

INAUGURAL-DISSERTATION

Zur
Erlangung der Doktorwürde
der
Naturwissenschaftlich-Mathematischen Gesamtfakultät
der
Ruprecht - Karls - Universität
Heidelberg

vorgelegt von
Diplom-Chemiker Axel Ludwig
aus Mannheim

2001

DAS NÄHRSTOFFELEMENT PHOSPHOR
IN LIMNISCHEN SEDIMENTEN
VERSCHIEDENER HERKUNFT:

KONZENTRATION UND BINDUNGSFORMEN

Tag der Disputation: 29.Mai 2001

Gutachter: Prof. Dr. Dr. hc. mult. German Müller
Prof. Dr. Heinz Friedrich Schöler

Abstract

Eutrophication as a result of a high nutrient input, especially of phosphorus, is one of the main environmental problems of coastal and inland waters. It will continue to be a significant concern.

To take measures against eutrophication, it is necessary to know both the state of the waters and the nutrient input. Because the concentration of pollutants in the body of water fluctuates with time, the examination of sediments is a favourable method to identify peak load and therefore some point sources of pollutants in waters.

For this purpose the concentration of the nutrient phosphorus was analysed in different sediments of inland waters.

- A detailed sediment mapping for phosphorus of streams and rivulets in Baden-Württemberg (Germany) has been prepared.
- The phosphorus content of sediments from the biggest European river, the Volga River, and its tributaries is shown in an integral study.
- Random tests of many other sediment types were conducted.

The P_2O_5 -concentration of all samples varies, in the grainsize-fraction of $< 20 \mu m$, in a range from 0,08% to 3,85%. The lowest phosphorus-concentrations were found in sediments of shallow lakes in areas with low anthropogenic pollution, the highest P-content has been found in the river Klyazma (Russia) with a highly urbanised and industrialised catchment area.

Peak loads and hints at possible point sources were found in the investigated regions.

It was of special interest in this work, to identify phosphorus-phases which could be released from sediments under natural conditions, because after remobilization, sediment-bound nutrients can achieve a great influence on the trophic state of waters.

With the help of differential solution, phosphorus compounds of similar behaviour or reactivity were included in artificial fractions (PSENNER 1988).

It could be confirmed, that this method is appropriate to identify potentially mobile P-fractions. A relationship between the P-composition in sediment and the type of the water, the geology of the catchment area and the anthropogenic influence has been shown.

Shallow lakes typically contain a higher portion of organic phosphorus in sediments than rivers with a higher flow velocity, which limits algae growth. Whereas a calcareous catchment area results in a higher percentage of acidic soluble P (Lake Constance), an immense input of wastewater raises the portion of phosphorus, which could be exchanged against hydroxide-ions (Klyazma).

Zusammenfassung

Eutrophierung als Folge hoher Nährstoffeinträge, insbesondere von Phosphor stellt gegenwärtig und auch zukünftig ein schwerwiegendes Problem für viele Binnen- und Küstengewässer dar. Um diesbezüglich Maßnahmen ergreifen zu können, ist die Kenntnis des Gewässerzustandes und der Eintragungssituation erforderlich. Während die Gehalte an Nähr- und Schadstoffen im Wasserkörper starken zeitlichen Schwankungen unterliegen, ist die Untersuchung von Gewässersedimenten ein hilfreiches Mittel, Belastungsschwerpunkte und damit verbunden auch mögliche Eintragungspfade von Schadstoffen in Gewässer auszumachen. Dazu wurden in dieser Arbeit die Konzentrationen des Nährstoffelementes Phosphor in unterschiedlichen limnischen Sedimenten bestimmt.

- Eine umfangreiche Sedimentkartierung kleiner Fließgewässer bezüglich Phosphor wurde in Baden-Württemberg vorgenommen.
- Die Phosphorgehalte von Sedimenten des größten Flusses Europas, der Wolga und ihrer Nebenflüsse sowie der Kljasma wurden anhand zahlreicher Untersuchungen in einer zusammenhängenden Studie dargestellt.
- In etlichen Stichproben wurde der Phosphorgehalt weiterer limnischer Sedimente bestimmt.

Der P_2O_5 -Gehalt aller Proben lag in der Korngrößenfraktion $< 20 \mu m$ zwischen 0,08 % und 3,85 %. Die geringsten Phosphorkonzentrationen wurden in Sedimenten anthropogen unbelasteter Flachseen gefunden, die höchsten Konzentrationen in den Sedimenten der Kljasma, eines russischen Flusses mit dicht besiedeltem und hoch industrialisiertem Einzugsgebiet.

In den untersuchten Regionen konnten Belastungsschwerpunkte ausgemacht werden, und es wurden Hinweise auf mögliche Eintragungspfade gefunden.

Da auch die Rücklösung von Nährstoffen aus den Sedimenten einen großen Einfluß auf den trophischen Zustand eines Gewässers haben kann, war in dieser Arbeit die Identifizierung der potentiell mobilisierbaren Phosphorphasen in den limnischen Sedimenten von Interesse.

Ein sequentielles Extraktionsverfahren (PSENNER 1988) wurde eingesetzt, welches Phosphorverbindungen mit ähnlichen Lösungseigenschaften in operationell definierten Fraktionen zusammenfaßt und zur Spezifizierung des bestimmten Gesamtphosphors dient.

Es konnte bestätigt werden, daß diese Verfahren geeignet ist, potentiell mobilisierbare P-Fraktionen zu identifizieren. Die Abhängigkeit der P-Zusammensetzung im Sediment sowohl vom Typ des Gewässers, der Geologie des Einzugsgebietes als auch vom anthropogenen Einfluß konnte aufgezeigt werden.

So enthalten Flachseen zumeist einen höheren Anteil organisch gebundener Phosphate als Fließgewässer, da in Flüssen aufgrund höherer Strömungsgeschwindigkeit die Primärproduktion limitiert wird. Ein kalkreiches Einzugsgebiet (Bodensee) schlägt sich im erhöhten Anteil der säurelöslichen Phosphate nieder, und die massive Einleitung von Abwasser erhöht insbesondere die Anteile der gegen Hydroxidionen austauschbaren, adsorbierten Phosphate (Kljasma).

Inhaltsverzeichnis

1.	EINLEITUNG	1
1.1.	EUTROPHIERUNG UND PHOSPHOR.....	1
1.2.	PHOSPHORKREISLAUF EINES SEES	3
1.2.1.	GELÖSTE PHOSPHATE UND GELÖSTE P-VERBINDUNGEN	4
1.2.2.	FESTE PHOSPHORVERBINDUNGEN	5
1.3.	UMWANDLUNGSPROZESSE IM WASSER.....	6
1.4.	FRÜHDIAGENETISCHE UMWANDLUNGSPROZESSE IM SEDIMENT	8
1.4.1.	REDUKTION.....	8
1.4.2.	MIKROBIELLER EINFLUß.....	8
1.4.3.	DESORPTION/ ADSORPTION	9
1.4.4.	MINERALISATION.....	10
1.5.	KONZEPTE ZUR VERMINDERUNG DES P-INHALTES VON SEEN.....	11
1.6.	BINDUNGSFORMEN DES PHOSPHORS	13
1.7.	SEQUENTIELLE EXTRAKTION	15
2.	PROBENAHEGEBIETE.....	18
2.1.	KLEINE FLIEßGEWÄSSER IN BADEN-WÜRTTEMBERG	18
2.2.	JUNGFERWEIHER	19
2.3.	BODENSEE.....	20
2.4.	GEWÄSSER IM PANTANAL, BRASILIEN.....	22
2.5.	SEEN IN PEKING	23
2.5.1.	KUN MING SEE	23
2.5.2.	YUYUANTAN SEE.....	24
2.5.3.	BEIHAI SEE.....	24
2.5.4.	SHUIZHUI SEE	25
2.6.	GEWÄSSER IN RUßLAND	26
2.6.1.	OKA.....	27
2.6.2.	MOSKWA.....	28
2.6.3.	KLJASMA.....	29
2.6.4.	WOLGA	30
3.	MATERIAL UND METHODEN.....	34
3.1.	PROBENAHE.....	34

3.2.	KÖNIGSWASSERAUF SCHLUß	35
3.3.	SPEKTRALPHOTOMETRIE	36
3.3.1.	MOLYBDÄNGELB-METHODE	36
3.3.2.	MOLYBDÄNBLAU-METHODE.....	37
3.4.	SEQUENTIELLE EXTRAKTION	38
3.4.1.	DURCHFÜHRUNG	38
3.4.2.	DARSTELLUNG	43
3.5.	EH-WERT	43
3.6.	KORRELATIONSANALYSE	44
3.7.	GEOAKKUMULATIONS-INDEX	45
3.8.	³¹ P-NMR.....	46
3.8.1.	PROBENVORBEREITUNG	46
3.8.2.	MESSUNG.....	46
3.9.	ELEKTRONENMIKROSKOPIE MIT ENERGIEDISPERSIVER RÖNTGENANALYSE	48
3.9.1.	PROBENVORBEREITUNG	49
3.9.2.	MESSUNG.....	49
4.	ERGEBNISSE	50
4.1.	SEDIMENTE KLEINER FLIEBGEWÄSSER IN BADEN-WÜRTTEMBERG	50
4.2.	JUNGFERWEIHER	52
4.2.1.	GESAMTPHOSPHOR UND BINDUNGSFORMEN VON P IN DER UNGESIEBTEN PROBE.....	52
4.2.2.	REDOXPROFIL	55
4.3.	BODENSEE	56
4.3.1.	GESAMTPHOSPHOR UND BINDUNGSFORMEN VON P IN DER UNGESIEBTEN PROBE.....	56
4.3.2.	KERNRESONANZSPEKTROSKOPIE	58
4.4.	GEWÄSSERSEDIMENTE IM PANTANAL, BRASILIEN	59
4.4.1.	GESAMTPHOSPHOR IN DER FRAKTION < 20 µm.....	59
4.4.2.	GESAMTPHOSPHOR UND BINDUNGSFORMEN VON P IN DER UNGESIEBTEN PROBE.....	61
4.5.	SEESSEDIMENTE IN PEKING	66
4.5.1.	GESAMTPHOSPHOR UND BINDUNGSFORMEN VON P IN DER UNGESIEBTEN PROBE	66
4.6.	GEWÄSSERSEDIMENTE IN RUBLAND	68
4.6.1.	GESAMTPHOSPHOR IN DER FRAKTION < 20 µm.....	68
4.6.2.	GESAMTPHOSPHOR UND BINDUNGSFORMEN VON P IN DER UNGESIEBTEN PROBE.....	74
4.6.3.	ELEKTRONENMIKROSKOPISCHE UNTERSUCHUNGEN	86
5.	AUSWERTUNG UND DISKUSSION	89

5.1. NÄHRSTOFFGEHALT VON SEDIMENTEN KLEINER FLIEBGEWÄSSER IN BADEN- WÜRTTEMBERG	89
5.1.1. REGIONALE ÜBERSICHT.....	89
5.1.2. KORRELATIONSANALYSE	93
5.1.3. NUTZUNGSSPEZIFISCHE BETRACHTUNG.....	95
5.1.4. EINZELFALLBETRACHTUNG.....	96
5.1.5. ZUSAMMENFASSUNG	103
5.2. DER JUNGFERWEIHER	105
5.2.1. GESAMTPHOSPHOR	105
5.2.2. BINDUNGSFORMEN	109
5.3. DER BODENSEE	116
5.3.1. GESAMTPHOSPHOR	116
5.3.2. BINDUNGSFORMEN	118
5.4. GEWÄSSERSEDIMENTE IM PANTANAL, BRASILIEN	123
5.4.1. GESAMTPHOSPHOR IN DER FRAKTION < 20 µM.....	123
5.4.2. GESAMTPHOSPHOR	126
5.4.3. BINDUNGSFORMEN	127
5.5. SEESSEDIMENTE IN PEKING	131
5.5.1. GESAMTPHOSPHOR	131
5.5.2. BINDUNGSFORMEN	132
5.6. GEWÄSSERSEDIMENTE IN RUBLAND.....	134
5.6.1. ÜBERBLICK ÜBER DIE PHOSPHORVERTEILUNG IN SEDIMENTEN EINIGER GEWÄSSERSYSTEME IN RUBLAND (FRAKTION < 20 µM)	134
5.6.2. KLJASMA.....	137
5.6.3. OKA, MOSKWA UND DAS „PRIOKSKO-TERRASNY STATE NATURE RESERVE“	146
5.6.4. WOLGA	151
5.6.5. ZUSAMMENHANG ZWISCHEN PHOSPHORGEHALT, P-ZUSAMMENSETZUNG UND DEN GEHALTEN ANDERER ELEMENTE IN DEN UNTERSUCHTEN RUSSISCHEN SEDIMENTEN	172
6. GESAMTZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	176
7. LITERATUR	181

1. Einleitung

In Flüssen und Seen ist Phosphor in der Regel das Element, welches die Primärproduktion limitiert, d.h. die pflanzenverfügbaren P-Verbindungen spielen die Rolle des Minimumfaktors, und alle anderen essentiellen Nährstoffe sind i.A. im Überschuß vorhanden.

Der steigende anthropogene P-Eintrag in den 50er und 60er Jahren, u.a. bedingt durch die Verwendung phosphathaltiger Waschmittel, führte in vielen Seen zu einer Eutrophierung.

Die beschleunigte Eutrophierung mit der Folge verminderter Wasserqualität wurde bald als gesellschaftlich relevantes Problem erkannt und gab weltweit Anlaß zur Entwicklung von Maßnahmen, die zur Reduktion des Phosphoreintrags in die Gewässer führten.

Doch trotz des Ausbaus von Kläranlagen, der Einführung einer Phosphatfällungsstufe in Kläranlagen und der Verwendung phosphatfreier Waschmittel zeigten viele Seen nur einen geringen Regenerationserfolg.

Verantwortlich hierfür sind die in den Sedimenten gespeicherten Phosphate, die abhängig von ihrer Bindungsart und den äußeren Bedingungen wieder mobilisiert und ins Freiwasser abgegeben werden können.

Der P-Haushalt von Gewässern läßt sich also nur unter Einbeziehung der Sedimente verstehen.

Kenntnis der wichtigsten abiotischen und biotischen Bindungsformen des Phosphors im Sediment kann die Bewertung des Freisetzungspotentials und Prognosen über die Wirksamkeit von Sanierungskonzepten bezüglich der P-Mobilität erleichtern (HUPFER 1995).

Hierzu empfehlen PSENNER et al. (1988) auf dem ersten „Workshop on Sediment Phosphorus“ ein einheitliches Extraktionsverfahren.

1.1. Eutrophierung und Phosphor

Dem Element Phosphor kommt eine Schlüsselrolle als essentieller Nährstoff für den Aufbau von Biomasse zu. In den meisten Seen der nördlichen Hemisphäre ist Phosphor der

limitierende Faktor der Primärproduktion und alle anderen Elemente liegen im allgemeinen im Überschuß vor.

Phosphor gelangt über Erosion, aus häuslichen und industriellen Abwässern und über Ausschwemmungen aus landwirtschaftlich genutzten Flächen in die Gewässer.

In den 50er und 60er Jahren erhöhte sich der anthropogene P-Eintrag unter anderem durch die Verwendung phosphathaltiger Waschmittel drastisch, und der P-Gehalt vieler Seen stieg um ein vielfaches an.

Die Folgen einer erhöhten Nährstoffzufuhr sind verstärktes Wachstum von Makrophyten und Algen mit einem Wechsel des Artenspektrums. Eine hohe Phytoplankton-Konzentration führt zu einer Trübung des Gewässers und durch den Abbau der Biomasse zur Sauerstoffzehrung im Hypolimnion mit einer nachfolgenden Freisetzung von Eisen, Mangan, Ammonium, Nitrit und toxischem Schwefelwasserstoff aus dem Sediment. Auch eine Erhöhung der Konzentration an gelöstem organischen Kohlenstoff (Geruchs- und Geschmacksbeeinträchtigung) und der Anzahl von Bakterien vermindert die Wasserqualität deutlich (LANDER & WAHLGREN 1988).

Eutrophe Gewässer sind somit als Naherholungsgebiete nicht oder als Brauch- und Trinkwasserreservoir nur bei kostenintensiver Wasseraufbereitung nutzbar.

Die zunehmende Eutrophierung der Gewässer wurde in den 70er Jahren als gesellschaftlich relevantes Problem erkannt, und weltweit wurden Maßnahmen ergriffen, den Phosphoreintrag in Gewässer zu reduzieren.

Doch trotz der erfolgreichen Maßnahmen zur Verminderung des Phosphoreintrags in Gewässer, wie der Ausbau von Kläranlagen und gesetzliche Regelungen zur Verwendung von Phosphor in Waschmitteln, blieb der Regenerationserfolg der Gewässer häufig hinter den Erwartungen zurück.

Um die verzögerte Antwort der Gewässer auf eine Verringerung des Phosphoreintrags (BOERS & VAN DER DOES 1993) zu verstehen, wurde die genauere Untersuchung des Phosphorkreislaufs in Seen erforderlich.

1.2. Phosphorkreislauf eines Sees

Phosphor gelangt über Zuflüsse, Erosion, Pflanzenteile, atmosphärischen Eintrag und über Grund- und Drainwasser in ein Gewässer.

Phosphat liegt im Wasser gelöst oder partikulär, anorganisch oder organisch gebunden vor.

Der Austrag aus dem Wasserkörper erfolgt zum einen über die Abflüsse, zum anderen wird ein Teil des partikulär gebundenen Phosphors dem Wasserkörper durch Sedimentation entzogen. Doch nur ein Teil des sedimentierten Phosphors verbleibt dauerhaft im Sediment, der andere Teil gelangt durch frühdiagenetische Umwandlungsprozesse (Abbildung 1) in Form gelöster Phosphate zurück in das Freiwasser.

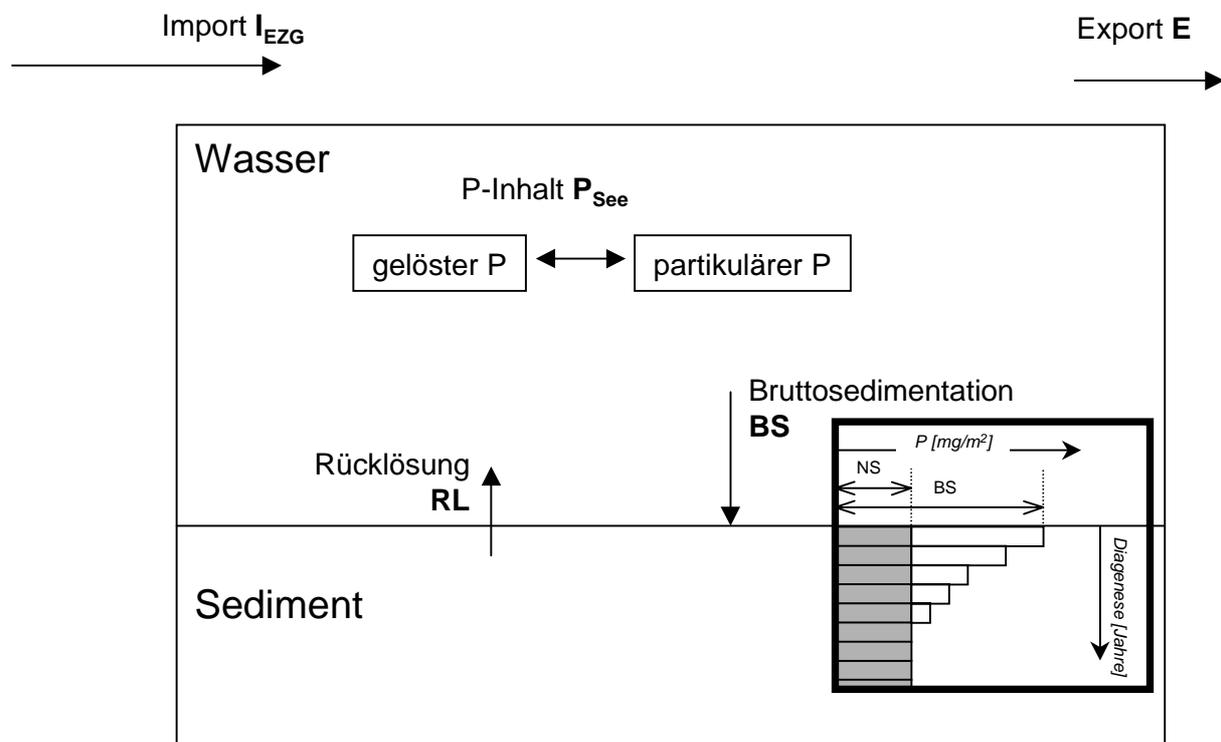


Abbildung 1: Kenngrößen der P-Bilanz in einem See und die daraus folgende Einteilung des Sedimentphosphors in dauerhaft festgelegte (graue) und temporäre P-Formen (verändert aus HUPFER & ZIPPEL 1998)

Der P-Inhalt im Freiwasser eines Sees (P_{See}) wird also bestimmt von dem P-Eintrag (I_{EZG}), dem P-Austrag aus dem See, bezeichnet als Export E , sowie der Nettosedimentation (NS).

Der Anteil an Phosphor, der durch Sedimentation dauerhaft dem Wasserkörper entzogen wird, wird als P-Nettosedimentation (NS) bezeichnet.

Die Nettosedimentation setzt sich zusammen aus der Differenz der Bruttosedimentation und der Rücklösung:

Gleichung 1

$$NS = BS - RL$$

Die P-Bruttosedimentation (**BS**) bezeichnet den Teil an partikulärem P, der dem Wasserkörper durch Sedimentation entzogen wird. Sie kann durch den Einsatz von Sedimentfallen bestimmt, oder über den P-Verlust im Epilimnion geschichteter Seen während der Sommerstagnation berechnet werden.

Die P-Rücklösung (**RL**) soll die Menge gelösten Phosphors beschreiben, die aufgrund diagenetischer Prozesse (Abbildung 3) aus dem Sediment ins Freiwasser übergeht.

Sie läßt sich aus Porenwasserprofilen oder dem Konzentrationsanstieg an Orthophosphat im Hypolimnion (während der Sommerstagnation) berechnen.

Im Sediment muß also zwischen einem temporären und einem permanenten P-Anteil unterschieden werden. Der temporäre Anteil nimmt mit dem Sedimentalter (entspricht der Sedimenttiefe) ab. Das Ausmaß der Rücklösung wird nicht durch den Gesamtphosphorgehalt einer Sedimentschicht bestimmt, sondern durch den Anteil an mobilisierbarem Phosphor und den Milieubedingungen und Vorgängen im Sediment. Um die temporären Anteile abschätzen zu können sind Kenntnisse über die P-Spezies und die Umwandlungsprozesse denen sie im Wasserkörper und im Sediment unterliegen erforderlich.

1.2.1. Gelöste Phosphate und gelöste P-Verbindungen

Die Anionen der Orthophosphorsäure (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-}) machen den größten Teil des gelösten anorganischen Phosphors in Seen aus.

Aber auch kondensierte Phosphate wie das dimere Pyrophosphat, das trimere Tripolyphosphat, welches Waschmitteln zugegeben wird, und zu geringeren Anteilen höher kondensierte Phosphate können in den See gelangen. Alle kondensierten Phosphate hydrolysieren mit der Zeit in wäßriger Lösung zu Orthophosphat (ZINDER 1985).

Natürlich vorkommende gelöste organische Phosphorverbindungen in Gewässern sind Abbauprodukte von Biomasse, zumeist hochmolekulare Ester der Phosphorsäure. In der

Biomasse ist Phosphor in DNS und RNS sowie in Zellmembranen (Phospholipiden) und in Zellwand-Polysacchariden enthalten.

Anthropogene organische Phosphorverbindungen aus Herbiziden und Pestiziden oder pharmazeutischen Produkten machen nur einen verschwindend geringen Teil der P-Verbindungen in Gewässern aus und sind deshalb kaum von Bedeutung für die Eutrophierung, bergen jedoch aufgrund ihrer Persistenz andere Gefahren.

GLEISBERG (1991) konnte in Biotests zeigen, daß Orthophosphat, Meta-, Triphosphat und Phosphorsäureester ähnlich algenverfügbar sind, Phosphonate (mit einer Phosphor-Kohlenstoff-Bindung) dagegen ein deutlich geringeres Algenwachstum bewirkten.

Nach seinen Studien gelangt aus dem Ablauf von Kläranlagen zu über 90% gelöstes Phosphat in die Gewässer, welches sich etwa zu 90% aus Orthophosphat und zu 10% aus organisch gebundenem oder kondensiertem Phosphat zusammensetzt.

1.2.2. Feste Phosphorverbindungen

Zu den partikulären Phosphorverbindungen (PP), die in Gewässern und in Gewässersedimenten auftreten können, zählen in Organismen und im Detritus enthaltener Phosphor (POP = particulate organic phosphorus) sowie kristalline Phosphate und an Oberflächen von Tonmineralen und Oxiden, vor allem des Eisens und Aluminiums, adsorbierte Phosphate oder okkludierte Phosphate (PIP = particulate inorganic phosphorus).

Die partikulären P-Verbindungen können allochthonen oder autochthonen Ursprungs sein.

Allochthone partikuläre Phosphorverbindungen

PIP allochthonen Ursprungs gelangt hauptsächlich über Erosion von Böden und Gestein in Form anorganischer Minerale wie Fluorapatit $[\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{F},\text{OH})_2]$ oder Hydroxyapatit $[\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2]$ in Gewässer (BLOESCH et al. 1988). In Tabelle 1 sind durch Lichtmikroskopie und Röntgendiffraktometrie identifizierte phosphathaltige Minerale aufgelistet, welche in limnischen Sedimenten gefunden wurden. Eine Übersicht phosphathaltiger Minerale geben NRIAGU & MOORE (1984).

Aus landwirtschaftlichem und städtischem Abfluß gelangt PIP überwiegend in Form von an Ton und Silt adsorbierten Phosphaten in Gewässer.

Allochthones POP gelangt in Form von abgestorbenen Pflanzenteilen oder Exkrementen in Gewässer.

Tabelle 1: Phosphorhaltige Minerale in Gewässersedimenten (PETTERSSON et al. 1988), (*NRIAGU & MOORE 1984)

<i>Mineral</i>	<i>Chemische Formel</i>
Apatit	$\text{Ca}_{10}(\text{F},\text{OH})_2(\text{PO}_4)_6$
Brushit	$\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
octoCalciumphosphat	$(\text{Ca}_4\text{H}(\text{PO}_4)_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O})_2$
Anapatit	$\text{Ca}_3\text{Fe(III)}(\text{PO}_4)_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O} / \text{Ca}_2\text{Fe(II)}(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}^*$
Strengit	$\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Vivianit	$\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
Lipscombit	$\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_2$
Phosphoferrit	$(\text{Mn},\text{Fe})_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
Ludlamit	$(\text{Fe},\text{Mn},\text{Mg})_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Variscit	$\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Wavellit	$\text{Al}_3(\text{OH})_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$

Autochthone partikuläre Phosphorverbindungen

POP wird im See selbst durch die Phosphoraufnahme von Phytoplankton, Bakterien und Zooplankton gebildet.

Die chemische Fällung von phosphorhaltigen Metallverbindungen, die Adsorption von Phosphat an Metalloxiden und die Kopräzipitation von Phosphaten bei der authigenen Calcitfällung in eutrophen Hartwasserseen führen zur Bildung autochthoner anorganischer phosphorhaltiger Partikel.

