,1	48,1	
Arsen gelöst	Bachneunauge	5,30	3,65	
Arsen gesamt	Bachneunauge	11,9	9,13	

Parameter	Art	Obere Whisker Absenz [ $\mu\text{g/l}$ ]	Obere Whisker Präsenz [ $\mu\text{g/l}$ ]	JD-UQN [ $\mu\text{g/l}$ ]
Kupfer gelöst	Bachneunauge	5,05	4,55	
Nickel gelöst	Bachneunauge	11,9	6,37	4
Nickel gesamt	Bachneunauge	16,4	7,61	
Zink gesamt	Bachneunauge	267	65,5	
Nickel gelöst	Elritze	14,7	9,82	4
Blei gelöst	Groppe	0,53	0,47	1,2
Cadmium gelöst	Groppe	0,64	0,57	0,08 – 0,25*
Cadmium gesamt	Groppe	2,64	0,78	
Kupfer gesamt	Groppe	10,6	7,03	
Nickel gelöst	Groppe	10,0	6,57	4
Nickel gesamt	Groppe	13,7	9,57	
Quecksilber gelöst	Groppe	0,03	0,02	
Zink gesamt	Groppe	496	45,2	
Nickel gelöst	Schmerle	14,4	9,40	4
Nickel gesamt	Schmerle	19,7	12,7	
Zink gelöst	Schmerle	150	48,3	

\*: abhängig von der Wasserhärte

Zusätzlich wurden entsprechende Untersuchungen mit den anhand des Biomet-Tools berechneten bioverfügbaren Anteilen der Metalle Blei, Kupfer, Nickel und Zink durchgeführt (Tabelle 22). Dort sind ebenfalls alle Fälle dargestellt, bei denen der Kolmogorow-Smirnow-Test auf dem Signifikanzniveau  $p < 0,05$  anzeigte, dass sich die Verteilungen in den beiden Gruppen signifikant unterscheiden und bei denen die Ausbildung der Oberen Whisker plausibel erscheint. In 6 der 9 Fälle sind die Oberen Whisker der Präsenz-Daten unterhalb von 90 % des Oberen Whiskers der Absenzdaten.

**Tabelle 22: Obere Whisker der Boxplots von bioverfügbaren Metallkonzentrationen (Jahresmittel) über Präsenz-Absenz-Daten**

Parameter	Art	Obere Whisker Absenz [ $\mu\text{g/l}$ ]	Obere Whisker Präsenz [ $\mu\text{g/l}$ ]
Bioverfügbares Zink	Äsche	12,2	11,0
Bioverfügbares Nickel	Bachforelle	2,99	2,86
Bioverfügbares Kupfer	Bachneunauge	0,435	0,323
Bioverfügbares Nickel	Bachneunauge	3,01	2,15
Bioverfügbares Nickel	Elritze	3,01	2,94
Bioverfügbares Kupfer	Groppe	0,422	0,366
Bioverfügbares Nickel	Groppe	3,30	2,57
Bioverfügbares Nickel	Schmerle	3,15	2,72
Bioverfügbares Blei	Schmerle	0,0451	0,0416

## Fazit

Die Kolmogorow-Smirnow-Tests der Präsenz-Absenz-Konzentrationsunterschiede (Messwertgruppen mit und ohne Artnachweis) sowie die Vergleiche zwischen den Oberen Whiskern der Metallkonzentrationen beider Fallgruppen bei den untersuchten Fisch-/Rundmaularten und Metall-Parametern lassen die Aussage zu, dass zwischen den Metallkonzentrationen und dem Fehlen oder Vorhandensein einer Fisch-/Rundmaulart ein Zusammenhang besteht.

Dies kann aus der Tatsache geschlossen werden, dass ein Oberer Whisker in den Fällen, in denen die betreffende Art vorgefunden wurde, unterhalb desjenigen liegt, bei denen die Art nicht angetroffen wurde, da gezielt die typologischen Verbreitungsschwerpunkte der jeweiligen Arten untersucht wurden, an denen das Auftreten der Art zu erwarten ist.

Bei gemeinsamer Betrachtung aller drei Metallfraktionen (gesamt, gelöst und bioverfügbar) ergeben sich in insgesamt 35 von 108 Kombinationen signifikante Zusammenhänge zu Vorkommen oder Fehlen von Fisch- bzw. Rundmaularten. In 3 dieser Fälle (sämtlich in der Fraktion „bioverfügbar“) beträgt die Differenz der Oberen Whisker weniger als 10 % des Oberen Whiskers der Absenzdaten und ist daher wenig aussagekräftig.

Zur Ableitung von Schwellenwerten für ein „ökologisch angemessenes Vorkommen“ einer Art hat diese Untersuchung insgesamt jedoch nur eine eingeschränkte Aussagekraft, da der Obere Whisker der Präsenz-Messstellen nichts darüber aussagt, in welcher Individuendichte die Fisch-/Rundmaulart bei dieser Metallkonzentration noch vorkommen kann.

Auch ein Vergleich der Oberen Whisker der Präsenz-Messstellen mit einer der in Kapitel 4.6 abgeleiteten Klassengrenzen bzw. Schwellenwerte ist nicht aussagefähig, da sich die beiden Grundgesamtheiten unterscheiden, denn bei der Präsenz-Absenz-Betrachtung wurden alle Befischungen ausgewertet, denen chemische Messwerte zugeordnet werden konnten. Dagegen wurden bei der Analyse der klassifizierten Abundanzen nur solche Fälle berücksichtigt, bei denen die betrachtete Art auch vorkam.

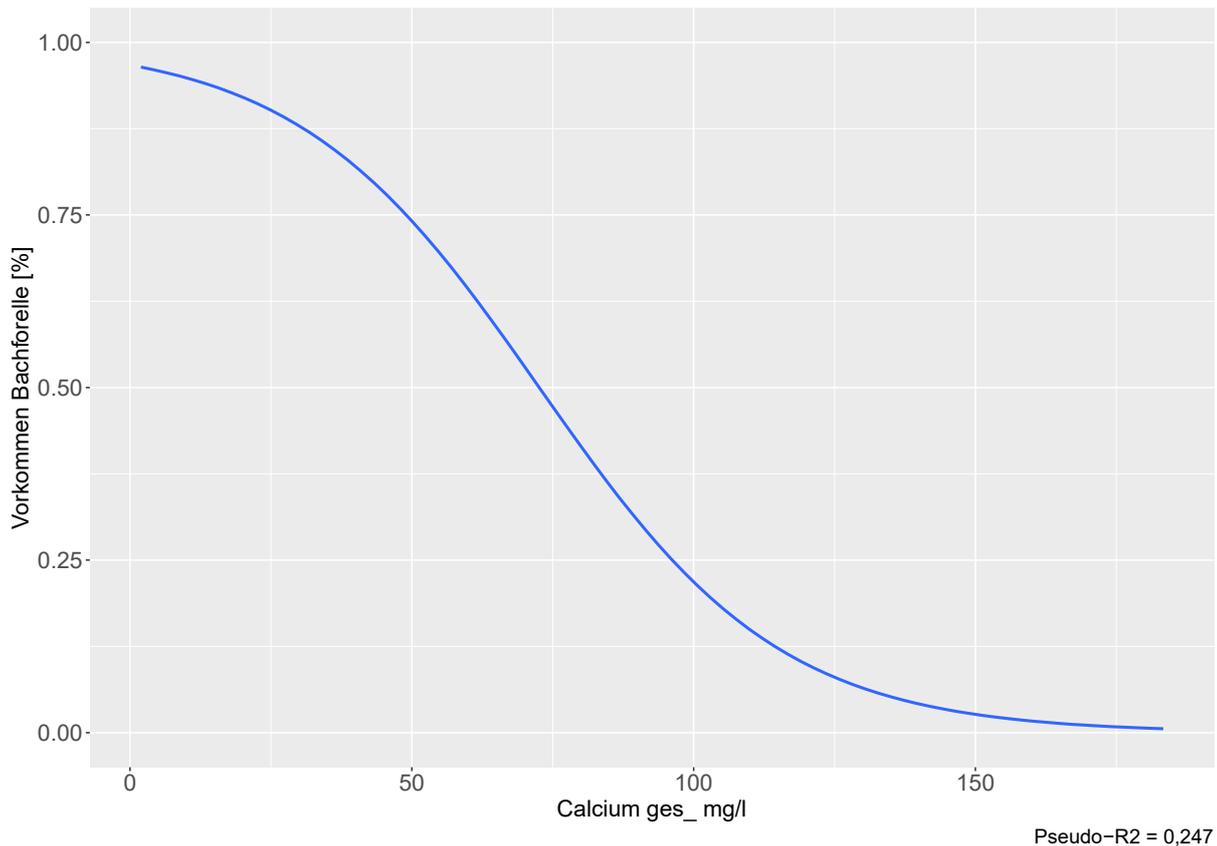
## 4.5 Statistische Auswertungen der Präsenz-Absenz-Daten (1/0): B. Binomiale Logistische Regressionen

### 4.5.1 Methodik

Mit den Präsenz-Absenz-Daten (1/0) wurden **Binomiale Logistische Regressionen** durchgeführt, mit denen sich die durch die verschiedenen Parameterkonzentrationen bedingten Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten bzw. Nicht-Auftreten einer Fisch-/Rundmaulart ermitteln lassen. Die Stärke des Zusammenhangs kann mittels eines sogenannten „Pseudo-Bestimmtheitsmaßes“ oder „Pseudo- $R^2$ “ beschrieben werden, wobei im Unterschied zu dem „echten“ Bestimmtheitsmaß der linearen Regression hier bereits Werte ab 0,1 einen deutlichen Zusammenhang indizieren.

So zeigt sich z.B. ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Calcium-Konzentration und dem Auftreten von Bachforellen (Abbildung 12). Ab einer Gesamt-Calcium-Konzentration von etwa 75 mg/l liegt die Wahrscheinlichkeit eines Bachforellenfundes unter 50 %, ab etwa 100 mg/l liegt sie unter 25%.

Das Pseudo-Bestimmtheitsmaß im Beispiel liegt bei 0,25.

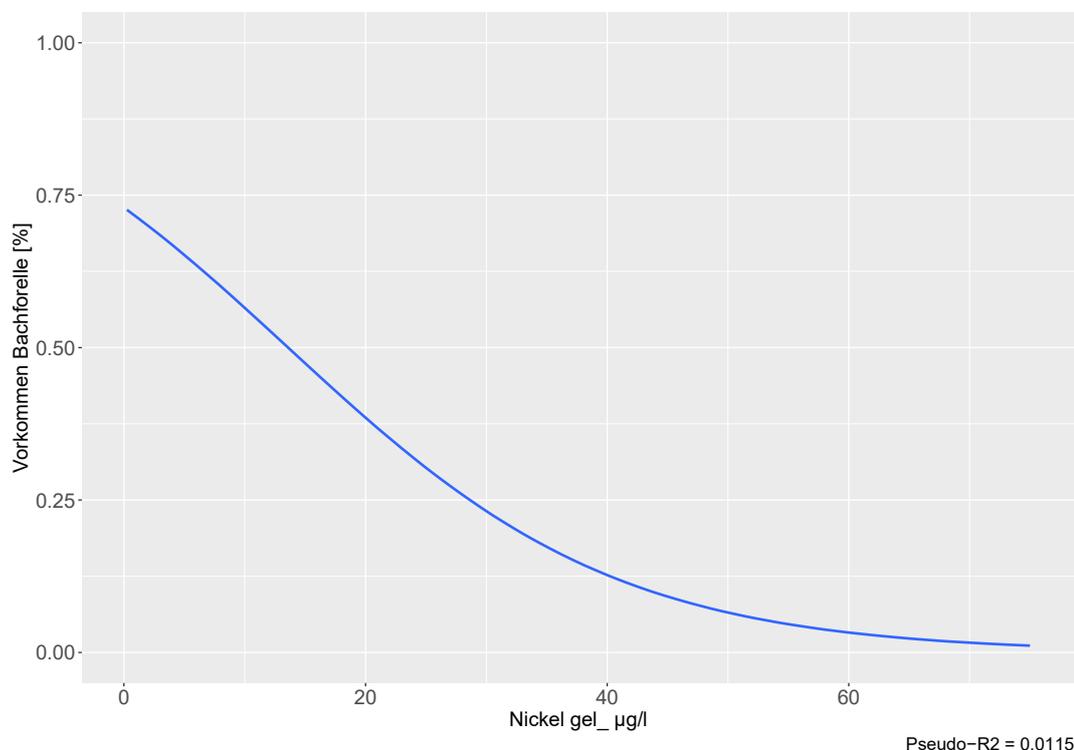


**Abbildung 12: Logistische Regression zwischen Calcium Gesamt-Konzentration und dem Vorkommen von Bachforellen**

Bei Signifikanz und ausreichender Stärke des Zusammenhangs kann die Logistische Regression dazu herangezogen werden, Stoffschwellenwerte abzuleiten, bei deren Verletzung die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Art unterhalb einer bestimmten, je nach Anwendungszweck des Schwellenwertes höher oder niedriger anzusetzenden, statistischen Wahrscheinlichkeit liegt. Für Gewässer, in denen die betrachtete Art zu den Leitarten (bzw. typspezifischen Arten, bei Äsche und Bachneunauge) zählt (wie es bei den vorliegenden Auswertungen durch die Messstellenauswahl immer der Fall ist), muss die Wahrscheinlichkeit mit einem Zielwert deutlich über 0,5 festgelegt werden, wenn der dazu korrespondierende Schwellenwert dazu dienen soll, das Vorkommen der Art in ihrem potenziell natürlichen Lebensraum mit hinreichender Sicherheit gegenüber den betrachteten Stoffbelastungen zu gewährleisten. Mit welcher Individuendichte die Art bei Einhaltung eines derartigen Schwellenwertes vorkommen kann, lässt sich auf diese Weise aber nicht bestimmen. Außerdem kann aus einer fehlenden Signifikanz und/oder einer geringen Stärke der Logistischen Regressionsbeziehung nicht im Umkehrschluss gefolgert werden, dass der betrachtete Stoffparameter oberhalb einer bestimmten Konzentration nicht doch das Vorkommen der Art limitieren kann, nur weil dieser Wert nicht ableitbar ist.

## 4.5.2 Ergebnisse

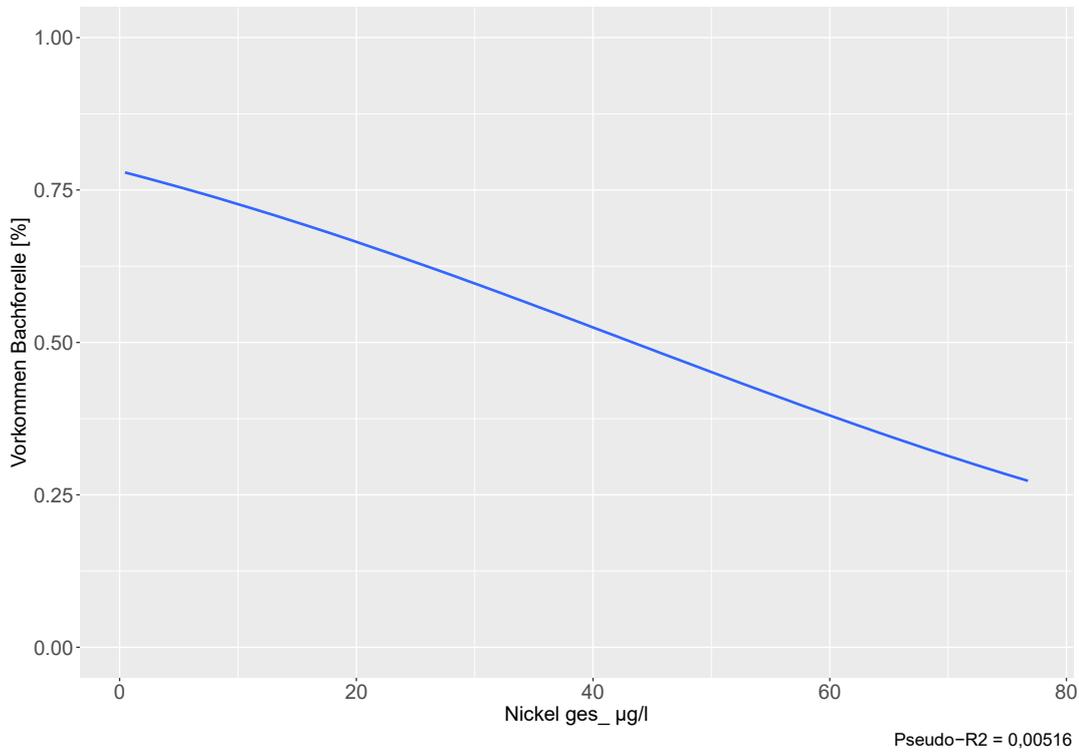
Es ergeben sich nur im Fall von Nickel erkennbare Zusammenhänge mit dem Vorfinden der Bachforelle (Nickel<sub>gel</sub>) und der Schmerle (Nickel<sub>ges</sub>), jeweils allerdings mit sehr geringen Pseudo-R<sup>2</sup> << 0,1 (Abbildung 13 und Abbildung 14). Ergebnisse sind in den Anlagen 4 a und b dargestellt.



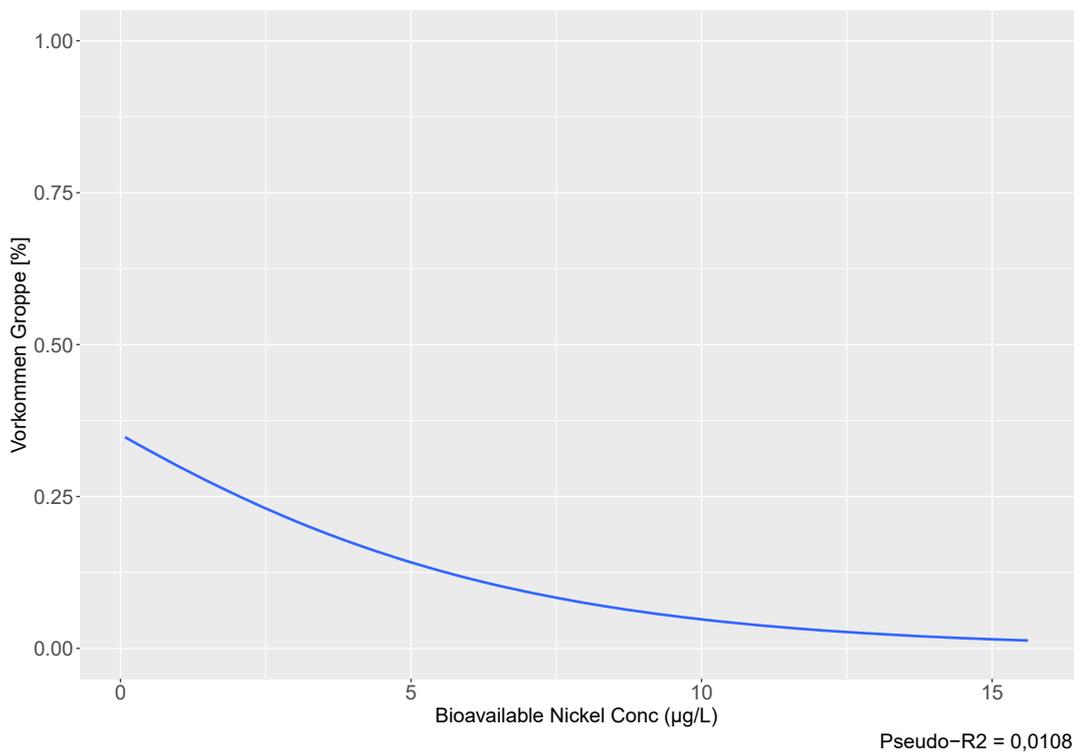
**Abbildung 13: Logistische Regression zwischen Nickel (gelöst)-Konzentration und dem Vorkommen von Bachforellen**

Zusätzlich wurden entsprechende Untersuchungen mit den anhand des Biomet-Tools berechneten bioverfügbaren Anteilen der Metalle Blei, Kupfer, Nickel und Zink durchgeführt.

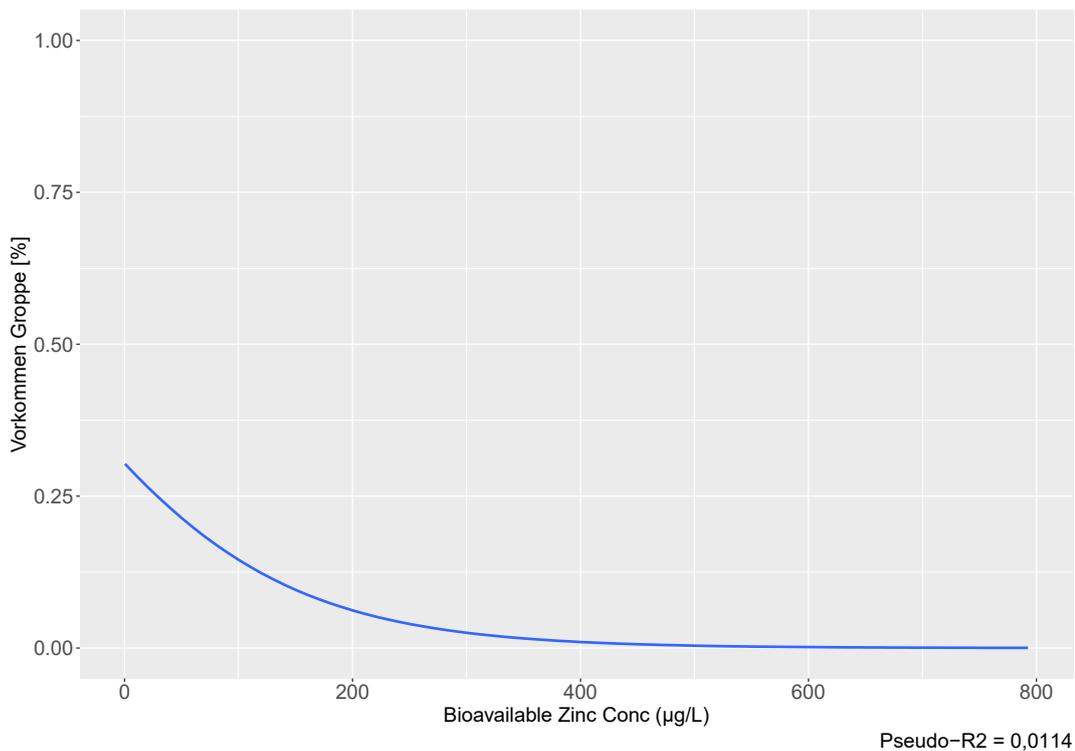
Auch hier ergaben sich nur in drei Fällen erkennbare Zusammenhänge, und zwar für Nickel (Groppe) und für Zink (Groppe und Schmerle), ebenfalls mit sehr geringen Pseudo-R<sup>2</sup> << 0,1 (Abbildung 15 bis Abbildung 17).



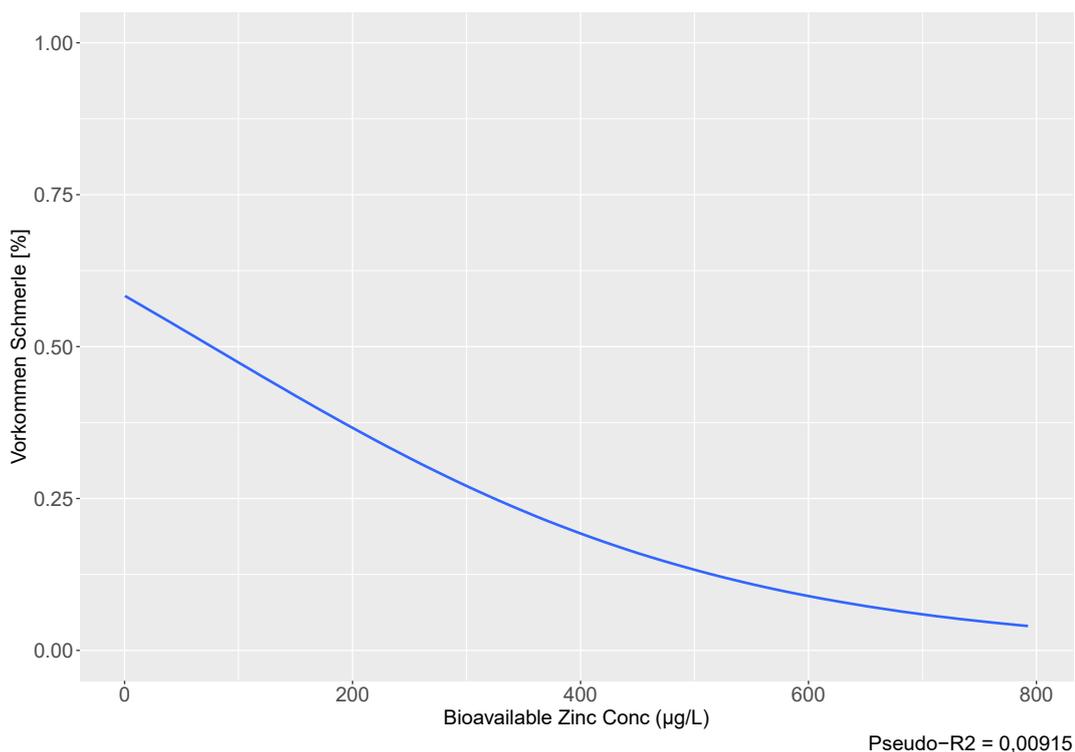
**Abbildung 14: Logistische Regression zwischen Nickel (gesamt)-Konzentration und dem Vorkommen von Bachforellen**



**Abbildung 15: Logistische Regression zwischen bioverfügbarem Nickel und dem Vorkommen von Groppe**



**Abbildung 16: Logistische Regression zwischen bioverfügbarem Zink und dem Vorkommen von Groppen**



**Abbildung 17: Logistische Regression zwischen bioverfügbarem Zink und dem Vorkommen von Schmerlen**

## Fazit

Die Binomialen Logistischen Regressionsanalysen, die für die Präsenz-Absenz-Fallgruppen der verschiedenen untersuchten Fisch-/Rundmaularten und Metall-Parameter durchgeführt wurden, können somit zur Klärung der Projektfragestellungen kaum etwas beitragen, da die ermittelbaren Regressionsmodelle keine Zusammenhänge oberhalb des Signifikanzmaßes bzw. mit einem ausreichend hohen Pseudo-Bestimmtheitsmaß aufweisen. Dies kann daran liegen, dass die Metallgehalte nur in wenigen Fällen so hoch sind, dass sie zum kompletten Ausfall einer Art führen.

## 4.6 Statistische Auswertungen der Abundanzdaten der Fisch-/Rundmaularten: A. Box-Whisker-Plots und Regressionen über die Oberen Whisker

### 4.6.1 Methodik

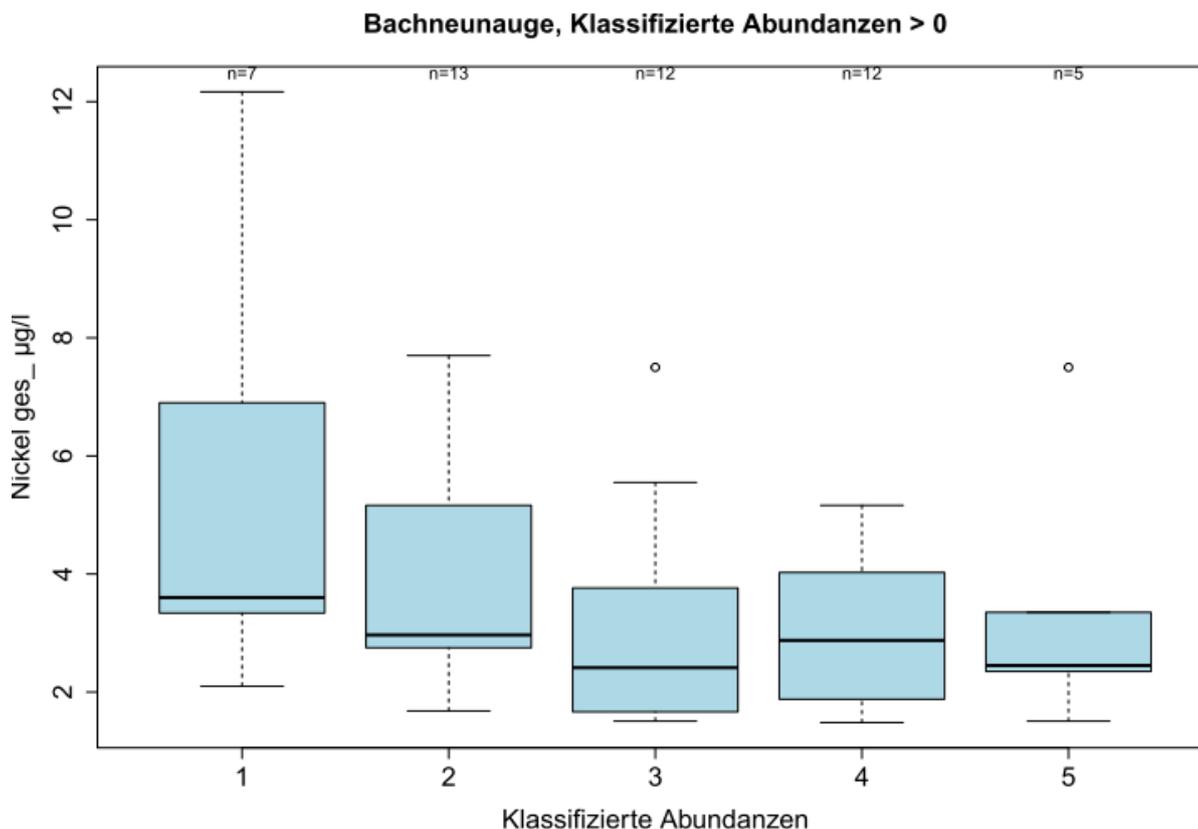
Für die Box-Whisker-Plot-Darstellungen der Fisch-/Rundmaulabundanzdaten mussten diese zunächst in Abundanzklassen unterteilt werden, bevor auch für diese differenzierteren Fisch-/Rundmauldaten Diagramme mit jeweils einem Box-Whisker-Plot pro Abundanzklasse erstellt werden konnten.

Dazu wurde eine fünfstufige artspezifische Abundanzklassifizierung basierend auf einheitlichen Perzentilen (12,5%, 37,5%, 63,5% und 87,5%) aller ausgewerteten Messstellen einer Art als Klassenobergrenzen gewählt (mit Artnachweisen >0 als Untergrenze der Klasse 1). Der Nachweis mindestens eines Individuums einer jeweiligen Art wurde im Unterschied zu den auf die Ableitung der prinzipiell vorkommensermöglichenden Konzentrationsschwellen ausgelegten Auswertungen der Präsenz-Absenz-Daten gewählt, um zu prüfen, ob die jeweils betrachteten Stoffparameter unterhalb dieser Schwellen einen systematischen Einfluss (und wenn ja, welchen) auf die Abundanz der untersuchten Arten haben. Auf diese Weise sollen statistische Verzerrungen in Folge überproportional hoher Absenz-Fallzahlen vermieden werden, die die unterste der fünf Abundanzklassen dominieren könnten und dazu führen würden, dass diese Abundanzklasse im Vergleich zu denen der anderen Klassen viel höhere Fallzahlen hätte. In dem Zusammenhang sei auch darauf hingewiesen, dass dadurch, dass die befischten Gewässerflächen deutlich kleiner als die Bezugsgröße eines Hektars sind und daher zwischen einer Mindestanzahl von Individuennachweisen pro Hektar und keinem Artnachweis keine Zwischenwerte möglich sind. Die abgeleiteten Obergrenzen der Klassen 1 bis 4 sind in Individuen pro Hektar für die sechs betrachteten Fisch-/Rundmaularten in Tabelle 23 dargestellt.

**Tabelle 23: Artspezifische, flächenbezogene Abundanzklassifizierung anhand von Perzentilen zur Abgrenzung der Obergrenzen der Klassen 1 bis 4; Mindestindividuenzahl/Hektar der Klasse 1: >0**

Art	Klassengrenze 1 / 2 12,5-Perzentil Anzahl/ha	Klassengrenze 2 / 3 37,5-Perzentil Anzahl/ha	Klassengrenze 3 / 4 62,5-Perzentil Anzahl/ha	Klassengrenze 4 / 5 87,5-Perzentil Anzahl/ha
Äsche	79	211	417	921
Bachforelle	533	2667	6400	15778
Bachneunauge	154	572	1333	4103
Elritze	265	1667	5847	15816
Groppe	278	858	1829	5122
Schmerle	154	528	1601	5312

Die Oberen Whisker der Box-Whisker-Plots (s. Abbildung 18) begrenzen für die jeweilige Abundanzklasse die vorgefundenen Metallkonzentrationen – abzüglich etwaiger „Ausreißer“. Nach McGill und Tukey (1978) trennen die Oberen Whisker die Ausreißer einer Verteilung dann am besten, wenn sie als 1,5-faches des Interquartilabstandes definiert werden. Sie beschreiben also kein festes Perzentil (z.B. 95-Perzentil), sondern sind zu einem gewissen Grad dynamisch, auch wenn sie, wie von Halle und Müller (2014) gezeigt, „in der Nähe“ des obersten 5-Perzentils liegen.



**Abbildung 18: Beispiel eines Box-Whisker-Plots: Nickel (gesamt) gegen die 5 Abundanzklassen des Bachneunauges**

Vor dem Hintergrund, dass die ausgewerteten Konzentrationsdaten und Fisch-/Rundmaulabundanzen ausschließlich auf Freilandmessungen basieren, und mit den Befischungen stets nur die ökosystemaren Gesamtkonsequenzen für die Populationsstärken der einzelnen Arten abgebildet werden können, wurde mit der Regressionsmethode über die Oberen Whisker der Fischabundanzklassen ein Verfahren gewählt, dass auf die höchsten Konzentrationswerte je Klasse ausgelegt ist, bei der die jeweilige Fischabundanzklasse also gerade noch auftreten kann und die betrachtete Stoffbelastung zum abundanzlimitierenden Faktor wird. Erfahrungen, u.a. aus dem zitierten LAWA-Vorhaben haben gezeigt, dass dieser Ansatz daher für die Ableitung von Schwellenwerten für ökosystemar wirkende Stoffbelastungen besonders gut geeignet ist.

Um anhand dieser Diagramme parameter- und fisch-/rundmaulartspezifische Konzentrationsschwellenwerte für die einzelnen Abundanzklassen abzuleiten, wurden Regressionsfunktionen (mit dem Zweck der Interpolation) über die Oberen Whisker gelegt.

Da es weniger um die Aufstellung von Regressionsmodellen, sondern vielmehr um möglichst gute Interpolationen geht, wurde trotz der geringen Zahl an Datensätzen (Anzahl der Abundanzklassen: 5) sowohl ein lineares als auch ein nicht-lineares Modell in Form einer Potenzfunktion berechnet. Aufgrund der komplexen ökosystemaren Funktionsbeziehungen innerhalb der Gewässer lässt sich keine fachlich hinreichend eindeutige Auswahl für eine der beiden Funktionen treffen. Voraussetzungen für eine Ableitung von Schwellenwerten waren jedoch ein plausibler Verlauf der Oberen Whisker (Abnahme der oberen Metallkonzentrationen mit steigender Abundanz), ein bestimmtes Mindestsignifikanzmaß und ein hinreichend hohes Bestimmtheitsmaß des jeweiligen Regressionsmodells einer Paarung, dass die Beziehung am besten beschreibt. So wurde festgelegt, dass der p-Wert einer Linear- oder Potenzregression über die Oberen Whisker der fisch-/rundmaulartspezifischen Abundanzklassen mit negativer Steigung (geringer werdende Konzentrationen bei steigenden Abundanzen) maximal  $<0,1$  betragen darf und dass jeweils diejenige Regressionsfunktion mit den besten Signifikanz- und Bestimmtheitswerten verwendet wird. Die Mindestanforderung entspricht einer unter zehnpromtigen Wahrscheinlichkeit, dass die Regressionsbeziehung auf einen Zufall zurückzuführen ist. Damit ist der Zusammenhang statistisch zwar nicht mehr als signifikant zu bezeichnen, aber zumindest noch als Trend einzustufen. Liegt der p-Wert dagegen bei Werten  $<0,05$  (5% Zufallswahrscheinlichkeit), kann bereits von einer statistisch signifikanten Beziehung ausgegangen werden und bei einem p-Wert  $<0,005$  (0,5% Zufallswahrscheinlichkeit) ist der Zusammenhang sogar als statistisch hoch signifikant zu qualifizieren.

#### 4.6.2 Ergebnisse

Die Gesamtzahl der mittels linearer und nicht-linearer Regressionen analysierten Metall-Rundmaul-/Fischpaarungen resultiert aus den 8 für das Projekt ausgewählten Metallen (Arsen, Blei, Cadmium, Kupfer, Nickel, Quecksilber, Uran und Zink), für die jeweils 3 verschiedene Fraktionen (gelöst, gesamt, partikulär) zuzüglich der bioverfügbaren Fraktionen von 4 Metallen (Blei, Kupfer, Nickel und Zink) und der Mischungstoxizität RQ Mix gegen 6 Fisch-/Rundmaularten (Äsche, Bachforelle, Bachneunauge, Elritze, Groppe und Schmerle) untersucht wurden. Somit wurden  $(8 * 3 + 4 + 1) * 6 = 174$  Paarungen mit jeweils einer Linear- und einer Potenzregression über die Oberen Whisker analysiert, was zu insgesamt  $2 * 174 = 348$  Regressionsberechnungen über die Oberen Whisker der Abundanzklassen führte.

Davon beläuft sich die Zahl derjenigen Regressionen, die die für die Schwellenwertableitung definierten Mindestanforderungen an die Signifikanz ( $p < 0,1$ ) und an die Steigungsrichtung (negativ) der Regressionsfunktionen erfüllen, auf 59 Fälle (25 Linearregressionen und 34 Potenzregressionen). Das sind also 17% von 348 Regressionen (siehe Anlagen 5a-c und 6a-c).

12 Linearregressionen und 11 Potenzregressionen, die die Signifikanzanforderung von  $p < 0,1$  erfüllen, weisen gegenteilige (positive) Steigungsrichtungen auf, weshalb diese Regressionen ebenso wenig für die Schwellenwertableitung verwendbar sind, wie alle anderen, die die Anforderungen nicht vollständig erfüllen. Diese 23 Fälle entsprechen 6,6% aller untersuchten Regressionen. Für diese Fälle mit positiver Steigung kann auch nicht im Sinne eines Umkehrschlusses gefolgert werden, dass die jeweilige Metallkonzentration einen ökologischen Fördereffekt für die Populationsstärke der betrachteten Fisch-/Rundmaulart haben muss (z.B. weil ein Nahrungskonkurrent oder ein Predator aufgrund seiner stärkeren Empfindlichkeit gegenüber dem betreffenden Metall in seiner Abundanz reduziert wird und dadurch die betrachtete Art größere Individuendichten erreichen kann), da für einen derartigen Effekt nicht die Oberen, sondern die Unteren Whisker als limitierend wirkende Randkonzentrationen zu betrachten wären, die mit zunehmender Abundanz ansteigen müssten. Im untersuchten Datensatz treten derartige Fälle (mit hinrei-

chender Signifikanz der Regressionen über die unteren Whisker) aber nicht auf, was als Indiz dafür angesehen werden kann, dass solche indirekten ökosystemaren Fördereffekte bei den untersuchten Metallen und Fisch-/Rundmaularten keine dominante Rolle spielen.

## **Fazit**

Die auf den Boxplots von Abundanzklassen basierenden Regressionsanalysen über die Oberen Whisker (im Folgenden als Whisker-Regressionmethode bezeichnet) erwiesen sich als am besten geeignet, um konkrete Größenordnungen limitierender Metallkonzentrationen für definierte Individuendichteklassen der verschiedenen Fisch-/Rundmaularten ableiten zu können. Dazu wurden Linear- und Potenz-Regressionen über die Oberen Whisker der Abundanzklassen gelegt und jeweils diejenigen Regressionsfunktionen mit den besten Signifikanzniveaus und Bestimmtheitsmaßen zur Schwellenwertableitung verwendet.

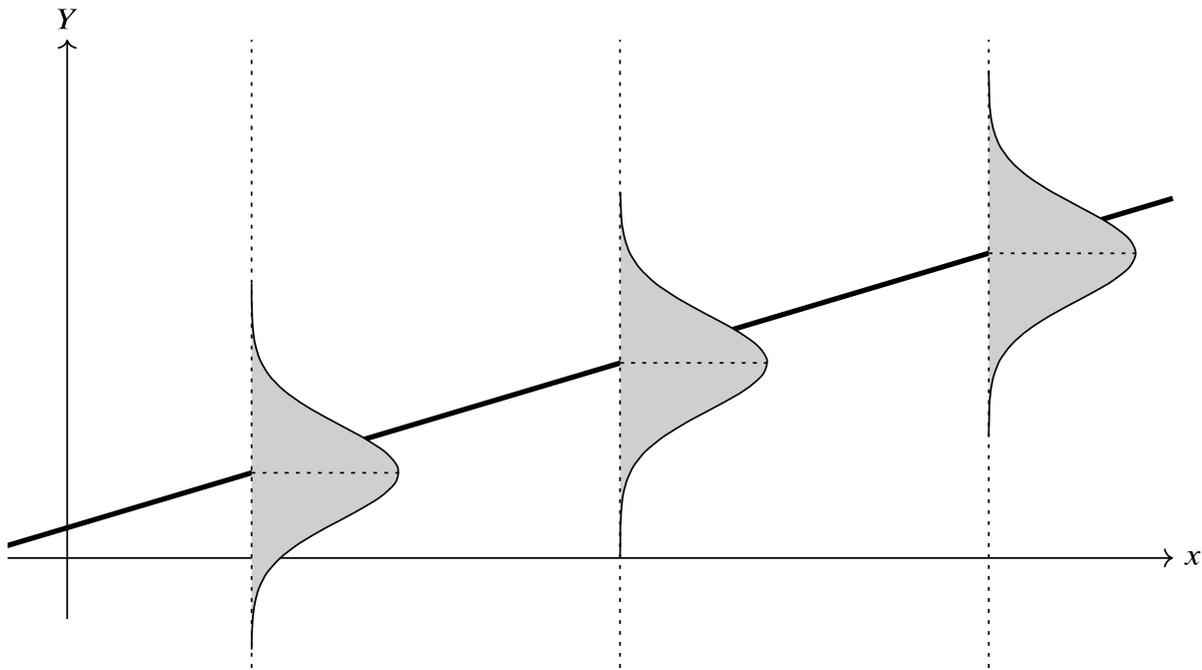
Die Verwendung der berechneten bioverfügbaren Metallkonzentrationen bei den beschriebenen Auswertungsverfahren entsprach mit Ausnahme einiger weniger Fälle, nicht den Erwartungen höherer statistischer Signifikanzen und Erklärungsanteile. Insgesamt war bei den meisten untersuchten Fisch-/Rundmaularten und Metallen eher das Gegenteil der Fall (d.h. keine belastbaren oder sogar gegenteiligen Beziehungen zwischen den Metallkonzentrationen und den Fisch-/Rundmaulabundanzen).

Dagegen zeigten die durch Differenzberechnungen aus den Gesamtmetallfraktionen und den Gelöstfraktionen ermittelten partikulär gebundenen Metallfraktionen häufig signifikante Zusammenhänge zwischen den Metallkonzentrationen und den Artabundanzen.

## **4.7 Statistische Auswertungen der Abundanzdaten der Fisch-/Rundmaularten: B. Quantile Regressionen**

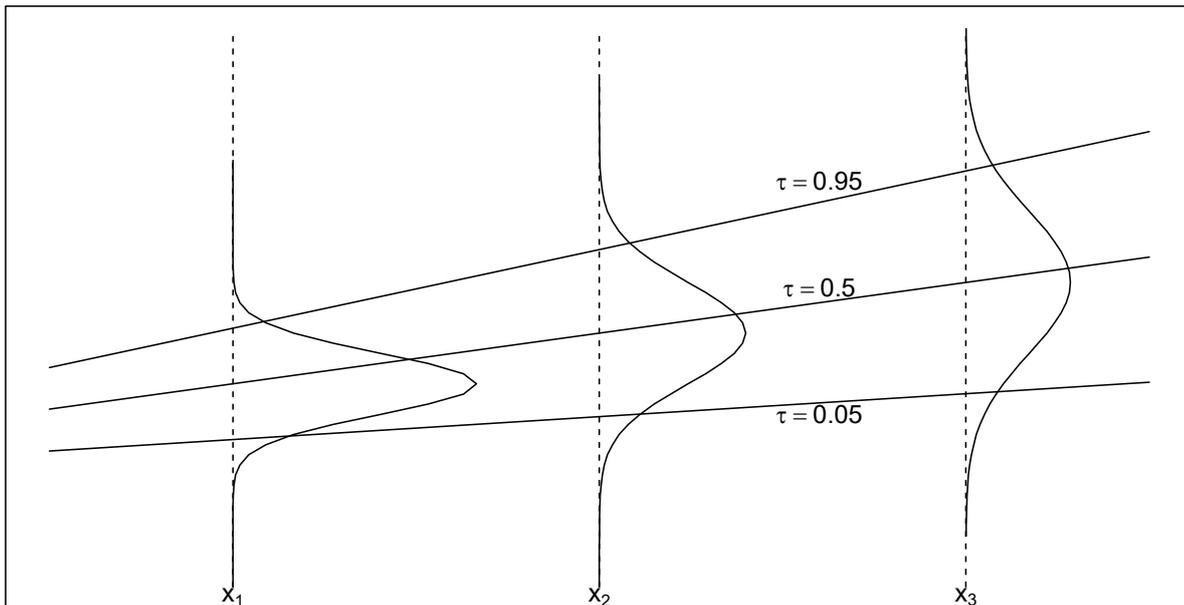
### **4.7.1 Methodik**

Für die Fisch-/Rundmaulabundanzdaten wurden außerdem Quantile Regressionen berechnet. Bei diesen Regressionsmodellen werden nicht Erwartungswerte, sondern beliebige Quantile (z.B. 5-Perzentil, Median, 90-Perzentil) geschätzt. Während das als „lineare Regression“ bekannte Verfahren eine Gerade an die bedingten Mittelwerte einer Verteilung approximiert, modelliert die Quantile Regression beliebige bedingte Perzentile. Der Unterschied zwischen den Verfahren liegt daher nicht im Modell – auch der hier verfolgte Ansatz ist linear –, sondern im Minimierungsansatz zur Annäherung des Modells an die Daten. In der Abbildung 19 (nach Meier, 2020) ist schematisch für drei ausgewählte Stellen dargestellt, wie die Regressionsgerade an die Mittelwerte der Daten angenähert wird. Die Grundvoraussetzungen sind Linearität, Normalverteilung der Daten (da sonst der Mittelwert keine sinnvolle Zielgröße darstellt) und Homogenität der Residuen (Trendfreiheit der Fehler). Bei einem linearen Quantilen Regressionsansatz „zielt“ das Modell nun nicht auf den Mittelwert, sondern auf ein beliebiges Quantil in der Verteilung. Damit entfällt die Anforderung der normalverteilten Fehler. Schlittgen (2013) erläutert den Nutzen der Quantilen Regression: *„Allgemein ist die Quantilsregression von Nutzen, wenn eher die Randbereiche von Verteilungen von Bedeutung sind.“*



**Abbildung 19: Schematische Darstellung des optimierenden Prozesses bei der einfachen linearen Regression**

Im Vergleich dazu zeigt Abbildung 20 ebenfalls für drei verschiedene Stellen die Regressionsgeraden, die an das 5-Perzentil, den Median und das 95-Perzentil angepasst werden (nach Schlittgen, 2013).



**Abbildung 20: Schematische Darstellung des optimierenden Prozesses bei der Quantilen Regression**

Im hier verfolgten Ansatz wurden – in Analogie zu den Auswertungen der Box-Whisker-Plots über klassifizierte Abundanzen – die jeweiligen hektarbezogenen Individuendichten (Abundanzen) als „unabhängige“ und die Metall-/bzw. Begleitparameterkonzentrationen als „abhängige“ Variablen eingesetzt.

**Dies ist nicht inhaltlich zu verstehen, denn natürlich sind die Stoffkonzentrationen nicht abhängig von den Fischbefunden. Es soll vielmehr eine Vergleichbarkeit zu dem klassenbasierten Ansatz der Box-Whisker-Plots erreicht werden, indem Modelle berechnet werden, die die Oberen Perzentile von Stoffkonzentrationsverteilungen für bestimmte Abundanzen beschreiben.**

Dass das Regressionsmodell dadurch „gespiegelt“ ist (y und x sind gegenüber der angenommenen Abhängigkeitsbeziehung vertauscht), ist für das Ergebnis irrelevant, da die Modelloptimierung nicht quadratisch nach der Varianz (Gauß'sche Fehlerquadratmethode), sondern linear nach dem Fehler erfolgt. Das lineare Modell selbst wird anhand beidseitig logarithmierter Werte aufgebaut. Als Ziel-Quantile wurden der Median sowie 80-, 90-, 95- und 99-Perzentil gewählt. Auch aus den Modellen der Quantilen Regression können nach Festlegung von Ziel-Quantilen (z.B. 80-, 90-, 95- oder 99-Perzentil) Schwellenwerte für zu definierende Häufigkeiten abgeleitet werden.

Das lineare Modell selbst wird anhand beidseitig logarithmierter Werte aufgebaut, so dass die Gleichungen in ihrer Struktur mit den für die Interpolation der Oberen Whisker verwendeten Potenzfunktionen vergleichbar sind, wie die folgende Umformung zeigt:

Die dabei verwendeten Potenzfunktionen haben die Struktur  $y = a \times x^z$ .

Logarithmieren beider Seiten ergibt  $\log(y) = \log(a \times x^z)$ . Dies lässt sich nach den Rechenregeln für Logarithmen umformen zu  $\log(y) = \log(a) + z \times \log(x)$  oder  $\log(y) = z \times \log(x) + const$ , was einem linearen Regressionsmodell bei beidseitig logarithmierten Werten entspricht.

Zur Bewertung der Güte der Modelle werden Pseudo-Bestimmtheitsmaße nach McFadden (1974) bestimmt. Das McFadden Pseudo  $R^2$  vergleicht die logarithmische Likelihood (Log-Likelihood) des vollständigen Modells (L) mit der Log-Likelihood des Modells mit nur dem Achsenabschnitt ( $L_0$ , dem Nullmodell):  $R^2 = 1 - \frac{\ln(L)}{\ln(L_0)}$ . Es kann Werte zwischen 0 und 1 aufweisen, Modellzusammenhänge gelten jedoch schon bei Werten oberhalb 0,1 als vergleichsweise stark. Die Signifikanz wird nach Koenker (1994) mittels Bootstrapping ermittelt. Es werden p-Werte ermittelt, die mit einem gegebenen Signifikanzniveau (üblicherweise 0,05) verglichen werden.

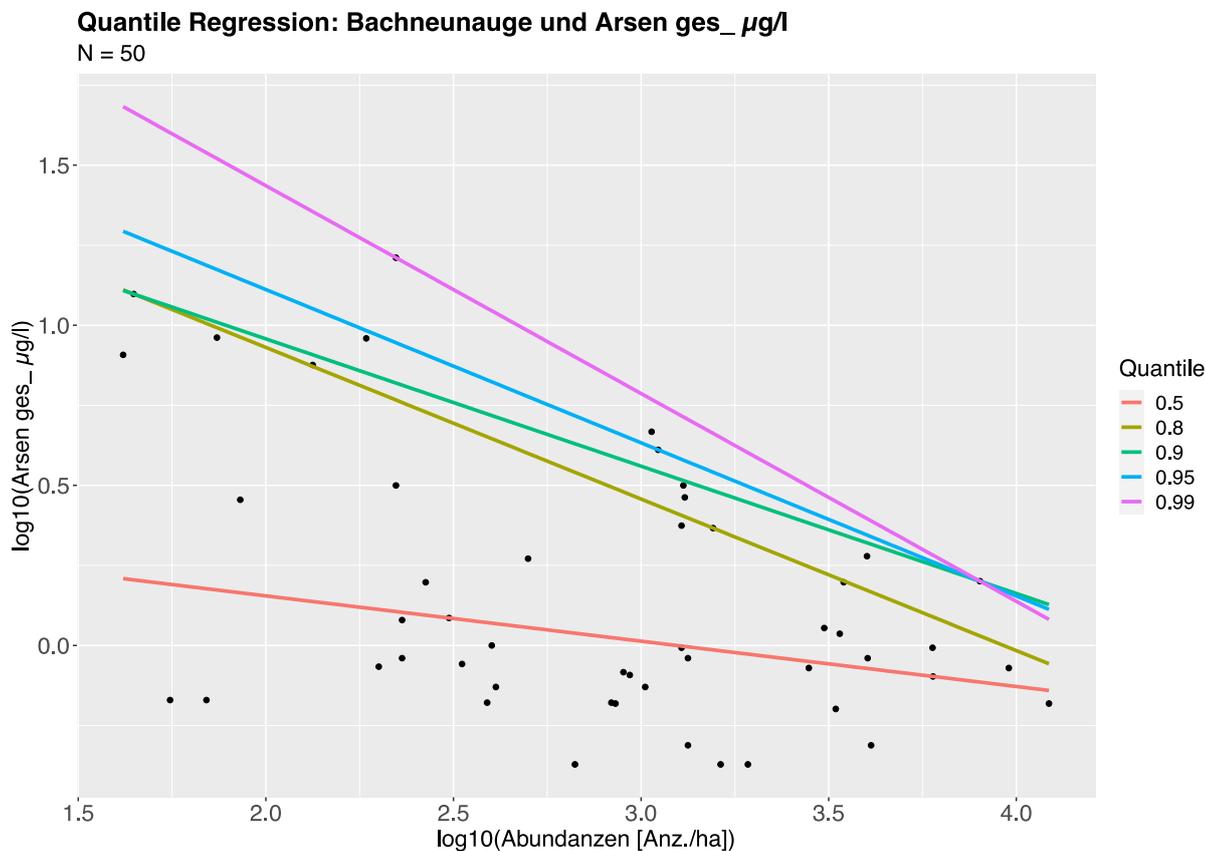
#### 4.7.2 Ergebnisse

Die Abbildung 21 zeigt beispielhaft die Quantile Regression der Befischungsdichten von Bachneunaugen gegen die  $Asen_{gel}$ -Konzentration. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es sich um beidseitig logarithmierte Darstellungen handelt. Die Farbkodierung der verschiedenen Ziel-Quantile ist in Tabelle 24 dargestellt. Die gesamten Ergebnisse zu den durchgeführten Quantilen Regressionen sind in den Anlagen 7 a und b (Metalle), 8 a und b (Begleitparameter), 9 (Boxplots zu Q.R. Metalle), 10 (Boxplots zu Q.R. Begleitparameter) und 11 a bis d (doppelt logarithmierte quantile Regression) dargestellt.