Partikuläre Phosphorverbindungen können sedimentieren, über den Abfluß aus dem See ausgetragen werden oder nach chemischer oder biologischer Umwandlung in gelöster Form wieder der Primärproduktion zur Verfügung stehen.

1.3. Umwandlungsprozesse im Wasser

Zu den Umwandlungsprozessen, denen Phosphor im Wasserkörper unterliegt, zählen:

- die Aufnahme gelöster Phosphate durch Algen (Assimilation; Photosynthese) sowie die Freisetzung gelöster Phosphate aus Biomasse (Dissimilation; Respiration): Die Phosphataufnahme durch Algen und Cyanobakterien erfolgt überwiegend in der durchleuchteten oberen Wasserzone. Sie wird neben dem Nährstoffangebot bestimmt von hydrologischen und meteorologischen Komponenten, wie Temperatur,

Lichtdurchlässigkeit und Strömungsverhältnissen. Ein Teil der abgestorbenen Biomasse kann bereits im Wasserkörper abgebaut werden.

- die Hydrolyse gelöster organischer oder kondensierter Phosphate ist pH-abhängig und in steriler Lösung ein sehr langsamer Prozeß. In Anwesenheit von Mikroorganismen verkürzt sich die Halbwertszeit kondensierter Phosphate von Jahren auf wenige Stunden (ZINDER 1985).
- Auflösung/ Fällung anorganischer Phosphatphasen: Die Bildung kristalliner Phosphate wie Strengit $[\text{FePO}_4]$ oder Variscit $[\text{AlPO}_4]$ gilt aufgrund der Löslichkeitsprodukte als unwahrscheinlich. „In eutrophen calciumreichen Seen kann Hydroxyapatit epitaktische Aufwachsungen auf Calcit bilden“ (ZINDER 1985). Wesentlich für die Fällung anorganischer Phosphatphasen ist jedoch die Phosphatadsorption bei der Fällung von Oxiden und Hydroxiden des Eisens und Aluminiums, sowie die Mitfällung mit Calcit.
- Adsorption gelöster Phosphate an Partikel/ Desorption: Die Adsorption an Hydroxide des Eisens und Aluminiums sowie an Tonminerale ist ein bedeutender Vorgang für die Phosphatsedimentation. An organische Oberflächengruppen adsorbieren Anionen wenig bis gar nicht (ZINDER 1985).

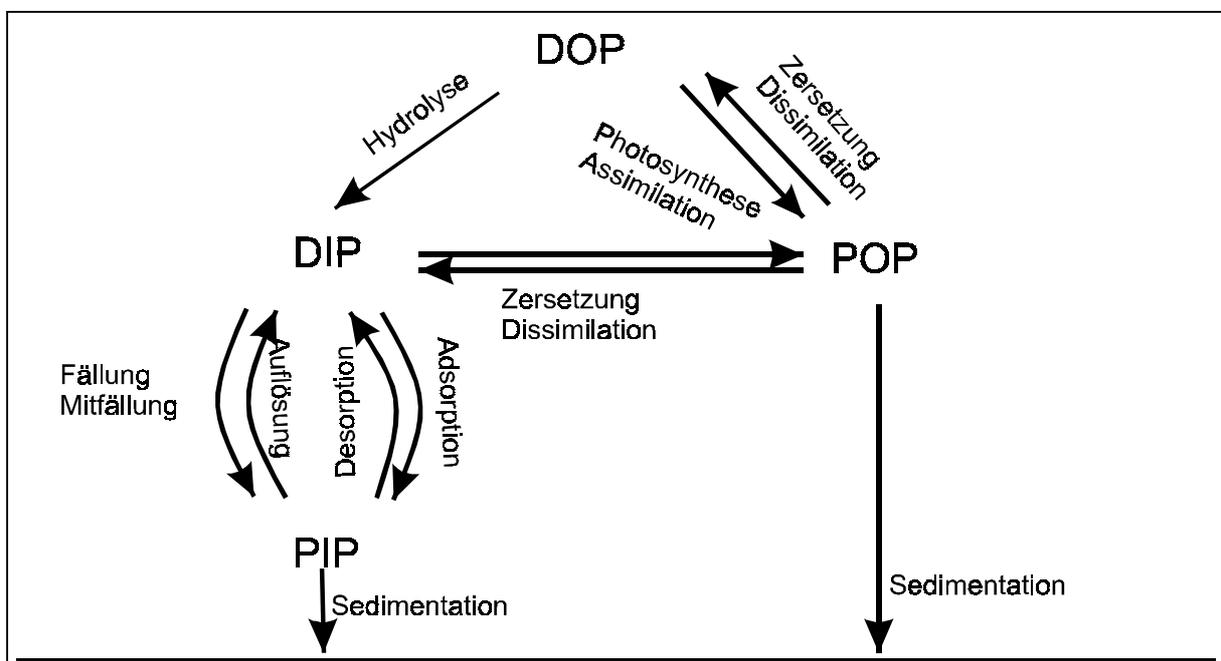


Abbildung 2: Phosphatkreislauf im Wasserkörper, Wechselwirkungen zwischen DOP (disolved oganic phosphorus), DIP (disolved inorganic phosphorus), POP (particulate organic phosphorus) und PIP (particulate inorganic phosphorus).

1.4. Frühdiagenetische Umwandlungsprozesse im Sediment

Im Sediment gibt es, abgesehen von der Photosynthese, ähnliche Umwandlungsmechanismen, die Phosphat über das Porenwasser in den Wasserkörper zurückführen oder Phosphat aus dem Porenwasser und dem überstehenden Wasser fixieren können.

1.4.1. Reduktion

Zu den wichtigsten diagenetischen Prozessen im Sediment zählt die Reduktion von Eisen(III)hydroxiden. Auf den Wechselwirkungen zwischen Eisen und Phosphor unter aeroben und anaeroben Bedingungen beruht die klassische Beschreibung des Phosphataustausches zwischen Sediment und Wasser von EINSELE (1938) und MORTIMER (1941). Treten im Sediment anaerobe Verhältnisse auf, wird Eisen(III) zu Eisen(II) reduziert, und das ursprünglich an Eisenhydroxid adsorbierte Phosphat muß gleichzeitig mit dem reduzierten Eisen in Lösung gehen (Abbildung 3a). Durch das entstehende Konzentrationsgefälle diffundieren Phosphat und Eisen(II) nach oben oder werden durch den Kompaktionsdruck im Sediment in höhere Sedimentschichten transportiert. In Schichten mit Sauerstoff wird das Eisen wieder oxidiert und fällt als Hydroxidkolloid aus. Phosphat kann teilweise wieder adsorbiert werden. (Frisch gefälltes) Eisenhydroxid in einer oxischen Sedimentzone kann also eine Diffusionsbarriere für Phosphat darstellen.

In sulfatreichen anoxischen Sedimenten kann dieser Kreislauf entkoppeln, indem ihm Eisen(II) in Form von schwerlöslichem Eisensulfid entzogen wird (KLEEBERG 1997).

Das klassische Modell reicht jedoch nicht alleine aus, die P-Rücklösung aus dem Sediment zu erklären.

1.4.2. Mikrobieller Einfluß

Der Einfluß von Bakterien auf den Phosphor-Umsatz ist von zunehmendem wissenschaftlichen Interesse.

Bakterien beschleunigen die Mineralisierung organischer Substanz durch enzymatische Oxidation unter Verbrauch verschiedener Elektronenakzeptoren wie O_2 , NO_3^- , Fe^{3+} und SO_4^{2-} (Tabelle 2) und senken dadurch das Redoxpotential im Sediment. Durch enzymatische Hydrolyse (Abbildung 3c) beschleunigen sie den Abbau von organischen und kondensierten Phosphaten. Sie sind in der Lage unter oxischen Bedingungen große Mengen an Phosphor in Form von Polyphosphat als Energiereserve zu speichern (HUPFER, GÄCHTER & RÜEGGER

1995; LEITÃO et al. 1995) und nach Lysis oder unter anoxischen Bedingungen wieder abzugeben. GAECHTER und MEYER (1993) berechnen, daß benthische Bakterien bei einem C:P-Verhältnis zwischen 3 und 29 mindestens so viel P enthalten, wie dem Sediment in einem Jahr über Sedimentation von organischem Detritus (C:P-Verhältnis zwischen 40 und 200) zugeführt wird. In Bakterien gespeicherter Phosphor bildet ebenso wie an Eisenhydroxide adsorbierter Phosphor einen redoxsensitiven P-Pool im Sediment.

Tabelle 2: Mikrobielle Abbauprozesse in Sedimenten (FRÖHLICH et al. 1979)

Prozess (Milieu)	Reaktionsgleichung	Freie Enthalpie
Aerober Abbau (oxisch)	$(\text{CH}_2\text{O})_{106}(\text{NH}_3)_{16}(\text{H}_3\text{PO}_4) + 138 \text{O}_2 \Leftrightarrow 106 \text{CO}_2 + 16 \text{HNO}_3 + \text{H}_3\text{PO}_4 + 122 \text{H}_2\text{O}$	$\Delta G = -3190 \text{ kJ/mol}$
Denitrifikation (suboxisch)	$(\text{CH}_2\text{O})_{106}(\text{NH}_3)_{16}(\text{H}_3\text{PO}_4) + 94,4 \text{NHO}_3 \Leftrightarrow 106 \text{CO}_2 + 55,2 \text{N}_2 + \text{H}_3\text{PO}_4 + 177 \text{H}_2\text{O}$	$\Delta G = -3030 \text{ kJ/mol}$
Manganreduktion (suboxisch)	$(\text{CH}_2\text{O})_{106}(\text{NH}_3)_{16}(\text{H}_3\text{PO}_4) + 236 \text{MnO}_2 \Leftrightarrow 236 \text{Mn}^{2+} + 106 \text{CO}_2 + 8 \text{N}_2 + \text{H}_3\text{PO}_4 + 366 \text{H}_2\text{O}$	$\Delta G = -2920 \text{ kJ/mol}$
Eisenreduktion (suboxisch)	$(\text{CH}_2\text{O})_{106}(\text{NH}_3)_{16}(\text{H}_3\text{PO}_4) + 424 \text{FeOOH} \Leftrightarrow 424 \text{Fe}^{2+} + 106 \text{CO}_2 + 16 \text{NH}_3 + \text{H}_3\text{PO}_4 + 742 \text{H}_2\text{O}$	$\Delta G = -1330 \text{ kJ/mol}$
Sulfatreduktion (anoxisch)	$(\text{CH}_2\text{O})_{106}(\text{NH}_3)_{16}(\text{H}_3\text{PO}_4) + 54 \text{SO}_4^{2-} \Leftrightarrow 106 \text{CO}_2 + 16 \text{NH}_3 + 54 \text{S}^{2-} + \text{H}_3\text{PO}_4 + 106 \text{H}_2\text{O}$	$\Delta G = -380 \text{ kJ/mol}$
Fermentation (anoxisch)	$(\text{CH}_2\text{O})_{106}(\text{NH}_3)_{16}(\text{H}_3\text{PO}_4) \Leftrightarrow 53 \text{CO}_2 + 53 \text{CH}_4 + 16 \text{NH}_3 + \text{H}_3\text{PO}_4$	$\Delta G = -350 \text{ kJ/mol}$

1.4.3. Desorption/ Adsorption

Aus Bakterien oder reduzierten Eisenhydroxiden freigesetztes Phosphat kann an freie Oberflächenplätze von Tonmineralen oder Aluminiumhydroxiden adsorbieren. Adsorbierte Phosphate stehen in Konkurrenz mit (bei der Mineralisierung entstehenden) Hydroxidionen und organischen oder anderen anorganischen Anionen (Abbildung 3b). An Oberflächen adsorbierte Phosphate stellen somit einen pH-sensitiven P-Pool dar.

1.4.4. Mineralisation

Kristalline Phosphate haben in Sedimenten kaum Bedeutung. Apatit konnte in verschiedenen Sedimenten nachgewiesen werden (REID et al. 1980), gilt aber ebenso wie in Calcit mitgefälltes Phosphat unter natürlichen Bedingungen als wenig mobilisierbar (Abbildung 3d). Vivianitbildung ist in Seesedimenten thermodynamisch möglich, und es wurden Hinweise auf Vivianit $[\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}]$ im Sediment des Greifensees gefunden (ZINDER 1985). In Tabelle 1 sind phosphathaltige Minerale überwiegend allochthonen Ursprungs zusammengestellt.

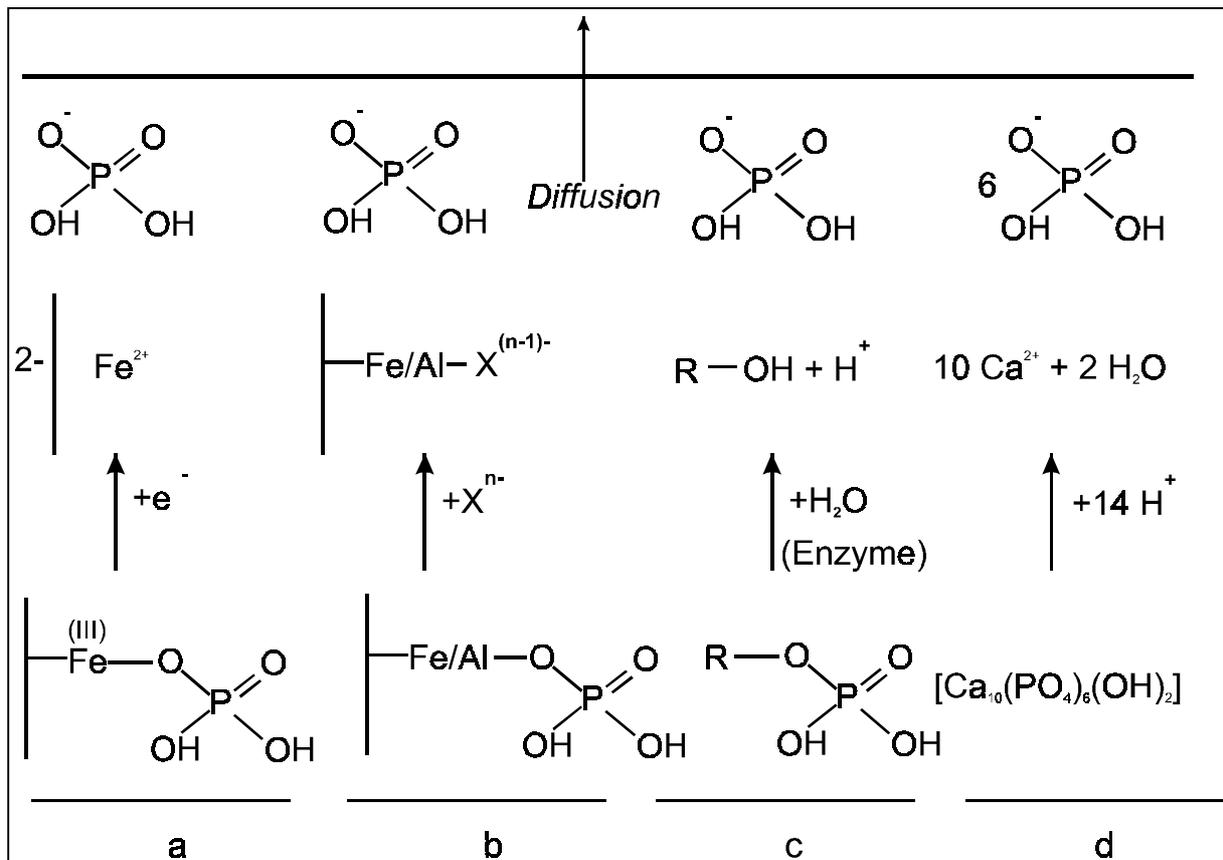


Abbildung 3: Umwandlungsprozesse im Sediment, die zu einer Freisetzung von Orthophosphat in das Porenwasser führen können:

a: Reduktive Auflösung von Eisenhydroxiden

b: Desorption bzw. Anionenaustausch; X^{n-} = Hydroxidion oder anderes Anion

c: (Enzymatische) Hydrolyse von organischen Phosphorsäureestern oder Polyphosphat; R = Organischer Rest oder Polyphosphatrest

d: Auflösung säurelöslicher Phosphatphasen; Hydroxylapatit steht exemplarisch für säurelösliches PIP

1.5. Konzepte zur Verminderung des P-Inhaltes von Seen

Alle Konzepte zur Sanierung von Gewässern bezüglich einer Verringerung des Phosphorgehaltes beruhen auf drei Ansätzen:

- Verringerung des P-Eintrags
- Erhöhung des P-Austrags
- Fixierung des Phosphors im Sediment

Verringerung des P-Eintrags

Eine Verringerung des P-Eintrages wird durch den Ausbau von **Kläranlagen** im Einzugsgebiet erreicht.

Der **vernünftige Einsatz von Düngemitteln** in der Landwirtschaft kann bei einem ländlichen Einzugsgebiet den P-Eintrag in ein Gewässer vermindern.

Erosionsschutz im Uferbereich z.B. durch Bepflanzung verringert den Eintrag von allochthonem PIP.

Der Bau von **Vorflutern** an den Hauptzuflüssen der zu schützenden Gewässer verringert den Eintrag von Nährstoffen, da ein Teil der Nährstofffracht bereits im Vorfluter durch Sedimentation entzogen wird.

Die **Umleitung von Zuflüssen** mit einer besonders hohen Nährstofffracht (Punktquelle) um das zu schützende Gewässer ist eine weitere mögliche Maßnahme zur Verminderung des P-Eintrages.

Erhöhung des P-Austrags

Die **Ableitung von P-reichem Tiefenwasser** aus geschichteten Seen erhöht den P-Austrag. Während der Zirkulationsphasen gelangt weniger Phosphor in das Epilimnion. Weiterhin wird aufgrund eines veränderten P-Gradienten zwischen Porenwasser und überstehendem Tiefenwasser der Sediment-P teilweise ausgelaugt.

Eine künstlich induzierte ganzjährige **Zirkulation** erhöht ebenfalls den P-Austrag. Ein weiterer Effekt dieser Maßnahme ist die geringere Verweilzeit von Phytoplankter in der oberen lichtdurchfluteten Zone, was eine Minderung der auf Phytoplanktonmassenentwicklung beruhenden Eutrophierungseffekte bewirkt (DEPPE & BENNDORF 1998).

Bei einer **Sedimentausbaggerung** werden die nährstoffreichen (und sauerstoffzehrenden) Sedimentschichten aus dem See entfernt, und die interne Düngung soll vermindert werden (VAN DER DOES et al. 1992).

Fixierung des Phosphors im Sediment

Die Maßnahmen zur Fixierung des Phosphors im Sediment können zum einen darauf abzielen, durch künstlich induzierte Phosphatfällung Phosphor aus dem Wasserkörper ins Sediment zu verlagern und zum anderen durch Veränderungen im Sediment die Phosphatrücklösung zu vermindern.

Zur Erhöhung der Bruttosedimentation wurde die **Zugabe von Eisen- und Aluminiumsalzen** als Fällungsmittel sowie die künstlich induzierte **Calcitfällung** eingesetzt. Zwar haben Eisen(III)hydroxide eine hohe Bindungskapazität für Phosphat (ZINDER 1985), doch können die so festgelegten Phosphate in anoxischen Sedimentzonen wieder freigesetzt werden. Redoxunabhängig ist dagegen die Sorption von Phosphaten an Aluminiumhydroxiden. Die Maßnahme der P-Festlegung durch Aluminiumhydroxide kann jedoch in sauren Gewässern die Freisetzung toxischer Aluminiumionen bewirken.

Durch die Kopräzipitation von Phosphat bei Intensivierung der autochthonen Calcitfällung wird Phosphat in einer redoxunabhängigen Form im Sediment festgelegt (KOSCHEL et al. 1998).

Die Abtrennung eines Teilvolumens des Gewässers im Zuflußbereich durch **Tauchwände** begünstigt das Phytoplanktonwachstum in diesem strömungsberuhigten Reaktionsraum. Dadurch kann ein Teil der gelösten Phosphate in der Biomasse (z.B. in schnellwachsenden Kieselalgen) gespeichert werden und auch in Aggregaten aus Mineralpartikeln, Bakterien und Algen sedimentieren (PAUL et al. 1998).

Bei den Maßnahmen zur Erhöhung der P-Sedimentation ist zu berücksichtigen, welcher Anteil dauerhaft im Sediment fixiert ist und welcher durch die oben beschriebenen Umwandlungsmechanismen rückgelöst werden kann. Nur wenn aus der Erhöhung der Bruttosedimentation auch eine Erhöhung der Nettosedimentation folgt, ist die Maßnahme erfolgreich.

Auf eine Fixierung des Sedimentphosphors zielen die Maßnahmen der Sedimentbelüftung und der Sedimentabdeckung.

Durch das Einleiten von Luft oder Sauerstoff in das Tiefenwasser soll die Sedimentoberfläche oxidiert werden. Dieser Strategie liegen die Ergebnisse von EINSELE (1938) und MORTIMER (1941) zugrunde, die eine Phosphatrücklösung aus anoxischen Sedimenten aufgrund der Reduktion von dreiwertigem Eisen beobachteten. Doch neuere Untersuchungen haben gezeigt, daß auch aus Sedimenten mit oxischen Grenzschichten eine Phosphatrücklösung stattfinden kann.

WEHRLI und WÜST (1996) belegen, daß die **Belüftung** einiger Schweizer Seen keinen direkten Einfluß auf deren Phosphathaushalt und die P-Rücklösung hatte. Zum einen war die Eindringtiefe des Sauerstoffs in das Sediment gering, zum anderen kann in der oxischen Grenzschicht an Eisen(III)hydroxide nur eine - bezogen auf den Gesamtphosphorgehalt des Sees - geringe Menge Phosphat zusätzlich festgelegt werden, welches wieder freigesetzt wird, sobald das frisch abgelagerte Material in anaerobe Horizonte gelangt (HUPFER, GÄCHTER & GIOVANOLI 1995).

Die **Sedimentabdeckung** mit tonigen Materialien soll eine Diffusionsbarriere für den gelösten Sedimentphosphor bilden und an Sorptionsplätzen Phosphat binden. Ein Beispiel für den Versuch, den P-Haushalt eines Sees durch Seekreideaufspülung zu beeinflussen beschreiben RÖNICKE et al. (1998). Auch Versuche der Sedimentabdeckung mit Folien sind durchgeführt worden. SCHARF (1996) beschreibt die Vor- und Nachteile dieser Verfahren.

1.6. Bindungsformen des Phosphors

Wie oben beschrieben, kann sedimentierter Phosphor aufgrund frühdiagenetischer Prozesse von einer Bindungsform in eine andere übergehen. Diese Umwandlung ist ursächlich für die Mobilisierung sedimentgebundenen Phosphors. Dem Analytiker stehen wenige Methoden zur Verfügung, die Bindungsformen des Phosphors zu untersuchen. Die wichtigsten sind im folgenden in einer Übersicht mit ihren Möglichkeiten und Schwierigkeiten aufgelistet.

Röntgendiffraktometrie

- Verfahren: Röntgenstrahlen erfahren eine kristallspezifische Beugung.
Möglichkeiten: Identifizierung von Mineralien im Sediment
Schwierigkeiten: Es sind nur Hauptkomponenten erkennbar.

(Transmissions-)Elektronenmikroskopie mit energiedispersiver Röntgenspektrometrie

- Verfahren: Elektronenstrahl auf Probe induziert elementspezifische Röntgenstrahlung.
Möglichkeiten: Elementkartierung; Identifizierung P-haltiger Granula in Bakterien oder Algen; Vergesellschaftung von P mit anderen Elementen (Fe)
Referenzen: BAUER & UHLMANN 1989; UHLMANN et al. 1988; HUPFER, GÄCHTER & GIOVANOLI 1995
Anwendung: Belebtschlamm, Sediment

Öl-Immersionmikroskopie

- Verfahren: Bakterien können nach Fixierung, Trocknung und Neisserfärbung (o-Toluidinblau) lichtmikroskopisch (1000- bis 1700fach) erfaßt werden.
Möglichkeiten: P-haltige Granula werden sichtbar.
Referenzen: CHECH & HARTMAN 1993; KUNST 1991
Anwendung: Belebtschlamm

³¹P-Kernresonanzspektroskopie

- Verfahren: Die Resonanzfrequenz von Kernen mit einem magnetischen Moment hängt von der chemischen Umgebung des Kerns ab.
Möglichkeiten: Aufgrund unterschiedlicher Resonanzfrequenzen lassen sich unterschiedliche P-Spezies unterscheiden: Phosphorsäuremono- und diester, Phosphonate, Ortho-, Pyro-, und Polyphosphat u.a.
Schwierigkeiten: Methode erfordert gelöste Spezies und hohe Konzentrationen.
Referenzen: HUPFER 1995, HUPFER, GÄCHTER & RÜEGGER 1995
Anwendung: Sediment

Ionenchromatographie

- Verfahren: Moleküle werden mit einem Eluenten durch Trennsäulen gespült und wandern darin unterschiedlich schnell. In einer Reaktionsschleife werden die Verbindungen aufgeschlossen, mit Komplexbildnern versetzt und photometrisch detektiert.
Möglichkeiten: Trennung von Orthophosphat und kondensierten Phosphaten je nach Säule von P₁-P₄; P₁₉; P_{>100}
Schwierigkeiten: Moleküle müssen in Lösung vorliegen, Nachweisgrenze liegt für höher-kondensierte Phosphate (Gelchromatographie) bei 5 mg/l.
Referenzen: VAETH et al. 1987; MÜSSIK-ZUFIKA & JECKEL 1992;
Anwendung: Standards; Belebtschlamm

Elektrophorese

Verfahren:	Ionen unterschiedlicher Größe und Ladung wandern in einem elektrischen Feld unterschiedlich schnell. Photometrische Analyse parallel über „metachromatischen Shift“ mit o-Toluidinblau 0
Möglichkeiten:	Trennung von Polyphosphaten unterschiedlicher Kettenlängen
Schwierigkeiten:	Polyphosphate müssen in hohen Konzentrationen und in Lösung vorliegen. Proteine müssen zuvor abgetrennt werden. Standards sind nur bis P ₇₅₊ käuflich, dennoch Trennung bis P ₈₀₀ möglich.
Referenzen:	LEITÃO et al. 1995; CLARK et al. 1986, CLARK & WOOD 1987; IMSIECKE et al. 1996; LORENZ et al. 1994, 1995
Anwendung:	Bakterienkultur; Algenkultur; Schwämme

Sequentielle Extraktion

Verfahren:	Probematerial wird mit verschiedenen Lösungen extrahiert und in jeder Fraktion wird SRP und NRP photometrisch bestimmt.
Möglichkeiten:	Probe kann ohne Vorbehandlung untersucht werden. Operationell definierte P-Pools, die für den P-Haushalt eines Sees entscheidend sind, werden gut unterschieden: leicht austauschbarer Phosphor, reduktiv löslicher, gegen Hydroxid austauschbarer, säurelöslicher Phosphor, jeweils als Orthophosphat oder organisch gebundenes bzw. Polyphosphat.
Schwierigkeiten:	Es können keine echten Bindungsformen erkannt werden. Es ist mit hohem Zeitaufwand verbunden. Es gibt durch viele unterschiedliche Verfahren Probleme mit der Vergleichbarkeit.
Referenzen:	PSENNER et al. 1984, 1988; UHLMANN et al. 1990; RÖSKE & UHLMANN 1992; LIEBEZEIT 1990; PETERSSON et al. 1988; RUBAN et al. 1999
Anwendung:	Sedimente und Klärschlamm

1.7. Sequentielle Extraktion

Die Phosphor-Konzentration in Sedimenten liegt häufig um drei bis vier Größenordnungen über den Phosphor-Konzentrationen im überstehenden Wasser, und somit befindet sich in den oberen Millimetern der Sedimentschicht häufig ebensoviel Phosphor wie im gesamten überstehenden Wasserkörper. Die Mobilisierung eines kleinen Teils des Sedimentphosphors hat somit starke Auswirkung auf den Trophiestatus des Gewässers. Dennoch besteht kein gesicherter Zusammenhang zwischen dem Gesamt-P-Gehalt der Sedimente und dem Trophiegrad eines Gewässersystems. Das postsedimentäre Mobilisierungspotential hängt mehr von den Milieubedingungen im Sediment und von dem Anteil bestimmter Bindungsformen ab, in welchen Phosphor das Sediment erreicht, als von der Gesamtkonzentration im Sediment.

Die quantitative Ermittlung von Bindungsformen erfolgt vorwiegend mittels chemischer Auslaugungsverfahren, bei denen Sedimentmaterial einer bestimmten Abfolge verschieden wirksamer Lösungsmittel ausgesetzt wird. Dieses Verfahren stammt ursprünglich aus der Bodenkunde (CHANG & JACKSON 1957), wurde dann an die Bedürfnisse der Sedimentforschung angepaßt (WILLIAMS et al. 1971, 1976 a) und modifiziert (HIELTJES & LIJKLEMA 1980, PSENNER et al. 1984, 1988).

Wurde zunächst der Versuch unternommen, zwischen Al-P, Fe-P und Ca-P zu unterscheiden, beschränkte man sich später auf die Einteilung anorganisch gebundenen Phosphors in Apatit-P (AIP) und Nicht-Apatit-P (NAIP) sowie auf die Definition einer organisch gebundenen P-Fraktion. HIELTJES & LIJKLEMA (1980) unterscheiden in ihrem Verfahren zwischen labilem P (NH_4Cl -SRP), an Eisen und Aluminium gebundenem P (NaOH-SRP), Ca-P (HCl-SRP) und Rest-P (Differenz zwischen Gesamtphosphor und der Summe der Fraktionen).

PSENNER empfahl 1984 zusätzlich noch eine Extraktion mit einer Bikarbonat-Dithionit Lösung, die an Eisen gebundene Phosphate löst sowie eine Unterscheidung zwischen molybdatreaktivem (SRP) und nichtreaktivem (NRP) Phosphor in jeder Fraktion und eine P-Bestimmung im Extraktionsrückstand.

Tabelle 3: Sequentielle Extraktion nach Psenner

Bezeichnung	Extraktionsmittel	Bindungsformen
NH_4Cl -SRP	1 m NH_4Cl	Interstitialwasser-Phosphat; labil adsorbiertes Phosphat; algenverfügbares Phosphat
BD-SRP	0,11 m Bikarbonat/ Dithionit	reduktiv lösliches P; Fe- und Mn gebunden
BD-NRP		organischer Anteil
NaOH-SRP	1 m NaOH	an Oberflächen von Metalloxiden (Al) gebundenes Phosphat, welches gegen Hydroxidionen austauschbar ist
NaOH-NRP		P in Mikroorganismen; huminstoffgebundener P
HCl-SRP	0,5 m HCl	In Karbonaten eingeschlossene Phosphate; Apatit-P
HCl-NRP		säurelabiler organischer P
Refraktär	Königswasser	refraktärer (organischer) P

Neuere Verfahren erlauben noch eine Differenzierung in der organischen P-Fraktion (GOLTERMANN 1996) oder der Ca-Fraktion (RUTTENBERG 1992), wurden jedoch von RUBAN

et al. (1999) in einem Vergleich von 4 Fraktionierungsverfahren als schlecht reproduzierbar und schwierig in der Handhabung ausgewiesen.

Diese Extraktionsverfahren für Phosphor finden nicht nur in der Analytik von Böden und limnischen Sedimenten Anwendung, sondern werden auch bei der Untersuchung von Bakterien- und Algenkulturen (WAARA et al. 1993), Klärschlämmen (RÖSKE & UHLMANN 1992) und marinen Sedimenten (LIEBEZEIT & KRAUL 1999) eingesetzt.

Da mehr als 20 solcher Verfahren publiziert sind, empfehlen PSENNER et al. (1988) ein einheitliches Verfahren, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

Der genaue Ablauf der vorgeschlagenen Extraktion ist im Kapitel „Material und Methoden“ beschrieben.

An verschiedenen Gewässersystemen in unterschiedlichsten geographischen Regionen wurden die Bindungsformen des Phosphors im Sediment an Oberflächenproben und in Kernen mittels sequentieller Extraktion bestimmt. An zwei Sedimentproben wurde der Versuch unternommen, mikrobiell gebildetes Polyphosphat nachzuweisen. An einem See wurden die Ergebnisse der Bestimmung der Phosphorgehalte und der Bindungsformen des Phosphors im Zusammenhang mit einer Massenbilanz und Porenwasserprofilen diskutiert. Aufgrund der Veränderung der Zusammensetzung der P-Fractionen mit der Sedimenttiefe wurde abgeschätzt, welche P-Fractionen für eine Phosphatfreisetzung in Frage kommen. Elektronenmikroskopische Untersuchungen an zwei Sedimentproben sollten die Zusammensetzung der Partikel zeigen, in denen Phosphor in erhöhten Konzentrationen auftritt. Einen großen Überblick über die Phosphorverteilung in kleinen Fließgewässern Baden-Württembergs gibt eine flächendeckende Untersuchung.

2. Probenahmegebiete

2.1. Kleine Fließgewässer in Baden-Württemberg

In Baden-Württemberg wurden 1999 im Rahmen einer Studie des LFU vom Institut für Umwelt-Geochemie Sedimentproben kleiner Fließgewässer Baden-Württembergs genommen. 809 dieser Proben wurden auf Phosphor in der Fraktion $<20\ \mu\text{m}$ untersucht. Die Probenahmepunkte sind in Abbildung 4 dargestellt.

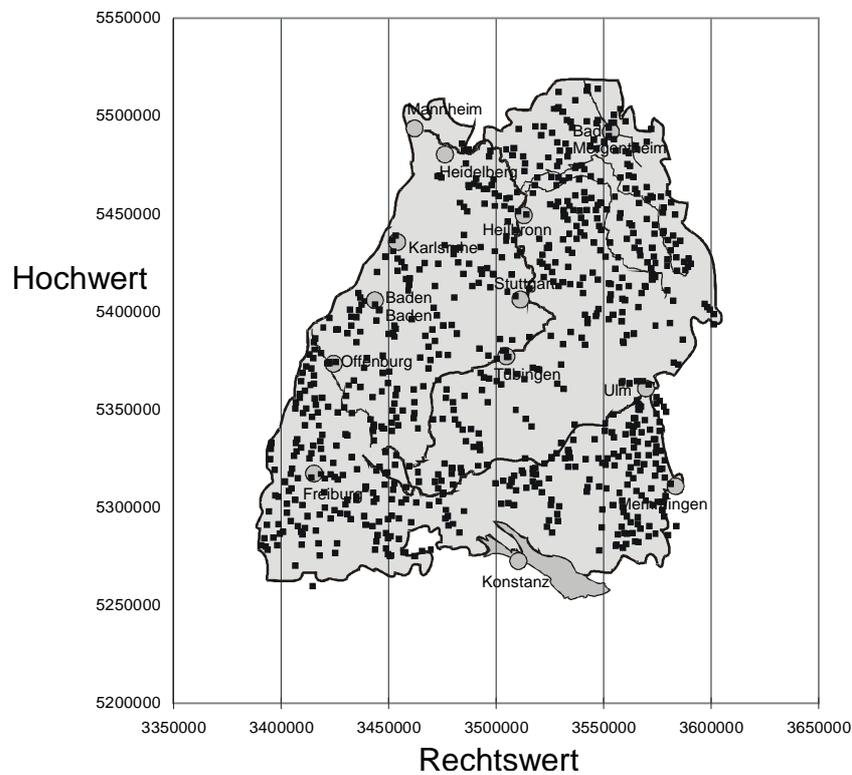


Abbildung 4: Probenahmegebiet Baden-Württemberg

2.2. Jungferweiher

Der Jungferweiher ist ein 1942 durch den Aufstau des Ulmener Baches künstlich angelegter Flachsee in der Eifel. Er fungiert als Vorfluter für das wasserwirtschaftlich genutzte Ulmener Maar. Seine Nord-Süd-Ausdehnung beträgt etwa 900 m, die mittlere Ost-West-Ausdehnung etwa 300 m. Seine Wasserfläche beträgt je nach Wasserstand zwischen 0,2 km² und 0,3 km², seine mittlere Tiefe liegt bei 1 m, seine maximale Tiefe beträgt 2,2 m im südlichen Teil des Weihers. Sein Einzugsgebiet umfaßt eine Fläche von 4,69 km², wovon etwa die Hälfte forstwirtschaftlich genutzt wird. Das effektive Einzugsgebiet, abzüglich der befestigten und kanalisierten Flächen beträgt 4,12 km². Der See wird durch sechs kleine oberirdische Fließgewässer gespeist, die im Sommer meist trockenfallen. Sein Volumen beträgt zwischen 94 000 und 370 000 m³. Die Erneuerungsrate liegt zwischen 0,1 und 0,2 Jahren, sein Umgebungsfaktor zwischen 20,7 und 12,2. Der Ablauf des Sees fließt über eine Phosphoreliminierungsanlage in das Ulmener Maar.

Hier wurden im November 1996 (Süd/ 1) und im März 1997 (Mitte/ 2) zwei Sedimentkerne mit 40 cm bzw. 50 cm Länge genommen und auf Gesamtphosphor und P-Bindungsformen untersucht.

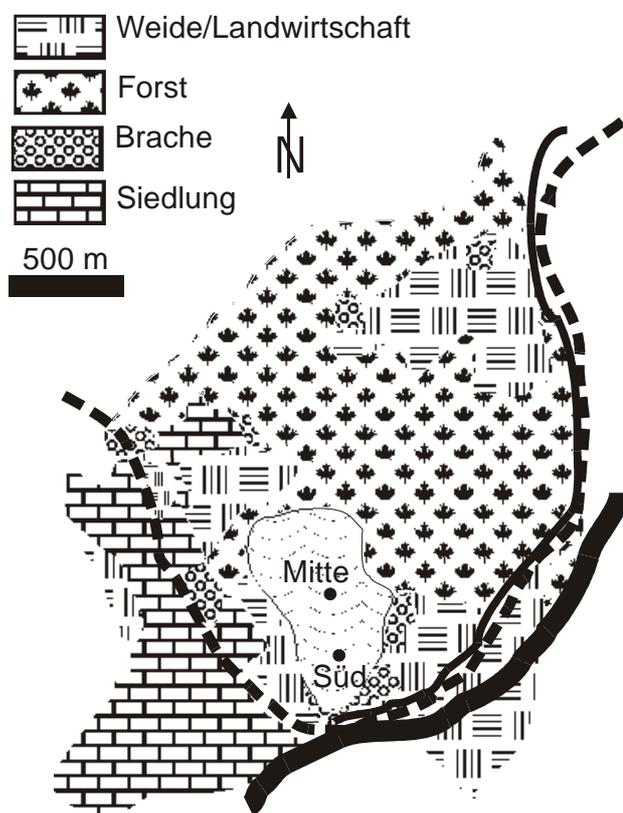


Abbildung 5:
 Probenahmegebiet
 Jungferweiher mit
 Einzugsgebiet (nach
 LÜSSE et al. 1997)

2.3. Bodensee

Der Bodensee ist mit einer Gesamtfläche von 571,5 km² nach dem Genfer See der zweitgrößte Voralpensee. Er gliedert sich in den Obersee und den flachen Untersee.

Der Bodensee-Obersee hat eine Fläche von 476 km², eine mittlere Tiefe von 100 m und eine maximale Tiefe von 252 m. Es handelt sich um einen mono-holomiktischen See mit einem Volumen von 47 700*10⁶ m³. Sein Einzugsgebiet umfaßt 10 446 km² (Umgebungsfaktor 22), von dem 71% im schweizerischen und österreichischen Alpengebiet liegen. Der deutsche Teil des Einzugsgebietes wird stark landwirtschaftlich genutzt, auf der österreichischen und schweizerischen Seite wechseln unterhalb des alpinen Bereichs Waldgebiete mit intensiv genutztem Acker- und Weideland ab (LAWA 1985).

Die Erneuerungsrate für den Obersee beträgt 4,3 Jahre.

90% des Zuflusses stammen aus dem schweizerisch-österreichischen Teil, aus welchem auch im jährlichen Mittel 8 300*10⁶ m³ Wasser den Obersee über seinen bedeutendsten Zufluß, den Alpenrhein, erreichen. Der Bodensee-Obersee zählt zu den kalkreichen Gewässern. Der steigende Phosphoreintrag zu Beginn der 50er Jahre führte zu einer raschen Eutrophierung. Maßnahmen der Anliegerstaaten zur Reduktion des Phosphoreintrages haben seit Mitte der 80er Jahre zur Reoligotrophierung des Bodensees geführt.

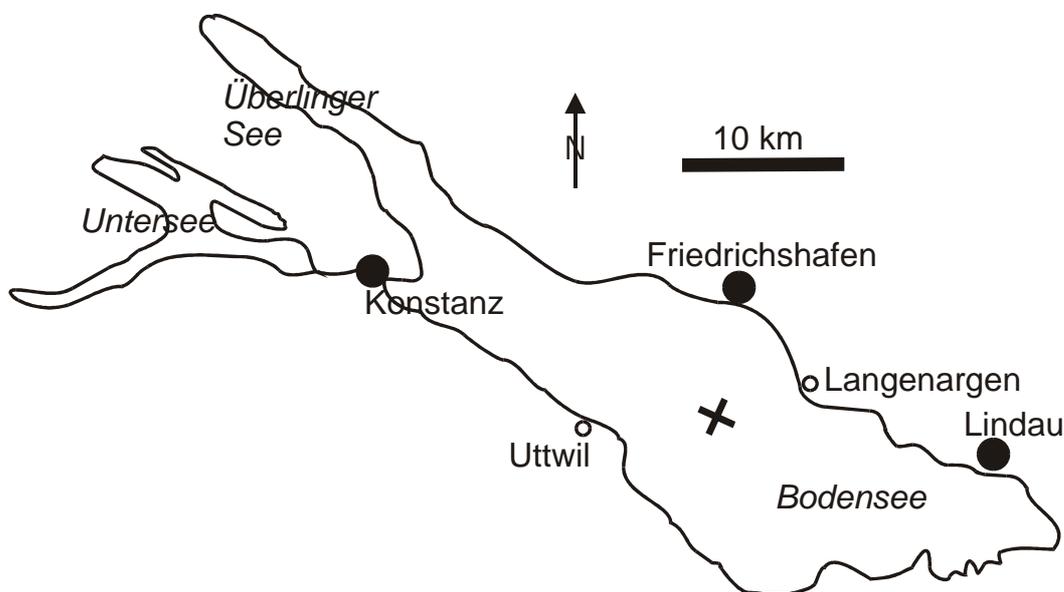


Abbildung 6: Bodensees mit Ort der Probenahme (Kreuz)

Betrag die Phosphorfracht im Bodensee-Einzugsgebiet im hydrologischen Jahr 1985/86 noch 2 300 t, lag sie im Jahr 1996/97 bei nur 1 500 t. Insbesondere verringerte sich der Eintrag

gelöster Phosphorverbindungen stärker als der partikulärer, sowie der Eintrag von Phosphor aus Punktquellen stärker, als der aus diffusen Quellen (IGKB 1999). Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen klimatischen Bedingungen in den beiden Jahren verbleibt eine Verringerung der Phosphatfracht um 26%, die der veränderten Nutzung des Einzugsgebietes und der Verminderung des Eintrags aus Punktquellen zuzuschreiben ist. Die Entwicklung des Phosphorgehaltes des Wasserkörpers über die Jahrzehnte ist in Abbildung 73 dargestellt.

Der See dient 4 Millionen Menschen als Trinkwasserreservoir und liegt in einem Feriengebiet mit überregionaler Bedeutung. (LAWA 1985)

Im Bodensee wurde im Juni 1997 von Prof. Müller ein 27 cm langer Sedimentkern und im April 1998 vom Autor ein 40 cm langer Sedimentkern und eine Greiferprobe aus 252 m Wassertiefe gezogen. Die Probenahme erfolgte mit dem Boot und mit der Ausrüstung des Institutes für Seenforschung, Langenargen, an der tiefsten Stelle des Sees zwischen Uttwil und Langenargen.

2.4. Gewässer im Pantanal, Brasilien

Das Pantanal liegt in Zentral- bis Westbrasilien und reicht bis über die Grenzen von Bolivien und Paraguay. Das größte Feuchtgebiet der Erde umfaßt 137 000 Quadratkilometer und gliedert sich in Alto- Médio- und Baixo-Pantanal. Es wird vom Rio Paraguai und seinen Nebenflüssen wie dem Rio Cuiabá durchflossen. Das Einzugsgebiet des Rio Paraguai wird im Norden durch die Gebirgszüge Serra dos Parecis und Serra Azul vom Einzugsgebiet des Amazonas getrennt. Während der Regenzeit zwischen November und März wird die absolut flache Ebene großflächig überschwemmt und es bilden sich riesige Buchten und Seen, die überschwemmten Flächen schwanken zwischen 11 000 km² und 110 000 km².

In dieser Region wird Gold gesucht und verarbeitet, was zu einer Belastung der Umwelt mit Quecksilber führt. Des weiteren werden in Pantanal 300 Viehzuchtstationen betrieben, und die Alkoholfabriken, die Zuckerrohr in Autotreibstoff umwandeln, leiten ihre Abwässer in den Rio Paraguai ein. Die Rodung großer Waldflächen an den Flußufern verstärkt die Erosion des Überschwemmungsgebietes.

Im August 1998 wurden vom Institut für Umwelt-Geochemie der Universität Heidelberg eine Probenahme in Alto Pantanal durchgeführt. Zur Analyse wurden fünf Sedimentkerne aus drei Flachseen und einem Fluß ausgewählt:

Ein Kern aus dem Süden des Baía Chacororé (1/ Ke), einem Weißwassersee und einer bei Barao de Melgaco (1/ BCH) im selben See. Ein Kern stammt aus dem Baía Siá Mariana (1/ BSM), einem Schwarzwassersee, einer aus dem Baía de Burro am Rio Cuiabá (2/ Cho) sowie ein weiterer aus dem Rio Paraguai (3/ Per).

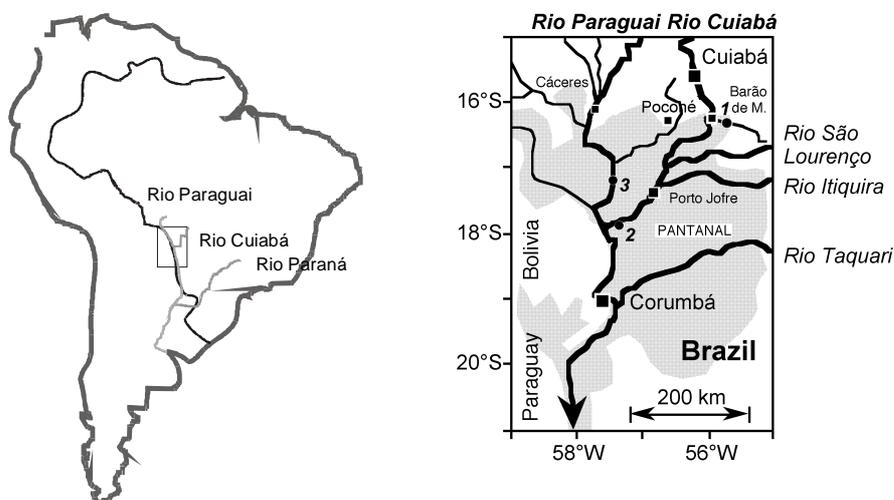


Abbildung 7: Probenahmegebiet Pantanal (nach HYLANDER et al. 2000)

2.5. Seen in Peking

In China wurden vier Flachseen im Stadtgebiet von Peking auf Phosphor und seine Bindungsformen untersucht. In acht Oberflächenproben und in zwei Sedimentkernen wurde Gesamtphosphat bestimmt. Die Bindungsformen von Phosphor wurden in fünf Greiferproben und in 7 Proben aus zwei Sedimentkernen bestimmt. Die Probenahme erfolgte im April 1998 durch Prof. Müller.

2.5.1. Kun ming See

Der Kun ming See ist ein Flachsee am nordwestlichen Rand des Stadtgebietes von Peking, direkt südlich des Sommerpalastes gelegen. Er ist ca. 2,2 km lang und mißt an seiner breitesten Stelle 1,5 km. Er hat eine Verbindung zum Qinghe im Norden und zum Jin He Fluß (Jingmi Bewässerungskanal) im Süden und ist von langgestreckten Halbinseln durchzogen.

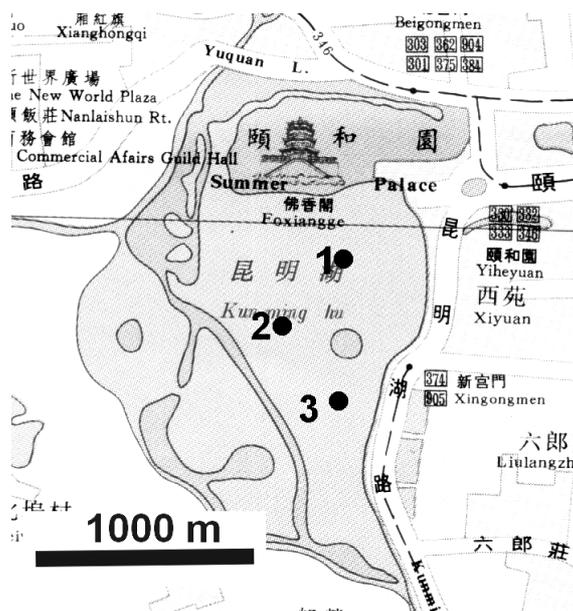


Abbildung 8: Kun ming See (CNPIEC)

Er war bereits 1987 Gegenstand sedimentologischer Untersuchungen (ZHOU et al. 1989) und wurde 1990 ausgebaggert (schriftliche Mitteilung Prof. J.Y. Liu, State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry Sinica, Peking). Hier wurden drei Oberflächenproben aus 1,5 m und 1,2 m Wassertiefe entnommen.

2.5.2. Yuyuantan See

Der Yuyuantan See liegt im westlichen Teil des Stadtgebietes von Peking. Er ist 1,5 km breit und erstreckt sich 200 m in Nord-Süd-Richtung. Er hat zwei Verbindungen zum Jimngmi Bewässerungskanal. Hier wurden drei Greiferproben aus 1,8 m und 2,2 m entnommen.

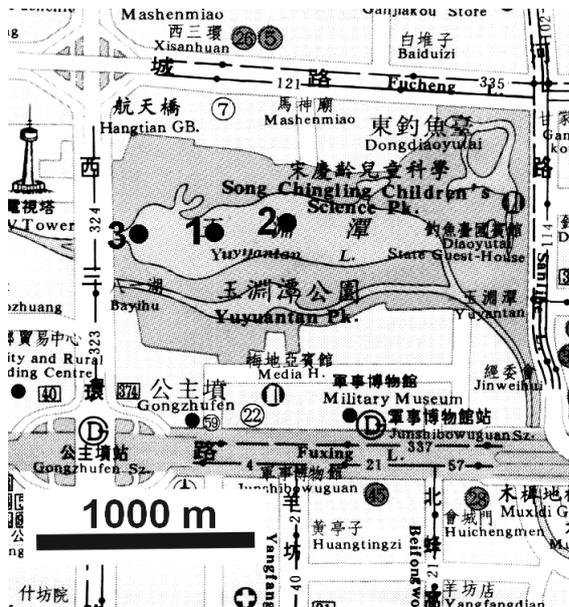


Abbildung 9: Yuyuantan See (CNPIEC)



Abbildung 10: Beihai See (CNPIEC)

2.5.3. Beihai See

Der Beihai See ist Teil eines 6 km langen Systems von sechs miteinander verbundenen Seen, welches im Norden eine Verbindung zum Liang ma Fluß hat.

Er liegt inmitten Pekings Stadtzentrum im 68 Hektar großen Beihai Park und grenzt im Südwesten an die Verbotene Stadt.

Der See ist etwas über einen Kilometer lang und etwa 600 Meter breit. Hier wurden aus 1,5 m bzw. 1,8 m Wassertiefe zwei Greiferproben und ein Sedimentkern (Probe 3) von 23 cm Länge genommen.

2.5.4. Shuizhui See

Der Shuizhui See liegt im 320 Hektar großen Chaoyang Park, im östlichen Teil von Peking. In Ost-West-Richtung mißt er etwa 700 Meter, in Nord-Süd-Richtung etwa 400 Meter. Vom Süden her ragt eine Halbinsel 200 Meter weit in den See hinein. Nordöstlich der Insel wurde aus 3,8 m Wassertiefe ein Sedimentkern von 26 cm Länge gezogen.



Abbildung 11: Shuizhui See (CNPIEC)

Bis 1949 wurde ein Teil des Sees als Müllkippe genutzt, 1985 wurde der Park mit den Seen umgestaltet (Beijing this month online, 1999).