**Tabelle 24: Farbkodierung der Quantile**

Quantil	Farbe
Median	Lachsfarben
80-Perzentil	Oliv
90-Perzentil	Grün
95-Perzentil	Blau
99-Perzentil	Magenta

In der Abbildung 21 ist der Median der Arsengehalte (lachsfarben) indifferent bzgl. der relativen Häufigkeiten. Dagegen zeigen 80-, 90-, 95- und 99-Perzentil deutlich abnehmende Tendenzen mit zunehmender Größe der Fundzahlen. Allerdings nimmt die Steigung (bzw. das „Gefälle“) vom 80-Perzentil bis zum 99-Perzentil nicht mehr sonderlich stark zu. Dies deutet an, dass der Effekt, den das in diesem Fall betrachtete  $\text{Arsen}_{\text{ges}}$  auf die Abundanz der Bachneunaugen hat, bereits im Bereich der 80-Perzentile seine volle Wirkung entfaltet.



**Abbildung 21: Quantile Regression der Befischungsdichte von Bachneunauge und der Konzentration von Arsen (gesamt). Doppelt-logarithmische Darstellung.**

### Fazit

Die Quantilen Regressionsanalysen, die in der gewählten Ausprägung als kontinuierliche Variante der Whisker-Regressionmethode angesehen werden können, zeigten für die oberen betrachteten Quantile in ca. 15 bis 30% der Fälle starke und statistisch signifikante Zusammenhänge zwischen den nachgewiesenen Individuendichten der ausgewerteten Fisch-/Rundmaulartenvorkommen und den untersuchten Metallkonzentrationen. Die Tabelle 25 zeigt dies in der Übersicht. Relevant ist auch, dass die Anzahl der Fälle mit höheren Quantilen zunimmt. Dies ist ein weiterer Hinweis darauf, dass die jeweilige Metallkonzentration in diesen Bereichen limitierend wirkt.

**Tabelle 25: Anteile der Fälle mit starken und statistisch signifikanten Quantilen Regressionen zwischen Individuendichten und Metallkonzentrationen**

Quantil	Raumbezug	Pseudo-R <sup>2</sup> > 0,1
0,8	Fläche	16 von 112
0,9	Fläche	20 von 112
0,95	Fläche	28 von 112
0,99	Fläche	32 von 112

Um die Ergebnisse der in Kapitel 4.6 durchgeführten Auswertungen zu validieren, wurden exemplarisch diejenigen Fälle, bei denen die 80-Perzentile eine starke und statistisch signifikante Beziehung zeigen, mit den aus den Box-Whisker-Plots hergeleiteten Schwellenwerten verglichen. Dazu wurde anhand der Koeffizienten der Regressionsgeraden für die jeweiligen Grenzabundanz (12,5-Perzentil etc.) die jeweilige Metallkonzentration bestimmt. Tabelle 26 zeigt diese Fälle. Die berechneten Metallkonzentrationen sind in den Spalten „KI 1 / 2“, „KI 2/3“ usw. dargestellt („Klassengrenze 1 / 2“ etc.).

**Tabelle 26: Fälle mit plausibler Steigung und starken und statistisch signifikanten Quantilen Regressionen zwischen Individuendichten und Metallkonzentrationen bei 80-Perzentilen**

Art	Parameter	Schnittstelle	Steigung	p-Wert	Pseudo-R <sup>2</sup>	Fallzahl	KI 1/2	KI 2/3	KI 3/4	KI 4/5
Äsche	Kupfer gel [µg/l]	1,00	-0,19	0,01	0,12	52	4,3	3,6	3,1	0,7
Bachneunauge	Arsen gel [µg/l]	1,00	-0,30	0,03	0,11	97	2,2	1,5	1,2	0,7
Bachneunauge	Arsen ges [µg/l]	1,88	-0,47	<0,01	0,26	50	6,9	3,7	2,5	0,3
Bachneunauge	Arsen part [µg/l]	1,36	-0,42	0,01	0,10	50	2,8	1,6	1,1	0,4
Bachneunauge	Blei ges [µg/l]	1,51	-0,43	<0,01	0,16	50	3,6	2,0	1,4	0,4
Bachneunauge	Blei part [µg/l]	1,52	-0,46	<0,01	0,15	50	3,2	1,7	1,2	0,4
Bachneunauge	Cadmium ges [µg/l]	1,18	-0,62	0,02	0,15	50	0,7	0,3	0,2	0,3
Bachneunauge	Zink ges [µg/l]	2,84	-0,49	0,04	0,15	50	60	32	21	0,5
Elritze	Cadmium ges [µg/l]	2,39	-0,76	<0,01	0,15	123	3,5	0,9	0,3	0,2
Elritze	Zink ges [µg/l]	4,18	-0,68	<0,01	0,16	123	345	99	42	21
Elritze	Zink part [µg/l]	3,36	-0,59	<0,01	0,14	123	86	29	14	8

In Tabelle 27 bis Tabelle 30 werden nun die in Kapitel 4.6 mit hinreichender Signifikanz abgeleiteten Klassengrenzen, mit denen aus der Quantilen Regression verglichen.

**Tabelle 27: Aus Box-Whisker-Plots abgeleitete Schwellenwerte für das Bachneunauge**

Parameter	KI 1/2	KI 2/3	KI 3/4	KI 4/5
Arsen gel [ $\mu\text{g/l}$ ]	2,1	1,3	0,96	0,76
Arsen ges [ $\mu\text{g/l}$ ]	6,99	3,54	2,26	1,61
Arsen part [ $\mu\text{g/l}$ ]	3,33	1,87	1,27	0,96
Blei ges [ $\mu\text{g/l}$ ]	3,72	1,98	1,30	0,96
Blei part [ $\mu\text{g/l}$ ]	3,49	1,76	1,12	0,80
Cadmium ges [ $\mu\text{g/l}$ ]	1,13	0,35	0,16	0,09
Zink ges [ $\mu\text{g/l}$ ]	128	43	21	12,46

**Tabelle 28: Aus Box-Whisker-Plots abgeleitete Schwellenwerte für die Elritze**

Parameter	KI 1/2	KI 2/3	KI 3/4	KI 4/5
Cadmium ges [ $\mu\text{g/l}$ ]	1,55	1,10	0,64	0,18
Zink ges [ $\mu\text{g/l}$ ]	380	106	46	25
Zink part [ $\mu\text{g/l}$ ]	59	24	13	8,6

**Tabelle 29: Aus Quantilen Regressionen berechnete Schwellenwerte für das Bachneunauge**

Parameter	KI 1/2	KI 2/3	KI 3/4	KI 4/5
Arsen gel [ $\mu\text{g/l}$ ]	2,2	1,5	1,2	0,7
Arsen ges [ $\mu\text{g/l}$ ]	6,9	3,7	2,5	0,3
Arsen part [ $\mu\text{g/l}$ ]	2,8	1,6	1,1	0,4
Blei ges [ $\mu\text{g/l}$ ]	3,6	2,0	1,4	0,4
Blei part [ $\mu\text{g/l}$ ]	3,2	1,7	1,2	0,4
Cadmium ges [ $\mu\text{g/l}$ ]	0,7	0,3	0,2	0,3
Zink ges [ $\mu\text{g/l}$ ]	60	32	21	0,5

**Tabelle 30: Aus Quantilen Regressionen berechnete Schwellenwerte für die Elritze**

Parameter	KI 1/2	KI 2/3	KI 3/4	KI 4/5
Cadmium ges [ $\mu\text{g/l}$ ]	3,5	0,9	0,3	0,2
Zink ges [ $\mu\text{g/l}$ ]	345	99	42	21
Zink part [ $\mu\text{g/l}$ ]	86	29	14	8

Mit Ausnahme der Klassengrenze 1 / 2 für die Kombination Bachneunauge /  $\text{Zink}_{\text{ges}}$  zeigen alle Werte gute Übereinstimmungen.

## 4.8 Einflüsse der Begleitparameter DOC, pH und Härte

### 4.8.1 Methodik

Das in der EU geläufige Bio-Liganden-Modell Bio-Met (<https://bio-met.net/>) berücksichtigt zwar die Begleitparameter DOC, pH und Härte. Dies erfolgt jedoch implizit, d.h., ein funktionaler Zusammenhang ist nicht explizit formuliert, sondern wurde aus einem Eich-Datensatz abgeleitet (> 20.000 verschiedenen Kombinationen von pH, DOC und Ca-Konzentrationen und entsprechenden HC<sub>5</sub>-Berechnungen für verschiedene Metalle).

Um auch explizite Beziehungen betrachten bzw. darstellen zu können, wurde auf Gleichungen zurückgegriffen, die in der kanadischen Wasserqualitätsrichtlinie beschrieben sind. Die kanadische Wasserqualitätsrichtlinie (Canadian Water Quality Guideline) zum Schutz aquatischen Lebens hinsichtlich Langzeitbelastungen beschreibt Schwellenwerte für gelöstes Zink und gelöstes Cadmium in Süßwasser bei verschiedenen Wasserhärten, pH- und DOC-Werten (Canadian Council of Ministers of the Environment, 2014 und 2018). Es werden einmal Schwellenwerte für unterschiedliche Wertebereiche der Begleitparameter angegeben, aber auch Gleichungen, mit denen die Schwellenwerte („CWQG“-Werte nach „Canadian Water Quality Guideline“) für spezifische Bedingungen ermittelt werden können:

$$CWQG_{Cd} = 10^{0,83 \times \log(GH) - 2,46}$$

$$CWQG_{Zn} = e^{0,947 \times \ln(GH) - 0,815 \times pH + 0,398 \times \ln(DOC) + 4,625}$$

Wie man sieht, hängt der CWQG-Wert für Cadmium nur von der Gesamthärte ab, während im Falle von Zink außerdem pH und DOC berücksichtigt werden müssen.

Diese Gleichungen wurden in der Projektdatenbank implementiert und die entsprechenden Schwellenwerte berechnet. Ziel ist der Abgleich der so ermittelten Schwellenwerte mit den anhand der oben beschriebenen Methoden abgeschätzten Werte.

Der Vorteil der kanadischen Modelle ist ihre Explizitheit, also der Umstand, dass der Einfluss der Begleitgrößen funktional definiert ist, während es sich bei dem Bio-Met-Tool im Grunde um eine „black box“ handelt. Allerdings wurden nur Formeln für Cadmium und Zink definiert.

### 4.8.2 Ergebnisse

Ungeachtet der oben genannten Einschränkungen wurden die biologisch verfügbaren Konzentrationen für die Metalle mit dem Bio-Liganden-Modell Bio-Met (<https://bio-met.net/>) berechnet (zur Berechnungsmethodik siehe Kapitel 3.3.4). Die Ergebnisse (siehe Anlagen 12 a, b und c) wurden ebenfalls mit den Abundanz- bzw. Präsenz-Absenz-Daten in Beziehung gesetzt. Erläuterungen dazu finden sich jeweils in den entsprechenden Kapiteln 4.3 ff.

Die nach den oben beschriebenen Gleichungen berechneten CWQG-Schwellenwerte und die gemessenen Cadmium- und Zink-Konzentrationen für die einzelnen Proben wurden als Jahresmittelwerte auf die Messjahre aggregiert und den Befischungsdaten und damit den jeweiligen potenziellen Verbreitungsgebieten der Fisch-/Rundmaularten zugeordnet.

Die Daten wurden mit drei verschiedenen Ansätzen ausgewertet, um folgende Fragen zu beantworten

1. Wo liegen die mit den kanadischen Ansätzen berechneten Schwellenwerte in den Verbreitungsgebieten der jeweiligen Fisch-/Rundmaularten? Sind sie größenordnungsmäßig mit den mit anderen Ansätzen abgeleiteten Werten vergleichbar?
2. Ist ein Effekt auf die Abundanzen der verschiedenen Fisch-/Rundmaularten in Abhängigkeit von Schwellenwertverletzungen zu erkennen?
3. Ist eher eine scharfe Schwelle oder ein kontinuierlicher Verlauf erkennbar?

Zur Klärung der ersten Frage wurden die Mittelwerte, Mediane und Modalwerte (letzterer als Maximum der jeweiligen Verteilungsfunktion) über die verschiedenen potenziellen Verbreitungsgebiete berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 31 dargestellt.

**Tabelle 31: Mittelwerte, Mediane und Modalwerte der CWQG-Schwellenwerte für Cadmium (gelöst) in den potenziellen Verbreitungsgebieten der betrachteten Fisch-/Rundmaularten**

Fisch-/Rundmaulart	Mittelwert [ $\mu\text{g/l}$ ]	Median [ $\mu\text{g/l}$ ]	Modalwert [ $\mu\text{g/l}$ ]	Fallzahl
Äsche	0,21	0,19	0,18	342
Bachforelle	0,24	0,21	0,14	1882
Bachneunauge	0,30	0,27	0,26	621
Elritze	0,35	0,31	0,31	668
Groppe	0,24	0,20	0,14	1308
Schmerle	0,32	0,29	0,21	1474
<b>Mittelwert</b>	<b>0,28</b>	<b>0,24</b>	<b>0,21</b>	

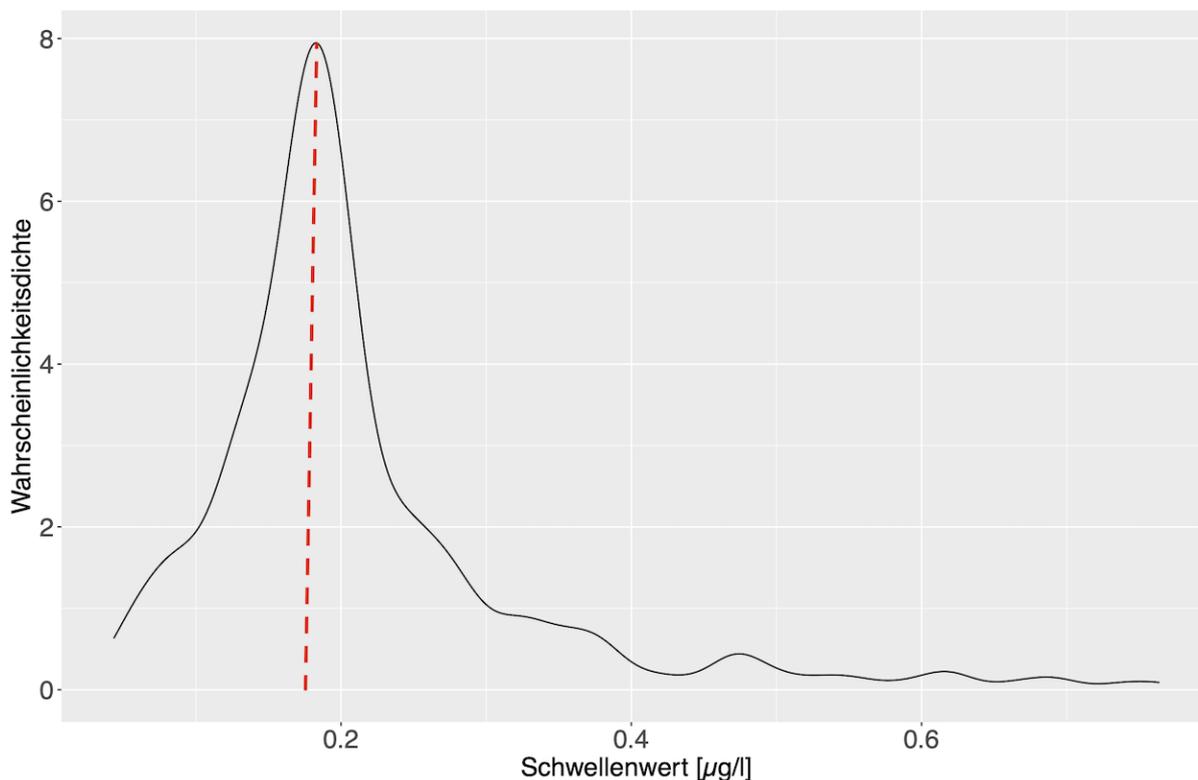
**Tabelle 32: Mittelwerte, Mediane und Modalwerte der CWQG-Schwellenwerte für Zink (gelöst) in den potenziellen Verbreitungsgebieten der betrachteten Fisch-/Rundmaularten**

Fisch-/Rundmaulart	Mittelwert [ $\mu\text{g/l}$ ]	Median [ $\mu\text{g/l}$ ]	Modalwert [ $\mu\text{g/l}$ ]	Fallzahl
Äsche	39,52	34,15	34,58	342
Bachforelle	46,41	39,54	23,98	1882
Bachneunauge	55,07	47,21	39,80	621
Elritze	94,74	66,61	46,78	668
Groppe	43,99	37,09	28,38	1308
Schmerle	81,93	59,37	42,78	1474
<b>Mittelwert</b>	<b>60,28</b>	<b>47,33</b>	<b>36,05</b>	

Um einen generellen Effekt auf die Abundanzen zu erkennen, wurde jeder Datensatz hinsichtlich der Überschreitung oder Einhaltung des spezifischen CWQG-Schwellenwertes eingestuft. Für jede Fisch-/ Rundmaulart und jedes Metall wurden Mittelwerte, Mediane und Modalwerte der verschiedenen Abundanzmaße für diese beiden Gruppen berechnet (Tabelle 33). Näherungsweise wurde der Modalwert als Maximum der jeweiligen Verteilungsfunktion bestimmt (Abbildung 22).

## Berechnete Schwellenwerte von Cadmium im pot. Verbreitungsgebiet Äsche

N = 342



**Abbildung 22: Bestimmung des Modalwertes als Maximum der Verteilungsfunktion**

In Tabelle 33 und Tabelle 34 sind die Ergebnisse dieser Auswertung dargestellt. Die farbliche (blassgrüne) Hinterlegung zeigt jeweils die Fälle mit den höheren Abundanzmaßen an.

Die Hypothese, dass ein Metall für eine bestimmte Fisch-/Rundmaulart limitierend wirkt, würde dadurch Unterstützung erfahren, dass die Abundanzmaße bei eingehaltenem CWQG-Schwellenwert höher sind als bei Verletzung dieses Wertes. Dies ist in 7 von 12 Fällen gegeben. Allerdings ergeben entsprechende Kolmogorow-Smirnow-Tests, dass die Unterschiede in den jeweiligen Zahlenreihen nicht signifikant sind.

**Tabelle 33: Mittelwerte verschiedener Abundanzmaße differenziert nach Überschreitung und Einhaltung der CWQG-Schwellenwerte für Cadmium (gelöst)**

Art	Anzahl/Hektar überschr. — eingeh.	Anzahl überschr. — eingeh.	Anzahl/100m überschr. — eingeh.
Äsche	827,81 — 456,52	6,86 — 5,41	24,83 — 13,88
Bachforelle	11.387,18 — 6.364,77	70,61 — 42,46	256,18 — 130,48
Bachneunauge	1.831,64 — 1.801,73	17,35 — 14,33	43,00 — 39,79
Elritze	3.834,06 — 8.947,78	32,85 — 56,24	117,51 — 184,78
Groppe	2.470,08 — 2.332,03	17,46 — 19,47	62,09 — 58,41
Schmerle	1.937,37 — 2.889,63	16,78 — 17,88	54,34 — 62,34

**Tabelle 34: Mittelwerte verschiedener Abundanzmaße differenziert nach Überschreitung und Einhaltung der CWQG-Schwellenwerte für Zink (gelöst)**

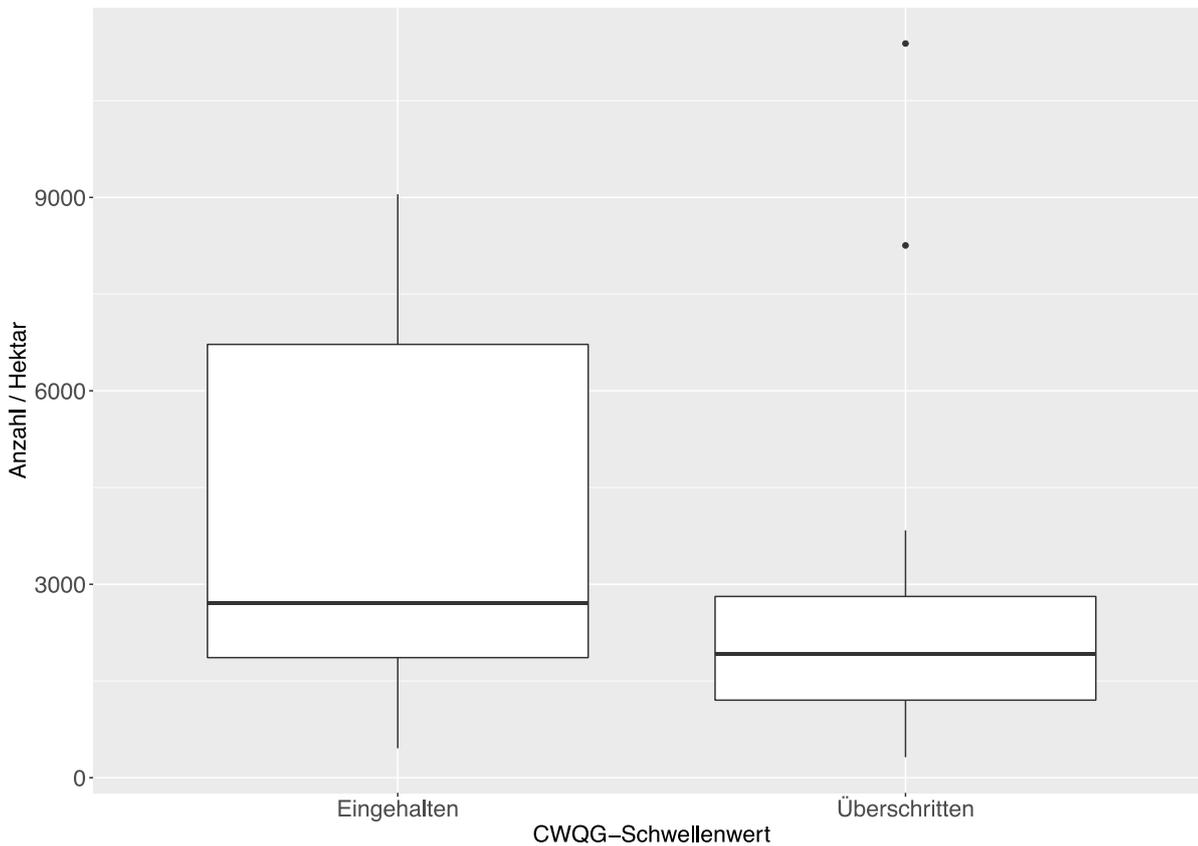
Art	Anzahl/Hektar überschr. — eingeh.	Anzahl überschr. — eingeh.	Anzahl/100m überschr. — eingeh.
Äsche	318,16 — 578,89	3,75 — 5,98	9,55 — 17,51
Bachforelle	8.254,62 — 7.790,64	58,38 — 49,62	199,28 — 162,83
Bachneunauge	850,93 — 1881,33	8,71 — 15,33	25,53 — 41,51
Elritze	2.428,76 — 9.049,36	24,79 — 56,92	73,56 — 189,49
Groppe	1.320,83 — 2.525,04	14,65 — 19,21	39,60 — 62,49
Schmerle	1.889,33 — 2.879,73	17,20 — 17,84	53,40 — 62,28

Stellt man die mittleren Anzahlen/ha für die beiden Gruppen in einem Boxplot dar, wird ein deutlicher Unterschied offenbar (Abbildung 23): 25-Perzentil, Median und 75-Perzentil und Oberer Whisker der Abundanzen der Gruppe, bei der die Schwellenwerte eingehalten sind, liegen erkennbar höher.

Die Prüfung dieser Unterschiede mit dem Kolmogorow-Smirnow-Test, zeigt allerdings, dass die Null-Hypothese, dass die beiden Gruppen sich signifikant unterscheiden, auf dem Signifikanz-Niveau von  $p = 0,05$  nicht verworfen werden kann<sup>2</sup>.

Für die beiden anderen Abundanzmaße ergeben sich ähnliche Ergebnisse: visuelle, jedoch statistisch nicht signifikante Unterschiede. Die Graphiken sind als Anlage 13 beigefügt.

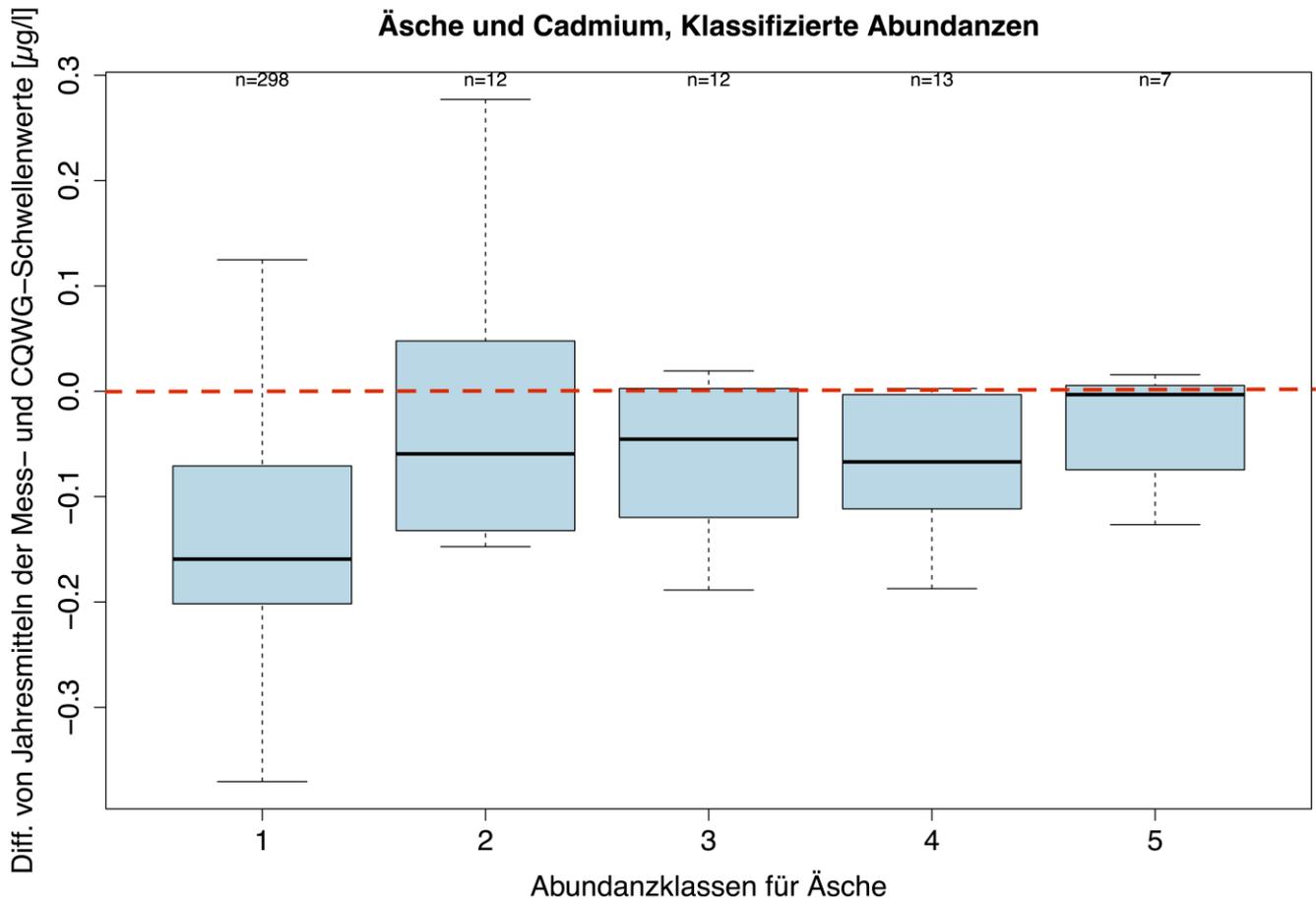
<sup>2</sup> Die beiden Mengen sind: „Eingehalten“: (456.52, 578.89, 1801.73, 1881.33, 2332.03, 2525.04, 2879.73, 2889.63, 6364.77, 7790.64, 8947.78, 9049.36) und „Überschritten“: (318.16, 827.81, 850.93, 1320.83, 1831.64, 1889.33, 1937.37, 2428.76, 2470.08, 3834.06, 8254.62, 11387.18).  
Der Kolmogorow-Smirnow-Test ergibt einen p-Wert von 0,54.