2.6. Gewässer in Rußland

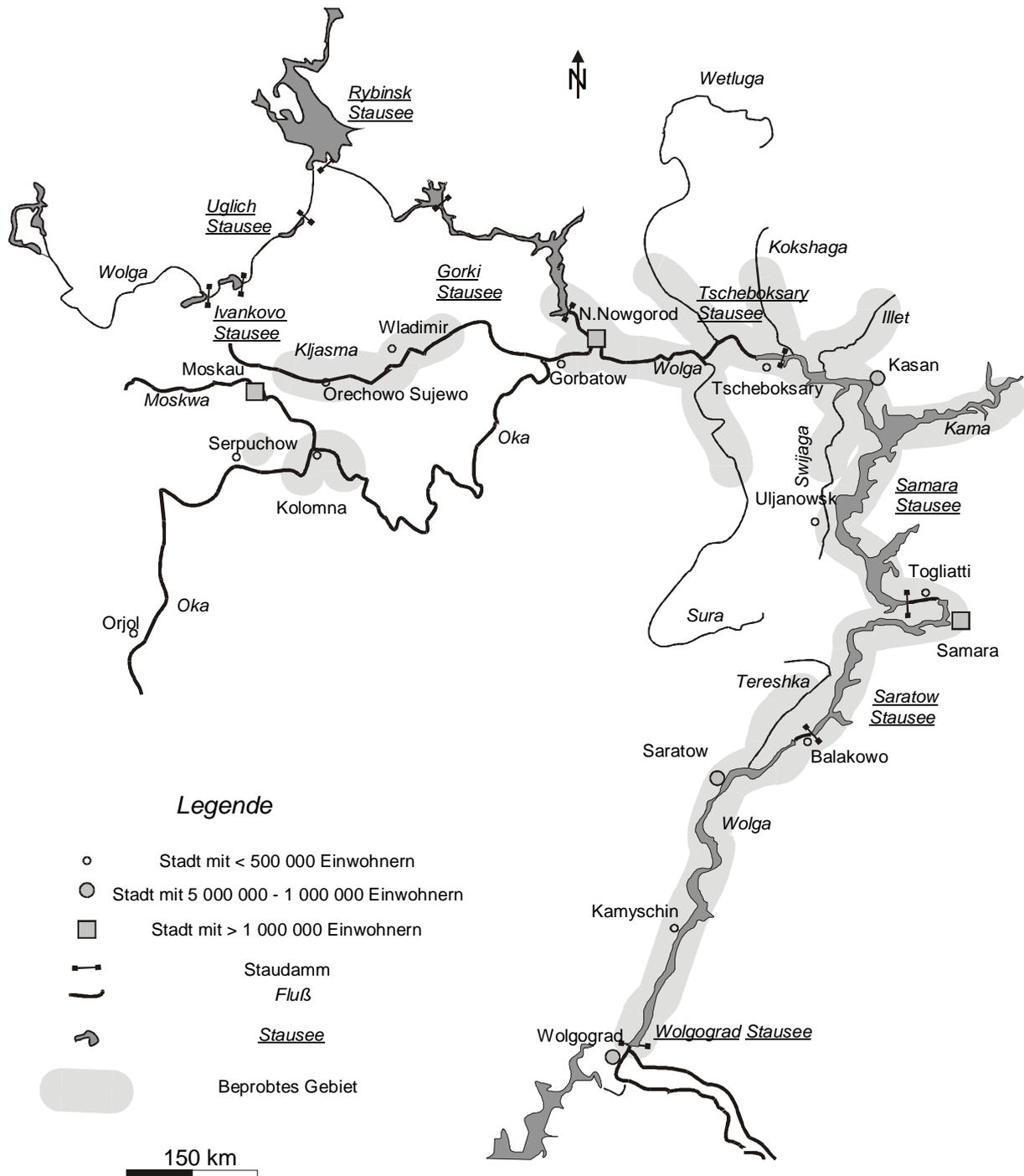


Abbildung 12: Probenahmegebiete in Rußland

Für die Übertragung russischer Ortsbezeichnungen in die lateinische Schreibweise und in die deutsche Sprache gibt es kein einheitliches Verfahren. Desweiteren wurden etliche Städte im Laufe der jüngeren Geschichte Rußlands umbenannt. So kommt es vor, daß Orte und Flüsse in verschiedenen Karten unterschiedlich benannt sind und z.B. ca. neun Schreibweisen der Stadt Nishnij Nowgorod existieren und in älteren Karten dazu noch etwa fünf Varianten von dem alten Namen Gorki. In dieser Arbeit wurden die geographischen Bezeichnungen dem Microsoft Encarta Weltatlas von 1999 entliehen. Eine Tabelle mit den in dieser Arbeit auftretenden russischen Namen und alternativen Bezeichnungen ist im Anhang enthalten.

2.6.1. Oka

Die Oka ist der zweitgrößte Nebenfluß der Wolga. Sie hat eine Länge von 1 500 km, entspringt südlich der Stadt Orjol und mündet bei Nishnij Nowgorod in der Wolga.

Ihr Einzugsgebiet ist 245 000 km² groß, und ihr mittlerer Jahresabfluß im Mündungsbereich beträgt $40 \cdot 10^9$ m³ (KORNDÖRFER 1993)

Im Einzugsgebiet der Oka leben etwa 13,5 Millionen Menschen. Der Frischwasserbedarf der Region beträgt $8,6 \cdot 10^9$ m³/a, von denen 63% aus (aufbereitetem) Flußwasser gewonnen wird. Pro Jahr werden $7,4 \cdot 10^9$ m³ Abwasser in das Flußsystem eingeleitet, etwa 60% davon ungeklärt (KORNDÖRFER 1993). Im Einzugsgebiet liegen mit Moskau und Nishnij Nowgorod zwei der wichtigsten Industriezentren Rußlands. In der Umgebung von Tula sind wichtige Eisen- und Stahlindustriebetriebe angesiedelt, weiter südlich konzentrieren sich Betriebe der chemischen Industrie, insbesondere der Düngemittelherstellung, aufgrund früherer Ausbeutung kleiner Phosphoritvorkommen (ILYIN 1998) in der Umgebung (KORNDÖRFER 1993).

Aus der Oka wurden 4 Oberflächenproben untersucht. Drei davon wurden im Oktober 1997 von V. Niedan bei Kolomna genommen (M51, M53, M55), eine im Oktober 1997 (W02) von Prof. Müller vor Nishnij Nowgorod.

Im Juli 1999 wurde ein Naturschutzgebiet im Einzugsgebiet der Oka beprobt. Das „Prioksko-Terrasny State Nature Reserve“ wurde 1945 angelegt, ist 4 900 Hektar groß und liegt am linken Ufer der Oka, 10 km östlich von Serpuchow und gegenüber der „Pushchino-Region“, einem naturwissenschaftlichem Forschungszentrum. Zwei Proben stammen aus einer Steppe, zwei Proben aus einem Pinienwald, eine aus einer Quelle. Im See Protokskoye wurden drei Sedimentkerne von 6 cm, 10 cm und 30 cm Länge genommen.

2.6.2. Moskwa

Die Moskwa entspringt 150 km westlich von Moskau, fließt durch die Stadt Moskau und mündet in Kolomna in die Oka, deren drittgrößter Nebenfluß sie ist. Die Moskwa ist 473 km lang und hat ein Einzugsgebiet von 17 600 km² und einer jährlichen Abflußsumme von 5,5*10⁹ m³ bei Kolomna. Pro Jahr werden 2,2*10⁹ m³ Abwasser in das Flußsystem eingeleitet (YAHYA et al. 2000). Das Einzugsgebiet der Moskwa gehört zu der Region mit der höchsten Bevölkerungsdichte, ist hoch industrialisiert und wird intensiv landwirtschaftlich genutzt.

Zur Analyse des Gesamtphosphors und der Bindungsformen von Phosphor wurde eine Probe (M50), genommen im Oktober 1997 von V. Niedan bei Kolomna, herangezogen. Die Probe wurde bis zur Analyse im Januar 1998 bei -18 °C aufbewahrt.

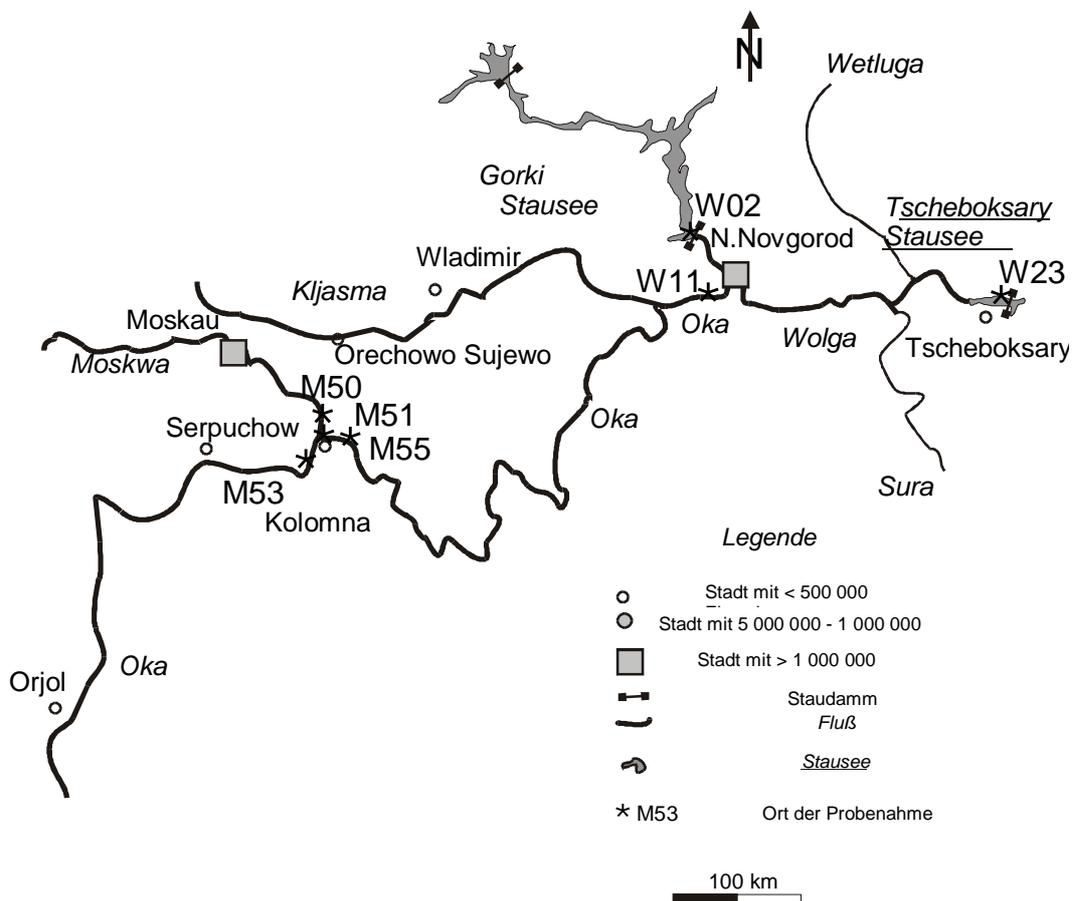
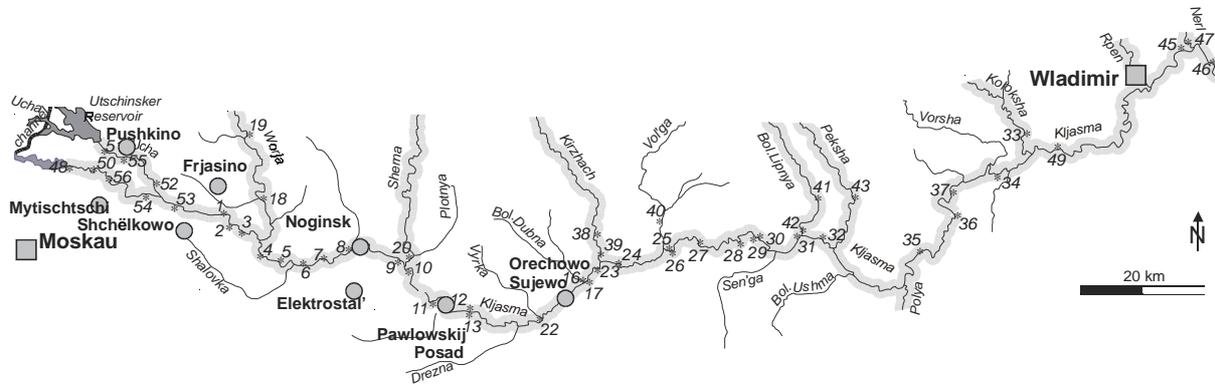


Abbildung 13: Probenahmegebiete Oka, Moskwa und ein Teil der Wolga

2.6.3. Kljasma



Legende

- **Wladimir** über 300 000 Einwohner
- **Noginsk** Zwischen 50 000 und 300 000 Einwohner
- Nerl · Beprobter Fluß
- Drezna · Unbeprobter Fluß
- Stausee
- * Probenahmepunkt

Abbildung 14: Probenahmegebiet Kljasma und Nebenflüsse

Die Kljasma ist der größte Nebenfluß der Oka. Sie entspringt ca. 50 km nordwestlich von Moskau und mündet 60 km westlich von Nishnij Nowgorod in die Oka. Sie ist 686 km lang. Ihr Einzugsgebiet umfaßt eine Fläche von 42 500 km². Bei Gorbatow hat sie einem mittleren jährlichen Abfluß von $7,1 \cdot 10^9$ m³. Pro Jahr werden zwischen Shchëlkowo in der Moskauer Region und Orgrtud in der Region von Wladimir $502 \cdot 10^6$ m³ Abwasser in das Flußsystem eingeleitet (YAHYA et al. 2000). Die nordwestliche Moskauer Region ist dichter besiedelt und stärker industrialisiert als die Region von Wladimir, die die Kljasma im weiteren Verlauf durchfließt.

Im Juli 1999 wurden 40 Oberflächenproben aus der Kljasma und 16 Oberflächenproben aus neun Nebenflüssen der Kljasma genommen und untersucht (OK 1...OK 56).

2.6.4. Wolga

Die Wolga ist mit 3 688 Kilometern der längste Fluß Europas, ihr Einzugsgebiet ist 1,38 Millionen Quadratkilometer groß (Abbildung 18). Sie entspringt in den Waldaihöhen und mündet bei Astrachan in mehreren Armen durch ein 6 600 Quadratkilometer großes Delta ins Kaspische Meer. Ihr mittlerer jährlicher Abfluß beträgt $263 \cdot 10^9 \text{ m}^3$.

Der Ausbau der Wolga in eine Kaskade von 8 Staustufen (Abbildung 15) dient neben der Energiegewinnung der Regulierung der Wasserführung und der Bewässerung weiter Trockengebiete an Mittel- und Unterlauf.

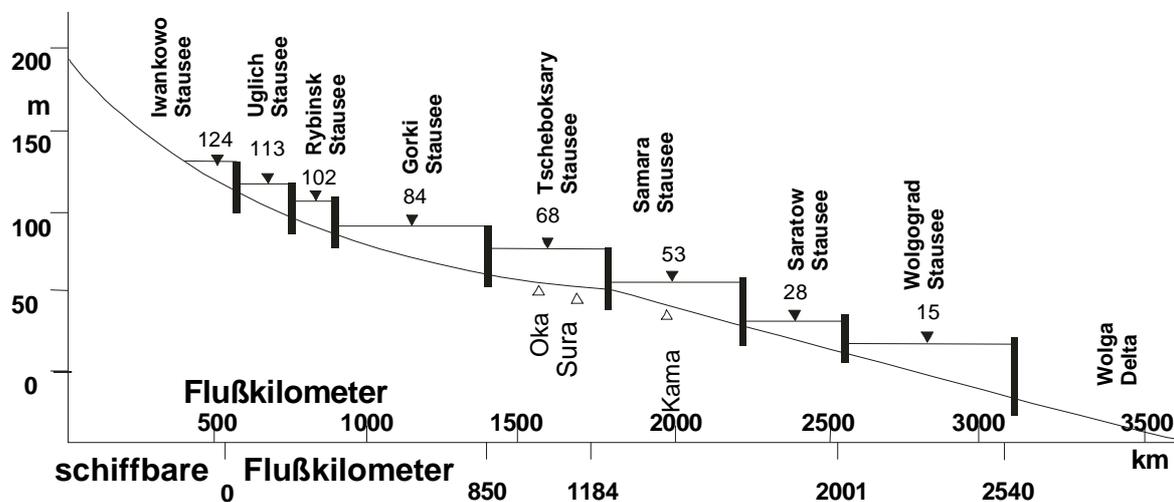


Abbildung 15: 8 Staustufen der Wolga

Ca. 45% der russischen Landwirtschaft und 50% der russischen Industrie beziehen Nutzwasser aus dem Flußsystem der Wolga. Die Wolga ist der Hauptzufluß des Kaspischen Meeres.

Die Wolga und einige ihrer Nebenflüsse wurden zwischen 1997 und 1999 in drei Probenahmekampagnen vom Institut für Umwelt-Geochemie, Heidelberg, beprobt. Dabei wurden 83 Proben der Wolga zwischen dem Gorki Stausee und dem Wolgograd Stausee sowie 19 Proben aus 8 Nebenflüssen (ohne die Oka) zur Analyse herangezogen.

Im Oktober 1997 wurde der Flußabschnitt zwischen dem Gorki Stausee und dem Tscheboksary Stausee beprobt, wobei eine Probe im Gorki Stausee (W02, schiffbare Flußkilometer 850) und eine im Tscheboksary Reservoir (W23, schiffbare Flußkilometer 1184) zur Analyse herangezogen wurden.

Im August 1999 wurde der Flußabschnitt vor der Einmündung der Sura (schiffbare Flußkilometer 1 065) vor dem Tscheboksary Stausee bis zur Stadt Samara kurz hinter dem Damm Kujbyschew beprobt. 32 Proben wurden in der Wolga genommen (Volga01...Volga29; Lopatinskij 1,2; Kasan Hafen) und 10 Proben in den Nebenflüssen Wetluga, Kokshaga, der Illet, der Kazanka und der Kama.

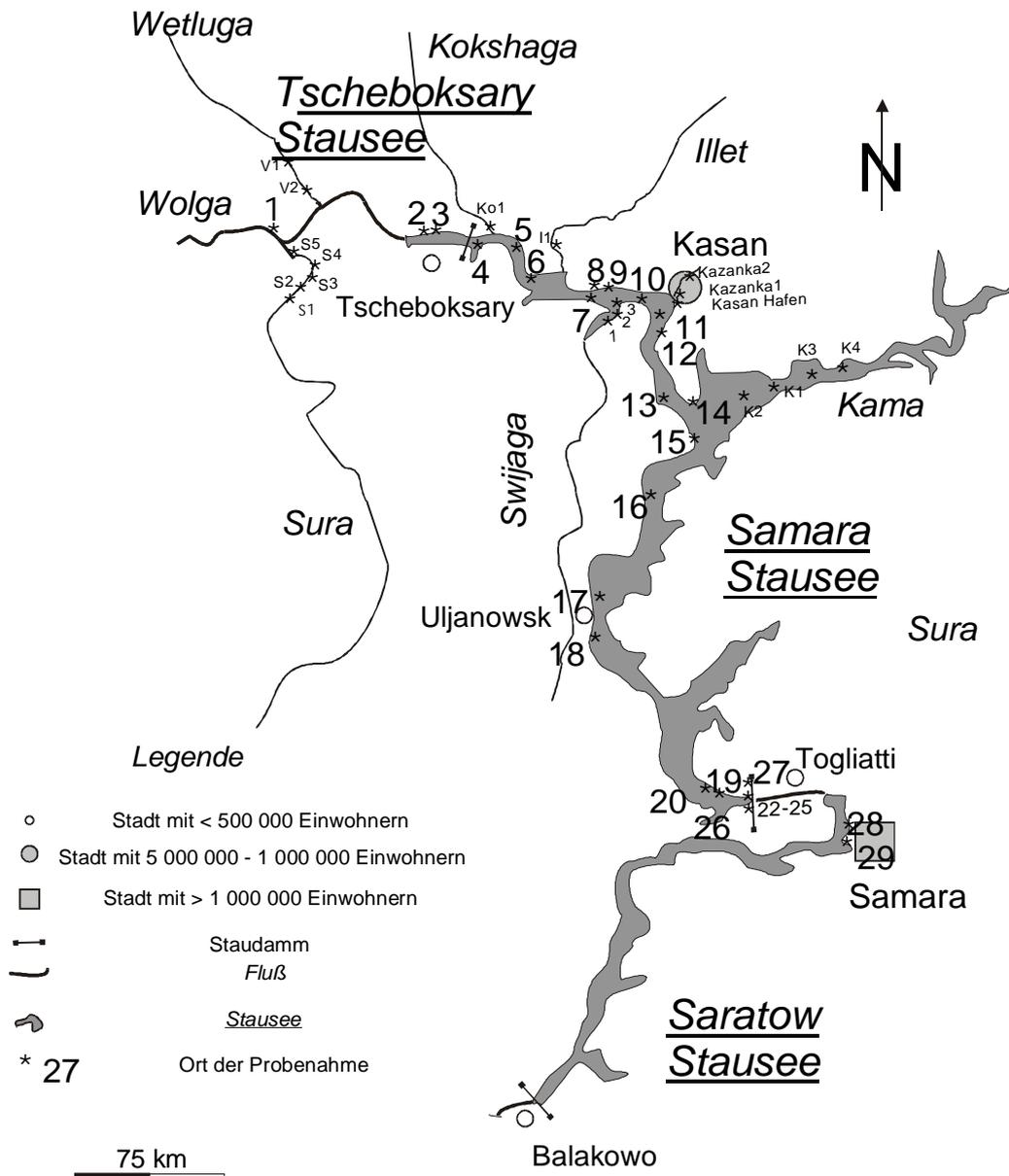


Abbildung 16: Probenahmegebiet Wolga und Nebenflüsse zwischen Tscheboksary Reservoir und Samara, die Zahlen der Probenahmepunkte sind im Datenanhang mit dem Vorsatz „Volga“ versehen.

Vom 28. Juni bis zum 5. Juli 1998 wurde die Wolga zwischen dem Saratow Stausee (schiffbare Flußkilometer 1 912) und dem Wolgograd Reservoir (schiffbare Flußkilometer 2 540) beprobt. Hier wurden 49 Proben aus der Wolga (WG 1...WG 50) und eine Probe aus der Tereshka (WG 16) analysiert.

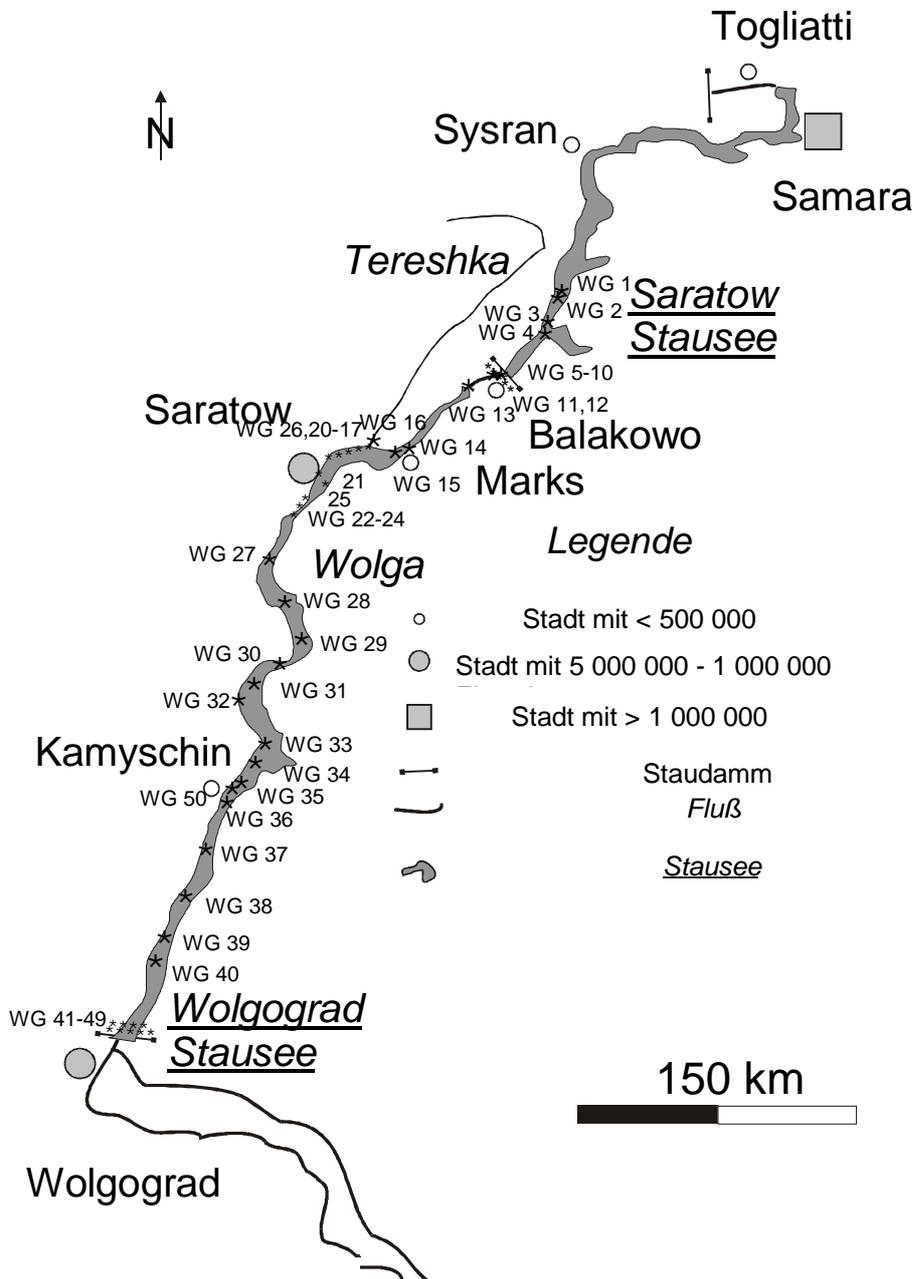


Abbildung 17: Probenahmegebiet Wolga und Tereshka zwischen Samara Stausee und Wolgograd Stausee

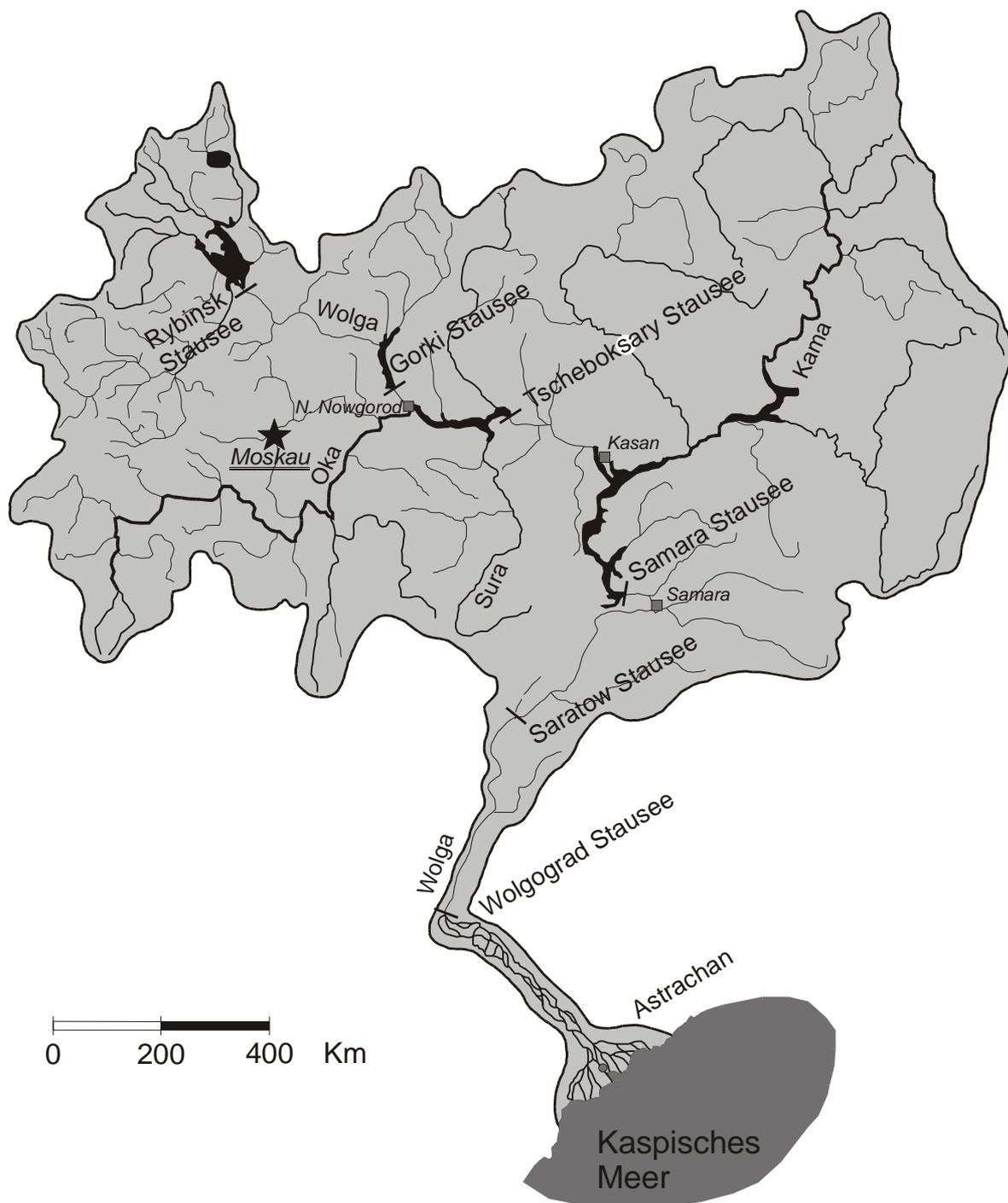


Abbildung 18: Hydrologische Karte des Einzugsgebietes der Wolga (verändert nach Vorlage des Institutes für Wasserbau und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe)

3. Material und Methoden

3.1. Probenahme

Oberflächenproben wurden mit einem Kastengreifer vom Typ *Van Veen* vom Boot, von einer Brücke oder vom Ufer aus genommen. Mit diesem Greifertyp erhält man ca. 2 kg Material, wobei der Greifer etwa 20 cm tief in das Sediment eindringt. Die gut durchmischten Proben wurden sofort in PE-Beutel verpackt, welche luftdicht verschlossen und kühl gelagert wurden. Einige Proben wurden bis zur Analyse bei ca. $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ tiefgefroren.

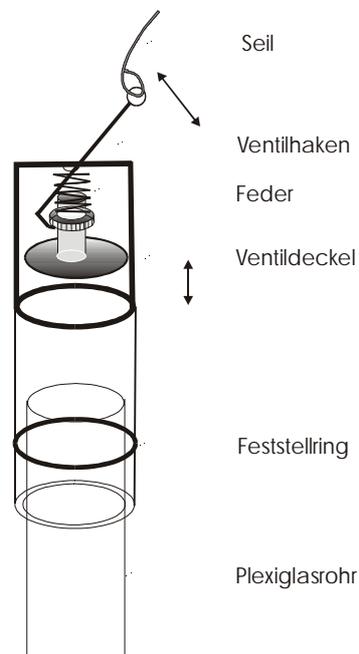


Abbildung 19: Fallot

Sedimentkerne wurden mit Hilfe der Kolbenlotmethode gezogen. Eine Plexiglasröhre mit einem Durchmesser von 60 mm wird von unten in ein Fallot eingespannt, welches oben mit einem Ventilverschluß und einem Seil versehen ist. Das Fallot wird am Seil herabgelassen. Ist die Plexiglasröhre in das Sediment eingedrungen, läßt der Zug am Seil nach und das Ventil verschließt sich. Das mit Sediment gefüllte Plexiglasrohr läßt sich verschlossen wieder hochziehen. Die Plexiglasröhre wird mit Kunststoffkappen wasserdicht verschlossen und entweder senkrecht transportiert, oder das Sediment wird direkt vor Ort mit einem Stempel aus dem Rohr herausgedrückt und in Schichten unterteilt in PE-Beutel verpackt.

Sedimentkerne mit einer gestörten Oberflächenschicht, erkennbar an einer Trübung des überstehenden Wassers, wurden verworfen.

3.2. Königswasseraufschluß

Zwar handelt es sich bei dem Königswasseraufschluß nicht um einen Vollaufschluß, so daß man besser von einem Königswasser-Auszug sprechen sollte, doch handelt es sich bei den nicht aufgelösten Rückständen überwiegend um silikatische Bestandteile, die für den limnischen Phosphat-Haushalt keine direkte Rolle spielen.

Die oxidierende Wirkung der Salpetersäure wird durch die komplexierende Wirkung der Chlorid-Ionen noch unterstützt.

Geräte

Achatmörser

beheizbares Sandbad

Material

Faltenfilter: Macherey-Nagel

Reagentien:

HCl konz Salzsäure (38 Gewichtsprozent) p.A.

HNO₃ konz Salpetersäure (65 Gewichtsprozent) p.A.

Der Phosphorgehalt der Sedimente wurde aus dem Königswasseraufschluß bestimmt.

Dazu wurden die frischen homogenisierten Proben in einer Porzellanschale bis zur Gewichtskonstanz bei 105 °C getrocknet. Proben, in denen der P-Gehalt in der Fraktion < 20 µm bestimmt wurde, wurden in einem Kunststoffbecher mit VE-Wasser aufgeschlämmt und über eine Anordnung von PE-Sieben mit Maschenweiten zwischen 2 mm und 20 µm naß gesiebt. Die aufgeschlämmt gesiebten Proben wurden im Trockenschrank getrocknet.

Etwa 0,5 g der getrockneten und gemörserten Proben werden in einem Becherglas mit 10 ml Salzsäure und 3,3 ml Salpetersäure versetzt. Die Proben bleiben über Nacht stehen, um die Reaktion der Karbonate und der organischen Bestandteile nicht zu beschleunigen und um ein Überschäumen der Suspension zu verhindern. Die Probe wird dann langsam auf dem Sandbad unter dem Abzug aufgeheizt und für drei Stunden auf 160 °C erhitzt. Nach dem Abkühlen wird der Inhalt des Becherglases in einen 50 ml Meßkolben überführt, welcher vorsichtig bis

zur Eichmarke mit destilliertem Wasser aufgefüllt wird. Der Inhalt des Meßkolbens wird über einen Faltenfilter in ein 50 ml PE Weithalsfläschchen überführt.

3.3. Spektralphotometrie

Die Spektralphotometrie beruht auf der optischen Anregung von Elektronenübergängen in Molekülen in Lösung oder in der Gasphase. Anders als bei der Atom-Absorptions-Spektroskopie werden die Elektronenübergänge in zahlreiche Rotations- und Schwingungszustände aufgespalten. Wechselwirkungen mit dem Lösemittel führen zu relativ breiten Absorptions- und Fluoreszenzmaxima und -minima.

3.3.1. Molybdängelb-Methode

Der Phosphorgehalt des Königswasseraufschlusses wurde photometrisch als Vanadomolybdophosphorsäure nach dem modifizierten Verfahren von JACKSON (1958) bestimmt.

Geräte

Spectrophotometer von Milton Roy Company, Rochester, NY, USA

Material

1 cm Photometerküvetten von Ratiolab© Art. Nr. 1101

Reagentien

NH₄VO₃ Ammoniummonovanadat p.A.

*(NH₄)₆Mo₇O₂₄*4H₂O Ammoniumheptamolybdat-tetrahydrat p.A.*

HNO₃ konz. Salpetersäure p.A.

Vanadomolybdatreagenz:

0,5 g Ammoniummonovanadat werden mit aqua dest. angefeuchtet und in 66 ml Salpetersäure gelöst.

10 g Ammoniumheptamolybdat werden in einem 1000 ml Meßkolben in 300 ml aqua dest. gelöst. Zu dieser Lösung wird die obige Lösung gegeben und mit aqua dest. wird auf 1000 ml aufgefüllt.

In 10 mm Photometerküvetten werden 2 ml aqua dest., 400 µl Probe/Standard und 1 ml Vanadomolybdatreagenz gegeben. Nach 20 min wird die Absorption der gelben Heteropolysäure bei einer Wellenlänge von 414 nm gemessen.

3.3.2. Molybdänblau-Methode

Der Phosphorgehalt der Extraktionslösungen wurde mit der empfindlicheren Molybdänblau-Methode photometrisch bestimmt. Dieses Verfahren beruht auf der Bildung eines blauen Komplexes durch selektive Reduktion von Molybdätdiphosphorsäure (HEINRICHS & HERRMANN 1990).

Geräte

Spectrophotometer von Milton Roy Company, Rochester, NY, USA

Material

1 cm Photometerküvetten von Ratiolab© Art. Nr. 1101

Reagentien

H₂SO₄ konz Schwefelsäure p. A.

H₂NSO₃H Amidosulfonsäure p. A.

*(NH₄)₆Mo₇O₂₄*4H₂O Ammoniumheptamolybdat-tetrahydrat p.A.*

*K(SbO)C₄H₄O₆*0,5H₂O Kaliumantimon(III)oxidtartrat*

C₆H₆O₆ L(+)-Ascorbinsäure p.A.

Voglers Reagenz

144 ml Schwefelsäure werden unter Rühren in 300 ml destilliertes Wasser gegeben und auf 20 °C temperiert.

10 g Amidosulfonsäure werden in 100 ml destilliertem Wasser gelöst.

12,5 g Ammoniummolybdat werden in 200 ml destilliertem Wasser gelöst.

0,3428 g Kaliumantimon(III)oxidtartrat werden in 100 ml destilliertem Wasser gelöst.

Die letzten drei Lösungen werden in dieser Reihenfolge der verdünnten Schwefelsäure zugegeben und mit destilliertem Wasser wird auf 1000 ml aufgefüllt. Die Lösung wird in einer braunen Flasche maximal drei Monate aufbewahrt.

Ascorbinsäure-Reagenz

10 g Ascorbinsäure werden in 100 ml Wasser gelöst. Die Lösung ist kühl zu lagern und maximal zwei Wochen haltbar.

Mischreagenz

Vor jeder Messung wird aus 4 Teilen Voglers Reagenz und 1 Teil Ascorbinsäurereagenz ein Mischreagenz erzeugt.

In 10 mm Photometerküvetten werden 2 ml der zu untersuchenden Lösung (pH 3-8) vorgelegt. Dazu werden 240 µl Mischreagenz gegeben und anschließend erneut 2 ml der zu untersuchenden Lösung.

Die Extinktion wird nach ca. 20 min bei 880 nm gemessen.

3.4. Sequentielle Extraktion

Zur Charakterisierung unterschiedlicher Bindungsformen des Phosphors in limnischen Sedimenten wurde ein von PSENNER (1988) entwickeltes Extraktionsverfahren verwendet. Dieses Verfahren findet Verwendung bei der Untersuchung bioverfügbaren Phosphors in Sedimenten, bei der Abschätzung von P-Freisetzungsraten aus Sedimenten, bei der Unterscheidung zwischen allochthonen und autochthonen P-Verbindungen und ist von Interesse bei der Untersuchung diagenetischer Prozesse.

Dabei wird Probematerial nacheinander mit verschiedenen Lösungen extrahiert, um Phosphorverbindungen mit ähnlichen Lösungseigenschaften in operationell definierte Fraktionen zusammenzufassen.

Die Proben wurden nach der Probenahme luftdicht verpackt und bis zur Analyse kühl gelagert. Die Analyse wurde möglichst rasch nach Probenahme durchgeführt.

3.4.1. Durchführung

Geräte

Beheizbares Sandbad
Überkopfschüttler
Zentrifuge: Heraeus Sepatech Cryofuge 8500

Material

50 ml Zentrifugenröhrchen
25 ml Schraubdeckelgläser, autoklavierbar
Sartorius Cellulose Nitrat Filter Art. Nr. 11306-50 Porengröße 0,45 µm

Etwa 1 g der frischen, ungesiebten, homogenisierten und feuchten Probe werden in 50 ml Zentrifugenröhrchen (Falcon) eingewogen. Eine weitere Teilprobe wird zur Bestimmung des Wassergehaltes und zur Gesamtphosphor-Bestimmung in eine Porzellanschale eingewogen.

Nach jedem Extraktionsschritt wurde die Probe bei 4200 U/min zentrifugiert. Die Membranfiltration der Proben erfolgte über 0,45 µm Cellulose-Nitrat Filter im Wasserstrahlvakuum.

Der Phosphornachweis erfolgt nach der Molybdänblau-Methode direkt in den aufbereiteten Extrakten als „Soluble Reactive Phosphorus (SRP)“ und nach Aufschluß der aufbereiteten Extrakte als Summe von SRP und NRP („Non Reactive Phosphorus“).

NH₄Cl-Extraktion

Reagentien

VE-Wasser: Um den Sauerstoff aus dem VE-Wasser auszutreiben wird 30 min Stickstoff durchgeleitet.

1 m Ammoniumchloridlösung: 53,49 g NH₄Cl Ammoniumchlorid p. A. in einem Liter VE-Wasser lösen.

Die Sedimentprobe wird im Zentrifugenröhrchen mit 25 ml der 1 m Ammoniumchloridlösung versetzt und für 2 Stunden im Überkopfschüttler bei Raumtemperatur geschüttelt.

Die Probe wird für 15 min zentrifugiert.

Das Zentrifugat wird abdekantiert und das Pellet erneut mit 25 ml Ammoniumchloridlösung versetzt und für weitere zwei Stunden geschüttelt.

Nach erneutem Zentrifugieren werden die Zentrifugate vereinigt und filtriert. Der Nachweis des Orthophosphat „Soluble Reactive Phosphorus (SRP)“ erfolgt wie oben angegeben nach der Molybdänblau-Methode direkt aus dem Filtrat.

BD-Extraktion

Reagentien

VE-Wasser: Um den Sauerstoff aus dem VE-Wasser auszutreiben wird 30 min Stickstoff durchgeleitet.

0,11 m Bikarbonat-Dithionitlösung: 20 g Na₂S₂O₄ Natriumdithionit p. A. und 9,24 g NaHCO₃ Natriumhydrogenkarbonat werden in 1 Liter VE-Wasser gelöst.

EDTA Lösung: 0,97 g Titriplex(III) werden auf 100 ml aufgefüllt

Das Pellet aus der vorangegangenen Extraktion wird mit 25 ml der BD-Lösung versetzt und für eine Stunde bei Raumtemperatur im Überkopfschüttler extrahiert.

Die Probe wird zentrifugiert und das Zentrifugat abdekantiert. Das Pellet wird erneut mit 25 ml BD-Lösung versetzt und für eine weitere Stunde im Schüttler extrahiert.

Die Zentrifugate werden vereinigt und filtriert. 5 ml des Extraktes werden mit 1 ml EDTA-Lösung versetzt, auf etwa 20 ml aufgefüllt und für zwei Stunden zur Oxidation des Dithionits mit Luft begast. Die Lösung wird auf ein definiertes Volumen aufgefüllt und der SRP-Nachweis erfolgt in dieser Verdünnung. Je nach dem Phosphorgehalt in dieser Fraktion ist die Wahl einer anderen Verdünnung erforderlich.

NaOH-Extraktion

Reagentien

*1 m NaOH: 40 g NaOH-Plätzchen p. A. auf 1 Liter Wasser
verd. H₂SO₄: 5 ml H₂SO₄ in 20 ml VE-Wasser*

Das Pellet der vorangegangenen Extraktion wird mit 25 ml 1 m Natronlauge versetzt und für 18 Stunden unter Schütteln extrahiert. Anschließend wird die Probe zentrifugiert und das Zentrifugat abdekantiert. Das Pellet wird erneut mit 25 ml Natronlauge versetzt und weitere 60 Minuten extrahiert und anschließend zentrifugiert. Die Zentrifugate werden vereinigt. Etwa 1 bis 5 ml des Überstandes werden in Meßkolben mit verdünnter Schwefelsäure neutralisiert und auf 25 ml aufgefüllt.

HCl-Extraktion

Reagentien

*0,5 m HCl: 42 ml konzentrierte Salzsäure (37%) werden in einen 1 l Meßkolben mit VE-Wasser gegeben und mit VE-Wasser auf 1 Liter aufgefüllt
5 m NaOH Lösung: 20 g NaOH Plätzchen p. A. werden langsam unter Rühren in 80 ml VE-Wasser gegeben und mit VE-Wasser auf 100 ml aufgefüllt.*

Das Pellet der vorangegangenen Extraktion wird mit 25 ml 0,5 m Salzsäure versetzt und für 18 Stunden unter Schütteln extrahiert. Anschließend wird die Probe zentrifugiert und das Zentrifugat abdekantiert. Der Vorgang wird mit weiteren 25 ml Salzsäure für eine Stunde wiederholt. Die vereinigten Zentrifugate werden filtriert.

Etwa 1 bis 5 ml des Überstandes werden in Meßkolben mit 5 m Natronlauge neutralisiert und auf 25 ml aufgefüllt.

Summe NRP

Reagentien

*K₂S₂O₈ (4%): 4 g K₂S₂O₈ Kaliumperoxodisulfat werden in 100 ml VE-Wasser gelöst.
5 m NaOH Lösung: 20 g NaOH Plätzchen p. A. werden langsam unter Rühren in 80 ml VE-Wasser gegeben und mit VE-Wasser auf 100 ml aufgefüllt.*

Jeweils 15 ml des (filtrierten, neutralisierten und verdünnten) Extraktes der NH₄Cl-Fraktion, der BD-Fraktion, der NaOH-Fraktion und der HCl-Fraktion werden in autoklavierbaren Schraubdeckelgläsern mit 5 ml der Kaliumperoxodisulfatlösung versetzt und für 2 Stunden bei 121 °C auf dem Sandbad autoklaviert. Nach dem Neutralisieren der Proben mit Natronlauge wird in jeder Fraktion der Phosphorgehalt bestimmt und der Phosphorgehalt der

Fraktion vor dem Druckaufschluß abgezogen. Hieraus errechnet sich der NRP-Gehalt in jeder Fraktion.

Gleichung 2

$$\text{NaOH-NRP} = \text{NaOH}[\text{NRP} + \text{SRP}] - \text{NaOH-SRP}$$

Die Summe der NRP-Gehalte der einzelnen Fraktionen steht für den NRP-Gehalt der gesamten Probe.

Gleichung 3

$$\Sigma\text{NRP} = \text{NH}_4\text{Cl-NRP} + \text{BD-NRP} + \text{NaOH-NRP} + \text{HCl-NRP}$$

P residual (refraktär)

Der Rückstand aus der Extraktion wird einem Königwasseraufschluß (Seite 35) unterzogen, wobei die Übereinstimmung der Summe der Phosphorgehalte aller Fraktionen mit dem Gesamtposphorgehalt, welcher gesondert bestimmt wird, ein Maß für die Qualität der Analyse ist.

Gleichung 4

$$\text{NH}_4\text{Cl-SRP} + \text{BD-SRP} + \text{NaOH-SRP} + \text{HCl-SRP} + \Sigma\text{NRP} + \text{P residual} = \text{P}_{\text{gesamt}}$$

In einigen Fällen wird P residual auch abgeschätzt aus der Differenz von Gesamtphosphor und der Summe aller übrigen Fraktionen.

Gleichung 5

$$\text{P residual} = \text{P}_{\text{gesamt}} - [\text{NH}_4\text{Cl-SRP} + \text{BD-SRP} + \text{NaOH-SRP} + \text{HCl-SRP} + \Sigma\text{NRP}]$$

Die Ergebnisse des im 6. Frühdiagenese Workshops in Neuglobsow vorgestellten Ringversuchs vom 11.11.1997 über die Reproduzierbarkeit des Extraktionsverfahrens sind in Abbildung 20 dargestellt.

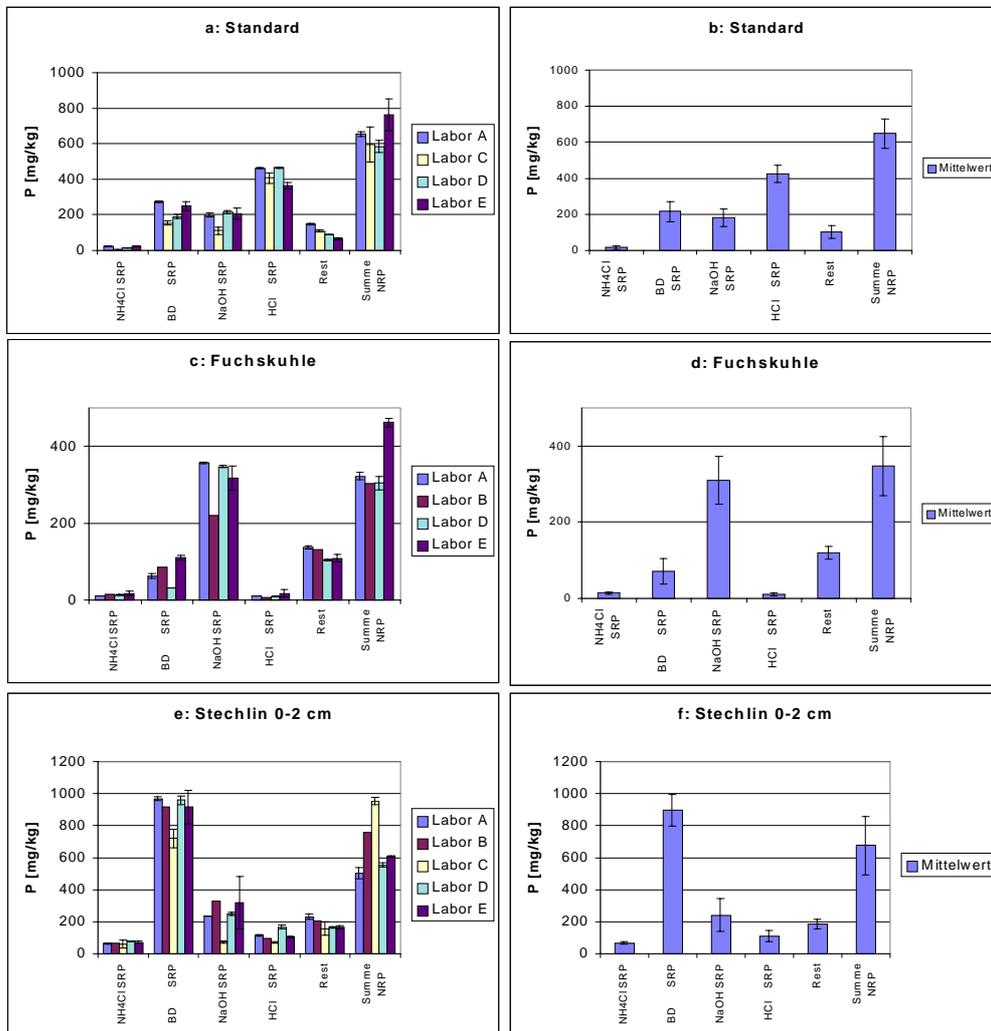


Abbildung 20a-f: Ringversuch zur sequentiellen Extraktion nach Psenner. Links die Ergebnisse der einzelnen Labors mit Standardabweichung aus der Doppelbestimmung, rechts die gemittelten Ergebnisse mit Standardabweichung

Die Standardabweichungen aus den Doppelbestimmungen der Ergebnisse jedes einzelnen Labors sind sehr gering (Fehlerindikatoren 5 a, c, e, soweit angegeben). Größere Standardabweichungen finden sich im Vergleich der Ergebnisse der Labors untereinander (Fehlerbalken 5 b, d, f). Relative Standardabweichungen liegen in den beiden stärksten Fraktionen zwischen 11% und maximal 23%, was akzeptabel erscheint, berücksichtigt man, daß sich die Verhältnisse in der Sediment-P-Zusammensetzung aufgrund der deutlichen Konzentrationsunterschiede in den verschiedenen Fraktionen dadurch nicht wesentlich ändern. Trotz dieser Abweichungen lassen sich die gleichen Kernaussagen für die

Sedimentzusammensetzung aus den Resultaten der verschiedenen Labors ziehen, nämlich ein relativ hoher Gehalt an organisch gebundenem Phosphor in allen Proben, eine Dominanz der reduktiv löslichen Phosphorformen in der Probe des Stechlinsees, ein relativ hoher Anteil einer säurelöslichen P-Komponente im Standardmaterial und ein vergleichsweise hoher Anteil an Phosphor, welcher gegen Hydroxid-Ionen austauschbar ist, in der Fuchskuhle.

3.4.2. Darstellung

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt als Konzentrationsangabe des in jeder Fraktion enthaltenen Phosphors (als P_2O_5) bezogen auf die Trockenmasse der ungesiebten Sedimentprobe. Für den Vergleich der P-Zusammensetzung von Sedimentproben mit unterschiedlichem Feinkornanteil, wurden in einigen Fällen - soweit angegeben - die Konzentrationen auf den P_2O_5 -Gehalt der Fraktion $< 20 \mu m$ umgerechnet (Gleichung 6).

Gleichung 6: Umrechnung der analytisch bestimmten Konzentration von Phosphor einer Bindungsform in der ungesiebten Probe auf die theoretische Konzentration dieser Bindungsform in der Fraktion $< 20 \mu m$

$$C_{<20}(X) = C_{ungesiebt}(X) * \frac{C_{P_2O_5 < 20}}{C_{P_2O_5 ungesiebt}}$$

3.5. Eh-Wert

Zur Messung des Milieuparameters „Eh-Wert“ wurde eine Redoxelektrode der Firma Ingold in das Überstandswasser und in das Sedimentmaterial eines mit der Kolbenlotmethode genommenen Sedimentkerns getaucht. Vor dem Ablesen des Eh-Wertes [mV] wurde zum Erreichen des Gleichgewichtspotentials 20 min gewartet.

3.6. Korrelationsanalyse

Mit Hilfe einer Korrelationsanalyse läßt sich feststellen, inwieweit ein stochastischer Zusammenhang zwischen zwei Wertegruppen besteht. Der Korrelationskoeffizient ist dabei ein Maß für Stärke und Richtung des Zusammenhangs. Zur Anwendung kam die Berechnung des Korrelationskoeffizienten nach Pearson.

Der Korrelationskoeffizient „r“ liegt zwischen den Grenzen +1 und -1. Ist $|r| = 1$, so liegt ein exakter linearer Zusammenhang zwischen x und y vor.

Eine gute stochastische Korrelation kann immer nur einen Hinweis auf einen kausalen Zusammenhang geben.

Gleichung 7: Korrelationskoeffizient nach Pearson

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 * \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

Die Bewertung der Koeffizienten wird nach ZÖFEL (1985) vorgenommen:

Tabelle 4: Bewertung der Korrelationskoeffizienten nach ZÖFEL (1985)

$ r < 0,2$	sehr geringe Korrelation
$ r = 0,2 - 0,5$	geringe Korrelation
$ r = 0,5 - 0,7$	mittlere Korrelation
$ r = 0,7 - 0,9$	hohe Korrelation
$ r = 0,9 - 1$	sehr hohe Korrelation

Die Aussagekraft einer guten Korrelation wächst mit der Anzahl der Datenpunkte

3.7. Geoakkumulations-Index

Mit Hilfe des Geoakkumulations-Index (I_{geo}) kann das Ausmaß der Belastung von Sedimenten oder Böden dargestellt werden. Bei der von MÜLLER (1978) entwickelten Methode wird die präzivilisatorische Konzentration eines Stoffes zu der aktuell ermittelten Konzentration dieses Stoffes in Bezug gesetzt.

Der Geoakkumulationsindex berechnet sich nach folgender Gleichung:

Gleichung 8

$$I_{\text{geo}} = \log_2 C_n / (1,5 * B_a)$$

C_n = gemessene Konzentration des Elementes in der Tonfraktion

B_a = geochemischer Background in der Tonfraktion präzivilisatorischer Sedimente desselben Ablagerungsraumes

Die I_{geo} -Klasse 6 ist eine nach oben offene Klasse und schließt alle I_{geo} -Klassen > 5 mit ein.

Für die Background-Konzentration von Phosphor in den untersuchten Sedimenten wurde die von TUREKIAN & WEDEPOHL (1961) ermittelte P_2O_5 -Konzentration im Tongesteinsstandard von 0,16 % eingesetzt. Hiernach ergibt sich folgende Beschreibung der Sediment-Qualität.