**Abbildung 23: Vergleich der Verteilungen der Abundanzen bei Einhaltung und Überschreitung der CWQG-Schwellenwerte**

Damit muss man festhalten, dass ein Effekt auf die Abundanzen der verschiedenen Fisch-/Rundmaularten in Abhängigkeit von Schwellenwertverletzungen nicht zu erkennen ist.

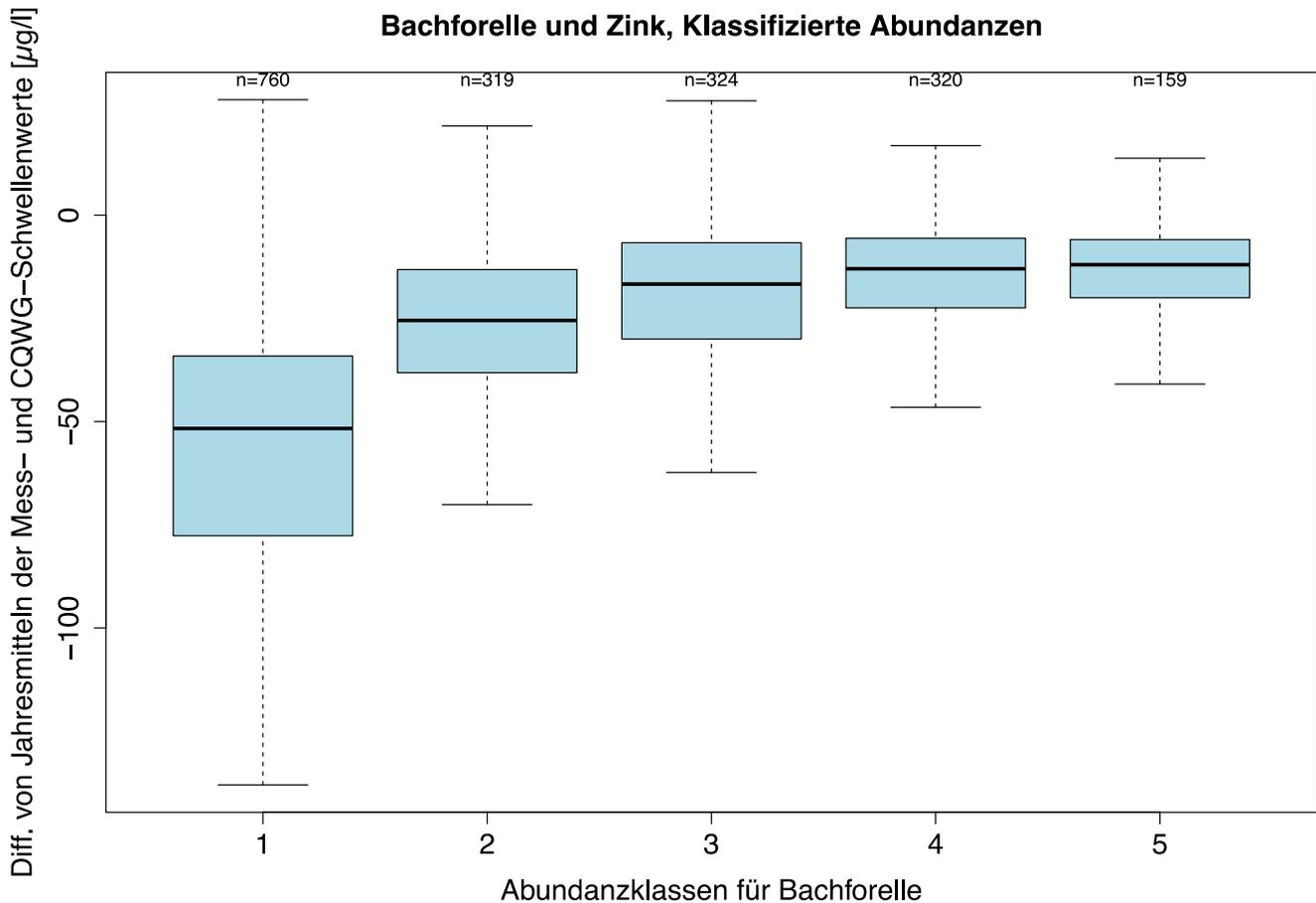
Um die dritte Fragestellung zu beantworten, wurden analog zu den anderen Kenngrößen artspezifisch nach Abundanz klassifizierte Boxplots erstellt. Als Maß wurde die Differenz zwischen den Jahresmitteln der Messwerte und der spezifischen CWQG-Schwellenwerte herangezogen. Wenn eine Überschreitung eines Schwellenwertes negative Auswirkungen auf die Abundanzen hat, sollte man feststellen können, dass insbesondere bei den unteren Abundanzklassen mehr Werte oberhalb von 0.0 zu finden sind. Die Ergebnisse sind in Abbildung 24 und Abbildung 25 dargestellt.



**Abbildung 24: Boxplot der Differenz von Jahresmitteln der Mess- und CWQG-Schwellenwerte von Cadmium (gelöst) im potenziellen Verbreitungsgebiet der Äsche**

In Abbildung 24 ist erkennbar, dass im Falle von Cadmium tatsächlich die größten Differenzen zwischen den Jahresmitteln der Messwerte und der spezifischen CWQG-Schwellenwerte bei den Abundanzklassen 1 und 2 zu finden sind.

Im Falle von Zink ist das Bild weniger deutlich (Abbildung 25). Hier liegen bei allen Abundanzklassen jeweils nur wenige Differenzen oberhalb von 0.0.



**Abbildung 25: Boxplot der Differenz von Jahresmitteln der Mess- und CWQG-Schwellenwerte von Zink (gelöst) im potenziellen Verbreitungsgebiet der Bachforelle**

Die in Tabelle 31 dargestellten mittleren CWQG-Schwellenwerte beziehen sich auf Cadmium (gelöst) und Zink (gelöst). Zum Abgleich mit biologisch verfügbaren Zinkkonzentrationen (für Cadmium liegt kein Bioligandenmodell vor) wurden fisch-/rundmaulartspezifisch die Mittelwerte der Verhältnisse von gelösten zu bioverfügbaren Zink-Konzentration ermittelt. Das Ergebnis ist in Tabelle 35 und Tabelle 36 dargestellt.

**Tabelle 35: Fisch-/Rundmaulartspezifische Mittelwerte der Verhältnisse von gelösten zu bioverfügbaren Zink-Konzentration**

Art	Verhältnis Gelöst zu Bioverfügbar
Äsche	2,36
Bachforelle	2,42
Bachneunauge	2,53
Elritze	2,85
Groppe	2,35
Schmerle	2,83

**Tabelle 36: Mittelwerte, Mediane und Modalwerte der auf Bioverfügbare Zink-Konzentrationen umgerechneten CWQG-Schwellenwerte für Zink (gelöst) in den potenziellen Verbreitungsgebieten der betrachteten Fisch-/Rundmaularten**

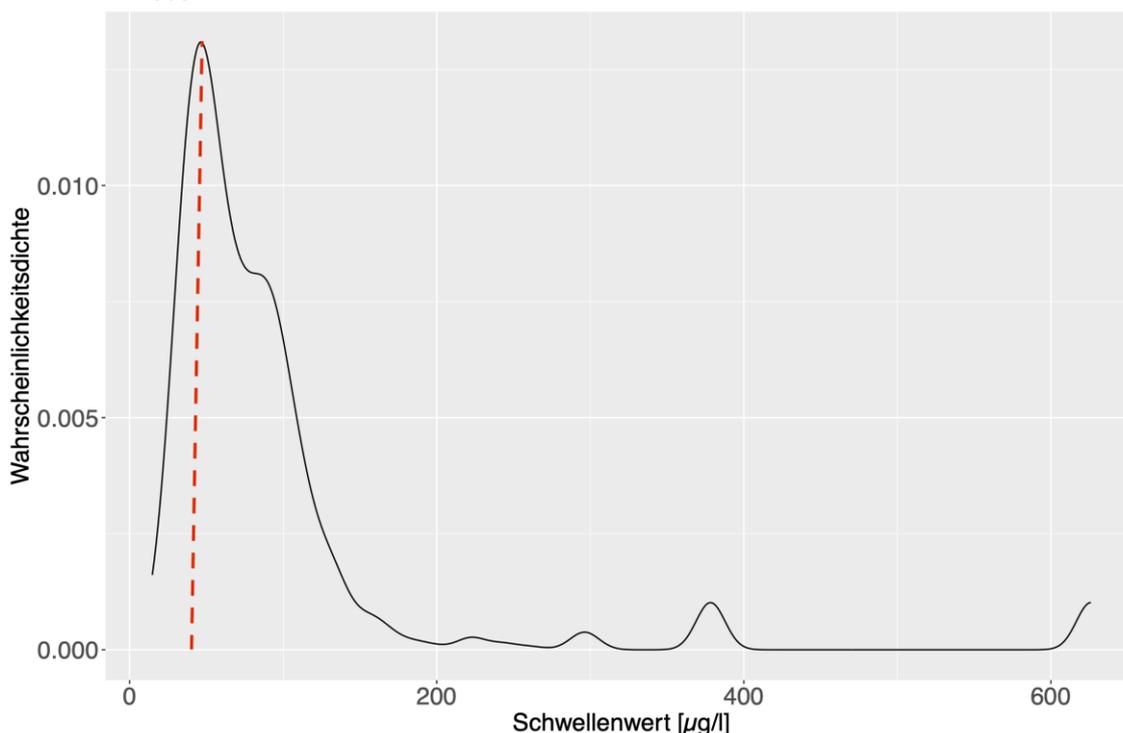
Art	Mittelwert [ $\mu\text{g/l}$ ]	Median [ $\mu\text{g/l}$ ]	Modalwert [ $\mu\text{g/l}$ ]
Äsche	16,74	14,46	14,65
Bachforelle	19,16	16,32	9,90
Bachneunauge	21,74	18,64	15,72
Elritze	33,27	23,39	16,43
Groppe	18,75	15,81	12,10
Schmerle	28,95	20,98	15,12
<b>Mittelwert</b>	<b>23,58</b>	<b>18,51</b>	<b>14,10</b>

Für Elritze und Schmerle wurden jeweils Median-Abundanz-Konzentrationen für bioverfügbare Zink-Konzentrationen abgeleitet. Diese wurden zu 12,72  $\mu\text{g/l}$  (Elritze) und 9,41  $\mu\text{g/l}$  (Schmerle) bestimmt.

Aufgrund der stark rechtsschiefen Form der Verteilungen der Zink-CWQG-Schwellenwerte für Elritze und Schmerle (siehe Abbildung 26 und Abbildung 27) erscheint der Modalwert (Maximum der Verteilungen) als das am besten geeignete Maß zur Beschreibung der mittleren Zink-CWQG-Schwellenwerte.

**Berechnete Schwellenwerte von Zink im pot. Verbreitungsgebiet Elritze**

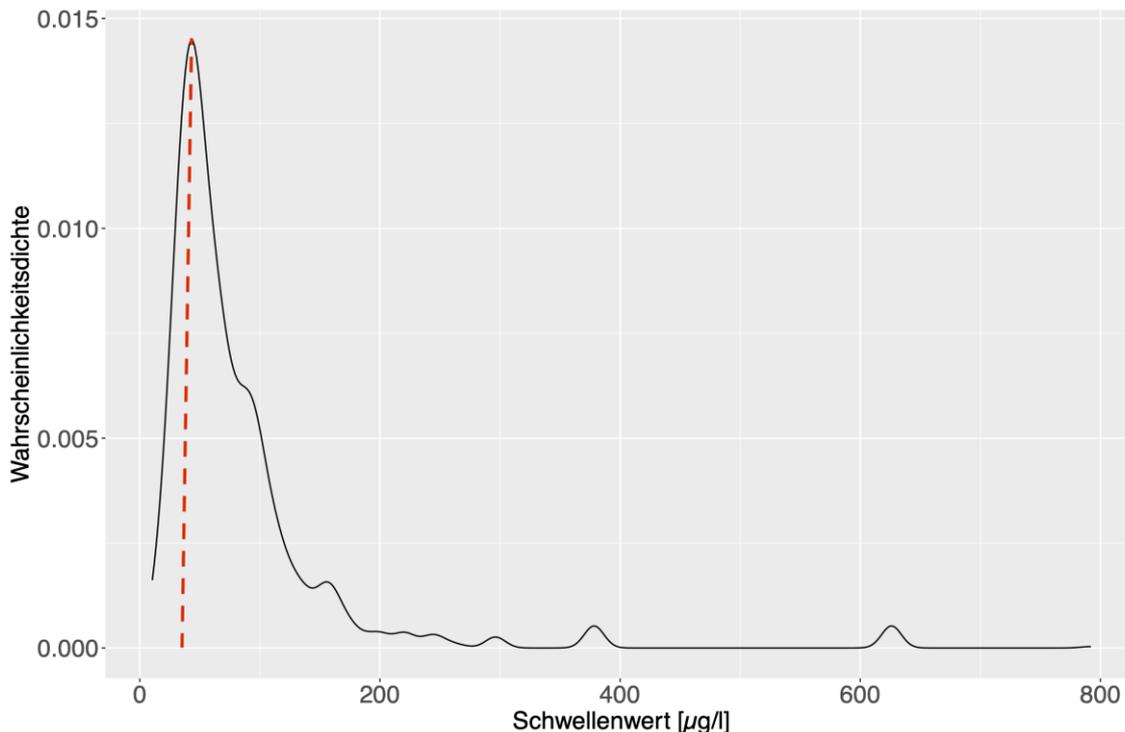
N = 668



**Abbildung 26: Modalwert als Maximum der Verteilungsfunktion der CWQG-Schwellenwerte von Zink im potenziellen Verbreitungsgebiet der Elritze**

## Berechnete Schwellenwerte von Zink im pot. Verbreitungsgebiet Schmerle

N = 1474



**Abbildung 27: Modalwert als Maximum der Verteilungsfunktion der CWQG-Schwellenwerte von Zink im potenziellen Verbreitungsgebiet der Schmerle**

Beide Werte liegen unterhalb der sich aus Tabelle 36 ergebenden mittleren CWQG-Schwellenwerte von rund 16 µg/l (Elritze) und 15 µg/l (Schmerle). Dies ist jedoch nicht unplausibel, da Median-Abundanz-Konzentrationen ja eher einen Verteilungsschwerpunkt denn eine Grenze der Verteilung bilden. Auch die in Tabelle 33 dargestellten Ergebnisse für Elritze und Schmerle stützen die Ergebnisse der Boxplot-gestützten Auswertungen. Denn für beide Arten zeigen die betrachteten Abundanzmaße deutliche Unterschiede zwischen eingehaltenen und überschrittenen Schwellenwerten. Für Zink, aber bei dieser Auswertung auch bei Cadmium, sind die Abundanzmaße bei eingehaltenen Schwellenwerten deutlich höher.

Weitere Analogien zu den Ergebnissen der Boxplot-gestützten Auswertungen können nicht ausgemacht werden, da die Auswertungen der Gelöst-Fractionen durchweg keine signifikanten Zusammenhänge zeigten. Die hier anhand der kanadischen Schwellenwerte gewonnenen Erkenntnisse deuten darauf hin, dass eine stärkere Berücksichtigung der Begleitparameter zu noch schärferen Abgrenzungen führen könnte.

### Fazit

Die hier anhand der kanadischen Schwellenwerte gewonnenen Erkenntnisse deuten darauf hin, dass eine stärkere Berücksichtigung der Begleitparameter zu noch schärferen Abgrenzungen führen könnte. Allerdings ist dies allenfalls als zusätzliches Indiz zu werten, da insbesondere die Ergebnisse bezüglich der CWQG-Schwellenwerte keine statistisch signifikante Auftrennung der Daten zeigen. Die kanadischen Schwellenwerte lassen sich daher für den Schutz der hier untersuchten Leitfischarten kaum sinnvoll anwenden.

#### **4.9 Abgeleitete fisch-/rundmaulartspezifische Konzentrationsschwellenwerte für die ausgewählten Metalle**

Aus den Regressionen über die Oberen Whisker der untersuchten Metallkonzentrationen der fünf Fisch-/Rundmaulabundanzklassen wurden die in Tabelle 37 dargestellten Grenzkonzentrationen der untersuchten Metallspezies und -fraktionen zwischen den gebildeten Fischabundanzklassen als Schwellenwerte abgeleitet. Ziel dieser Ableitungen war es, für möglichst viele Paarungen aus den untersuchten Metallspezies und -fraktionen mit den Abundanz der ausgewählten sechs Fisch-/Rundmaularten artspezifische, bei einer gegebenen Metallkonzentration bestenfalls noch erreichbare Abundanzklassen (Ind./ha) bestimmen zu können. Ist z.B. bei einer niedrigen Metallkonzentration gerade noch eine hohe Abundanzklasse einer Fisch-/Rundmaulart möglich, dann kennzeichnet diese die Konzentrationsgrenze zur nächst kleineren Abundanzklasse, wo jedwede Konzentrationserhöhung bereits zu einer Unterschreitung der Abundanzklasse führen würde. Aufgrund der gebildeten fünf ansteigenden Abundanzklassen entsprechen die Metallkonzentrationen der höchsten Abundanzklasse den niedrigsten Metallkonzentrationen und Gefährdungspotenzialen, bzw. -klassen. Abundanz- und Gefährdungsklassen, die auch den Kartenabbildungen der Steckbriefe (Anlage 14 & Anlage 15) zugrunde liegen, stehen daher in einem reziproken Verhältnis zueinander: Metallkonzentrationen der Abundanzklasse 1 entsprechen der Gefährdungsklasse 5 und Konzentrationen der Abundanzklasse 2 entsprechen der Gefährdungsklasse 4, während die Konzentrationen der mittleren Abundanz- und Gefährdungsklasse einander entsprechen (Klasse 3).

Tabelle 37: Abgeleitete Schwellenwerte (SW) mit Angaben zu den ausgewerteten Fallzahlen und Regressionstypen (Regr.-Typen: „P“: Potenzfunktion, „L“: Linearfunktion) mit den dazu gehörigen Bestimmtheits- ( $R^2$ ) und Signifikanzmaßen (p), JD-UQN (OGewV) und Hintergrundschätzwerten nach LAWA (1998)

Metallspezies und -fraktionen	Fisch-/Rundmaulart	Fallzahl	Regr.-Typ	$R^2$	p	Steigung / Exponent	Schnittpunkt / Faktor	JD-UQN* / Higrw** [ $\mu\text{g/l}$ ]	SW 1 / 2	SW 2 / 3	SW 3 / 4	SW 4 / 5
Arsen gel.	Bachneunauge	97	P	0,71	0,075	-0,926	3,06	-	2,10	1,31	0,96	0,76
Arsen ges.	Äsche	45	L	0,76	0,055	-5,793	34,2	-	25,5	19,7	13,9	8,10
Arsen ges.	Bachneunauge	50	P	0,83	0,033	-1,335	12,0	-	6,99	3,54	2,26	1,61
Arsen part.	Bachneunauge	50	P	0,82	0,033	-1,136	5,28	-	3,33	1,87	1,27	0,96
Blei bio.	-	-	-	-	-	-	-	1,2*	-	-	-	-
Blei gel.	Schmerle	812	P	0,71	0,075	-0,304	0,38	0,2**	0,33	0,29	0,26	0,24
Blei ges.	Bachforelle	754	L	0,89	0,016	-0,253	3,47	0,83**	3,09	2,84	2,59	2,33
Blei ges.	Bachneunauge	50	P	0,76	0,055	-1,238	6,15	0,83**	3,72	1,98	1,30	0,96
Blei ges.	Schmerle	452	L	0,80	0,042	-0,331	3,74	0,83**	3,25	2,92	2,59	2,26
Blei part.	Bachforelle	752	P	0,91	0,012	-0,256	3,08	0,625**	2,78	2,44	2,24	2,10
Blei part.	Bachneunauge	50	P	0,80	0,040	-1,340	6,00	0,625**	3,49	1,76	1,12	0,80
Blei part.	Schmerle	451	L	0,81	0,039	-0,286	3,34	0,625**	2,92	2,63	2,34	2,06
Cadmium gel. Härteklasse 1	-	-	-	-	-	-	-	$\leq 0,08^*$	-	-	-	-
Cadmium gel. Härteklasse 2	-	-	-	-	-	-	-	0,08*	-	-	-	-
Cadmium gel. Härteklasse 3	-	-	-	-	-	-	-	0,09*	-	-	-	-
Cadmium gel. Härteklasse 4	-	-	-	-	-	-	-	0,15*	-	-	-	-
Cadmium gel. Härteklasse 5	-	-	-	-	-	-	-	0,25*	-	-	-	-
Cadmium ges.	Elritze	123	L	0,83	0,032	-0,458	2,24	0,018**	1,55	1,10	0,64	0,18
Cadmium ges.	Schmerle	452	L	0,75	0,056	-0,033	0,34	0,018**	0,29	0,25	0,22	0,19
Cadmium part.	Bachneunauge	50	P	0,91	0,012	-2,027	0,98	0,0075**	0,43	0,15	0,08	0,05
Cadmium part.	Elritze	123	L	0,83	0,031	-0,278	1,31	0,0075**	0,89	0,62	0,34	0,06
Kupfer bio.	Elritze	167	L	0,89	0,015	-0,080	0,70	-	0,58	0,50	0,42	0,34
Kupfer gel.	Bachforelle	1289	L	0,70	0,077	-0,292	5,85	0,5**	5,41	5,12	4,83	4,53
Kupfer ges.	Elritze	123	L	0,84	0,03	-1,008	9,02	1,0**	7,51	6,50	5,49	4,48
Kupfer part.	Bachforelle	752	P	0,91	0,01	-0,169	5,44	0,5**	5,08	4,66	4,40	4,22

Metallspezies und -fraktionen	Fisch-/Rundmaulart	Fallzahl	Regr.-Typ	R <sup>2</sup>	p	Steigung / Exponent	Schnittpunkt / Faktor	JD-UQN* / Higrw** [µg/l]	SW 1 / 2	SW 2 / 3	SW 3 / 4	SW 4 / 5
Kupfer part.	Bachneunauge	50	P	0,74	0,06	-0,462	4,72	0,5**	3,91	3,09	2,65	2,36
Nickel bio.	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-
Nickel ges.	Bachneunauge	50	P	0,96	0,003	-0,742	12,6	1,1**	9,30	6,37	4,96	4,12
Nickel ges.	Elritze	123	L	0,92	0,009	-1,72	16,8	1,1**	14,25	12,53	10,81	9,09
Nickel part.	Groppe	241	P	0,72	0,071	-0,093	3,63	0,75**	3,50	3,34	3,23	3,16
RQ Mix	Schmerle	812	L	0,65	0,097	-0,044	1,06	-	1,00	0,96	0,91	0,87
Uran gel.	Bachneunauge	97	P	0,88	0,019	-2,001	1,81	-	0,80	0,29	0,15	0,09
Uran gel.	Groppe	375	P	0,93	0,008	-1,056	1,75	-	1,14	0,66	0,47	0,36
Uran ges.	Bachforelle	754	L	0,85	0,026	-0,731	4,85	-	3,75	3,02	2,29	1,56
Uran ges.	Bachneunauge	50	P	0,85	0,026	-2,233	4,93	-	2,00	0,64	0,30	0,17
Zink bio.	Elritze	167	P	0,96	0,003	-2,503	199	-	72,1	20,1	8,65	4,61
Zink bio.	Schmerle	681	L	0,92	0,009	-0,317	10,4	-	9,88	9,57	9,25	8,93
Zink ges.	Bachneunauge	50	P	0,92	0,011	-2,122	303	3,5**	128	43,4	21,3	12,5
Zink ges.	Elritze	123	P	0,92	0,009	-2,493	1044	3,5**	380	106	45,9	24,5
Zink ges.	Schmerle	452	L	0,78	0,046	-4,778	52,8	3,5**	45,6	40,8	36,0	31,3
Zink part.	Bachforelle	752	P	0,79	0,043	-0,283	22,8	2,5**	20,3	17,6	16,0	14,9
Zink part.	Bachneunauge	50	P	0,89	0,015	-1,953	73,8	2,5**	33,4	12,3	6,39	3,91
Zink part.	Elritze	123	P	0,97	0,002	-1,760	121	2,5**	59,3	24,1	13,4	8,58

\* Jahresdurchschnitts-Umweltqualitätsnorm (JD-UQN) gem. OGewV

\*\* Hintergrundschätzwerte (Higrw.) gem. LAWA (1998), für den ein geschätzter Schwankungsbereich zwischen der Hälfte und dem doppelten Hintergrundschätzwert galt; die doppelte Obergrenze des Hintergrundbereichs (= 4 x Higrw.) der Gesamtfraktion wurde als Zielwert für das Schutzgut „Aquatische Lebensgemeinschaften“ definiert

Was die Größenordnungen der abgeleiteten Schwellenwerte der verschiedenen Metallfraktions-Fisch-/Rundmaulkombinationen anbelangt, so reichen diese vom 2-stelligen Nanogramm-pro-Liter-Bereich (bei Cadmium und Uran) bis zum 3-stelligen Mikrogramm-pro-Liter-Bereich bei Zink. Sie liegen überwiegend niedriger als die meisten publizierten Schwellenwerte der Fischtoxizität und auch der internationalen Grenz- oder Beurteilungswerte zum Schutz der Gewässer und ihrer Biozöosen (s. Anlage 14).