Tabelle 5: Sediment-Qualität und I_{geo} -Klassen

I_{geo} -Klasse	Konzentrations-Obergrenze	Sediment-Qualität
0	0,24 % P_2O_5	praktisch unbelastet
1	0,48 % P_2O_5	unbelastet bis mäßig belastet
2	0,96 % P_2O_5	mäßig belastet
3	1,92 % P_2O_5	mäßig bis stark belastet
4	3,84 % P_2O_5	stark belastet
5	7,68 % P_2O_5	stark bis übermäßig belastet
6	15,6 % P_2O_5	übermäßig belastet

3.8. ³¹P-NMR

³¹P mit der Kernspin-Quantenzahl 1/2 ist das einzige natürlich vorkommende Phosphor-Isotop. Im Vergleich zum Wasserstoff beträgt seine relative Empfindlichkeit nur 6,6% (Hesse et al. 1991)

3.8.1. Probenvorbereitung

Geräte

*Rotationsverdampfer mit Heizbad und Membranpumpe
Zentrifuge: Heraeus Sepatech Cryofuge 8500
Kernresonanzspektroskop DRX 300*

Material

*Quarzglas NMR Röhrchen
50 ml Zentrifugenröhrchen*

Reagentien

*67 mM EDTA Lösung: 2,5 g EDTA (Titrplex(III)) auf 100 ml VE-Wasser
67 mM EDTA/0,2 m NaOH: 2,5 g EDTA und 0,8 g NaOH in 100 ml VE-Wasser
D₂O*

Test 1 (Test 2)

Zwei mal 5 g (*einmal* 9,25 g) frischer Sedimentprobe werden am Tag der Probenahme in 50 ml Zentrifugenröhrchen mit jeweils 50 ml EDTA Lösung versetzt und für 30 min geschüttelt. Nach Zentrifugieren bei 4000 U/min wird der Überstand verworfen und die Pellets für zwei Stunden im Überkopfschüttler mit der NaOH/EDTA-Lösung extrahiert. Nach dem Zentrifugieren bei 5000 U/min werden die Überstände vereinigt und bei 30 °C und 45 mbar im Rotationsverdampfer mit Membranpumpe auf die Hälfte des Volumens (*auf 1/10 des Volumens*) eingengt.

Etwa 500 µl Probe werden mit 100 µl D₂O in NMR-Röhrchen abgefüllt und bis zur Analyse für wenige Tage bei -20 °C aufbewahrt.

3.8.2. Messung

Als externer Standard zur Festlegung der δ-Skala dient eine 85%ige Phosphorsäure

Die Messung wurde am DRX 300 mit folgenden Einstellungen durchgeführt:

Tabelle 6: Geräteeinstellungen der Kernresonanzspektroskopie

	Test 1	Test 2
	121,5 MHz	121,5 MHz
Acquisition time	1,64 s	0,34 s
Pulse delay	10 s	1 s
Spectral width	4990 Hz	24331 Hz
Scans	6427	2652

3.9. Elektronenmikroskopie mit energiedispersiver Röntgenanalyse

Die Auflösung des Lichtmikroskops ist durch die Wellenlänge begrenzt, da zwei Punkte, die kleiner sind als die Wellenlänge der Strahlung, nicht getrennt abgebildet werden können. Demgegenüber ist die Auflösung des Raster-Elektronenmikroskops etwa um den Faktor 1000 größer (FELS 2000).

Das Raster-Elektronenmikroskop REM besteht aus einer Vakuumprobenkammer mit angebauter Elektronensäule und verschiedenen Detektoren.

Ähnlich einem Glühfaden wird ein Filament, z.B. ein Wolframdraht, geheizt und zur Elektronenemission angeregt. Die Elektronen werden über ein Triodengitter in die Elektronensäule beschleunigt und mit magnetischen Linsen gebündelt. Daraus entsteht der Primärelektronenstrahl, der bei Hochvakuum (besser als 10^{-4} mbar) auf eine elektrisch leitfähige Probe in der Probenkammer fokussiert wird. Durch einen Zeilengenerator wird der Strahl zeilenweise über die Probe gerastert. Die Information, die jeder Punkt der Probe liefert, wird mit Detektoren gesammelt und zu einem Bild verarbeitet.

Die auf die Probe treffenden Elektronen fließen über die Probe als Probenstrom ab und erzeugen Wärme.

Sie bewirken den Austritt von *Sekundärelektronen* aus den äußersten Nanometern der Probe, welche mit dem Sekundärelektronen-Detektor erfaßt werden, der die Oberflächenkontrastbilder liefert, wobei Bereiche, die dem seitlich am REM angebrachten Detektor zugewandt sind, mehr Signal liefern als dem Detektor abgewandte Stellen.

Die auf die Probe treffenden Elektronen bewirken den Austritt von *Rückstreuelektronen* aus den äußeren Mikrometern der Probe, die vom Rücksteuelektronen-Detektor gemessen werden um den Elementkontrast abzubilden. Durch Wechselwirkung mit den Hüllenelektronen der angeregten Atome ist die Ausbeute an Rückstreuelektronen um so höher, je höher die Ordnungszahl der Atome ist.

Eine weitere Wechselwirkung zwischen den Primärelektronen und den Atomen der Probe ist die Erzeugung von *Röntgenstrahlung*. Die Primärelektronen schlagen Hüllenelektronen aus ihrer Bahn und heben sie auf ein höheres Energieniveau. Beim Zurückfallen geben die angeregten Hüllenelektronen die zusätzliche Energie in Form von Röntgenquanten wieder ab. Weil die Höhe der Energie charakteristisch für jedes Energieniveau der Atome ist, lassen sich über eine energiedispersive Röntgenanalyse über den EDX-Detektor die angeregten Elemente bestimmen.

Ebenfalls durch den Elektronenstrahl ausgelöst wird der Austritt der langsamen Auger-Elektronen aus den äußersten Nanometern der Probe, die zur Analyse dünner Schichten genutzt werden können.

3.9.1. Probenvorbereitung

Da die Probe im Hochvakuum untersucht wird, ist eine Trocknung im Trockenschrank erforderlich. Die getrocknete ungesiebte Probe wird im Achatmörser zerrieben. Ein Aluminiumträger wird mit einem doppelt klebenden Kohlenstoffplättchen versehen. Der Träger wird nun fest in das Probematerial gedrückt und loses Material abgeschüttelt. Um die Probe leitfähig zu machen, wird sie in einem Sputtergerät mit einer dünnen Schicht aus Kohlenstoff bedampft.

3.9.2. Messung

Die Untersuchung wurde mit einem Elektronenmikroskop Typ Leo 440 bei einer Anregungsspannung von 20 kV, einem Arbeitsabstand von 25 mm und 26 mm und bei Vergrößerungen zwischen 323fach und 1 810fach mit einem SE Detektor durchgeführt.

4. Ergebnisse

4.1. Sedimente kleiner Fließgewässer in Baden-Württemberg

Untersucht wurden 809 Sedimentproben aus 324 kleinen Fließgewässern Baden-Württembergs.

In den Fraktionen < 20 µm wurde P₂O₅ bestimmt.

Der Median liegt bei 0,31% P₂O₅, der Mittelwert bei 0,33% P₂O₅.

Es wurde über das Probenahmegebiet ein Raster von 10 km Kantenlänge in Nord-Süd- bzw. Ost-West-Richtung gelegt. Alle Meßwerte, die in einem Quadrat zusammenfallen, wurden gemittelt. Diese Mittelwerte sind in Abbildung 21 farblich dargestellt. Man kann erkennen, daß der P₂O₅-Gehalt der Sedimente in den meisten Gebieten zwischen 0,2% und 0,4% liegt. Nur in vier Regionen liegen die Konzentrationen über 0,6%: In der Region südlich von Karlsruhe in der Alb und im Malscher Landgraben, in der Brenz bei Herbrechtingen, in der Gächinger Lauter bei Bad Urach und in der Klein Kinzig bei Freudenstadt.

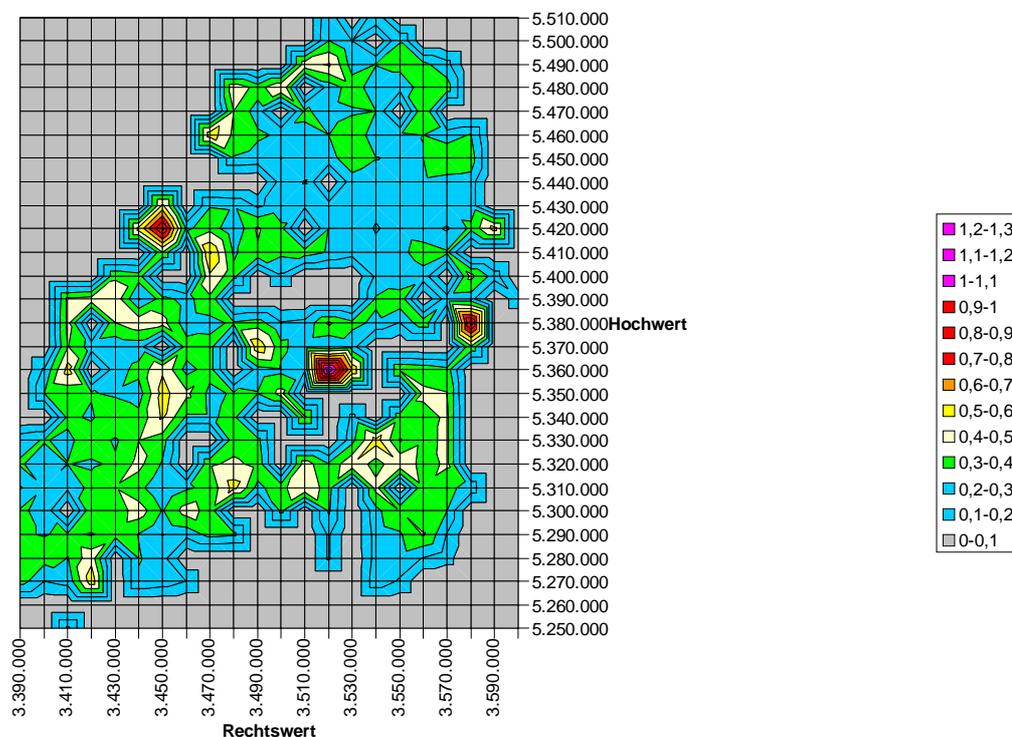


Abbildung 21: Phosphorverteilung in Sedimenten kleiner Fließgewässer in Baden-Württemberg. Graue Flächen sind ohne Probe.

Eine genauere Übersicht über die Phosphorverteilung bietet Abbildung 22. Die höchsten Phosphor-Konzentrationen an einzelnen Meßpunkten wurden in der Murre bei Buchen (1,36% P_2O_5), im Malscher Landgraben, 7 km südlich von Karlsruhe (1,35%) und in der Gächinger Lauter in der Schwäbischen Alb (1,19%) gefunden.

Eine Häufung von Proben mit mehr als 0,6% P_2O_5 finden sich südlich von Karlsruhe im Malscher Landgraben, im Federbach und der Alb (n = 6), südlich von Sigmaringen im Andelsbach und Kehlbach (n = 4) und in der Klein Kinzig und der Schiltach südlich von Freudenstadt (n = 3)

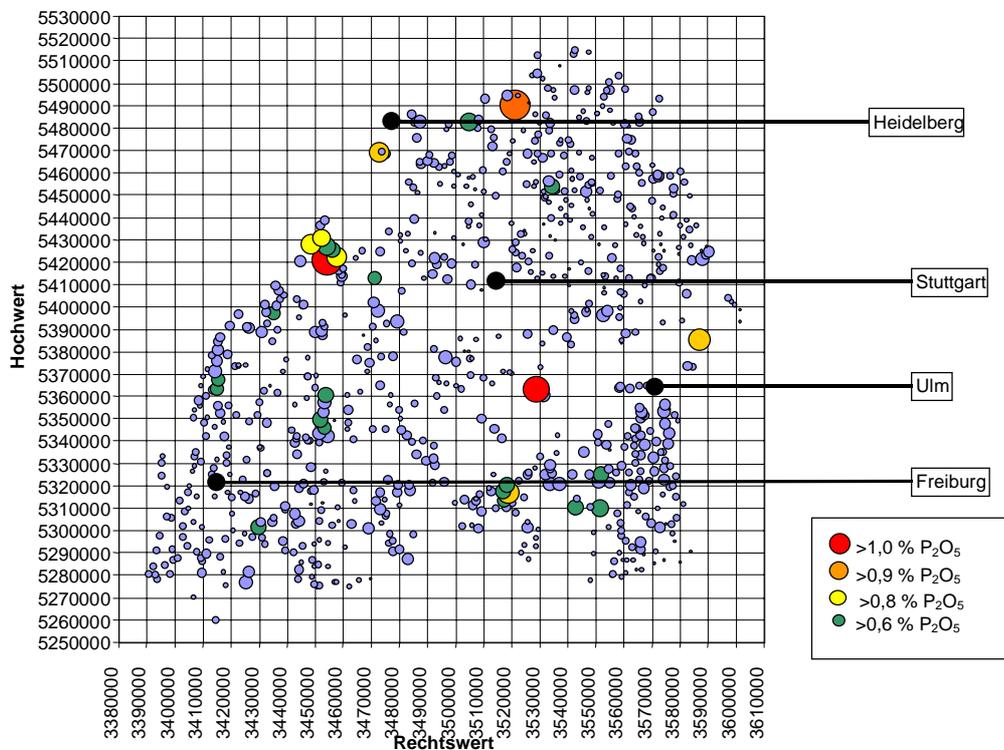


Abbildung 22: Phosphorverteilung in Sedimenten kleiner Fließgewässer Baden-Württembergs

4.2. Jungferweiher

Untersucht wurden zwei Sedimentkerne aus dem Jungferweiher bei Ulmen, einem Flachsee in der Eifel.

Kern 1 reicht in eine Tiefe von 40 cm und wurde in 12 Einzelproben unterteilt, Kern 2 ist 50 cm lang und wurde in 14 Abschnitte unterteilt. Alle Proben wurden einer sequentiellen Extraktion unterzogen, und Gesamtphosphor wurde in den ungesiebten Proben bestimmt.

4.2.1. Gesamtphosphor und Bindungsformen von P in der ungesiebten Probe

Tabelle 7: Bindungsformen von Phosphor in einem Sedimentkern des Jungferweihers: *BD bestehend aus BD-SRP und BD-NRP, wobei der Anteil von NRP in 13 gemessenen Proben zwischen 0 und 5 Prozentpunkten liegt. **NRP bestehend aus NaOH-NRP und HCl-NRP, ohne BD-NRP, welcher in 13 gemessenen Proben zwischen 0 und 5 Prozentpunkten liegt.

Probenname	Tiefe [cm]	NH ₄ Cl-SRP [%]	BD* [%]	NaOH-SRP [%]	HCl-SRP [%]	NRP** [%]	Refraktär [%]	P ₂ O ₅ ungesiebt [10 g/kg]
Kern 1	0-1	nrb	21	30	7	35	8	0,38
	1-2	nrb	25	30	7	37	1	0,37
	2-3	nrb	18	30	7	34	12	0,38
	3-4	nrb	25	30	8	37	0	0,36
	4-5	nrb	20	31	9	35	5	0,37
	5-10	nrb	17	38	9	37	0	0,31
	10-15		15	41	9	36	0	0,32
	15-20	nrb	16	40	10	35	0	0,30
	20-25	nrb	13	40	10	30	7	0,32
	25-30	nrb	17	41	10	32	0	0,28
	30-35	nrb	10	49	11	25	5	0,30
	35-40	nrb	15	49	9	27	0	0,26

Tabelle 8: Bindungsformen von Phosphor in einem Sedimentkern des Jungferweiher: *BD bestehend aus BD-SRP und BD-NRP, wobei der Anteil von NRP in 13 gemessenen Proben zwischen 0 und 5 Prozentpunkten liegt. **NRP bestehend aus NaOH-NRP und HCl-NRP, ohne BD-NRP, welcher in 13 gemessenen Proben zwischen 0 und 5 Prozentpunkten liegt.

Probenname	Tiefe [cm]	NH ₄ Cl-SRP [%]	BD* [%]	NaOH-SRP [%]	HCl-SRP [%]	NRP** [%]	Refraktär [%]	P ₂ O ₅ ungesiebt [10 g/kg]
Kern 2	1-2	n nb	24	25	6	32	12	0,31
	2-3	n nb	29	23	5	33	11	0,35
	3-4	n nb	29	19	5	36	11	0,33
	4-5	n nb	35	19	5	31	10	0,33
	5-10	n nb	33	18	5	33	10	0,31
	10-15	n nb	28	21	5	35	11	0,29
	15-20	n nb	25	25	6	33	12	0,26
	20-25	n nb	21	29	6	32	12	0,25
	25-30	n nb	18	33	7	30	13	0,24
	30-35	n nb	18	34	6	29	13	0,25
	35-40	n nb	11	28	3	45	14	0,19
	40-45	n nb	12	26	2	45	15	0,16
	45-50	n nb	11	27	1	52	9	0,15

Betrachtet man den Konzentrationsverlauf im Sediment mit der Tiefe, fällt auf, daß die höchsten Phosphor-Konzentrationen im obersten bzw. in den oberen 3 cm der Sedimentkerne zu finden sind. Die P₂O₅-Konzentrationen nehmen mit der Tiefe von 0,38% bzw. 0,36% im ersten Zentimeter auf 0,26% bzw. 0,19% in der Sedimentschicht zwischen 35 cm und 40 cm ab.

Betrachtet man den Verlauf der Anteile der einzelnen P-Fractionen, fallen relativ hohe BD-Anteile von 18% bis 25% (Kern 1) und von 24% bis 35% (Kern 2) in den oberen 5 cm des Sedimentkerns auf. Diese Anteile machen unterhalb von 25 cm nur noch zwischen 10% und 18% aus.

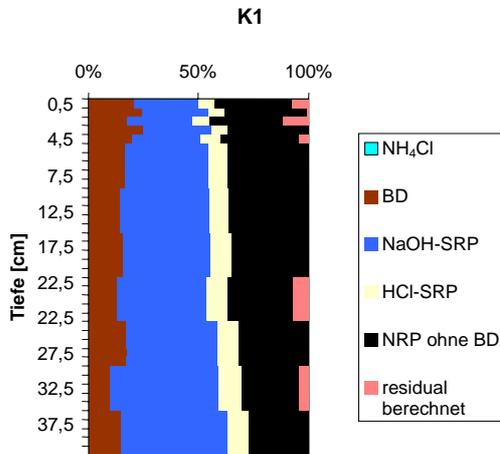


Abbildung 23: Bindungsformen von Phosphor in Kern 1 (Jungferweiher)

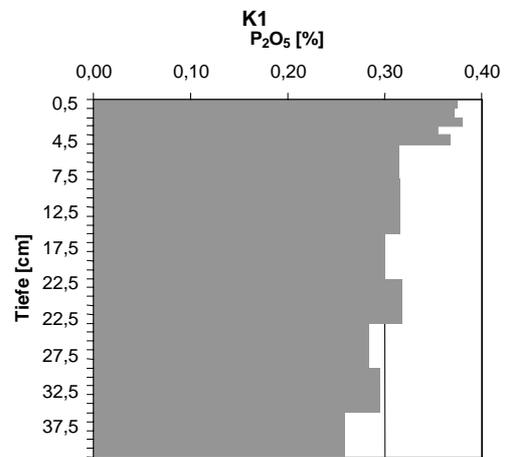


Abbildung 24: P₂O₅-Konzentrationen in Kern 1 (Jungferweiher)

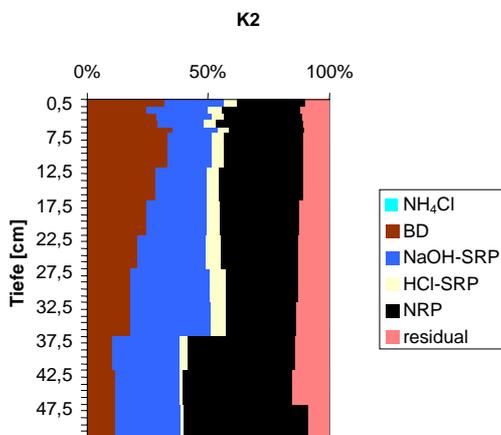


Abbildung 25: Bindungsformen von Phosphor in Kern 2 (Jungferweiher)

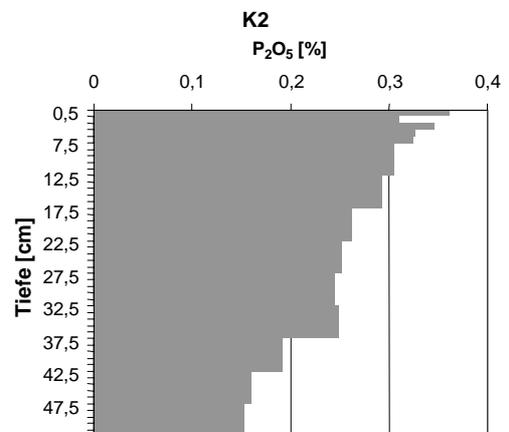


Abbildung 26: P₂O₅-Konzentrationen in Kern 2 (Jungferweiher)

Die NaOH-SRP-Fraktion macht in Kern 1 zwischen 30% und 49% vom Gesamtphosphor aus. Ihr Anteil wächst tendenziell mit zunehmender Tiefe, und er erreicht sein Maximum ab 30 cm Tiefe.

Ein ähnlicher Verlauf findet sich auch in Kern 2 ab einer Tiefe von 4 cm mit einem Maximum in der Zone zwischen 30 cm und 35 cm.

Die HCl-SRP-Fraktion macht in beiden Kernen maximal 11% vom Phosphat-Pool aus.

Die NRP-Gehalte liegen in beiden Kernen bis 35 cm Tiefe zwischen 25% und 37% mit den niedrigsten Konzentrationen in den Zonen zwischen 30 cm und 35 cm. Unterhalb von 35 cm im Kern 2 liegen die Anteile dieser Fraktion dagegen zwischen 45% und 52%.

4.2.2. Redoxprofil

Das Redoxprofil eines frischen Sedimentkerns aus dem Jungferweiher zeigt deutlich einen Übergang von positiven Eh-Werten zu negativen Eh-Werten an der Sediment-Wasser-Grenzschicht.

Tabelle 9: Redoxprofil eines Sedimentkerns

Sedimenttiefe [cm]	Redoxpotential [mV]
4	8
1	7
-0,5	-30
-1	-80
-10	-125
-20	-120
-30	-120
-35	-122

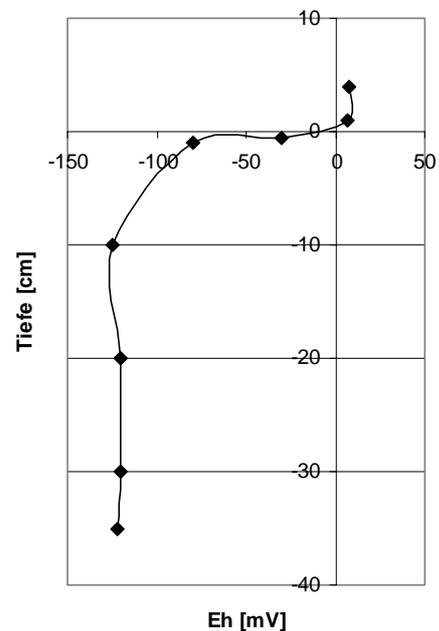


Abbildung 27: Redoxprofil eines Sedimentkerns im Jungferweiher

4.3. Bodensee

Untersucht wurde ein 40 cm langer Sedimentkern des Bodensees zwischen Utwil und Langenargen in der Seemitte, gezogen aus einer Tiefe von 252 m, sowie eine Greiferprobe an gleicher Stelle.

Der Sedimentkern wurde in 12 Schichten unterteilt, in welchen Gesamtphosphor bestimmt wurde. Mit Material von neun dieser Schichten wurde eine sequentielle Extraktion durchgeführt. Auf eine Untersuchung der Fraktion < 20 µm wurde verzichtet, da es sich um homogenes, feinkörniges Material handelt.

Die obersten Millimeter der Greiferprobe wurden zur kernresonanzspektroskopischen Analyse verwandt.

4.3.1. Gesamtphosphor und Bindungsformen von P in der ungesiebten Probe

Der Mittelwert der 12 gemessenen Proben liegt bei 0,21% P₂O₅, mit einem Maximum von 0,40% in den obersten 5 mm des Sedimentkerns und einem Minimum in der Schicht zwischen 29 cm und 32 cm von 0,14% P₂O₅.

Tabelle 10: Prozentuale Verteilung der Bindungsformen von Phosphor in einem Sedimentkern des Bodensees sowie Gesamtphosphor in der ungesiebten Probe

Probenname	NH ₄ Cl-SRP [%]	BD-SRP [%]	NaOH-SRP [%]	HCl-SRP [%]	NRP [%]	Refraktär [%]	P ₂ O ₅ ungesiebt [10 g/kg]
0-0,5 cm	7	16	35	19	10	14	0,40
0,5-1 cm	6	17	18	25	8	26	0,26
1-2 cm	4	29	9	23	12	23	0,25
2-3 cm	1	13	24	28	11	23	0,21
3-4 cm	0	8	16	42	6	27	0,17
4-9 cm	0	19	10	29	17	26	0,18
9-14 cm							0,19
14-19 cm	1	10	20	32	11	26	0,19
19-24 cm							0,16
24-29 cm	0	4	9	41	12	34	0,16
29-32 cm							0,14
32-34 cm	0	3	8	44	10	35	0,16

Die NH_4Cl -SRP-Fraktion nimmt in den ersten Zentimetern rasch von 7% auf unter 1% vom P-Pool ab, die BD-SRP-Fraktion liegt in den ersten 2 Zentimetern (16% - 29%) höher als in den untersten 20 Zentimetern (10% - 3%).

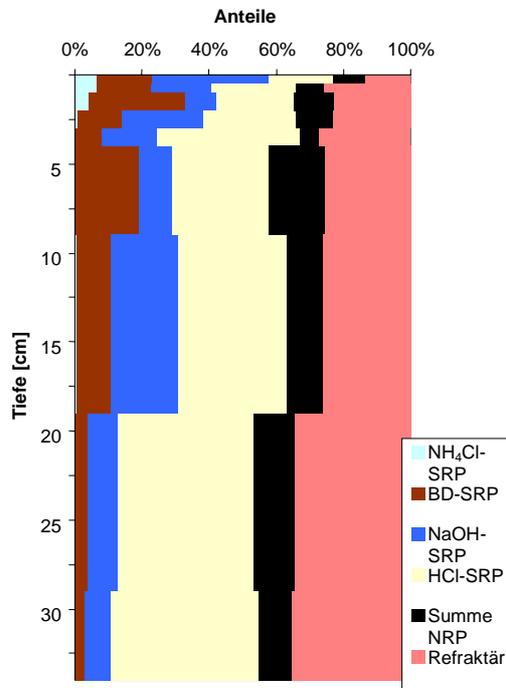


Abbildung 28: Bindungsformen von Phosphor in einem Sedimentkern des Bodensees

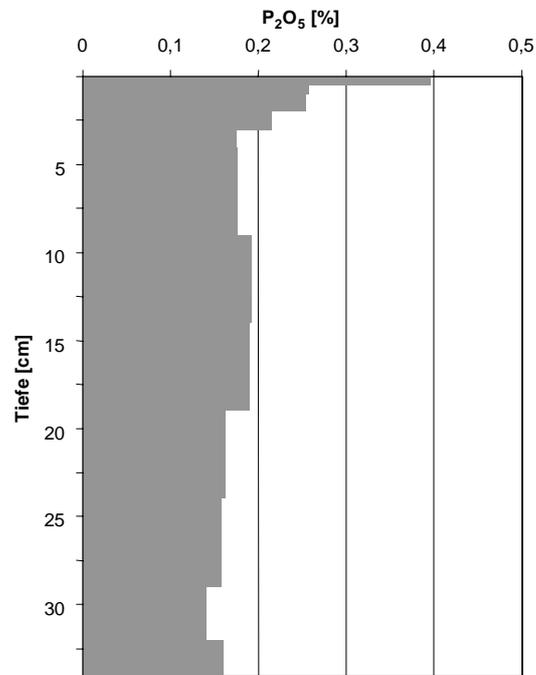


Abbildung 29: P_2O_5 -Konzentration in einem Sedimentkern des Bodensees

Während in den oberen 2 cm eine Gleichverteilung (ca. 20%) zwischen den BD-SRP-, NaOH-SRP-, HCl-SRP- und der refraktären Fraktion vorliegt, dominiert in den tieferen Zonen die HCl-SRP-Fraktion und der refraktäre Anteil.

4.3.2. Kernresonanzspektroskopie

³¹P-Kernresonanzspektroskopie wird in der Literatur (Hupfer 1995) als hilfreiches Instrument zur Bestimmung organischer Phosphorverbindungen und Polyphosphaten in Sedimenten beschrieben.

Nach einer zweistufigen Extraktion des frischen Sediments wird das Extrakt kernresonanzspektroskopisch untersucht. Die relative Lage der Peaks gibt Aufschluß über die Bindungsform.

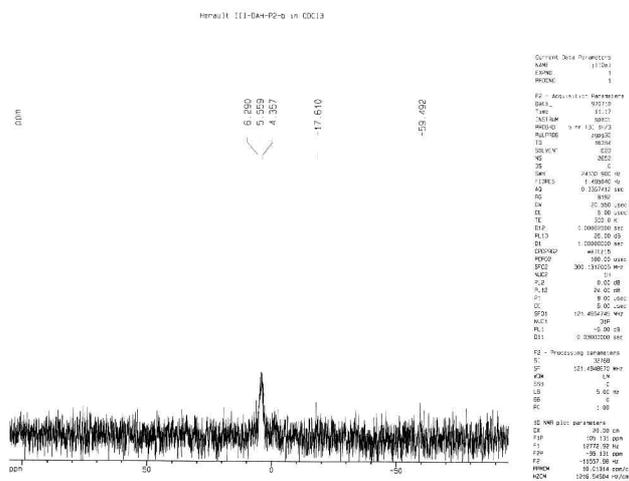


Abbildung 30: ³¹P-NMR Spektrum eines Sedimentextraktes aus dem Bodensee

In Abbildung 30 ist das Spektrum des Extraktes einer Oberflächensedimentprobe des Bodensees dargestellt. Von zwei verschiedenen Versuchsdurchführungen mit Probematerial aus dem Bodensee konnte nur in einer (Test 2) Phosphor nachgewiesen werden.

Man erkennt nur einen Peak bei $\delta = 5,5$, welcher für Orthophosphat steht. Weder Phosphorsäureester ($\delta = -1$ bis -18) noch Polyphosphat-Mittel- und Endgruppen ($\delta = -10$ und $\delta = -26$) lassen sich erkennen.

Berücksichtigt man jedoch, daß in der NaOH-Fraktion der obersten Schicht des Bodensees etwa 80% des Phosphors als Orthophosphat vorliegen, läßt sich abschätzen, daß vorhandene organische P-Verbindungen oder Polyphosphat aufgrund zu geringer Konzentration nicht im Spektrum gefunden werden können.

Die Entwicklung einer ausreichend empfindlichen Methodik war aufgrund der zeitlich begrenzten Nutzungsmöglichkeit des Spektrometers nicht möglich.

4.4. Gewässersedimente im Pantanal, Brasilien

Untersucht wurden fünf Sedimentkerne aus dem Pantanal: im Süden des Baía de Chacororé (Kern 1/ 10 Proben), im Baía Siá Mariana (Kern 2/ 7 Proben), im Baía de Chacororé bei Barao de Melgaco (Kern 3/ 10 Proben), im Baía de Burro am Rio Cuiabá (Kern 4/ 8 Proben) und im Rio Paraguai (Kern 5/ 5 Proben)

4.4.1. Gesamtphosphor in der Fraktion < 20 µm

In den untersuchten Oberflächenproben der Sedimente liegen die Konzentrationen zwischen 0,13% und 0,34% P_2O_5 .

Die P_2O_5 -Konzentrationen in allen Proben schwanken in den Kernen zwischen 0,08% und 0,67%, wobei die höchsten Konzentrationen im Baía Siá Mariana gefunden wurden, und dort insbesondere in tieferen Sedimentschichten

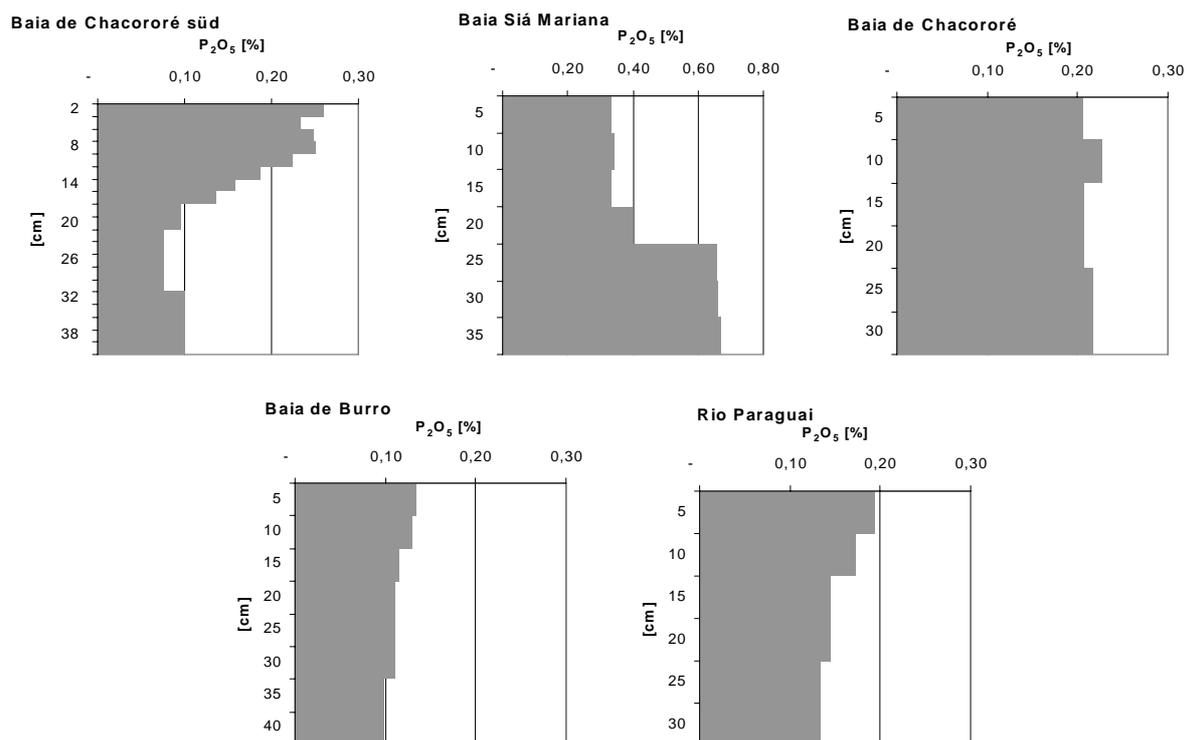


Abbildung 31: P_2O_5 -Konzentrationen in fünf Sedimentkernen (<20 µm) im Pantanal

Mit Ausnahme der Sedimente dieses Schwarzwassersees (Kern 2) zeigen alle Sedimente dieser Region P_2O_5 -Konzentrationen bis maximal 0,26%. Die höchsten Phosphorkonzentrationen in diesen Sedimenten finden sich in den Kernen des Baía de Chacororé (süd), des Baía de Burro und des Rio Paraguai jeweils im obersten untersuchten

Sedimenthorizont, wobei die Konzentrationsabnahme mit der Tiefe im Süden des Baía de Chacororé am deutlichsten ist.

4.4.2. Gesamtphosphor und Bindungsformen von P in der ungesiebten Probe

Kern 1 wurde im Süden des Baía de Chacororé, eines Weißwassersees, genommen und reicht bis in eine Tiefe von 30 cm. Ab einer Tiefe von 12 cm wird das Sediment zunehmend sandig. Die Gesamtkonzentrationen an P₂O₅ reichen von 0,01% in den untersten 14 cm bis zu 0,15% in den oberen 2 cm.

Tabelle 11: Prozentuale Verteilung der Bindungsformen von Phosphor in Sedimentkern 1 aus Pantanal und Gesamtphosphor in der ungesiebten Probe

Probenname	Tiefe [cm]	NH ₄ Cl-SRP [%]	BD-SRP [%]	NaOH-SRP [%]	HCl-SRP [%]	NRP [%]	Refraktär [%]	P ₂ O ₅ ungesiebt [10 g/kg]
Kern 1 (Ke)	0-2	n nb	30	20	1	14	34	0,15
Baía de Chacororé, Süden	2-4	n nb	32	19	1	13	34	0,14
	4-6	n nb	37	25	2	12	25	0,11
	6-8	n nb	42	23	2	20	14	0,10
	8-10	n nb	41	22	3	18	16	0,07
	10-12	n nb	23	17	3	7	51	0,10
	12-14							0,06
	14-16	n nb	11	37	2	18	32	0,03
	16-21	n nb	2	16	1	13	67	0,01
	21-30	n nb	0	34	2	10	54	0,01

Die reduktiv löslichen BD-SRP-Anteile machen in den oberen 8 cm zwischen 30% und 41% vom Gesamt-P aus, darunter fallen sie rasch auf 0% ab. Die nicht-extrahierbaren Anteile sind in den unteren Zonen mit bis zu 61% deutlich höher als in den oberen Schichten.

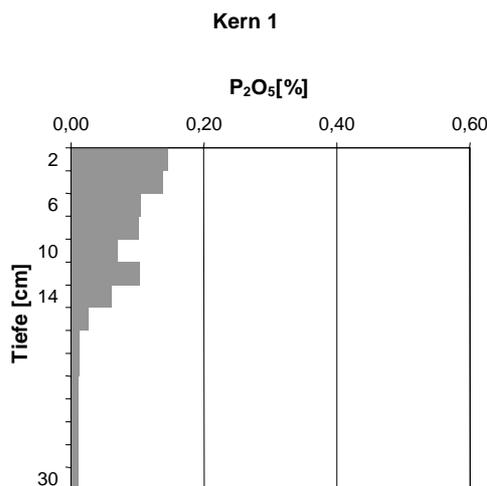


Abbildung 32: P₂O₅-Konzentrationen in Kern 1 (Süden des Baía de Chacororé)

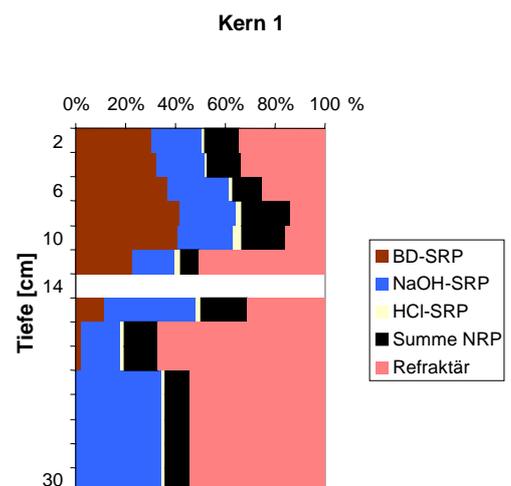


Abbildung 33: Bindungsformen von P in Kern 1 (Süden des Baía de Chacororé)

Kern 2 wurde im Baía Siá Maria, einem Schwarzwassersee, genommen. Der Kern reicht bis in eine Tiefe von 35 cm und wurde in 7 Einzelproben unterteilt. Die Gesamtkonzentrationen an P_2O_5 reichen von 0,22% bis zu 0,54%. Die höchsten Konzentrationen finden sich in den Schichten ab 20 cm Tiefe.

Tabelle 12: Prozentuale Verteilung der Bindungsformen von Phosphor in Sedimentkern 2 aus Pantanal und Gesamtphosphor in der ungesiebten Probe

Probenname	Tiefe [cm]	NH_4Cl -SRP [%]	BD-SRP [%]	NaOH-SRP [%]	HCl-SRP [%]	NRP [%]	Refraktär [%]	P_2O_5 ungesiebt [10 g/kg]
Kern 2 (BSM)	0-5	n nb	32	23	3	18	25	0,27
Baía Siá	5-10	n nb	31	24	3	13	29	0,24
Mariana	10-15	n nb	23	21	2	9	44	0,26
	15-20	n nb	14	36	2	11	37	0,22
	20-25	n nb	4	60	1	17	18	0,53
	25-30	n nb	4	66	1	14	15	0,54
	30-35	n nb	4	64	1	12	18	0,54

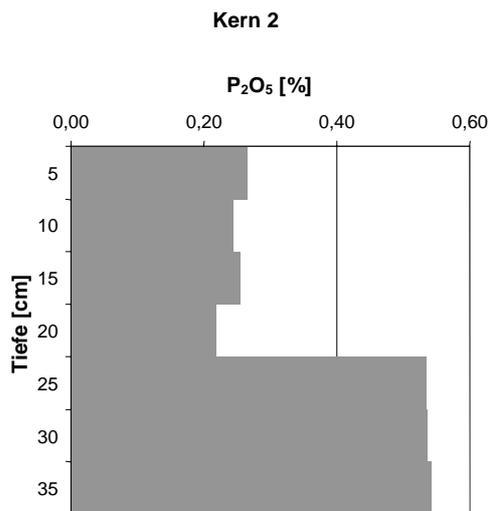


Abbildung 34: P_2O_5 -Konzentrationen in Kern 2 (Baía Siá Maria)

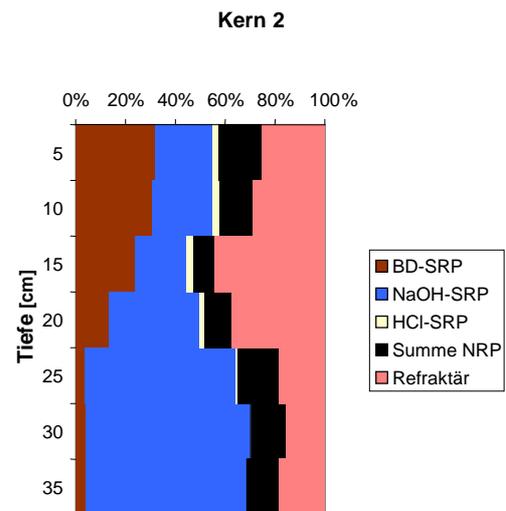


Abbildung 35: Bindungsformen von P in Kern 2 (Baía Siá Maria)

Während der Anteil an der BD-SRP-Fraktion von oben nach unten von 32% auf 4% kontinuierlich sinkt, steigt der Anteil von NaOH-SRP tendenziell von über 20% auf über 60% mit der Tiefe an. Die höchsten NRP-Anteile finden sich in den oberen 5 cm. Die oberen 20 cm des Sedimentes unterscheiden sich sowohl in der P-Konzentration, als auch in der P-Zusammensetzung deutlich von den darunterliegenden Schichten.

Kern 3 wurde bei Barao de Melgaco im Baía de Chacororé genommen, reicht bis in eine Tiefe von 30 cm und wurde in 10 Einzelproben unterteilt. Die P_2O_5 -Konzentrationen liegen zwischen 0,18% und 0,09% mit abnehmender Tendenz von oben nach unten.

Tabelle 13: Prozentuale Verteilung der Bindungsformen von Phosphor in Sedimentkern 3 aus Pantanal und Gesamtphosphor in der ungesiebten Probe

Probenname	Tiefe [cm]	NH_4Cl -SRP [%]	BD-SRP [%]	NaOH-SRP [%]	HCl-SRP [%]	NRP [%]	Refraktär [%]	P_2O_5 ungesiebt [10 g/kg]
Kern 3 (BCH)	0-2	nrb	25	9	3	13	51	0,17
Baía de Chacororé	2-4	nrb	22	9	3	9	57	0,18
	4-6	nrb	23	8	3	11	55	0,17
	6-8	nrb	32	10	3	14	42	0,14
	8-10	nrb	26	8	3	11	53	0,14
	10-12	nrb	24	8	3	14	52	0,12
	12-14	nrb	21	17	3	4	56	0,13
	14-16	nrb	29	25	3	9	34	0,11
	16-21	nrb	23	10	3	7	57	0,09
	21-30	nrb	30	10	2	5	53	0,12

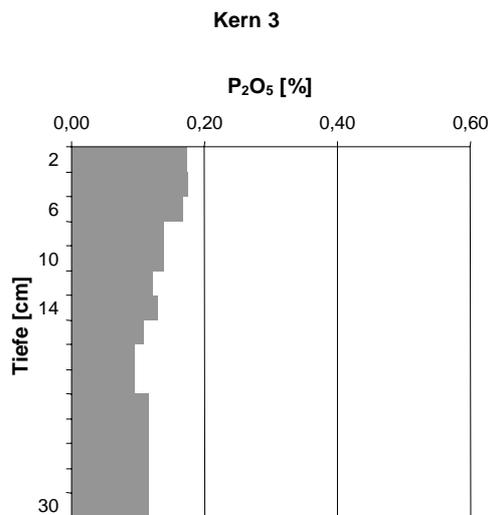


Abbildung 36: P_2O_5 -Konzentrationen in Kern 3 (Baía de Chacororé)

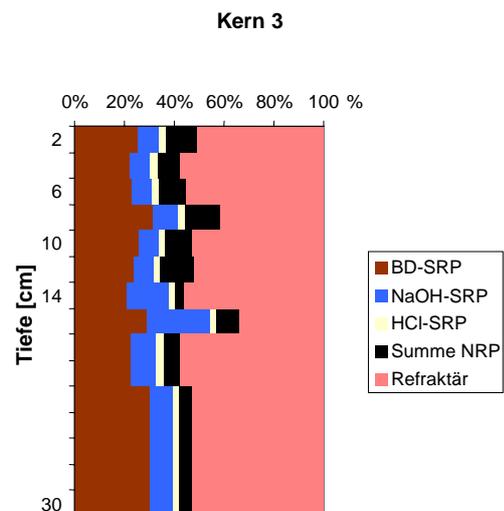


Abbildung 37: Bindungsformen von P in Kern 3 (Baía de Chacororé)

Die nicht extrahierbare Fraktion ist mit ca. 50% die stärkste, gefolgt von der BD-SRP-Fraktion mit ca. 25%. Die NaOH-SRP-Fraktion und die NRP-Fraktion machen dagegen in den meisten Zonen nur etwa 10% aus. Eine tendenzielle Veränderung der Zusammensetzung mit der Tiefe ist nicht zu beobachten.

Kern 4 wurde im Baía de Burro am Rio Cuiabá genommen, reicht in eine Tiefe von 40 cm und wurde in 8 Proben unterteilt. Die Konzentration an P_2O_5 liegt zwischen 0,09% und 0,06% mit der höchsten Konzentration in der oberen Schicht.

Tabelle 14: Prozentuale Verteilung der Bindungsformen von Phosphor in Sedimentkern 4 aus Pantanal und Gesamtphosphor in der ungesiebten Probe

Probenname	Tiefe [cm]	NH_4Cl -SRP [%]	BD-SRP [%]	NaOH-SRP [%]	HCl-SRP [%]	NRP [%]	Refraktär [%]	P_2O_5 ungesiebt [10 g/kg]
Kern 4 (CHO)	0-5	nrb	37	15	2	26	20	0,09
Baía de Burro	5-10	nrb	27	13	3	26	32	0,08
	10-15	nrb	18	17	3	31	32	0,07
	15-20	nrb	27	19	3	23	28	0,06
	20-25	nrb	10	16	3	24	47	0,08
	25-30	nrb	20	14	3	20	43	0,07
	30-35	nrb	17	14	2	25	42	0,07
	35-40	nrb	19	12	2	15	52	0,06

Die nicht extrahierbare Fraktion nimmt mit der Tiefe von 20% auf über 50% zu, die BD-SRP-Fraktion ist in den oberen 5 cm mit 37% vertreten und nimmt mit der Tiefe tendenziell ab, die NRP-Fraktion liegt in den sieben oberen Sedimentproben zwischen 31% und 20%. Die NaOH-SRP-Fraktion liegt zwischen 12% und 17% am Gesamtphosphor.

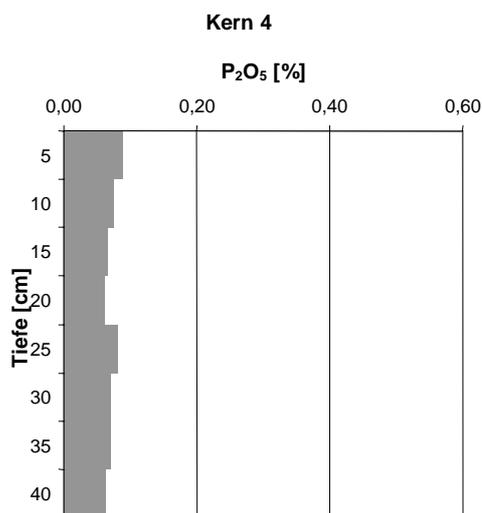


Abbildung 38: P_2O_5 -Konzentrationen in Kern 4 (Baía de Burro)

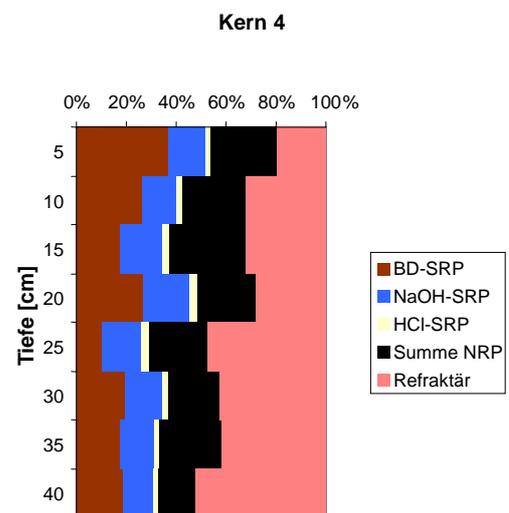


Abbildung 39: Bindungsformen von P in Kern 4 (Baía de Burro)

Kern 5 wurde im Rio Paraguai genommen, reicht in eine Tiefe von 30 cm und wurde in 5 Schichten unterteilt. Die Konzentrationen von P_2O_5 in diesen Proben liegen zwischen 0,19% und 0,12%.

Tabelle 15: Prozentuale Verteilung der Bindungsformen von Phosphor in Sedimentkern 5 aus Pantanal und Gesamtphosphor in der ungesiebten Probe

Probenname	Tiefe [cm]	NH_4Cl -SRP [%]	BD-SRP [%]	NaOH-SRP [%]	HCl-SRP [%]	NRP [%]	Refraktär [%]	P_2O_5 ungesiebt [10 g/kg]
Kern 5 (Rio Paraguai)	0-6	nrb	26	16	2	15	41	0,19
	6-12	nrb	28	17	2	9	44	0,17
	12-18	nrb	16	20	2	19	43	0,14
	18-24	nrb	12	20	4	17	47	0,12
	24-30	nrb	16	14	2	17	50	0,16

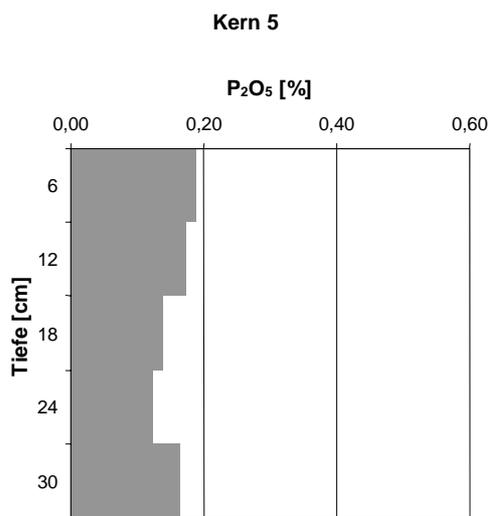


Abbildung 40: P_2O_5 -Konzentrationen in Kern 5 (Rio Paraguai)

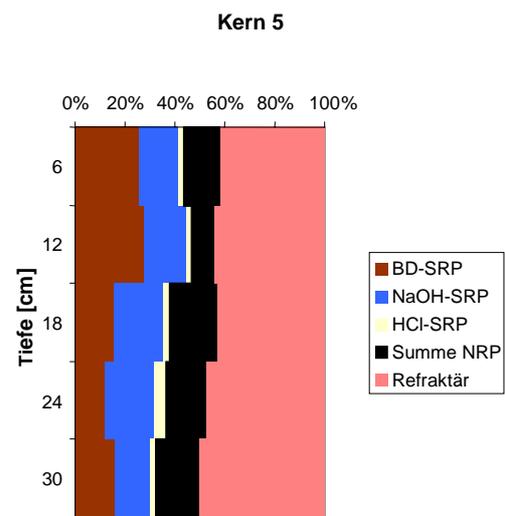


Abbildung 41: Bindungsformen von P in Kern 5 (Rio Paraguai)

Die stärkste Fraktion ist die nicht extrahierbare, mit Anteilen von 41% bis 50%. Die BD-SRP-Fraktion macht in den oberen 12 cm noch 26% bis 28% vom Gesamtphosphor aus, darunter zwischen 12% und 16%. Die NaOH-SRP-Fraktion liegt zwischen 14% und 20%, die NRP-Fraktion macht zwischen 9% und 17% aus.

4.5. Seesedimente in Peking

Es wurden 12 Sedimentproben aus 4 Flachseen in Peking untersucht. Eine Greiferprobe aus dem Kunming-See, zwei Greiferproben aus dem Yuyuatan-See, zwei Greiferproben und zwei Proben aus einem Sedimentkern des Beihai-Sees und fünf Proben aus einem Sedimentkern des Shui Zhui-Sees. In elf Proben wurde eine sequentielle Extraktion von Phosphor durchgeführt. Der refraktäre Anteil wurde in diesen Proben nicht bestimmt.

4.5.1. Gesamtphosphor und Bindungsformen von P in der ungesiebten Probe

Tabelle 16: Prozentuale Verteilung der Bindungsformen von Phosphor in Sedimentproben (ohne refraktären Anteil, Angaben in % von der Summe der 5 extrahierten Fraktionen) und Gesamtphosphor in der ungesiebten Probe

Probenname	Tiefe [cm]	NH ₄ Cl-SRP [%]	BD-SRP [%]	NaOH-SRP [%]	HCl-SRP [%]	NRP [%]	Refraktär [%]	P ₂ O ₅ ungesiebt [10 g/kg]
Kunming		1	4	10	71	14		0,08
Yuyuantan 1	0-5	1	4	19	58	19		0,16
Yuyuantan 3,	0-5							0,30
Beihai 1	0-5	0	3	6	81	10		0,29
Beihai 2	0-5	0	1	6	81	11		0,28
Beihai 13	13-17	0	1	5	87	6		0,31
Beihai 20	20-23	0	2	4	91	3		0,46
Shui Zhui 1	0-2	1	3	17	70	9		0,20
Shui Zhui 3	4-6	1	4	16	72	8		0,17
Shui Zhui 7	12-14	0	3	14	78	4		0,21
Shui Zhui 9	18-20	0	3	15	76	5		0,21
Shui Zhui 12	24-26	0	1	20	76	3		0,28

Die Konzentrationen an P₂O₅ in allen Proben liegen zwischen 0,08% und 0,46%, mit den höchsten Konzentrationen im Beihai-See, insbesondere in den tieferen Schichten.