In Relation zu den Hintergrundschätzwerten der LAWA (1997) bewegen sich die für die Grenze zwischen den beiden höchsten Abundanzklassen 4 und 5 abgeleiteten Schwellenwerte für die untersuchten Metalle, je nach Metallfraktion und Fisch-/Rundmaulart, in folgenden Spannweiten:

- Blei: 1,2- bis 3,4-fache Hintergrundschätzwerte
- Cadmium: 6,7 bis 10,6-fache Hintergrundschätzwerte
- Kupfer: 4,5 bis 9,1-fache Hintergrundschätzwerte
- Nickel: 3,7 bis 8,3-fache Hintergrundschätzwerte
- Zink: 1,6 bis 8,9-fache Hintergrundschätzwerte

Der in LAWA (1997) zur Ableitung von Zielwerten für das Schutzgut „Aquatische Lebensgemeinschaften“ bezogen auf die Hintergrundschätzwerte verwendete Faktor 4 erscheint daher vor dem Hintergrund der im Projekt abgeleiteten fisch-/rundmaulartspezifischen Schwellenwerte für Cadmium und Kupfer passend, für Nickel leicht zu hoch und für Blei und Zink deutlich zu hoch.

In Tabelle 37 sind auch Angaben zu Jahresdurchschnitts-Umweltqualitätsnormen (JD-UQN) dargestellt. Es konnten jedoch keine zu den entsprechenden Gelöstfraktionen bzw. bioverfügbaren Gelöstfraktionen passenden Schwellenwerte abgeleitet werden, so dass unmittelbare Vergleiche mit den JD-UQN nicht möglich sind. Die Tatsache, dass aber z.B. die allein auf den bioverfügbaren Anteil der Gelöstfraktion von Blei bezogene JD-UQN bei 1,2 µg/l liegt, während z.B. alle vier für die Schmerle abgeleiteten und auf die gesamte Gelöstfraktion bezogenen Blei-Schwellenwerte im Wertebereich  $\leq 0,33$  µg/l (also fast bei einem Viertel der JD-UQN) liegen, lässt darauf schließen, dass eine Einhaltung der JD-UQN allein, vermutlich zumindest die Schmerle in den sächsischen Fließgewässern, nicht vor populationslimitierenden chronischen Bleibelastungen zu schützen vermag. Im Hinblick auf Bleibelastungen ist auch für die Bachforelle und das Bachneunauge keine hinreichende Protektivität der Größenordnung der JD-UQN anzunehmen, auch wenn sich die abgeleiteten Schwellenwerte bei diesen beiden Arten auf die Gesamt- bzw. die partikulär gebundenen Fraktionen beziehen, was den Vergleich zusätzlich erschwert.

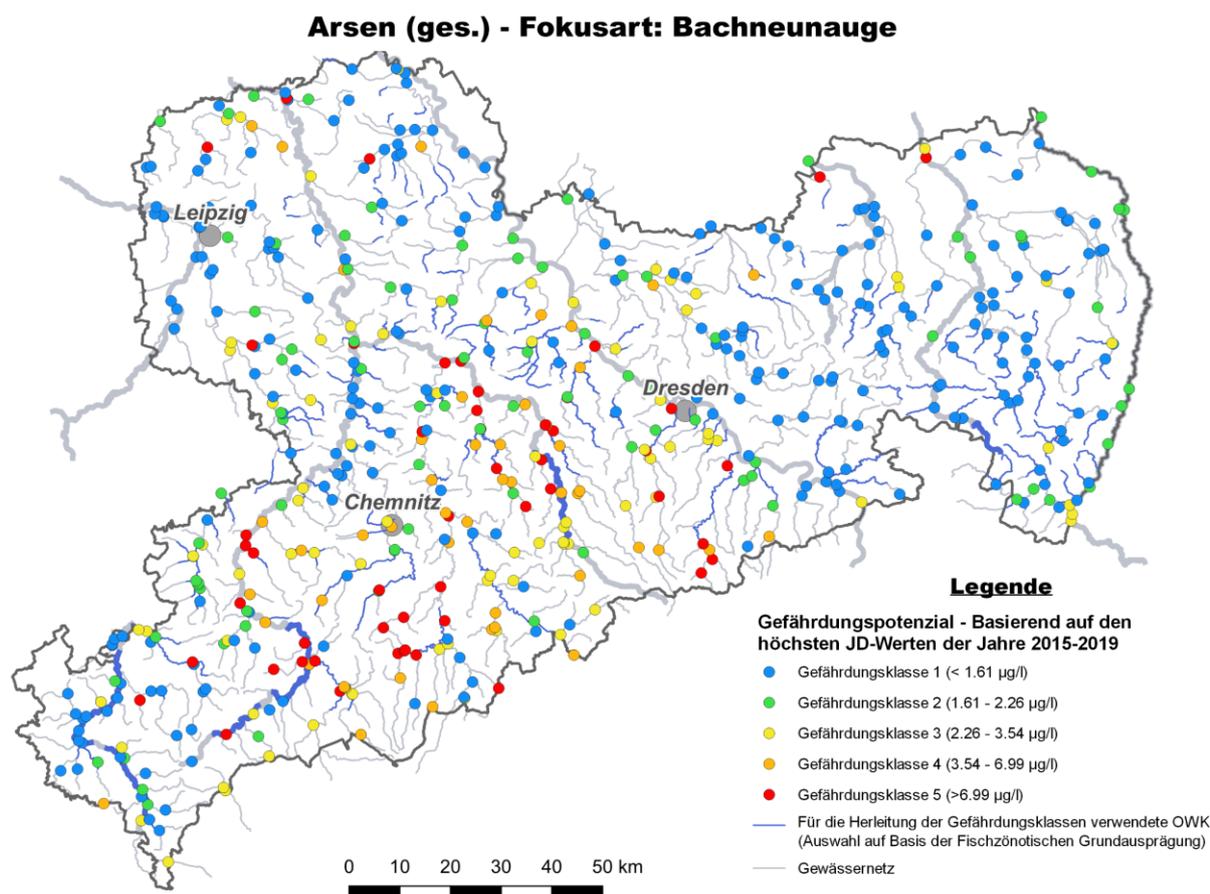
Die Größenordnungen der härteklassenspezifischen JD-UQN für gelöstes Cadmium könnten dagegen zumindest teilweise besser zu den, für die verschiedenen Fisch-/Rundmaularten abgeleiteten Schwellenwerten der Gesamt- bzw. partikulär gebundenen Fraktionen passen.

Wohingegen die für Nickel abgeleiteten Schwellenwerte der Gesamt- und der partikulär gebundenen Fraktionen wieder deutlich anspruchsvoller als die für den bioverfügbaren Anteil der Gelöstfraktion gültige JD-UQN für Nickel zu sein scheinen.

Die für die verschiedenen Metallspezies abgeleiteten fisch-/rundmaulart- und metallfraktionsspezifischen Schwellenwerte der Abundanzklassen bzw. Gefährdungsklassen können bei der gewässerökologischen Beurteilung chemischer Monitoringdaten hinsichtlich potenzieller Metallbelastungen für Fische in der Gewässerbewirtschaftungsplanung unterstützend eingesetzt werden. Anders als mit artunspezifisch definierten Beurteilungswerten oder UQN, kann so der potenzielle Belastungseinfluss einer Metallspezies für eine

bestimmte Fisch-/Rundmaulart differenziert nach definierten Gefährdungsgraden eingestuft werden. Damit bieten die Gefährdungsklassen auch für die Kausalanalyse defizitärer Fischzönosen oder Einzelartvorkommen überhaupt erst die erforderlichen Beurteilungsmaßstäbe für die Identifizierung oder den Ausschluss bestimmter Metallbelastungen als Ursachen festgestellter Defizite bei den Fisch-/Rundmaulabundanz.

Die im Zuge dieser Auswertungen ermittelten Abundanz- bzw. Gefährdungsklassen bilden die Grundlage für die in den Steckbriefen (Anlage 14 & Anlage 15) aufgeführten Kartendarstellungen. In den Karten sind für jede chemisch-physikalische Messstelle die dort zwischen 2015 und 2019 gemessenen höchsten JD-Werte der verschiedenen Metallspezies und -fraktionen jeweils einer der fünf fischartspezifischen Gefährdungsklassen zugeordnet. Es wird davon ausgegangen, dass – bei Erfüllung der definierten statistischen Verfahrensvoraussetzungen (s. a. Kapitel 4.6.1) – die oberen Whisker diejenigen Metallkonzentrationen der verschiedenen Abundanzklassen der jeweils betrachteten Fischarten beschreiben, die der Art gerade noch die Erreichung der Mindestpopulationsstärke der betreffenden Abundanzklasse ermöglicht, während jede weitere Konzentrationssteigerung zu einer Verringerung der Abundanz unter die Klassengrenze führen würde. Entsprechend ihrer Einteilung in die fünf Gefährdungsklassen wurden die jeweiligen JD-Werte in den Karten an der Position der korrespondierenden Messstelle farblich dargestellt. Dem Betrachter werden somit in übersichtlicher Form Regionen und einzelne Abschnitte sächsischer Fließgewässer ersichtlich in denen erhöhte Konzentrationen einer bestimmten Metallfraktion die Populationen bestimmter Fisch-/Rundmaularten in unterschiedlichem Maße gefährden.



**Abbildung 28: Kartenbeispiel aus den in den Steckbriefen (Anlage 14) enthaltenen Metall- und Fraktionsspezifischen Darstellungen der ermittelten artspezifischen Gefährdungsklassen.**

## 4.10 Ergebnisdiskussion

### 4.10.1 Bedeutung der ausgewerteten Metallspezies für die untersuchten Fisch-/Rundmaularten

Einen Gesamtvergleich der Anzahlen der Metallfraktions-Fisch/Rundmaulbeziehungen mit negativen Steigungen, bei Erfüllung der definierten Mindestsignifikanzanforderungen für die acht untersuchten Metallspezies, enthält die Tabelle 38. Darin sind außerdem für jedes Metall die Fallzahlen der drei anhand der p-Werte unterschiedenen Signifikanzniveaus der Beziehungen aufgeführt.

**Tabelle 38: Anzahlen N der Metallfraktions-Fisch-/Rundmaulbeziehungen mit negativen Steigungen und Erfüllung der definierten Mindestsignifikanzanforderungen für die acht untersuchten Metallspezies**

Metallspezies	N	N mit $p < 0,005$	N mit $p = 0,005$ bis $< 0,05$	N mit $p = 0,05$ bis $< 0,1$
Zink	8	6	2	0
Blei	7	0	5	2
Kupfer	5	0	3	2
Uran	4	0	4	0
Cadmium	4	0	3	1
Arsen	4	0	2	2
Nickel	3	1	1	1
Quecksilber	0	0	0	0

#### Zink

Die in Tabelle 38 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass von allen acht Metallspezies die untersuchten Fisch-/Rundmaularten die meisten und deutlichsten Zusammenhänge gegenüber den Zink-Konzentrationen ermittelt werden konnten (8 für die Schwellenwertableitung geeignete Metallfraktions-Fisch-/Rundmaulbeziehungen). Zinkschwellenwerte konnten für das Bachneunauge, die Bachforelle, die Elritze und die Schmerle abgeleitet werden.

Die Tatsache, dass von den untersuchten Begleitparametern des Datensatzes nur der pH-Wert negativ mit der Zink-Konzentration korreliert ist (siehe Tabelle 20), dürfte sich förderlich auf die Ableitbarkeit der Metallschwellenwerte ausgewirkt haben.

Hier muss jedoch die mineralogische Vergesellschaftung von Zink mit Cadmium ins Kalkül gezogen werden, die sich ja auch in sehr starken positiven Korrelationsbeziehungen zwischen den beiden Metallen zeigt. Exemplarisch durchgeführte Quantile Regressionen zwischen Cadmium und Zink (Gesamtgehalte) bei den Perzentilen 0,5 (Median) bis 0,99 zeigen ebenfalls starke Zusammenhänge, die bei höheren Perzentilen noch zunehmen. Allerdings nimmt die Signifikanz bei sehr hohen Perzentilen ab. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle 39 dargestellt.

**Tabelle 39: Quantile Regressionen von Cadmium mit Zink**

Perzentil	Pseudo-Bestimmtheitsmaß	p-Wert
0,5	0,65	0,09
0,8	0,69	0,005
0,9	0,80	0,02
0,95	0,88	0,05
0,99	0,97	0,14

Es kann also nicht ausgeschlossen werden, dass ein nicht unerheblicher Teil der hier festgestellten Wirkung durch das deutlich toxischere Cadmium verursacht wirkt. Eine Trennung der Effekte ist mit statistischen Methoden nicht möglich.

### **Blei**

Direkt auf Zink folgt Blei, für das insgesamt 7 für die Schwellenwertableitung geeignete Metallfraktions-Fisch-/Rundmaulbeziehungen für die folgenden Fisch-/Rundmaularten ermittelt wurden: Bachforelle, Bachneunauge und Schmerle.

Von den untersuchten Begleitparametern erwiesen sich die Folgenden als mit Blei (ausschließlich positiv) korreliert: AFS, Benzo(a)pyren, Eisen, Fluoranthen, TOC, Trübung (siehe Tabelle 14). Für die Fisch-/Rundmaularten, für die der eine oder andere dieser Parameter nach der Whisker-Regressionmethode als potenzieller Belastungsparameter identifiziert wurde, können daher die entsprechenden abgeleiteten Blei-Schwellenwerte ggf. tendenziell zu niedrig sein (s. Kapitel 4.10.3).

Korrelationen von Blei mit anderen Metallen sind ebenfalls gegeben, allerdings deutlich schwächer als die Beziehung zwischen Zink und Cadmium. Die Bestimmtheitsmaße liegen bei ca. 0,3 bis 0,4. Am häufigsten ist Blei mit Arsen korreliert. Exemplarisch durchgeführte Quantile Regressionen von Blei mit Arsen zeigen ähnlich Resultate wie bereits bei Cadmium und Zink. Bei oberen Perzentilen sind die Beziehungen besonders stark ausgeprägt.

**Tabelle 40: Quantile Regressionen von Blei mit Arsen**

Perzentil	Pseudo-Bestimmtheitsmaß	p-Wert
0,5	0,008	0,03
0,8	0,22	0,0001
0,9	0,53	0,001
0,95	0,69	0,02
0,99	0,93	0,0001

Es kann also nicht ausgeschlossen werden, dass ein nicht unerheblicher Teil der hier festgestellten Wirkung durch Arsen verursacht wirkt. Eine Trennung der Effekte ist mit statistischen Methoden nicht möglich.

## **Kupfer**

Für Kupfer konnten insgesamt 5 für die Schwellenwertableitung geeignete Metallfraktions-Fisch-/Rundmaulbeziehungen für die folgenden Fisch-/Rundmaularten ermittelt werden: Bachforelle, Bachneunauge und Elritze.

Von den untersuchten Begleitparametern wurde nur Magnesium als negativ mit Kupfer korreliert identifiziert (siehe Tabelle 16), welches sich nach der Whisker-Regressionmethode als potenzieller Belastungsparameter für die Bachforelle und das Bachneunauge erwies. Das bedeutet, dass die dennoch für diese Arten abgeleiteten Schwellenwerte ggf. noch niedriger sein müssten (s. Kapitel 4.10.3).

Kupfer tritt mit Blei und mit Cadmium auf. Die Regressionsbeziehungen sind – wie beim Blei – mäßig stark. Quantile Regressionen Von Kupfer mit Blei liefern ähnliche Ergebnisse wie Blei und Arsen, jedoch etwas schwächer. Summationswirkungen sind daher auch hier nicht ausgeschlossen.

## **Uran**

Insgesamt 4 für die Schwellenwertableitung von Uran geeignete Metallfraktions-Fisch-/Rundmaulbeziehungen konnten für die folgenden Fisch-/Rundmaularten ermittelt werden: Bachforelle, Bachneunauge und Groppe.

Für alle drei Arten konnte ortho-Phosphat als positiv mit Uran korrelierter Begleitparameter ermittelt werden (siehe Tabelle 13), der sich nach der Whisker-Regressionmethode als potenzieller Belastungsparameter für alle drei Arten erwies und daher dazu geführt haben könnte, dass die abgeleiteten Schwellenwerte für Uran ggf. auch höher ausfallen könnten.

Uran ist mit keinem der anderen Metalle vergesellschaftet.

## **Cadmium**

Ebenfalls insgesamt 4 für die Schwellenwertableitung geeignete Metallfraktions-Fisch-/Rundmaulbeziehungen konnten für Cadmium für die folgenden Fisch-/Rundmaularten ermittelt werden: Bachneunauge, Elritze und Schmerle.

Cadmium ist das Metall, für das kein einziger positiv, aber die meisten negativ korrelierten Begleitparameter ermittelt wurden: Calcium, Carbamazepin, Chlorid, Gesamthärte, Magnesium, Leitfähigkeit, Nitrit, pH-Wert, Sulfat (siehe Tabelle 15). Für 8 dieser 9 Begleitparameter konnten z.B. für die Bachforelle Belastungszusammenhänge gemäß der Whisker-Regressionmethode festgestellt werden. Bei der Groppe trifft dies auf 6 der 9 Begleitparameter zu. Darin könnte die Ursache dafür liegen, dass für beide Arten keine Cadmium-Schwellenwerte ableitbar waren.

Bezüglich der Korrelationen mit anderen Metallen sei auf die obigen Ausführungen zu Zink, Blei und Kupfer verwiesen.

## **Arsen**

Auch für Arsen konnten insgesamt 4 für die Schwellenwertableitung geeignete Metallfraktions-Fisch-/Rundmaulbeziehungen für die folgenden Fisch-/Rundmaularten identifiziert werden: Äsche und Bachneunauge.

Mit Arsen sind folgende Begleitparameter positiv korreliert (siehe Tabelle 13): Acesulfam, pH-Wert, o-Phosphat, Gesamtphosphor, Wassertemperatur, während Eisen negativ mit Arsen korreliert ist.

Von beiden genannten Arten konnte nur für das Bachneunauge ein Belastungseinfluss eines dieser genannten Parameter mittels der Whisker-Regressionmethode festgestellt werden: o-Phosphat, weshalb die abgeleiteten Arsen-Schwellenwerte ggf. zu niedrig abgeleitet worden sein könnten.

Für die Fischarten Bachforelle, Elritze und Schmerle wurden jedoch mittels der Whisker-Regressionmethode Belastungsabhängigkeiten von Eisen festgestellt. Dieses könnte also ggf. dafür mitverantwortlich sein, dass für die drei Arten keine Arsen-Schwellenwerte ableitbar waren.

Bezüglich der Korrelationen mit anderen Metallen sei auf die obigen Ausführungen zu Blei und Kupfer verwiesen.

### **Nickel**

Für Nickel wurden in Summe 3 für die Schwellenwertableitung geeignete Metallfraktions-Fisch-/Rundmaulbeziehungen für die folgenden Fisch-/Rundmaularten identifiziert: Bachneunauge, Elritze und Groppe.

Als positiv mit Nickel korreliert erwiesen sich die Begleitparameter Ammonium und Eisen und als negativ nur der pH-Wert (siehe Tabelle 17). Von diesen Parametern könnte Eisen nur bei der Elritze dazu geführt haben, dass die abgeleiteten Schwellenwerte tendenziell zu niedrig sind. Der pH-Wert könnte wiederum bei der Groppe die Schwellenwerte nach oben verschoben und bei der Bachforelle dazu beigetragen haben, dass überhaupt keine Schwellenwerte für Nickel ableitbar waren. Nickel ist mit keinem der übrigen Metalle korreliert.

### **Quecksilber**

Das einzige der für die vorliegende Untersuchung ausgewählten Metalle, für die die Mindestanforderungen an die Regressionen über die Oberen Whisker der gebildeten Abundanzklassen bei keiner der Fisch-/Rundmaularten erfüllt waren, ist Quecksilber und das, obwohl es mit keinem der untersuchten Begleitparameter negativ korreliert ist (siehe Tabelle 18).

Es scheint daher so zu sein, dass die in den Fließgewässern nachgewiesenen Konzentrationen zumeist noch unter dem Niveau einer Abundanzlimitierung für die untersuchten Fisch-/Rundmaularten liegen. Außerdem ist die Spannweite der Quecksilberkonzentrationen im Vergleich zu allen anderen untersuchten Metallen extrem gering, was ebenfalls einer Schwellenwertableitung für die einzelnen Fisch-/Rundmaularten entgegensteht.

Quecksilber ist mit keinem der übrigen Metalle korreliert.

#### **4.10.2 Bedeutung der ausgewerteten Metallfraktionen und Mischungstoxizitäten für die untersuchten Fisch-/Rundmaularten**

Von der Gesamtzahl der 59 Linear- und Potenz-Regressionen über die Oberen Whisker der gebildeten Abundanzklassen der untersuchten Fisch-/Rundmaularten mit für den Nachweis der Metallbelastungswirkungen plausiblen, d.h. negativen Steigungen und Signifikanzen von  $p < 0,1$  verbleiben nach Reduzierung aller Fälle, bei denen beide Regressionsarten für dieselben Paarungen aus Fisch-/Rundmaularten und Metallfraktionen die Mindestanforderungen erfüllen, auf die jeweils besser Abgesicherte, der beiden Regressionsvarianten (d.h. Linear- oder Potenz-Regression) noch insgesamt 36 Paarungen, für die Schwellenwerte abgeleitet werden konnten. Das entspricht 21 % der 174 untersuchten Paarungen.

Diese 36 Paarungen teilen sich wie in der folgenden Tabelle 41 dargestellt auf die verschiedenen untersuchten Fraktionen der Metalle auf.

**Tabelle 41: Aufteilung der 38 für die Schwellenwertableitungen verwendeten best-off-Paarungen auf die untersuchten Metallfraktionen**

Metallfraktionen	Anzahl der Paarungen	Prozentsätze von den 36 best-off-Paarungen	Metalle	Fisch-/Rundmaularten
partikulär	12	33,3%	Arsen, Blei, Cadmium, Kupfer, Nickel, Zink	Bachforelle, Bachneunauge, Groppe, Elritze, Schmerle
gesamt	15	41,7%	Arsen, Blei, Cadmium, Kupfer, Nickel, Uran, Zink	Äsche, Bachforelle, Bachneunauge, Elritze, Schmerle
gelöst	5	13,9%	Arsen, Blei, Kupfer, Uran	Bachforelle, Bachneunauge, Groppe, Schmerle
bioverfügbar	3	8,3%	Kupfer, Zink	Elritze, Schmerle
RQ Mix	1	2,8%	Mix	Schmerle

Es zeigt sich, dass für die Partikulärfractionen der untersuchten Metalle mehr als doppelt so viele für die Schwellenwertableitung geeignete Regressionen wie für die Gelöstfraktionen berechnet werden konnten. Und von allen untersuchten Fraktionen zeigten die Gesamtfractionen (also die Mischung aus Gelöst- und Partikulärfractionen) der Metalle die insgesamt meisten und stärksten Beziehungen zu den untersuchten Fisch-/Rundmaularten. Außerdem führte die Berechnung der Bioverfügbarkeit nur in 3 von 24 ausgewerteten Paarungen zu Regressionen, die die definierten Mindestanforderungen an die Schwellenwertableitung erfüllen. Für die Mischungstoxizität war das bei einer von 6 Paarungen der Fall.

Damit stehen die Ergebnisse in einem deutlichen Gegensatz zu den in den letzten Jahren vornehmlich publizierten Empfehlungen zur Verwendung berechneter bioverfügbarer Anteile der Gelöstfraktionen von Metallen zur Festlegung von Umweltqualitätsnormen zum Schutz der Gewässerfauna und -flora (Adams et al. 2020). Für deren Festlegung wurden nicht etwa Felddaten ausgewertet, die die tatsächliche ökologische Langzeitwirkung der Metallbelastungen auf Artenzusammensetzungen und Abundanzverteilungen der gewässertypischen Biozönosen widerspiegeln könnten. Vielmehr basieren diese Grenzwertableitungen auf normierten ökotoxikologischen Untersuchungen, die sich bestenfalls durch maximale Expositionsdauern von ein paar Tagen auszeichnen und mit Testorganismen durchgeführt werden, deren Physiologie und Ökologie nur sehr bedingt mit derjenigen der fließgewässertypischen Arten (egal ob Invertebraten oder Fisch-/Rundmaularten) vergleichbar ist. Außer den genannten Aspekten zu kurzer Expositionsdauer und nicht fließgewässertypischer Testarten, erschweren vor allem auch die Beschränkung der Tests auf die reine Gelöstfraktion der Metalle die Übertragbarkeit der Testergebnisse auf die Freilandverhältnisse, da so Belastungswirkungen durch die in den Gewässern sehr relevante Aufnahme partikulär gebundener Metalle (z.B. über die Nahrung) keine Berücksichtigung in den Tests finden.

Nach Adams et al. (2020) gilt die Bioverfügbarkeit in der Toxikologie „als Maß für die Geschwindigkeit und das Ausmaß, in dem eine Substanz den Wirkort erreicht. Ihre Schätzung ist eine der wesentlichen Eigenschaften in der Ökotoxikologie, wenn es um die Berechnung der Exposition oder der aus dem Wasser oder einem anderen Expositionsweg abgeleiteten Dosen geht. Das Ausmaß der Bioverfügbarkeit ist in der Regel ein begrenzender Faktor für die Auslösung einer Reaktion des Organismus.“ (übersetzt aus dem

Englischen). In dieser Begriffsbestimmung ist die Bioverfügbarkeit also nicht auf die gelöste Phase eingeschränkt. Unmittelbar anschließend führen Adams et al. (2020) jedoch aus: *„Beschränkungen der Bioverfügbarkeit sind in der Regel auf Löslichkeitsbeschränkungen, Bindungen an verschiedene Fest- oder Huminstoffe oder Überführungen in unzugängliche Phasen in der Umwelt wie Mineralien zurückzuführen. Weitere Faktoren, die sich auf die Bioverfügbarkeit von Metallen auswirken, sind der pH-Wert des Expositionsmediums, das Vorhandensein von Chemikalien, die um Bindungsstellen konkurrieren (wie Kalzium, Natrium oder Magnesium) und schließlich organismusspezifische Faktoren wie die Anzahl und Art der Bindungsstellen am Wirkort.“* Es ist symptomatisch, dass die Bioverfügbarkeit organisch gebundener Metalle über die Nahrungsaufnahme an dieser Stelle gar nicht erwähnt wird.

Gemäß Clearwater et al. (2002) ist die relative Effizienz der Cu-Aufnahme von Fischen aus dem Wasser und der Nahrung sehr ähnlich, wenn man die täglichen Dosen und nicht die Cu-Konzentrationen in den einzelnen Medien vergleicht. Demnach ist das Verhältnis zwischen der über die Nahrung aufgenommenen und der über das Wasser aufgenommenen Dosis ein gutes Unterscheidungsmerkmal für die relative Bedeutung der beiden Expositionsarten bei Kupfer und Zink. Nach Wang (2013) ist für marine Arten, die sich als Räuber oder Sedimentfresser ernähren, die Nahrung die wichtigste Quelle für die Anreicherung von Metallen, weshalb der trophische Transfer sehr grundlegende Fragen zur Toxizität von Metallen für Wassertiere und zur Festlegung von Wasserqualitätsnormen aufwerfen, die über die Exposition gelöster Metalle in der Wasserphase hinausgehen.

Insbesondere langfristige Effekte, die sich über Generationen in abnehmenden Populationsstärken im Gewässer zeigen, können daher mit derartigen Testverfahren nicht ermittelt werden. Ökotoxikologische Tests sind zwar ideal, um bestimmte akute physiologische Konsequenzen definierter Belastungen unter kontrollierten Bedingungen zu erforschen, aber ungeeignet, um daraus Schwellen- oder Grenzwerte zum Schutz natürlicher Fließgewässerzönosen vor chronischen (direkten und indirekten) Metallbelastungen ableiten zu können.

Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse zeigen, dass sich die realen Fisch-/Rundmaulpopulationen der Fließgewässer offenkundig nicht nur aufgrund der Aufnahme gelöster Metalle über die Wasserphase in ihren Abundanzen verändern, sondern, dass vor allem die partikulär gebundenen, d.h. über die Nahrung aufgenommenen Metalle eine noch größere populationsökologisch (demökologisch) wirksame Belastungswirkung auf die untersuchten Fisch-/Rundmaularten zu haben scheinen. Es spricht daher viel dafür, für die drei Fraktionen partikulär, gesamt und gelöst Schwellenwerte zum Schutz der Fischfauna in Fließgewässern basierend auf den jeweils empfindlichsten typspezifischen Arten festzulegen, während die Verwendung der berechneten Bioverfügbarkeiten zu diesem Zweck allenfalls in Ausnahmefällen Vorteile bringt. Gleiches gilt für die Berechnung und Verwendung der Mischungstoxizität als Belastungsgröße für die Schwellenwertfestlegung.

#### **4.10.3 Empfindlichkeiten der untersuchten Fisch-/Rundmaularten gegenüber den ausgewerteten Metallbelastungen**

Einen Gesamtvergleich der Anzahlen der best-off-Regressionen über die Oberen Whisker der Metallfraktions-Fisch-/Rundmaulbeziehungen, die die Mindestanforderungen zur Schwellenwertableitung erfüllen, enthält Tabelle 42. Darin sind außerdem für jede Art die Fallzahlen noch nach p-Wertebereichen unterteilt angegeben. Die Reihenfolge der Fisch-/Rundmaularten resultiert aus den jeweiligen Anzahlen der für die Schwellenwertableitung verwendbaren, bzw. verwendeten Metall-Fisch-/Rundmaulpaarungen.

**Tabelle 42: Anzahlen der Metallfraktions-Fisch-/Rundmaulbeziehungen (inkl. RQ Mix) N mit negativen Steigungen und Erfüllung der definierten Mindestsignifikanzanforderung ( $p < 0,1$ ) für die sechs untersuchten Fisch-/Rundmaularten**

Fisch-/Rundmaulart	N	N mit $p < 0,005$	N mit $p = 0,005$ bis $< 0,05$	N mit $p = 0,05$ bis $< 0,1$
Bachneunauge	12	1	8	3
Elritze	8	2	6	0
Schmerle	7	0	4	3
Bachforelle	6	0	5	1
Groppe	2	0	1	1
Äsche	1	0	0	1

### Bachneunauge

Es zeigt sich, dass die Untersuchungsergebnisse das Bachneunauge von allen sechs untersuchten Arten mit 12 Metallfraktions-Fisch-/Rundmaulbeziehungen mit negativen Steigungen und erfüllten Mindestsignifikanzen als die Art kennzeichnen, die die meisten und deutlichsten Abhängigkeiten von den untersuchten Metallen aufweist, was darauf schließen lässt, dass die Art bereits bei vergleichsweise niedrigen Metallkonzentrationen direkt in ihren Abundanzen dezimiert wird. Deshalb ist das Bachneunauge auch von den sechs untersuchten Fisch-/Rundmaularten, die Einzige, für die für alle sieben Metallspezies (Arsen (gelöst, gesamt, partikulär), Blei (gesamt, partikulär), Cadmium (partikulär), Kupfer (partikulär), Nickel (gesamt), Uran (gelöst, gesamt) und Zink (gesamt, partikulär) = 12 Regressionsbeziehungen) Schwellenwerte abgeleitet werden konnten. Nur für Quecksilber wurden die Mindestanforderungen an die Schwellenwertableitung auch beim Neunauge, wie bei allen anderen untersuchten Arten, nicht erfüllt. Somit stellt sich das Bachneunauge von den untersuchten Arten als die durch Metallbelastungen am stärksten beeinträchtigte, bzw. empfindlichste Art gegenüber Metallbelastungen heraus. Besonders beim Bachneunauge fällt auf, dass die Partikulärfractionen offenbar vorrangige Bedeutung haben, was aufgrund der spezifischen Ernährungsweise der Bachneunaugen-Querder (Larven), die von Schwebeteilchen leben (während die adulten Tiere überhaupt keine Nahrung mehr aufnehmen), nicht überrascht, aber in dieser Eindeutigkeit doch bemerkenswert ist.

Begleitparameter, die für das Bachneunauge gemäß derselben Methodik der Regressionsanalyse über die Oberen Whisker der Abundanzklassen an den untersuchten Messstellen als signifikant belastend einzustufen sind, sind: Ammoniak, Chlorid, Magnesium, Natrium und ortho-Phosphat-P.

Von diesen Begleitparametern erwies sich jedoch nur ortho-Phosphat-P als positiv mit Arsen korreliert (siehe Tabelle 13), so dass lediglich die Neunaugen-Arsenbeziehung ggf. durch den Phosphoreinfluss zu tendenziell zu niedrigen Arsenkonzentrationen hin verschoben sein könnte. Die Parameter Chlorid und Magnesium sind dagegen negativ mit Cadmium korreliert, was bedeutet, dass diese beiden Parameter die für Cadmium (partikulär) ableitbaren Schwellenwerte ggf. sogar noch in Richtung zu hoher Konzentrationen beeinflusst haben könnten. Entsprechendes gilt auch für Kupfer (partikulär), das ebenfalls negativ mit Magnesium korreliert ist. Die Empfindlichkeit der Neunaugen gegenüber Cadmium und Kupfer könnte also ggf. noch größer als ermittelt sein, während Arsen eventuell noch in etwas höheren Konzentrationen tolerabel sein könnte.

## **Elritze**

An zweiter Stelle ist die Elritze mit insgesamt 8 Regressionen zu nennen, die sich zur Schwellenwertableitung eignen. Ihre Populationen zeigen deutliche negative Abhängigkeiten von folgenden Metallkonzentrationen: Cadmium (gesamt, partikulär), Kupfer (gesamt, bioverfügbar), Nickel (gesamt) und Zink (gesamt, partikulär, bioverfügbar).

Bezüglich möglicher Einflüsse von Begleitparametern auf die für die Schwellenwertableitung genutzten Regressionen über die Oberen Whisker erwiesen sich die folgenden Parameter aufgrund ihrer nach derselben Methodik bestimmten Belastungseinflüsse auf die Abundanzen der Elritze als potenziell zu berücksichtigend: Eisen und Kalium (siehe Tabelle 13 ff.). Davon ist lediglich Eisen mit folgenden drei untersuchten Metallen korreliert: negativ mit Arsen, positiv mit Blei und positiv mit Nickel. Somit besteht lediglich die Gefahr, dass die für Nickel (gesamt) ermittelte Regressionsbeziehung durch den Eiseneinfluss tendenziell zu niedrigeren Konzentrationen verschoben sein könnte.

## **Schmerle**

Die Schmerle steht an dritter Stelle mit folgenden 7 für die Schwellenwertableitung geeigneten Metallfraktions-Fisch-/Rundmaulbeziehungen: Blei (gelöst, gesamt, partikulär), Cadmium (gesamt), RQ Mix, Zink (bioverfügbar, gesamt).

Mögliche regressionsbeeinflussende Belastungswirkungen von Begleitparametern, die auch mit den genannten Metallen korreliert sind, sind: Eisen, das positiv mit Blei korreliert ist, sowie Chlorid und Leitfähigkeit, die beide negativ mit Cadmium korreliert sind (siehe Tabelle 15). Somit besteht für die Schwellenwertableitung der drei Blei-Fraktionen die prinzipielle Gefahr, dass die abgeleiteten Blei-Schwellenwerte tendenziell zu niedrig sein könnten. Das genaue Gegenteil trifft auf die Cadmium-Schwellenwerte zu, die aufgrund des möglichen Chlorid- und Leitfähigkeitseinflusses zu hoch sein könnten.

## **Bachforelle**

Auf die Schmerle folgt die Bachforelle mit 6 für die Schwellenwertableitung geeigneten Regressionsbeziehungen: Blei (gesamt, partikulär), Kupfer (gelöst, partikulär), Uran (gesamt) und Zink (partikulär). Die große Bedeutung der Partikulärfractionen auch für die Forelle überrascht zunächst. Hierfür könnte sowohl die Metallanreicherung über die Nahrungskette als auch ein direkter Belastungseinfluss abfiltrierbarer Stoffe verantwortlich sein. Die Populationsdichten der Bachforelle sind im Vergleich zu den anderen untersuchten Arten von einer deutlich größeren Zahl an potenziell belastenden Begleitparametern abhängig, wozu u.a. auch abfiltrierbare Stoffe und Trübung gehören. Neben diesen beiden Belastungsparametern sind auch Eisen und TOC (gesamter organisch gebundener Kohlenstoff) positiv mit Blei korreliert und könnten daher einen senkenden Einfluss auf die für Blei abgeleiteten Schwellenwerte haben. Dagegen könnten die ebenfalls belastend wirkenden Parameter Calcium, Chlorid, Gesamthärte, Magnesium, Leitfähigkeit, Nitrit-N, pH-Wert und Sulfat, die alle negativ mit Cadmium korreliert sind, dazu geführt haben, dass für Cadmium überhaupt keine Schwellenwertableitung möglich war, während das belastend wirkende ortho-Phosphat positiv mit Uran korreliert ist und daher die abgeleiteten Uran-Schwellenwerte ggf. zu niedrig sein könnten. Eventuell zu hohe Schwellenwerte könnten für Kupfer die Folge seiner negativen Korrelation mit belastend wirkendem Magnesium sein. In gleicher Weise könnte es sich bei Zink im Hinblick auf den negativ mit ihm korrelierten Belastungseinfluss erhöhter pH-Werte verhalten.

Die große Zahl an belastenden Begleitparametern, die auch mit verschiedenen der untersuchten Metalle korreliert sind (siehe Tabelle 13 ff.), könnte also die Beziehungen zwischen den Metallkonzentrationen und den Abundanzen der Bachforelle stärker als bei den anderen Arten überlagert haben und daher sowohl die Anzahl der für die Schwellenwertableitung geeigneten Regressionen, als auch deren Werte entsprechend deutlich beeinflusst haben könnten.

Ein weiterer Faktor, der die Schwellenwertableitung bei den Bachforellen im Unterschied zu den anderen Fisch-/Rundmaularten signifikant überprägt haben könnte, ist der, dass die Abundanzen der Bachforellen teilweise stark von Besatzmaßnahmen verändert sein könnten, was tendenziell die Messbarkeit der Abhängigkeit der Abundanz von den Metallkonzentrationen verschlechtern dürfte und ggf. auch zu tendenziell höheren ableitbaren Schwellenwerten führen könnte.

### **Groppe**

Für die Groppe konnten nur 2 für die Schwellenwertableitung geeignete Regressionsbeziehungen ermittelt werden: Nickel (partikulär) und Uran (gelöst).

Da die Abundanzen der Groppe mit steigendem pH-Wert abnehmen, der pH-Wert aber auch negativ mit der Nickelkonzentration korreliert ist, könnten die abgeleiteten Nickelschwellenwerte ggf. noch zu hoch sein. Genau umgekehrt verhält es sich mit für die Groppe potenziell belastend wirkenden ortho-Phosphat- und Gesamtphosphorkonzentrationen im Hinblick auf Uran, mit dem diese Parameter positiv korreliert sind, so dass die abgeleiteten Uran-Schwellenwerte ggf. noch strenger, d.h. niedriger sein müssten.

Dagegen könnten die auch für die Groppe potenziell belastend wirkenden Begleitparameter Calcium, Chlorid, Leitfähigkeit, Nitrit-N, pH-Wert und Sulfat, die alle negativ mit Cadmium korreliert sind (siehe Tabelle 15), dazu geführt haben, dass für Cadmium (wie für die Bachforelle) überhaupt keine Schwellenwertableitung für die Groppe möglich war.

### **Äsche**

An letzter Stelle steht die Äsche, für die nur eine für die Schwellenwertableitung geeignete Regressionsbeziehung ermittelt werden konnte: Arsen (gesamt).

Auch bei den Begleitparametern (siehe Tabelle 13) konnten nur für Ammoniak und BSB<sub>5</sub> signifikante Belastungswirkungen für die Äsche über das Whisker-Regressionsverfahren abgeleitet werden. Beide Parameter sind weder positiv noch negativ mit einem der untersuchten Metalle korreliert, so dass für die Äsche kein Einfluss der Begleitparameter auf die Schwellenwertableitungen für die untersuchten Metalle anzunehmen ist.

Es kann aber nicht ausgeschlossen werden, dass die von allen untersuchten Arten geringsten Anzahlen an Metalle-Fische-Messwertpaaren (N = 45 bis 50) dazu beigetragen haben, dass nur für eine einzige Metallspezies und -fraktion Schwellenwerte für die Äsche ableitbar waren. Andererseits standen auch für die Schwellenwertableitungen des Bachneunauges nur wenig mehr Messwertpaare zur Verfügung, die dennoch die meisten Metall-Schwellenwertableitungen von allen untersuchten Arten ermöglichten.

#### **4.10.4 Bedeutung der Korrelationen zwischen den untersuchten Metallen**

Wie bereits in den Abschnitten 4.2.2 und 4.10.1 ausgeführt, sind einige der untersuchten Metalle mäßig stark miteinander korreliert, besonders hohe Bestimmtheitsmaße sind dabei auf den Einfluss von Ausreißern zurückzuführen. Neben der Spearman-Rangkorrelation und der linearen Regression nach der Gauß'schen Fehlerquadratmethode, die als Bezugsgröße den Mittelwert verwenden, zeigen auch Quantile Regressionen bei höheren Perzentilen deutliche Zusammenhänge zwischen den Metallen.

Das bedeutet, dass die aus den Oberen Whiskern der Abundanzklassen abgeleiteten Schwellenwerte in den betreffenden Fällen nicht eindeutig einem Metall zugeordnet werden können.

Es besteht keine Möglichkeit, diese Kreuzeffekte bei der Schwellenwertableitung auszuschließen. Der Versuch, bei einer Korrelationsanalyse das jeweils andere Metall als Kovariable mitzuführen („Partielle Korrelation“) ist nicht zulässig, da dieses Verfahren für jedes Variablenpaar eine bivariate Normalverteilung voraussetzt. Wie in Abschnitt 4.1.2 ausgeführt, sind die Metallkonzentrationen weit von einer Normalverteilung entfernt. Auch Logarithmierung oder andere Transformationen führen nicht zu Normalverteilungen. Es ist also mit statistischen Methoden nicht möglich, die Einflüsse der miteinander stark korrelierten Faktoren zu trennen. Ein z.B. für Zink abgeleiteter Schwellenwert im Verbreitungsgebiet der Elritze könnte daher zu einem gewissen Grad durch die in diesem Gebiet gegebenen Cadmium-Konzentrationen überprägt sein – und umgekehrt.

Dies bedeutet nicht, dass die Ergebnisse nicht nutzbar sind. Sie basieren allerdings auf den für die sächsischen Fließgewässer bzw. sächsischen Verbreitungsgebiete der betreffenden Fisch-Rundmaularten spezifischen Bedingungen, die insbesondere durch einen großen Anteil vererzter Regionen und damit durch mineralogische Bedingungen definierte Metallverteilungen geprägt sind. Eine Übertragung auf Gewässer in geologisch andersartigen Gebieten ist somit nicht ohne weiteres möglich.

## 5 Fallbeispiel Schwarzwasser-1

### 5.1 Fischtypologische Zuordnung

Der Wasserkörper Schwarzwasser-1 ist ein Gewässer der Forellenregion und den fischzönotischen Grundausprägungen (FZG) „Bachforellen-Groppen-Gewässer I“ (oberer Fließabschnitt: Referenz 2 - Einmündung Halsbach bis obere WK-Grenze) und „Bachforellen-Groppen-Gewässer II“ (unterer Fließabschnitt: Referenz 1 - untere WK-Grenze bis Einmündung Halsbach) zugeordnet. Leitarten sind in beiden Abschnitten die Arten Bachforelle und Groppe sowie im unteren Fließabschnitt zusätzlich die Schmerle. Elritze, Äsche und Bachneunauge haben hier den Status einer typspezifischen Art, Döbel und Gründling den Status einer Begleitart (s. Tabelle 43).

Oberhalb des WK Schwarzwasser-1 sowie in Oberläufen parallel gelegener Gewässer, befinden sich Gewässer die der FZG „Mono-Bachforellen-Gewässer“ zugeordnet sind und gemäß Referenz ausschließlich Bachforellen beherbergen. Der unterhalb des betrachteten Wasserkörpers liegende WK Schwarzwasser-2 ist ein Gewässer der Äschenregion und der FZG „Bachforellen-Groppen-Gewässer III“ zugeordnet. Gemäß Referenz ist die Fischzönose dieses Fließabschnittes artenreicher und umfasst neben den in Referenz 1 des WK Schwarzwasser-1 genannten Arten auch die Arten Atlantischer Lachs, Dreistachliger Stichling, Rotaugen, Quappe, Aal, Flussbarsch und Hecht.

Neben der Analyse der Fischvorkommen im betrachteten WK Schwarzwasser-1 selbst, kann auch die Betrachtung der Fangdaten der angrenzenden WK hinsichtlich der Metall-bezogenen Ergebnisinterpretation von Nutzen sein. So könnte bspw. das Fehlen einer Art aus weit zurückliegenden Ereignissen (z. B. Gewässer-Verunreinigungen oder anderen Extremereignissen) resultieren und noch heute aufgrund fehlender Wiederbesiedlungsquellen und/oder unzureichender Durchgängigkeit fortbestehen (näheres hierzu unter 5.2). In Tabelle 43 und Tabelle 44 sind daher auch die fischzönotischen Grundausprägungen angrenzender sowie parallel gelegener Wasserkörper aufgeführt.

Die Fokusarten deren Bestände sich gemäß der FZG für eine Gegenüberstellung mit den Metallkonzentrationen eignen, umfassen im WK Schwarzwasser-1 die Arten Bachforelle und Groppe sowie im unteren Bereich des WK zusätzlich die Arten Schmerle, und ggf. Äsche, Bachneunauge und Elritze. Insbesondere das Fehlen der Schmerle und des Bachneunauges im unteren Bereich des WK und die Defizite in den Beständen der Arten Äsche und Groppe sind hierbei von besonderem Interesse.

**Tabelle 43: Übersicht der im WK Schwarzwasser-1 (fett) und in anliegenden bzw. parallelen Gewässern (*kursiv*) zugrundeliegenden fischzönotischen Grundausprägungen (FZG). Der Artstatus im WK Schwarzwasser-1 ist in Klammern hinter jeder einzelnen Art angegeben (Leitart = L, typspezifische Art = tA, Begleitart = B, Art nicht Bestandteil der Referenzzönose = /).**

FZG	Leitarten		Sonstige Arten, die > 1 % erreichen	
<i>Mono-Bachforellen-Gewässer</i>	Bachforelle	100,0 %	keine	
<b>Bachforellen-Groppen-Gewässer I</b>	Bachforelle (L) Groppe (L)	62,0 – 70,0 % 24,0 – 30,0 %	Bachneunauge (/) Schmerle (/) Äsche (/) Elritze (/) Atlantischer Lachs (/) Barsch (/) Dreist. Stichling (/) Rotauge (/)	0 – 6,0 % 0 – 6,0 % 0 – 3,0 % 0 – 3,0 % 0 – 2,0 % 0 – 2,0 % 0 – 2,0 % 0 – 2,0 %
<b>Bachforellen-Groppen-Gewässer II</b>	Bachforelle (L) Groppe (L) Schmerle (L) Bachneunauge (tA) Äsche (tA) Elritze (tA)	56,0 – 61,5 % 23,0 – 24,4 % 3,0 – 6,0 % 2,0 – 6,0 % 2,0 – 4,0 % 1,2 – 3,0 %	Gründling (B) Döbel (B) Atlant. Lachs (/)	0,8 – 3,0 % 0,8 – 2,0 % 0 – 4,0 %
<i>Bachforellen-Groppen-Gewässer III</i>	Bachforelle Groppe Äsche Schmerle Elritze Bachneunauge Döbel	39,0 – 43,0 % 18,0 – 23,0 % 12,0 – 15,2 % 6,0 – 12,0 % 4,0 – 7,0 % 2,0 – 4,0 % 2,0 %	Gründling Döbel Atlant. Lachs	0,8 – 4,0 % 0,4 – 4,0 % 0 – 1,4 %

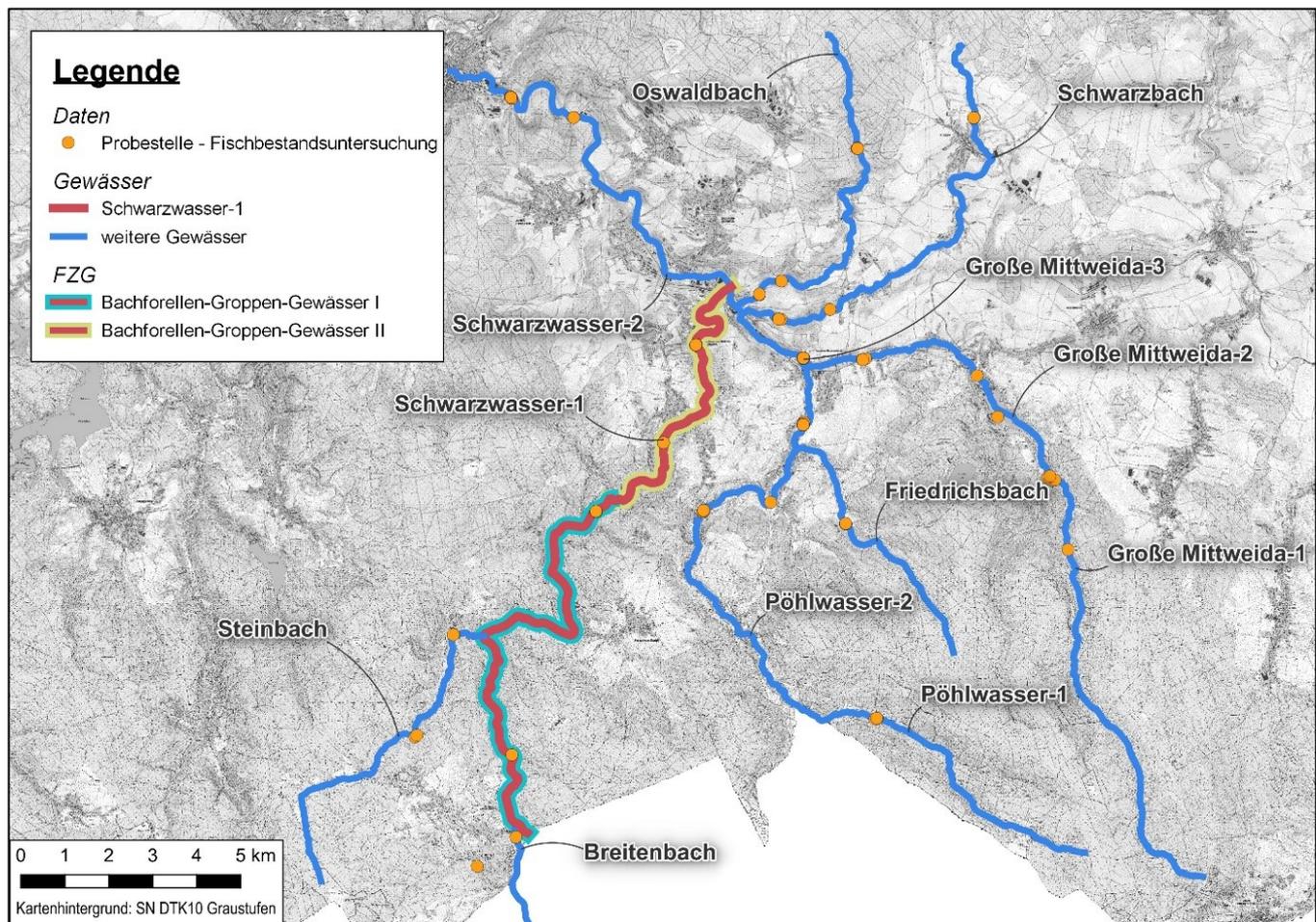
**Tabelle 44: Fischzönotische Grundausprägungen im WK Schwarzwasser-1 sowie oberhalb und unterhalb angrenzenden bzw. parallel liegenden Wasserkörpern.**

WK	Lage	Bachforellen- Groppen- Gewässer III	Bachforellen- Groppen- Gewässer II	Bachforellen- Groppen- Gewässer I	Mono- Bachforellen Gewässer
<b>Schwarzwasser-1</b>	-		X	X	
Steinbach	oberhalb				X
Breitenbach	oberhalb				X
Schwarzwasser-2	unterhalb	X			
Große Mittweida 3	parallel		X		
Große Mittweida 2	parallel			X	
Große Mittweida 1	parallel				X
Pöhlwasser-2	parallel		X	X	
Pöhlwasser-1	parallel			X	
Friedrichsbach	parallel				X
Schwarzbach	parallel			X	X
Oswaldbach	parallel			X	X

## 5.2 Aktueller Fischbestand & potenzielle Wiederbesiedlungsquellen

Bei der Betrachtung und Interpretation von Befischungsdaten ist das Wissen über natürliche Vorkommen der Fisch-/Rundmaularten im jeweiligen Gewässer bzw. Gewässerabschnitt von grundlegender Bedeutung. Ein Fehlen oder geringe Bestandsdichten einer Art können nur dann als Defizit identifiziert werden, wenn bekannt ist, dass eine Fisch-/Rundmaulart natürlicherweise im betrachteten Gewässerabschnitt vorkommen sollte.

Der zur Verfügung stehende Datensatz umfasst mittels Elektrofischung durchgeführte Fischbestandsuntersuchungen (WRRL Befischungen) aus den Jahren 2007 – 2019. Im oberen und unteren Bereich des WK (respektive je geltender Referenzzönose) wurde an jeweils zwei Probestellen gefischt, wobei an einer der beiden Probestellen lediglich in einem einzelnen Untersuchungs-jahr eine Befischung durchgeführt wurde, wohingegen die zweite Befischungsstelle im genannten Zeitraum mehrfach befischt wurde. Die detaillierten Fangergebnisse können Tabelle 45 entnommen werden. Abbildung 29 gibt einen Überblick über die Verortung der Probestellen im Wasserkörper sowie die Lage der verschiedenen Gewässer im Umfeld des betrachteten Wasserkörpers.



**Abbildung 29: Kartographische Verortung der Befischungsstellen (die dargestellten Punkte markieren die ungefähre Lage der Untergrenze der jeweiligen Befischungsstrecke) im OWK Schwarzwasser-1 und benachbarten Wasserkörpern mit Angabe der fischzönotischen Grundausrprägung (FZG) für den WK Schwarzwasser-1.**

Wie in Tabelle 45 und Tabelle 46 einzusehen, konnte die Fokusart Schmerle im WK Schwarzwasser-1 und im gesamten umliegenden Gebiet nicht nachgewiesen werden. Gropfen wurden in beiden Bereichen des WK Schwarzwasser-1 in 5 von 6 Fischbestandsaufnahmen nur in geringen Dichten nachgewiesen. Durch den Nachweis von 94 Individuen während der Befischungen im Jahr 2019 im oberen Bereich des WK (entspricht 5.222,22 Ind./ha), wurde die Abundanz der Groppe an dieser Probestelle im Mittel jedoch als „hoch“ eingestuft. Ob es sich bei diesem Fang um einen tatsächlichen Trend zu einer Verbesserung der Bestände in diesem Bereich oder lediglich um ein Zufallsereignis handelt, kann auf Basis der zur Verfügung stehenden Daten nicht abschließend bewertet werden. Bachforellen wurden an allen Befischungsstellen und meist in hohen Dichten nachgewiesen. Für beide Arten, Bachforelle und Groppe, lassen die während der Befischungen dokumentierten Größenklassen eine regelmäßige Reproduktion im WK vermuten. Im gesamten WK Schwarzwasser-1 konnte nur während einer einzigen weit zurückliegenden Befischung (2013) eine einzelne Äsche gefangen werden. Informationen über eventuelle Besatzmaßnahmen der Arten Bachforelle und Äsche liegen nicht vor.

**Tabelle 45: Absolute Fangzahlen und Fischdichten (Individuen pro Hektar) der sechs Fokusarten<sup>3</sup> für die seit 2007 durchgeführten Fischbestandsaufnahmen im WK Schwarzwasser-1.**

Fokusart	Probestelle 1* (unten)	Probestelle 2* (oben)	Probestelle 1** (unten)	Probestelle 2** (oben)
<b>Bachforelle</b>	108 Ind. 13846,15 Ind./ha (2013)		124 Ind. 14761,9 Ind./ha (2010)	126 Ind. 5040 Ind./ha (2007)
	83 Ind. 20282,05 Ind./ha (2016)	171 Ind. 9500 l/ha (2017)	171 Ind. 15833,33 Ind./ha (2013)	
	76 Ind. 4222,22 Ind./ha (2019)		122 Ind. 6777,78 Ind./ha (2016)	
			92 Ind. 5111,11 Ind./ha (2019)	
<b>Groppe</b>	1 Ind. 128,21 Ind./ha (2013)		3 Ind. 277,78 Ind./ha (2013)	-
	3 Ind. 769,23 Ind./ha (2016)	-	9 Ind. 500 Ind./ha (2016)	
	19 Ind. 1055,56 Ind./ha (2019)		94 Ind. 5222,22 Ind./ha 2019	
<b>Schmerle</b>	-	-	-	-
<b>Äsche</b>	1 Ind. 128,21 Ind./ha (2013)	-	-	-
<b>Elritze</b>	-	-	-	-
<b>Bachneun- auge</b>	-	-	-	-

\*: Bachforellen-Groppen-Gewässer II (untere WK-Grenze bis Einmündung Halsbach)

\* Bachforellen-Groppen-Gewässer I (Einmündung Halsbach bis obere WK-Grenze)

Im Hinblick auf eine Interpretation der Befischungsdaten hinsichtlich der Einflüsse erhöhter Metallkonzentrationen ist es zudem entscheidend, dass die aktuell sichtbaren Defizite in der Fischzönose sich nicht zwangsläufig in den aktuellen Metallbelastungen widerspiegeln müssen. Sofern geeignete Wiederbesiedlungsquellen fehlen, die Durchgängigkeit eingeschränkt ist, oder schlicht die Zeit bisher nicht für eine erneute Besiedlung

<sup>3</sup> Abgesehen von den hier dargestellten Fängen wurden während der Befischungen im WK Schwarzwasser-1 nur zwei Bachsaiblinge und eine Regenbogenforelle nachgewiesen (Befischungsjahr 2007).

ausreichte, könnten auch weit zurückliegende Ereignisse das Fehlen einer Art bedingen. Um diesem Umstand gerecht zu werden, wurden zusätzlich zu den Befischungsdaten des WK Schwarzwasser-1 auch die Befischungsergebnisse oberhalb gelegener Gewässerabschnitte (Hauptfaktor: Verdriftung von Larven und juvenilen Stadien), unterhalb gelegener Gewässerabschnitte (Hauptfaktor: Stromaufwärts gerichtete Wanderung adulter Individuen) und als sekundäre Wiederbesiedlungsquelle parallel gelegene Gewässerabschnitte (Verdriftung und anschließendes Aufsteigen in den WK-Schwarzwasser-1) betrachtet. Des Weiteren wurde die Durchgängigkeit vorhandener Querbauwerke im Umfeld des Wasserkörpers sowie im Schwarzwasser-1 selbst berücksichtigt. Durch diese Betrachtung des gesamten umliegenden Gebietes ergibt sich für jede der Fokusarten ein umfassendes Bild hinsichtlich ihrer Vorkommen bzw. ihre mittel- bis langfristigen Chancen auf Wiederbesiedlung.

In den verschiedenen Wasserkörpern im Umfeld des WK Schwarzwasser-1 ist die Bachforelle ubiquitär vertreten. Informationen darüber, inwiefern diese Bestände durch Besatz beeinflusst sind, liegen nicht vor. Groppen, Äschen und Elritzen wurden in allen Wasserkörpern nur in sehr geringen Mengen nachgewiesen. An manchen Befischungsstellen konnten nur einzelne Individuen dieser Arten gefangen werden. Schmerlen und Bachneunaugen fehlen im gesamten Gebiet vollständig. Eine Wiederbesiedlung des WK-Schwarzwasser-1 erscheint, unabhängig von den abiotischen Verhältnissen, aufgrund der großen Entfernung der nächstgelegenen Probestelle mit Artnachweis (ca. 23 km für die Schmerle und ca. 104 km für das Bachneunauge) und der unzureichenden Durchgängigkeit (allein 4 QBW im unteren Bereich des WK Schwarzwasser-1 und 4 QBW im WK Schwarzwasser-2 die als „nicht durchgängig“ eingestuft wurden) unwahrscheinlich.

**Tabelle 46: Schematische Gegenüberstellung Artnachweise der Fokusarten im Umfeld des WK Schwarzwasser-1 seit 2007. Im Falle mehrerer Probestellen und Befischungsdurchgänge wurde über die Jahre und Probestellen gemittelt. Die Felder von Wasserkörpern mit mehreren zugrundeliegenden Referenzen wurden, falls sich hierdurch Unterschiede ergaben, in Fließrichtung geteilt dargestellt.**

Lage	WK	Bachforelle	Groppe	Schmerle	Äsche	Elritze	Bachneunauge
oberhalb	Steinbach	X	-	-	-	-	-
oberhalb	Breitenbach	X	-	-	-	-	-
	Schwarzwasser-1 Referenz 2 (oben)	X	X	-	-	-	-
	Schwarzwasser-1 Referenz 1 (unten)	X	X	-	X	-	-
unterhalb	Schwarzwasser-2	X	X	-	X	X	-
parallel	Große Mittweida 3	X	X	-	X	X	-
parallel	Große Mittweida 2	X	-	-	-	-	-
parallel	Große Mittweida 1	X	-	-	-	-	-
parallel	Pöhlwasser-2	X	X	-	X	-	-
parallel	Pöhlwasser-1	X	-	-	-	-	-
parallel	Friedrichsbach	X	-	-	-	-	-
parallel	Schwarzbach	X	-	-	-	X*	-
parallel	Oswaldbach	X	-	-	-	X*	-

**Tabelle 47: Legende (Klassifizierung gemäß der artspezifischen ermittelten Abundanzklassen)**

Darstellung	Bedeutung
X	Sehr hohe Abundanz
X	Hohe Abundanz
X	Mittlere Abundanz
X	Geringe Abundanz
X / -	Sehr geringe Abundanz (X) oder Art fehlend (-) und Bestandteil der Referenzzönose
X	Art nachgewiesen, aber kein Bestandteil der Referenzzönose
-	Art fehlt und ist kein Bestandteil der Referenzzönose

### **5.3 Interpretation der Fischbestandsverhältnisse auf Grundlage der Projekt-Erkenntnisse**

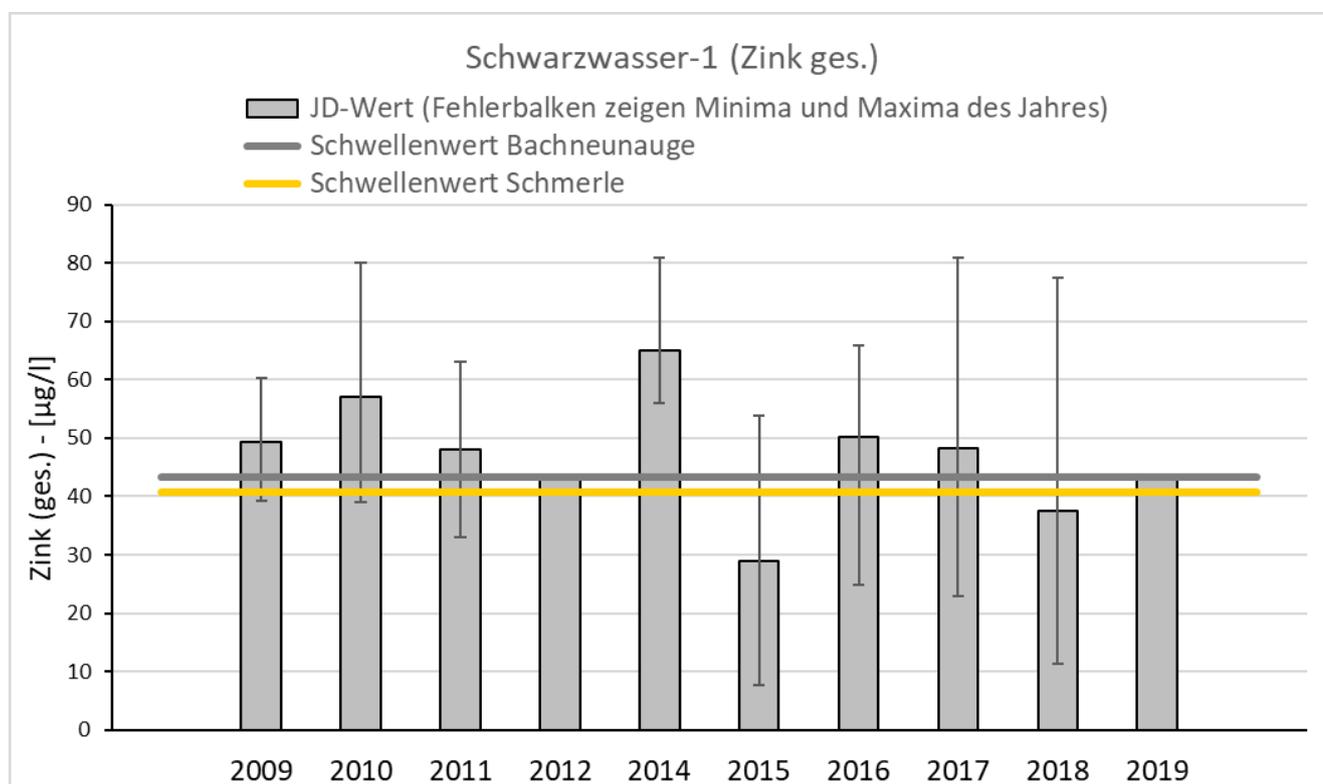
In Abbildung 30, Abbildung 31 & Abbildung 32 wurden die in den statistischen Analysen ermittelten Schwellenwerte (entsprechend dem Übergang zw. Gefährdungsklasse 2 und Gefährdungsklasse 3) den Messwerten der chemisch-physikalischen Messstelle des WK Schwarzwasser-1 (OBF40900) gegenübergestellt. Für die Gegenüberstellung wurde eine Darstellung der Jahresdurchschnittswerte (JD-Werte) gewählt und Maxima sowie Minima der Einzelmessungen eines jeden Jahres wurden mittels Fehlerbalken kenntlich gemacht. Da im Zuge der statistischen Analysen nicht für alle Fokusarten und jedes Metall ein signifikanter Zusammenhang nachgewiesen werden konnte, stehen für eine Gegenüberstellung nur Schwellenwerte für die Arten Schmerle (Zink ges., Cadmium ges.), Bachneunauge (Zink ges., Zink part., Arsen ges., Arsen part., Cadmium ges., Cadmium part.), Elritze (Zink ges., Zink part., Cadmium ges., Cadmium part.) und Bachforelle (Zink part.) zur Verfügung.

Auf die Darstellung von Schwellenwerten die in einem höheren Wertebereich liegen als die JD-Werte der Metalle wurde im Falle der Bachforelle (für die partikuläre Zinkbelastung) und der Elritze (für die Zink- und Cadmiumbelastung der Gesamtfraktion) verzichtet. Da auch das Bachneunauge, als typspezifische Art der FZG, Bestandteil der Referenzfischzönosen des WK Schwarzwasser-1 ist, konnten die Schwellenwerte für diese Art in allen metallspezifischen Abbildungen dargestellt werden, da für das Bachneunauge als einzige Art Schwellenwerte für alle drei Metalle ermittelt werden konnten und sich die Art somit gut für eine Einordnung der drei Metall-Belastungen in Bezug auf die ermittelten Schwellenwerte eignet.

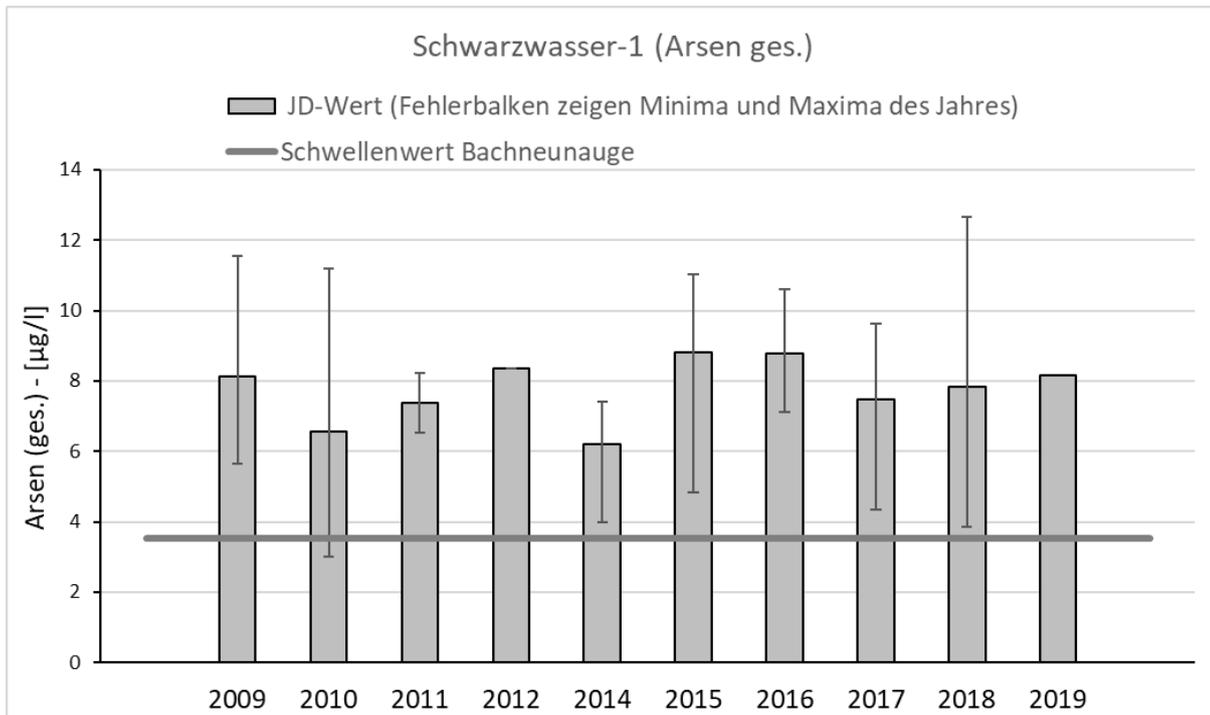
Im Hinblick auf die im WK vollständig fehlende Leitart, und hier auch Fokusart, Schmerle ist zu erkennen, dass die Zink-Belastungen (Zink ges.) im Mittel in nahezu allen Einzeljahren über dem ermittelten Schwellenwert liegen. Selbst in den Jahren 2015 und 2018, in denen die mittlere Zink-Konzentration den Schwellenwert unterschreitet, wurde der Wert in Einzelmessungen dieser Jahre überschritten. Der Schwellenwert für die Schmerle bei der Betrachtung der Cadmium-Belastung wurde im Mittel in jedem betrachteten Jahr überschritten. Bei Betrachtung des 10-Jahres Mittelwertes von Zink (ges.) und Cadmium (ges.) entspräche dieser Wert in beiden Fällen für die Fokusart Schmerle der Gefährdungsklasse 5, überschreitet also den höchsten abgeleiteten Schwellenwert. Ähnliches gilt für das in Referenz 1 des Schwarzwasser-1 typspezifische Bachneunauge und die Zink-, Arsen- und Cadmium-Belastungen. Eine direkte Übertragung der Ergebnisse zum Bachneunauge auf die sonstigen für den WK Schwarzwasser-1 relevanten Fischarten ist jedoch nicht möglich.

**Tabelle 48: Einstufung der Gefährdungsklasse der Fokusart Schmerle anhand der in den statistischen Analysen abgeleiteten Schwellenwerte.**

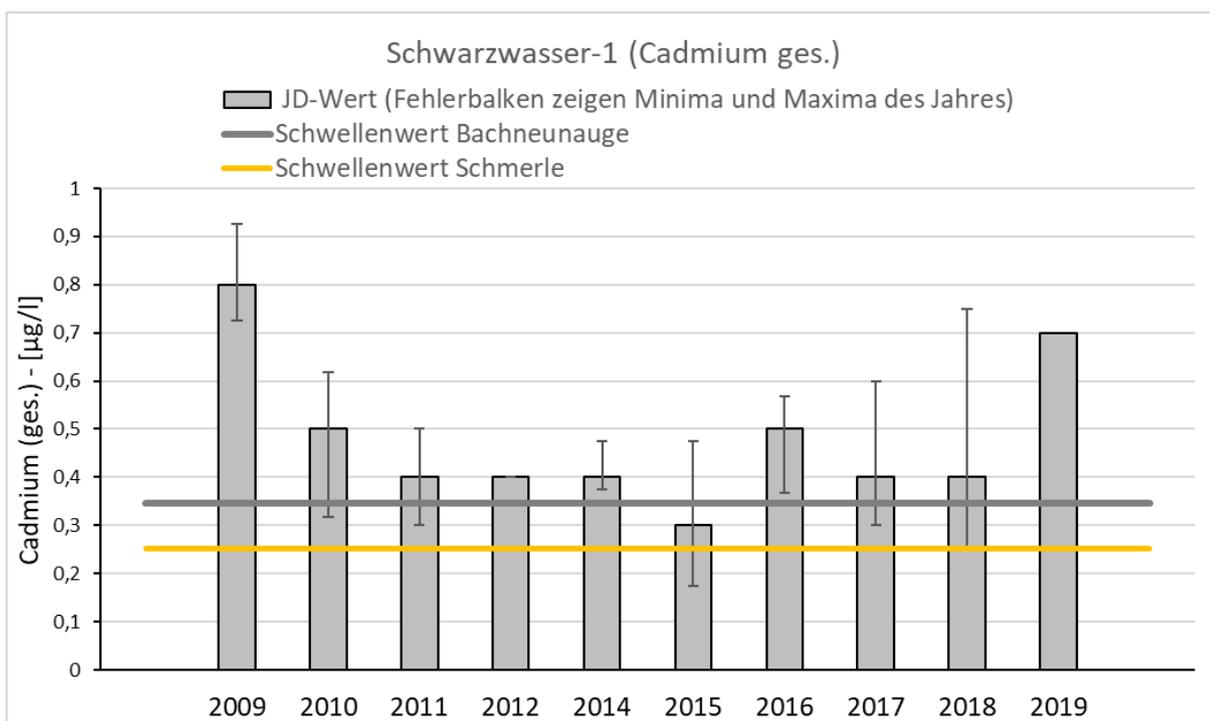
Metall	Durchschnittliche JD-Werte der Jahre 2009 bis 2019 im WK Schwarzwasser-1	Schwellenwert zur Abgrenzung der Gefährdungsklasse 5 der Fokusart Schmerle	Höhe der Überschreitung	Einstufung in Gefährdungsklasse
Zink (ges.)	47,1 µg/l	45,6 µg/l	1,5 µg/l	Gefährdungsklasse 5
Cadmium (ges.)	0,31 µg/l	0,29 µg/l	0,03 µg/l	Gefährdungsklasse 5



**Abbildung 30: Jahresdurchschnittswerte (JD-Werte) der Zink-Belastung (ges.) im WK Schwarzwasser-1 für die Jahre 2009 bis 2019 an der Messstelle OBF40900.**



**Abbildung 31: Jahresdurchschnittswerte (JD-Werte) der Arsen-Belastung (ges.) im WK Schwarzwasser-1 für die Jahre 2009 bis 2019 an der Messstelle OBF40900.**



**Abbildung 32: Jahresdurchschnittswerte (JD-Werte) der Cadmium-Belastung (ges.) im WK Schwarzwasser-1 für die Jahre 2009 bis 2019 an der Messstelle OBF40900.**

Neben der Betrachtung der im Projekt ermittelten artspezifischen Schwellenwerte, könnte auch die Betrachtung der höchsten nachgewiesenen Jahresmittelwerte an Probestellen mit Artnachweis (siehe (siehe auch Tabelle 21 unter Kapitel 4.4.2) einen wichtigen Hinweis zur Bewertung der Defizite in der Fischzönose geben. In Tabelle 49 sind daher die jeweiligen maximalen Zink-, Arsen- und Cadmium- Jahresmittelwerte angegeben die an einer Probestelle mit Artnachweis für die Schmerle, Groppe und Bachforelle in

den in die statistischen Analysen eingeflossenen Daten vorkommen. Es zeigt sich, dass die betrachteten Arten auch in Gewässern nachgewiesen wurden, an deren zugeordneter Messstelle im Jahresdurchschnitt deutlich höhere Belastungen gemessen wurden.

**Tabelle 49: Höchste Zink-, Arsen- und Cadmium-JD-Werte an Probestellen mit Schmerlen-, Gropen- oder Bachforellen-Nachweisen und langjährige Jahresmittelwerte im WK Schwarzwasser-1 auf Basis der in die statistischen Analysen eingeflossenen Datengrundlage.**

Parameter	Schmerle	Groppe	Bachforelle	Durchschnittliche JD-Werte der Jahre 2009 bis 2019 im WK Schwarzwasser-1
Zink ges.	1.068,3 µg/l	65,8 µg/l	1.716,7 µg/l	47,1 µg/l
Zink gel.	925,8 µg/l	152,3 µg/l	1.616,7 µg/l	48,8 µg/l
Arsen ges.	44,1 µg/l	120,7 µg/l	120,7 µg/l	7,8 µg/l
Arsen gel.	18,35 µg/l	114,00 µg/l	114,00 µg/l	5,60 µg/l
Cadmium ges.	7,35 µg/l	1,48 µg/l	7,38 µg/l	0,31 µg/l
Cadmium gel.	5,583 µg/l	1,150 µg/l	7,000 µg/l	-

Die Ergebnisse der Literaturrecherche legen nahe, dass sowohl die hohen Zink-, als auch die erhöhten Cadmium-Konzentrationen für die Defizite in der Fischzönose eine Rolle spielen könnten. In einer Studie mit Bachforellen im Dottersackstadium konnten bspw. 100 % Mortalität nach 18 Tagen bei einer Zink-Belastung von 49 µg/l beobachtet werden (Sayer et al. 1989), was ungefähr der Größenordnung der Belastung des WK Schwarzwasser-1 entspricht. Andere Studien finden jedoch erst bei höheren Konzentrationen Effekte. Der Einfluss von pH und Wasserhärte sowie Wechselwirkungen mit anderen Chemikalien können hierfür eine Erklärung liefern. Die Zink-Konzentrationen im WK Schwarzwasser-1 liegen von letalen Konzentrationen für adulte Schmerlen, wie sie in einer Studie von Solbe & Flook 1975 gezeigt wurden, weit entfernt (LC<sub>50</sub> 25-d in hartem Wasser: 1,90 – 2,00 mg/l). Erkenntnisse über chronische Effekte niedrigerer Konzentrationen oder negative Einflüsse auf die Eier oder Juvenilstadien der Schmerlen liegen nicht vor.

In einer Untersuchung von Haugen et al. 2007 lag die „No Observed Effect Concentration“ (NOEC) von Cadmium für den Parameter „Körperlänge“ von Forellen-Brütlings bei 0,14 bis 0,95 µg/l, in Abhängigkeit von der Wasserhärte. Da sich die Cadmium-Belastung des WK Schwarzwasser-1 diese Werte überschreitet, könnte der Bruterfolg der Bachforellen demnach negativ beeinflusst werden. Für die Elritze dokumentierten Glynn et al. 1972 bereits ab 0,34 µg Cd/l in weichem Wasser bei langer Expositionsdauer (> 150-d) eine erhöhte Mortalität gegenüber einer Kontrollgruppe. Cadmium reichert sich dabei vorwiegend in Leber und Nieren an. Da sich die Cadmium-Belastung des WK Schwarzwasser-1 in diesen Bereichen bewegt (die Wasserhärte jedoch nicht), könnte dies einen negativen Einfluss auf die Besiedlung des WK Schwarzwasser-1 durch die Art haben. Die Ergebnisse der Analysen dieses Projektes zeigen hingegen, dass die Elritze auch in Gewässern mit höheren Cadmium-Belastungen noch Populationen ausbilden kann (ermittelter Schwellenwert: 1,1 µg/l (ges. Fraktion)).

Über chronische oder entwicklungsschädigende Einflüsse von erhöhten Arsen-Konzentrationen in Bezug auf die Fokusarten konnten im Zuge der Literaturrecherche keine weiterführenden Informationen gewonnen werden. Inwiefern sich die erhöhte Belastung also auf die Bestände der Arten auswirkt, kann auf dieser Basis nicht bewertet werden.

Für die Arten Bachneunauge und Äsche konnten für Arsen, Cadmium und Zink im Zuge der Literaturrecherche keine artspezifischen Schwellenwerte und Grenzkonzentrationen ermittelt werden. Für die mit der Äsche (*Thymallus thymallus*) nah verwandte arktische Äsche (*Thymallus arcticus*) ist bekannt, dass insbesondere ihre juvenilen Stadien empfindlich auf Arsenintoxikationen reagieren (Buhl und Hamilton 1991). Eine besondere Empfindlichkeit der europäischen Äsche im Vergleich zu den fünf anderen betrachteten Fokusarten konnte in den Analysen des Projektes jedoch nicht bestätigt werden. Nach Dokker (2015) gibt es keine Hinweise darauf, dass Neunaugen im Allgemeinen sensibler auf chemische Verunreinigungen reagieren als andere Fische. Die Autorin weist jedoch darauf hin, dass juvenile Neunaugen durch ihre Lebensweise als langlebige Filtrierer im direkten Kontakt mit kontaminierten Sedimenten potenziell einer höheren Schadstoffmenge als andere Fische ausgesetzt sind und diese auch anreichern. Eine Vermutung die anscheinend durch die Ergebnisse der Analysen dieses Projektes bestätigt wird.

Die Erkenntnisse aus der durchgeführten Literaturrecherche und aus den Gegenüberstellungen der im Zuge des Projektes ermittelten Schwellenwerte mit den chemischen Messwerten des WK Schwarzwasser-1 können nicht zweifelsfrei klären, ob das Fehlen der Fokusarten Schmerle, Bachneunauge und Elritze, sowie die Defizite der Fokusarten Äsche und Groppe einzig auf die Belastungen durch Zink, Arsen und/oder Cadmium zurückzuführen sind. Die Ergebnisse der in diesem Bericht dargestellten statistischen Analysen deuten allerdings darauf hin, dass die hohen Zink- und Cadmium-Konzentrationen mindestens hinderlich für die (Re-)Etablierung von Schmerlen-Beständen im Gewässer sein könnten und sich zudem die erhöhten Cadmium-Konzentrationen negativ auf den Bruterfolg der Bachforellen auswirken könnten.

## 6 Zusammenfassung

Mit dem vorliegend dokumentierten Vorhaben sollten die wirksamen Zusammenhänge zwischen Halb- und Schwermetallbelastungen von Fließgewässern und dem Zustand der Populationen einzelner Fisch-/Rundmaularten in Sachsen ermittelt werden. Es wurden die Schwermetalle Blei (Pb), Cadmium (Cd), Kupfer (Cu), Nickel (Ni) und Zink (Zn) sowie das Halbmetall Arsen (As) und ihre Wirkungen auf die Fisch-/Rundmaularten Groppe (*Cottus gobio*), Schmerle (*Barbatula barbatula*), Bachneunauge (*Lampetra planeri*), Bachforelle (*Salmo trutta*), Elritze (*Phoxinus phoxinus*) und Äsche (*Thymallus thymallus*) betrachtet. Die so gewonnenen Erkenntnisse wurden beispielhaft auf den, vor allem durch Zink belasteten Fließgewässer-Wasserkörper Schwarzwasser-1 mit seinen Fischleitarten Groppe, Bachforelle und Schmerle als Fallbeispiel angewendet.

Es wurde zunächst die aktuelle Literatur bezüglich der Auswirkungen von Gewässerbelastungen durch die vorgenannten Metalle auf die ausgewählten Fisch-/Rundmaularten ausgewertet, um eine Wissensbasis bezüglich der Sensitivität einzelner Fisch-/Rundmaulartenpopulationen und deren Lebensstadien unter Bedingungen erhöhter Schwermetallkonzentrationen zu schaffen.

Die recherchierten Publikationen umfassen wissenschaftliche Arbeiten und sonstige Veröffentlichungen (behördliche Veröffentlichungen, Bücher und Reporte) aus 38 Ländern. Europäische Veröffentlichungen lieferten erwartungsgemäß die meisten artspezifischen Informationen zu den sechs Fokusarten, während Publikationen aus Nordamerika und anderen Teilen der Welt Informationen zu verwandten Fisch-/Rundmaularten oder grundlegende Forschungsergebnisse zu der Wirkweise eines Schwermetalls auf Fische/Rundmäuler im Allgemeinen beitragen konnten.

Es konnten die verschiedenen Wirkpfade und die auf die Toxizität wirkenden Einflussfaktoren der sechs betrachteten Metalle herausgearbeitet werden. Informationen zu experimentell ermittelten Grenz- oder Schwellenwerten wurden zusammengetragen und hierbei ein besonderes Augenmerk auf Studien mit artspezifischen Ergebnissen zu den sechs Fokusarten gelegt.

Die Ergebnisse der Literaturrecherche wurden in elementspezifischen Steckbriefen zusammengefasst. Die Steckbriefe sind folgendermaßen gegliedert:

- Elementspezifische Basisinformationen
- Wassergefährdungsklassen (WGK) von Verbindungen des betrachteten Elements
- Allgemeine Informationen zu Vorkommen und Eintragspfaden
- Bekannte Aufnahmewegen des Elements
- Toxische Wirkung
- Einflussfaktoren auf die Toxizität
- Grenz- & Literaturwerte
- Artspezifische Betrachtung ausgewählter Fokusarten
- Zusammenfassung & Vergleiche mit sächsischem Belastungsspektrum

Während Kupfer, Nickel und Zink essenzielle Spurenelemente sind und Arsen als potenziell essenziell anzusehen ist, gilt dies nicht für Blei und Cadmium. Für die erstgenannten vier Elemente gibt es folglich für jeden aquatischen Organismus eine artspezifische „Konzentrationsspannbreite“, in der ihre Konzentration zuträglich ist bzw. ohne Schädigungen toleriert wird, wobei sowohl eine zu hohe als auch eine zu niedrige Kupfer-, Nickel- oder Zinkkonzentration negative Auswirkungen haben kann. Für die nicht essenziellen Elemente gilt, dass geringe Stoffkonzentrationen ohne negative Folgen für aquatische Organismen

bleiben. Sind die Konzentrationen jedoch „zu hoch“, so haben sowohl die essenziellen als auch die nicht essenziellen Schwermetalle negative Auswirkungen auf die Organismen.

Fische können die Metalle entweder über die Kiemen, die Haut (perkutan) oder den Darm (enteral) aufnehmen. Die Toxizität der betrachteten Metalle besteht im Wesentlichen darin, dass ihre Kationen an verschiedenen Stellen in Konkurrenz zu den essenziellen Kationen Natrium ( $\text{Na}^+$ ), Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), und Magnesium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) treten und den Ionenhaushalt, die Osmoregulation und den Energiestoffwechsel stören. Bedingungen, die die Löslichkeit der Metallionen beeinflussen, fördern daher auch ihre Toxizität. Die höchste Toxizität haben die Schwermetalle folglich bei einer geringen Wasserhärte und niedrigen pH-Werten. Als Folge dieser toxischen Einflüsse sind sowohl körperliche Beeinträchtigungen (bis hin zum Tod) als auch Verhaltensänderungen dokumentiert. Betroffen sind meist die an der Aufnahme beteiligten Organe (Kiemen, Leber, Niere) und sämtliche Entwicklungsstadien der Fische. Juvenile Stadien und Eier weisen meist die größte Sensitivität auf.

Bei den in der Literaturrecherche zusammengetragenen Konzentrationsdaten handelt es sich zumeist um Ergebnisse aus Laboruntersuchungen. Eine direkte Übertragung auf Fischpopulationen im Freiland ist daher nicht zielführend. Literaturwerte geben jedoch Hinweise, ob sich die Konzentrationen eines betrachteten Metalls in Bereichen bewegen, in denen negative Folgen für Fische/Rundmäuler zu erwarten wären.

Die in sächsischen OWK im Zeitraum zwischen 2015 und 2019 gemessenen Metallkonzentrationen erreichen nur in wenigen Fällen Konzentrationen, die eine direkte physiologische Schädigung der Fische/Rundmäuler und ihrer Larven in den betroffenen OWK vermuten lassen. Für die Metalle Blei, Cadmium, Kupfer, Nickel und Zink wurden in Einzelmessungen Werte erreicht, die toxische Wirkungen auf bestimmte Fisch-/Rundmaularten und Lebensstadien zum Zeitpunkt der Messung wahrscheinlich erscheinen lassen. Da auch Arsen an manchen Messstellen die recherchierten Grenzwerte deutlich übersteigt, lassen sich auch hier nachteilige Effekte für die dortige Fischzönose vermuten. Für Cadmium und Zink erreichen Einzelmessungen eine Größenordnung einzelner  $\text{LC}_{50}$ -Werte. Erhöhte Mortalitäten (zumindest bei Larven und Brütlingen) erscheinen in diesen Fällen daher denkbar. Einzelne hohe Belastungen können ggf. sogar folgenfrei bleiben, sofern sie nicht genau im Reproduktionszeitraum der Fische/Rundmäuler auftreten. In Gewässern bzw. Gewässerabschnitten mit dauerhaft hohen Belastungen wird die Reproduktion sensibler Fisch-/Rundmaularten wahrscheinlich in stärkerem Maße negativ beeinflusst.

Hinzu kommt, dass erhöhte Metallkonzentrationen auch auf andere aquatische Organismen wirken, was wiederum – z.B. über die Nahrungskette – Auswirkungen auf die Fischzönose eines Gewässers haben kann. Verschiedene für Gewässer festgelegte Grenzwerte nehmen auf diesen Umstand Rücksicht, indem um ein Vielfaches niedrigere Grenzwerte festgesetzt werden, um Schädigungen aquatischer Organismen im Allgemeinen zu vermeiden.

Aufbauend auf der Literaturlauswertung wurden statistische Auswertungen von Befischungsdaten und physiko-chemischen Messdaten aus dem sächsischen Fließgewässermonitoring durchgeführt.

Es wurden Ergebnisse aus Fischbestandsaufnahmen (vorwiegend Elektrobefischungen) ausgewertet, die in den Jahren 2003 bis 2020 durchgeführt wurden. Dieser Datensatz umfasste 5.791 Einzelbefischungen, während derer insgesamt 65 verschiedene Fisch-/Rundmaularten und 524.497 Individuen nachgewiesen wurden. Davon machen die im Projekt betrachteten Arten insgesamt 296.568 Individuen aus. Davon war die häufigste Art im Datensatz die Bachforelle, in absteigender Häufigkeit gefolgt von Schmerle, Elritze, Groppe, Bachneunauge und Äsche.

Die Daten wurden in eine Projektdatenbank überführt, dort validiert und weiter aufbereitet (Prüfung der Wertebereiche, Berechnung von Jahresmittelwerten, Erzeugung der Eingabedaten für die Bioligandenmodelle, Berechnung von Mischungstoxizitäten, Berechnung von partikulär gebundenen Metallen, Differenzierung der Befischungsstellen nach den Hauptverbreitungsgebieten der betrachteten Fisch-/Rundmaularten). Die Zuordnung der biotischen zu den abiotischen Daten erfolgte anhand der Fließgewässerswasserkörper und der Probenahmejahre.

Mit den so aufbereiteten Daten wurden – differenziert nach den Verbreitungsgebieten der sechs Fokuserarten – deskriptiv-statistische Untersuchungen durchgeführt (Histogramme, Q-Q-Plots). Es zeigte sich, dass die Konzentrationen aller untersuchungsrelevanten Metalle in allen Verbreitungsgebieten signifikant von der Normalverteilung abweichen, so dass statistische Methoden, die derartige Verteilungen voraussetzen (z.B. t-Tests), nicht angewendet werden können.

Anschließend wurden die Metalle auf ihre Zusammenhänge untereinander sowie in Bezug auf verschiedene Begleitparameter untersucht. Dazu wurden Spearman-Rangkorrelationen und lineare Regressionen berechnet. Die festgestellten Zusammenhänge zwischen Metallen lassen sich gut über mineralogische Vergesellschaftungen erklären (z.B. Cadmium mit Zink). Zusammenhänge zwischen Metallen und Begleitparametern gaben deutliche Hinweise auf die Herkunft der Metalle (z.B. Quecksilber wahrscheinlich abwasserbürtig, Cadmium, Arsen, Blei, Kupfer, Zink eher nicht abwasserbürtig, Kupfer und Zink aus Oberflächenabfluss).

Die festgestellten Korrelationsbeziehungen der abiotischen Parameter wurden im weiteren Verlauf für die Beurteilung der festgestellten Zusammenhänge zwischen Metallen und Fisch-/Rundmaulabundanzen herangezogen.

Zur Beurteilung etwaiger Zusammenhänge zwischen Metallen und Fisch-/Rundmaulvorkommen wurden verschiedene statistische Verfahren herangezogen:

- Zusammenhänge zwischen Präsenz-Absenz-Daten und Metallkonzentrationen
  - Gruppierung mittels Box-Whisker-Plots und Signifikanzprüfung durch Kolmogorov-Smirnov-Tests
  - Berechnung Binomialer Logistischer Regressionen
- Zusammenhänge zwischen Artabundanzen und Metallkonzentrationen
  - Box-Whisker-Plots und Regressionen über die Oberen Whisker der Metallkonzentrationen
  - Quantile Regressionen

Zur Beurteilung von Fremdeinflüssen und Erkennung von Scheinkorrelationen wurden die Untersuchungen ebenfalls mit den Begleitparametern durchgeführt. Außerdem wurde der Einfluss der für die Bioligandenmodelle besonders relevanten Parameter DOC, pH und Härte analysiert. Dazu wurde geprüft, inwieweit die Artabundanzen mit den von der kanadischen Umweltbehörde entwickelten Modellen für Cadmium- und Zink-Schwellenwerte zusammenhängen.

Die **Kolmogorow-Smirnow-Tests der Präsenz-Absenz-Konzentrationsunterschiede** (Messwertgruppen mit und ohne Artnachweis) sowie die **Vergleiche zwischen den Oberen Whiskern der Metallkonzentrationen beider Fallgruppen** bei den untersuchten Fisch-/Rundmaularten und Metall-Parametern zeigen, dass zwischen den Metallkonzentrationen und dem Fehlen oder Vorhandensein einer Fisch-/Rundmaulart ein Zusammenhang besteht. In 35 von 108 Kombinationen wurden signifikante Zusammenhänge festgestellt. Zur Ableitung von Schwellenwerten für ein „ökologisch angemessenes Vorkommen“ einer Art hat diese Untersuchung insgesamt jedoch nur eine eingeschränkte Aussagekraft, da der Obere

Whisker der Präsenz-Messstellen nichts darüber aussagt, in welcher Individuendichte die Fisch-/Rundmaulart bei dieser Metallkonzentration noch vorkommen kann.

Die **Binomialen Logistischen Regressionsanalysen**, die die bedingte Wahrscheinlichkeit eines Artvorkommens in Abhängigkeit vom jeweiligen Metall-Parameter modellieren, ergaben keine signifikanten Zusammenhänge mit ausreichend hohen Pseudo-Bestimmtheitsmaßen. Dies kann daran liegen, dass die Metallgehalte nur in wenigen Fällen so hoch sind, dass sie zum kompletten Ausfall einer Art führen. Dies Ergebnis gibt allerdings der oben formulierten Annahme Unterstützung, dass eine Ableitung von Schwellenwerten aus den Oberen Whiskern der Präsenz-Absenz-Auswertung nicht zielführend ist.

Die auf den **Box-Whisker-Plots von Abundanzklassen** basierenden Regressionsanalysen über die Oberen Whisker erwiesen sich als am besten geeignet, um konkrete Größenordnungen limitierender Metallkonzentrationen für bestimmte Individuendichten der verschiedenen Fisch-/Rundmaularten ableiten zu können. Die Verwendung der **berechneten bioverfügbaren Metallkonzentrationen** bei den beschriebenen Auswertungsverfahren entsprach mit Ausnahme einiger weniger Fälle, nicht den Erwartungen höherer statistischer Signifikanzen und Erklärungsanteile. Insgesamt war bei den meisten untersuchten Fisch-/Rundmaularten und Metallen eher das Gegenteil der Fall. Dagegen zeigten die durch Differenzberechnungen aus den Gesamtmethylfraktionen und den Gelöstfraktionen ermittelten partikulär gebundenen Metallfraktionen häufig signifikante Zusammenhänge zwischen den Metallkonzentrationen und Artabundanzen.

Die **Quantilen Regressionsanalysen**, die als kontinuierliche Variante der Whisker-Regressionsmethode angesehen werden können, zeigten für die oberen betrachteten Quantile in ca. 15 bis 30% der Fälle starke und statistisch signifikante Zusammenhänge zwischen Individuendichten und Metallkonzentrationen. Dass die Anzahl der Fälle mit höheren Quantilen zunimmt ist ein weiterer Hinweis darauf, dass die jeweilige Metallkonzentration in diesen Bereichen limitierend wirkt. Unter Verwendung der bei der Whisker-Regression zugrunde gelegten Klassengrenzen konnten aus den Modellgleichungen der Quantilen Regressionsen Metallkonzentrationen berechnet werden. Sie entsprechen den aus den Box-Whisker-Plots abgeleiteten Werten in guter Näherung.

Untersuchungen unter Verwendung der kanadische **CWQG-Schwellenwerte** geben weitere Hinweise auf die Einflüsse von Cadmium und Zink.

Die für die verschiedenen Metallspezies abgeleiteten fisch-/rundmaulart- und metallfraktionsspezifischen **Schwellenwerte der Abundanzklassen bzw. Gefährdungsklassen** können die Gewässerbewirtschaftungsplanung hinsichtlich einer gewässerökologischen Beurteilung chemischer Monitoringdaten bezüglich potenzieller Metallbelastungen für Fische unterstützen. Anders als mit artübergreifend definierten Beurteilungswerten, kann so der potenzielle Belastungseinfluss einer Metallspezies für eine bestimmte Fisch-/Rundmaulart differenziert nach definierten Gefährdungsgraden eingestuft werden. Damit bieten die Gefährdungsklassen auch für die Kausalanalyse defizitärer Fischzönosen oder Einzelartvorkommen überhaupt erst die erforderlichen Beurteilungsmaßstäbe für die Identifizierung oder den Ausschluss bestimmter Metallbelastungen als Ursachen festgestellter Defizite bei den Fisch-/Rundmaulabundanzen.

Einschränkend ist jedoch insbesondere auf die sich aus der mineralogischen Vergesellschaftung einiger Metalle ergebenden Konsequenzen hinzuweisen. Es wurde gezeigt, dass sich diese Einflüsse mit rein statistischen Methoden nicht auftrennen lassen. Aus diesem Grund sind die hier abgeleiteten Schwellenwerte im räumlichen Kontext und seinen Nebenbedingungen (hoher Anteil von durch Vererzung geprägten Gebieten) zu sehen und nicht auf beliebige andere Gebiete übertragbar.

Für das **Fallbeispiel Schwarzwasser-1** lässt sich aus der durchgeführten Literaturrecherche und den Gegenüberstellungen der im Zuge des Projektes ermittelten Schwellenwerte mit den chemischen Messwerten des WK Schwarzwasser-1 nicht zweifelsfrei klären, ob das Fehlen der Fokusart Schmerle und die Defizite der Fokusarten Groppe und Bachforelle einzig auf die Belastungen durch Zink, Arsen und/oder Cadmium zurückzuführen sind. Folglich der Ergebnisse der statistischen Auswertungen, ist jedoch davon auszugehen, dass die hohen Zink- und Cadmium-Konzentrationen mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit mindestens hinderlich für die (Re-)Etablierung von Schmerlen-Beständen im Gewässer sind und sich zudem die erhöhten Cadmium-Konzentrationen negativ auf den Bruterfolg der Bachforellen auswirken dürften.

Abschließend sei noch einmal ausdrücklich betont, dass mit den basierend auf Felddaten durchgeführten statistischen Ableitungen von populationsökologischen Metall-Schwellenwerten für einzelne Fisch-/Rundmaularten gezeigt werden konnte, dass Umweltqualitätsnormen, die dem Schutz von Oberflächengewässern gegenüber chronischen Metallbelastungen dienen sollen, eine dafür sehr wesentliche Belastungskomponente unberücksichtigt lassen, wenn sie ausschließlich auf die gelöste, d.h. gefilterte (0,45 µm) Metallfraktion ausgelegt sind: die **partikulär gebundene Metallfraktion, die vor allem über die Nahrung von den Organismen aufgenommen** wird und daher insbesondere für Feinpartikel fressende und räuberische Organismen von besonderer Relevanz ist. Bei den untersuchten Fisch-/Rundmaularten zeigte sich das besonders deutlich für das Bachneunauge und die Bachforelle.

Abschließend ist noch zu betonen, dass es **nicht** Gegenstand der Studie war, die Auswirkungen der Schwermetallbelastung auf das Ergebnis der fiBS-Bewertung für die Zustandseinstufung der Fischfauna zu ermitteln. Dabei ist anzumerken, dass die vorliegenden Untersuchungsergebnisse zwar nahelegen, dass die Metallbelastungen oberhalb der abgeleiteten Abundanz bezogenen Schwellenwerte sehr wahrscheinlich auch einen belastenden Einfluss auf die ökologische Zustands-/Potenzialbewertung der Fische haben werden. Wie stark dieser Einfluss jedoch in welchen Gewässertypen unter welchen Rahmenbedingungen ist, lässt sich ohne weitergehende Untersuchungen nicht abschätzen, zumal für die fiBS-Bewertung als Grundlage für die Zustandseinstufung der Fische nicht die absoluten Individuenzahlen der einzelnen Arten pro Hektar, sondern (oberhalb einer Mindestabundanz) deren relative Dominanz gegenüber anderen nachweisbaren Fischarten ausschlaggebend ist. **Es kann somit nicht aus einer Gefährdungsklasse einer Leitart für eine bestimmte Metall-Spezies und -Fraktion auf eine bestenfalls noch erreichbare ökologische Zustands- oder Potenzialklasse der fiBS-Bewertung geschlossen werden.** Umgekehrt kann jedoch eine nachgewiesene Unterrepräsentanz einer Leitart bei einer hohen Metall-Gefährdungsklasse für die betrachtete Leitart und ansonsten fehlenden oder nur geringfügig ausgeprägten weiteren Belastungsfaktoren durchaus die Metallbelastung als Grund für eine defizitäre fiBS-Bewertung herangezogen werden.

## 7 Literatur

- Adams, W., Blust, R., Dwyer, R., Mount, D., Nordheim, E., Rodriguez, P. H. and Spry, D. (2020): Bioavailability Assessment of Metals in Freshwater Environments: A Historical Review. *Environmental Toxicology and Chemistry - Volume 39, Number 1*—pp. 48-59.
- Australian and New Zealand Environment and Conservation Council (2020): National Water Quality Management Strategy, Paper No. 4, Australian and New Zealand Guidelines for Fresh and Marine Water Quality, Volume 1, The Guidelines.
- Canadian Council of Ministers of the Environment (2014): Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life. Cadmium.
- Canadian Council of Ministers of the Environment (2018): Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life. Zinc.
- Clearwater, S. J. Farag, A. M., Meyer, J.S. (2002): Bioavailability and toxicity of diet borne copper and zinc to fish. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C* 132, 269–313.
- Halle, M. und Müller A. (2014): Bericht zu LAWA-LFP Projekt O 3.12 „Korrelation zwischen Qualitätskomponenten und allgemein chemisch-physikalischen Parametern in Fließgewässern“
- Haugen, T., Kristensen, T., Kroglund, F., Håvardstun, J., & Kleiven, E. (2007): Study of the effect of cadmium on the early life stages of brown trout (*Salmo trutta*) at different levels of water hardness.
- Koenker, R. W. (1994): Confidence Intervals for regression quantiles, in P. Mandl and M. Huskova (Hg.), *Asymptotic Statistics*, 349–359, Springer-Verlag, New York.
- LAWA (Hg.) (1998): Zielvorgaben zum Schutz oberirdischer Binnengewässer. Band 2: Ableitung und Erprobung von Zielvorgaben zum Schutz oberirdischer Binnengewässer für die Schwermetalle Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Quecksilber und Zink. (Stand: 2. Juni 1997). Erarbeitet vom LAWA-Arbeitskreis "Zielvorgaben". Kulturbuchverlag Berlin. ISBN-Nr. 3-88961-216-4.
- McFadden, D. (1974): Conditional logit analysis of qualitative choice behavior. In P. Zarembka (Hg.), *Frontiers in Econometrics*. Academic Press, New York, 1974.
- McGill, R., Tukey, J. W. und Larsen, W. A. (1978): Variations of box plots. *The American Statistician* 32, 12-16.
- Meier, L. (2020): *Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik: Eine Einführung für Verständnis, Intuition und Überblick*. Berlin.
- Nys C, Van Regenmortel T, Janssen CR, Oorts K, Smolders E, De Schamphelaere KAC (2018): A framework for ecological risk assessment of metal mixtures in aquatic systems. *Environ. Toxicol. Chem.* 2018 Mar;37(3):623-642.
- Sayer, M. D. J., Reader, J. P., & Morris, R. (1989): The effect of calcium concentration on the toxicity of copper, lead, and zinc to yolk-sac fry of brown trout, *Salmo trutta* L., in soft, acid water. *Journal of Fish Biology*, 35(3), 323-332.
- Schlittgen, Rainer (2013): *Regressionsanalysen mit R*. München.
- Solbé, J. F., & Flook, V. A. (1975): Studies on the toxicity of zinc sulphate and of cadmium sulphate to stone loach *Noemacheilus barbatulus* (L.) in hard water. *Journal of Fish Biology*, 7(5), 631-637.
- Wang, W. X. (2013): Dietary toxicity of metals in aquatic animals: Recent studies and perspectives. *Chin Sci Bull*, 58: 203-213, doi: 10.1007/s11434-012-5413-7.

**Herausgeber:**

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

Das LfULG ist eine nachgeordnete Behörde des Sächsischen Staatsministeriums für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft. Diese Veröffentlichung wird finanziert mit Steuermitteln auf Grundlage des von den Abgeordneten des Sächsischen Landtags beschlossenen Haushalts.

**Autoren:**

Martin Halle  
umweltbüro essen Bolle und Partner GbR  
Rellinghauser Str. 334 F, 45136 Essen  
Telefon: + 49 201 86061-12, E-Mail: martin.halle@umweltbuero-essen.de

Andreas Müller  
chromgruen Planungs- und Beratungs-GmbH & Co KG  
Gründelle 3, 42 555 Velbert  
Telefon: + 49 2052 927304-4, E-Mail: am@chromgruen.de

Florian Kreische, Jan Lindner & Stefan Staas  
LimnoPlan – Fisch- und Gewässerökologie  
Bonner Ring 22, 50374 Erftstadt  
Telefon: + 49 2235 688995, E-Mail: stefan.staas@limnoplan.org

**Redaktion:**

Christine Stevens  
Abteilung 4 / Referat 44; Zur Wetterwarte 11, 01109 Dresden-Klotzsche; Telefon: + 49 351 8928 4425,  
E-Mail: christine.stevens@smekul.sachsen.de

**Fotos:**

Foto auf der Titelseite: umweltbüro essen Bolle und Partner GbR

**Redaktionsschluss:**

14.07.2023

**Hinweis:**

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <https://publikationen.sachsen.de> heruntergeladen werden.

**Verteilerhinweis**

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen. Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung.

*Täglich für  
ein gutes Leben.*

www.lfulg.sachsen.de