Die Zusammensetzung der Sedimente wird durch die HCl-SRP-Fraktion bestimmt, deren Anteile zwischen 58% und 91% liegen. NRP macht in den Proben zwischen 3% und 19% des gesamten extrahierbaren Phosphors aus, NaOH-SRP liegt zwischen 4% und 20%. Die reduktiv löslichen Anteile liegen unter 5%.

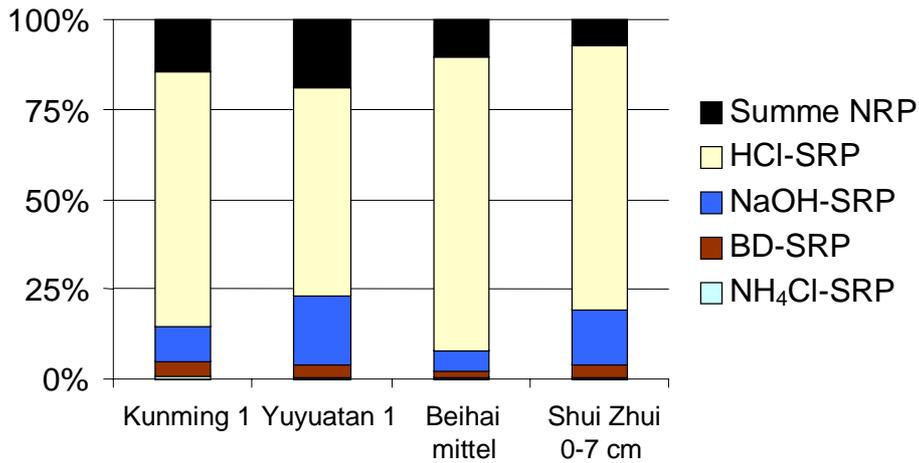


Abbildung 42: Bindungsformen von Phosphor in Oberflächen-Sedimentproben von vier Seen in Peking (ohne refraktären Anteil)

Betrachtet man den Verlauf der Zusammensetzung mit der Tiefe, erkennt man die höchsten NRP-Anteile und die geringsten HCl-SRP-Anteile in den oberen Schichten.

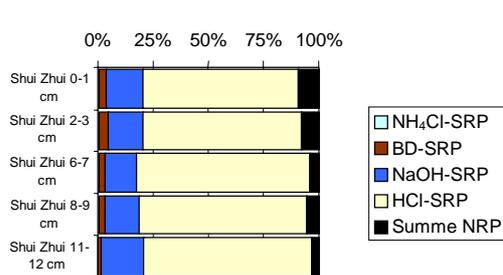


Abbildung 43: Bindungsformen von P in einem Sedimentkern des Shui Zhui-Sees

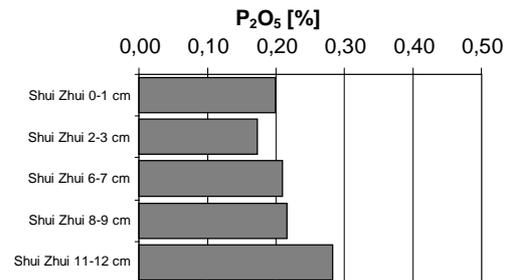


Abbildung 44: P₂O₅-Konzentrationen in einem Sedimentkern des Shui Zhui-Sees

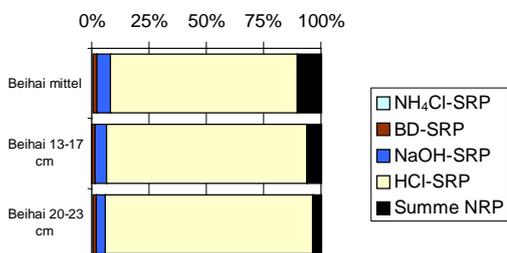


Abbildung 45: Bindungsformen von P in Sedimentproben des Beihai-Sees

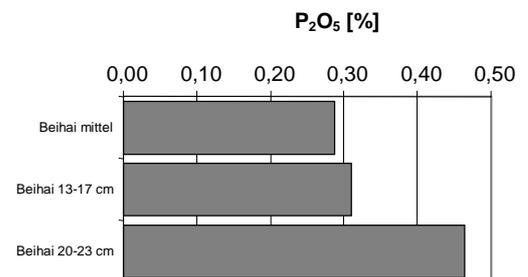


Abbildung 46: P₂O₅-Konzentrationen in Sedimentproben des Beihai-Sees

4.6. Gewässersedimente in Rußland

Untersucht wurden Sedimentproben aus der Moskwa, der Oka, der Kljasma und der Wolga zwischen dem Gorki Stausee und dem Wolgograd Stausee, sowie einige Nebenflüsse der Wolga und der Kljasma in Mündungsnähe. Des weiteren wurden Boden- und Sedimentproben aus einem Naturschutzgebiet an der Oka untersucht.

Die Proben wurden zum Teil auf Gesamtphosphor in der ungesiebten Probe und auf Gesamtphosphor in der Fraktion $<20\ \mu\text{m}$ untersucht, und eine Auswahl an Proben wurde einer sequentiellen Extraktion (PSENNER et al. 1988) zur Bestimmung der Bindungsformen unterzogen.

Insgesamt wurde in 178 Proben P in der Fraktion $<20\ \mu\text{m}$ bestimmt, in 136 Proben P in der ungesiebten Probe gemessen, und 91 Proben wurden einer sequentiellen Extraktion unterworfen.

4.6.1. Gesamtphosphor in der Fraktion $< 20\ \mu\text{m}$

Der Mittelwert aller gemessenen Proben in der Fraktion $< 20\ \mu\text{m}$ liegt bei 0,82% P_2O_5 , das Maximum bei 3,85% P_2O_5 (OK 16; Kljasma unterhalb der Stadt Orechowo Sujewo) und das Minimum bei 0,13% (OK 44; Nebenfluß der Kljasma namens Peksha bei Kosterowo).

Betrachtet man die P_2O_5 -Mittelwerte für einzelne Flüsse und Flußabschnitte, kommt man zu folgendem Ergebnis:

Tabelle 17: Mittelwerte an P₂O₅ [%] in den Sedimenten einzelner Flüsse und Flußabschnitte in Rußland

Fluß/ Flußabschnitt	Anzahl der Proben (<20 µm)	Mittelwert P ₂ O ₅ [%]	Median	Min	Max	Stabwn
Oka vor Moskwa	1	0,41				
Moskwa	1	2,29				
Oka hinter Moskwa	2	0,81	0,81	0,80	0,82	
Kljasma	40	1,89	2,02	0,64	3,85	0,97
Ucha	3	0,95	1,00	0,62	1,21	
Worja	2	1,68	1,68	0,95	2,41	
Sherna	2	1,89	1,89	1,84	1,93	
Kirzhach	2	1,70	1,70	1,52	1,87	
Vol'ga	1	0,84				
Bolshaya Lipnya	2	0,66	0,66	0,65	0,67	
Peksha	2	0,63	0,63	0,13	0,87	
Koloksha	1	0,41				
Nerl	1	0,49				
Gorki Stausee	1	0,60	0,60			
Wolga bis Tscheboksary Stausee	4	0,58	0,62	0,35	0,72	0,14
Sura	5	0,41	0,42	0,37	0,44	0,03
Wetluga	2	0,52	0,52	0,50	0,54	
Wolga bis Samara Stausee	27	0,38	0,33	0,23	0,84	0,13
Kokshaga	1	0,75				
Illet	1	0,38				
Swijaga	3	0,30	0,29	0,26	0,34	
Kazanka	2	0,36	0,36	0,34	0,38	
Kama	4	0,26	0,26	0,25	0,27	0,01
Wolga bis Saratow Stausee	13	0,30	0,28	0,26	0,42	0,05
Wolga bis Wolgograd Stausee	38	0,32	0,30	0,24	0,62	0,07
Tereshka	1	0,28				

Oka

Die Konzentrationen an P_2O_5 in den Sedimenten der Oka steigen von 0,41% vor der Moskwa durch den Einfluß der Moskwa (2,29%) auf 0,82% an. Auch vor der Wolga sind Phosphorgehalte ähnlich hoch (Abbildung 47).

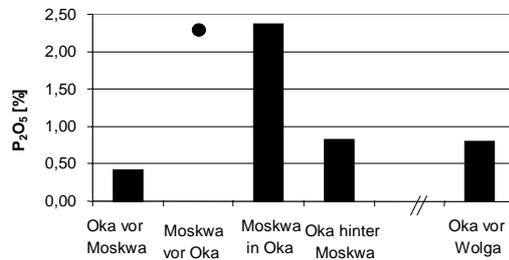


Abbildung 47: Konzentrationen an P_2O_5 in Sedimenten der Oka und der Moskwa (<20 μ m)

Die Untersuchungen im Prioksko-Terrasny State Nature Reserve umfassen Boden und Sedimentproben.

Tabelle 18: Mittelwerte an P_2O_5 [%] (<20 μ m) im Prioksko-Terrasny State Nature Reserve

Probe	Anzahl der Proben (<20 μ m)	Mittelwert P_2O_5 [%]	Median P_2O_5 [%]	Min P_2O_5 [%]	Max P_2O_5 [%]	Stabwn
Sedimentkern	11	0,22	0,21	0,20	0,26	0,02
Waldboden	2	0,22		0,20	0,24	
Steppe	2	0,27		0,27	0,27	
Quellsediment	1	0,33				

Die P_2O_5 -Konzentrationen in diesem Gebiet reichen von 0,22% in den Waldböden und im Sediment des von Wald umgebenen Flachsees bis zu 0,33% in den Ablagerungen einer Quelle.

Kljasma

Die höchsten Phosphor-Konzentrationen im Untersuchungsgebiet finden sich in Sedimenten der Kljasma und in ihren Nebenflüssen, der Worja, der Sherna und der Kirzhach, welche im Mittel über 1,5% an P_2O_5 in der Fraktion $<20\ \mu m$ aufweisen.

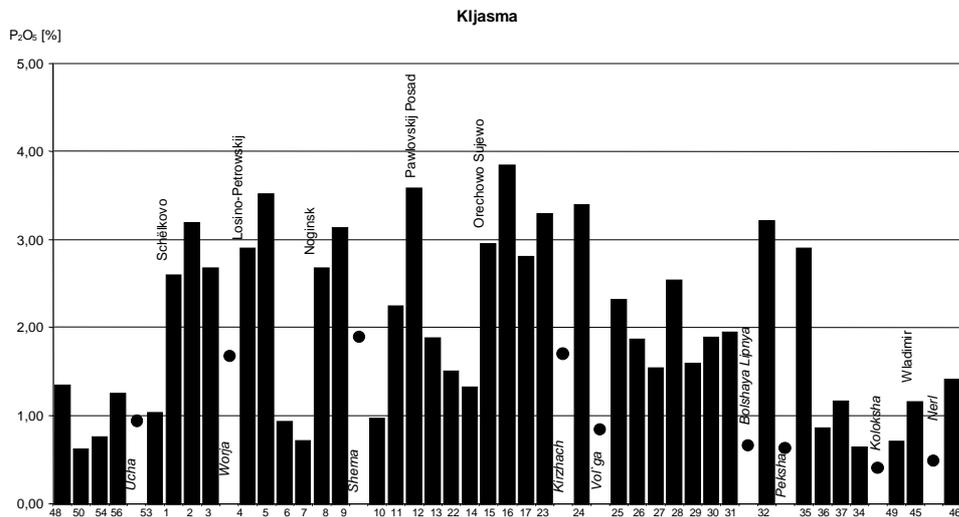


Abbildung 48: Konzentrationen an P_2O_5 in Sedimenten der Kljasma ($<20\ \mu m$) (Balken) und ihrer Nebenflüsse (Punkte; kursiv)

Betrachtet man den Verlauf der Konzentrationen in den Sedimentproben der Kljasma, fällt ein großer Schwankungsbereich auf (0,64% - 3,85% P_2O_5). Die höchsten Werte liegen in und hinter den Städten Shchëlkovo, Pawlowskij Posad und Orechowo Sujewo.

Die Konzentrationen an Phosphor in den Sedimenten der Nebenflüsse liegen i.A. niedriger als in den Proben der Kljasma vor oder nach diesen. Am stärksten belastet sind die Flüsse Worja, Sherna und Kirzhach, welche das westliche Einzugsgebiet der Kljasma darstellen.

Wolga

Im Gorki Stausee und im Tscheboksary Reservoir wurden im Mittel 0,6% bzw. 0,58% P_2O_5 gemessen. Im weiteren Verlauf der Wolga nehmen die Konzentrationen im Mittel ab (Abbildung 49) und liegen im letzten untersuchten Abschnitt, dem Wolgograd Stausee bei 0,32%.

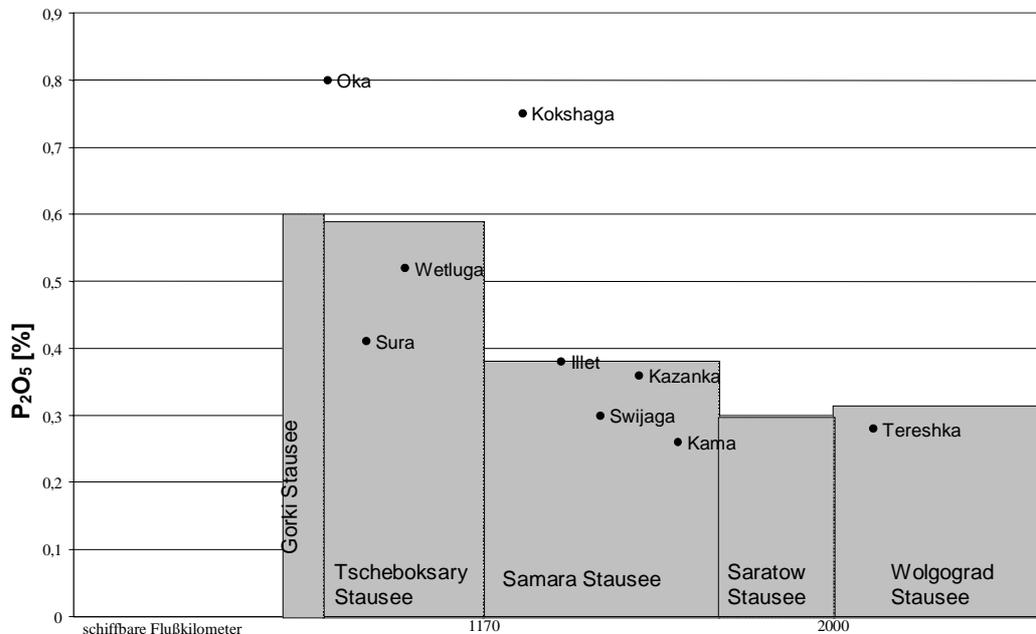


Abbildung 49: gemittelte P_2O_5 -Konzentrationen in den Sedimenten der Wolga zwischen den Staustufen (Rechtecke) sowie die Konzentrationen einiger Nebenflüsse (Punkte)

Die untersuchten Nebenflüsse der Wolga liegen in ihren P_2O_5 -Konzentrationen im Sediment meist unterhalb des Mittelwertes für den entsprechenden Flußabschnitt. Eine Ausnahme bildet die Oka mit 0,80% P_2O_5 sowie die Kokshaga, welche mit 0,75% P_2O_5 einen fast doppelt so hohen Phosphorgehalt aufweist wie das Mittel von 0,38% P_2O_5 zwischen dem Tscheboksary Stausee und dem Damm Kujbyschew (Staudamm des Samara Stausees/ Abbildung 49).

Betrachtet man den Verlauf der Konzentrationen in den Proben zwischen dem Tscheboksary Stausee und dem Wolgograd Reservoir, erkennt man einzelne Maxima (Abbildung 50).

Zwischen dem Tscheboksary Stausee und dem Samara Stausee weisen Probe „Volga06“ im Hafen Butyakowa erhöhte P_2O_5 -Konzentrationen (0,84%) auf, sowie Probe „Volga08“ (0,59%) bei der Stadt Wolshsk, Probe „Kazan1“ im Hafen von Kasan (0,55%) und Probe „Volga12“ (0,56%).

Zwischen dem Samara Stausee und dem Saratow Reservoir sind erhöhte Konzentrationen nur bei der Stadt Samara zu erkennen (0,42%).

Zwischen dem Saratow Stausee und dem Wolgograd Reservoir finden sich Maxima hinter der Stadt Saratow (WG 22-24 mit bis zu 0,39%), bei der Stadt Kamyschin (WG 36 mit 0,37%) und in einer Probe vor dem Dammbes des Wolgograd Reservoirs (WG 48 mit 0,41%).

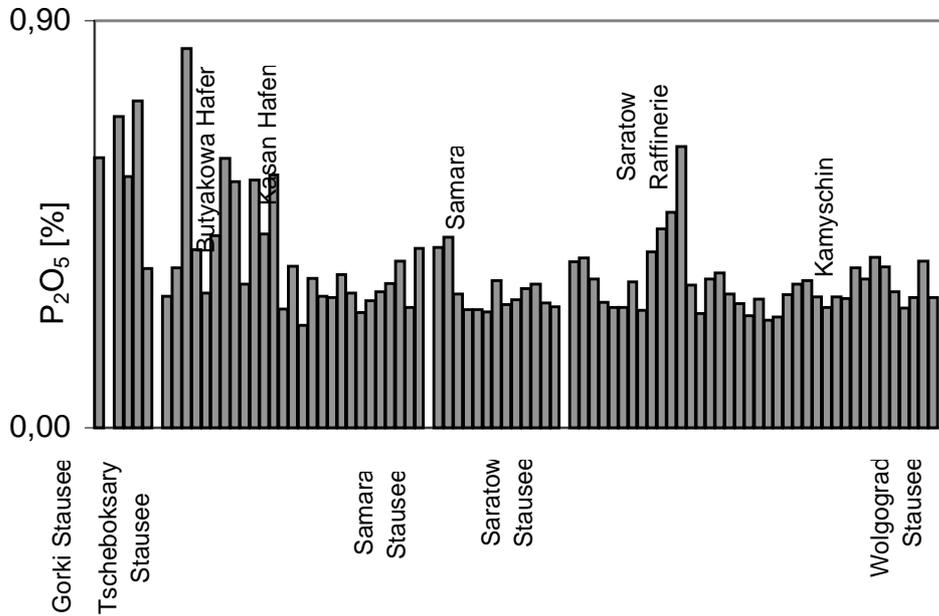


Abbildung 50: P_2O_5 -Messwerte in Sedimentproben der Wolga ($<20 \mu m$) zwischen dem Gorki Stausee (Flußkilometer 850) und dem Wolgograd Stausee (Flußkilometer 2540)

4.6.2. Gesamtphosphor und Bindungsformen von P in der ungesiebten Probe

Der Mittelwert aller gemessenen ungesiebten Proben liegt bei 0,31% P₂O₅, das Maximum bei 3,08% (OK 1; Kljasma bei Shchëlkovo, nahe einer Kläranlage), das Minimum bei 0,02% (99/1; eine sandige Probe aus dem Tscheboksary Stausee).

Tabelle 19: Mittelwerte an P₂O₅ [%] (ungesiebt) in den Sedimenten einzelner Flüsse und Flußabschnitte in Rußland

Fluß/ Flußabschnitt	Anzahl der Proben (ungesiebt)	Mittelwert P ₂ O ₅ [%]	Median P ₂ O ₅ [%]	Min P ₂ O ₅ [%]	Max P ₂ O ₅ [%]	Stabwn
Oka vor Moskwa	1	0,24				
Moskwa	1	1,49				
Oka hinter Moskwa	1	0,67				
Kljasma	13	0,92	0,67	0,13	3,08	0,82
Wolga bis Tscheboksary Stausee	3	0,17	0,11	0,02	0,37	0,15
Sura	5	0,41	0,42	0,37	0,44	0,03
Wetluga	2	0,52	0,52	0,50	0,54	
Wolga bis Damm Kujbyshev	27	0,20	0,11	0,03	0,41	0,11
Kokshaga	1	0,12				
Illet	1	0,05				
Swijaga	3	0,27	0,23	0,22	0,36	0,06
Kazanka	2	0,08	0,08	0,06	0,11	
Kama	4	0,18	0,20	0,09	0,21	0,05
Wolga bis Saratow Stausee	13	0,25	0,27	0,10	0,35	0,07
Wolga bis Wolgograd Stausee	38	0,25	0,24	0,13	0,41	0,07
Tereshka	1	0,28				

Von 121 Proben, an denen Phosphor in der Fraktion < 20 µm und in der ungesiebten Probe gemessen wurde, lag der P₂O₅ Wert in der Fraktion < 20 µm in 110 Proben über dem Wert der ungesiebten Probe. Im Mittel lag der Phosphorgehalt in der gesiebten Probe um 41% über dem Gehalt der ungesiebten Probe.

Oka

Die Konzentrationen in den ungesiebten Proben der Oka liegen zwischen 0,24% P₂O₅ und 0,67% P₂O₅. In der Moskwa liegen die P₂O₅-Konzentrationen bei 1,49%.

Die Konzentration an Phosphor in den ungesiebten Proben steigt nach der Moskwa-Mündung auf das 2,8fache des Wertes vor der Mündung an (auf das zweifache in den gesiebten Proben).

Tabelle 20: Prozentuale Zusammensetzung der Bindungsformen des Phosphors in Sedimentproben aus der Oka und der Moskwa (Angaben in % von P-Gesamt) sowie Gesamtphosphor in den ungesiebten und gesiebten Proben

Probenname	NH ₄ Cl-SRP [%]	BD-SRP [%]	NaOH-SRP [%]	HCl-SRP [%]	NRP [%]	Refraktär [%]	P ₂ O ₅ ungesiebt [10 g/kg]	P ₂ O ₅ (<20 µm) [10 g/kg]
Oka vor Moskwa	1	17	27	20	11	24	0,24	0,41
Moskwa vor Oka	1	15	35	38	3	8	1,49	2,29
Moskwa in Oka	1	12	40	44	2	1	1,52	2,37
Oka hinter Moskwa	1	11	43	23	10	12	0,67	0,82

Die Zusammensetzung des Phosphors in den Sedimenten der Oka verändert sich, betrachtet man die Proben vor und nach der Moskwa-Mündung: zwar ist die NaOH-SRP-Fraktion in beiden Proben stärkste Fraktion, erfährt sie jedoch den stärksten prozentualen Anstieg (16 Prozentpunkte), gefolgt von der HCl-SRP-Fraktion (3 Prozentpunkte). Einen absoluten Anstieg der Konzentrationen, jedoch eine prozentuale Abnahme läßt sich in allen anderen Fraktionen beobachten.

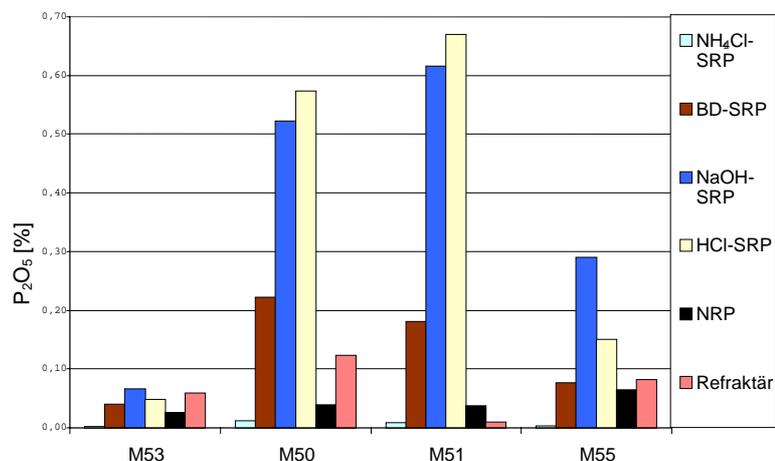


Abbildung 51: Bindungsformen von Phosphor in Sedimenten der Oka und der Moskwa

Die Untersuchungen im Prioksko-Terrasny State Nature Reserve sind in Abbildung 52 zusammengefasst.

Die Konzentrationen in den ungesiebten Proben des Prioksko-Terrasny State Nature Reserves liegen zwischen 0,09% P₂O₅ und 0,26% P₂O₅. Der Steppen- und Waldboden, sowie die obere Schicht von Kern 1 haben die geringsten Konzentrationen an Phosphor (ungesiebt).

Tabelle 21: Prozentuale Zusammensetzung der Bindungsformen des Phosphors in Boden und Sedimentproben des Prioksko-Terrasny State Nature Reserves sowie Gesamtphosphor in den ungesiebten und gesiebten Proben

Probenname	NH ₄ Cl-SRP [%]	BD-SRP [%]	NaOH-SRP [%]	HCl-SRP [%]	NRP [%]	Refraktär [%]	P ₂ O ₅ [10 g/kg]	P ₂ O ₅ (<20 μm) [10 g/kg]
Steppe	0	8	22	2	38	28	0,13	0,28
Wald	1	6	18	1	54	20	0,09	0,22
K1 0-2,5 cm	0	5	22	1	71	0	0,10	0,22
K1 2,5-5 cm	0	5	21	2	72	0	0,14	0,22
K1 5-7,5 cm	0	4	19	1	75	0	0,17	0,22
K1 7,5-10 cm	0	4	22	1	71	1	0,15	0,22
K2 18-21 cm	0	5	27	1	56	10	0,26	0,21
K3 0-2 cm	4	13	16	2	48	17	0,21	0,22

In allen Proben dominiert die NRP-Fraktion, insbesondere in den Sedimentkernen 1 und 2. Die NaOH-SRP-Fraktion macht zwischen 16% und 27% am Gesamtphosphor aus, die HCl-SRP-Fraktion ist nur mit 1% bis 2% am Gesamtphosphor vertreten. Der nicht extrahierbare Anteil am Gesamtphosphor ist im Wald und Steppenboden sowie im ufernahen Seesediment (K3) größer als in den Seesedimenten in Seemitte.

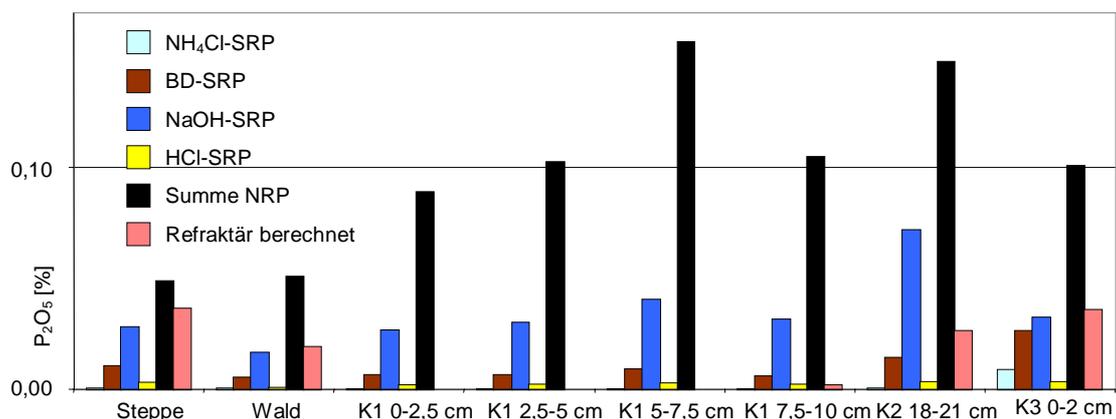


Abbildung 52: Bindungsformen von Phosphor in Wald und Steppenboden sowie in Sedimenten eines Flachsees im Prioksko-Terrasny State Nature Reserve

Kljasma

Die P₂O₅-Konzentrationen in den ungesiebten Proben liegen zwischen 3,08% und 0,13%. Die höchsten Konzentrationen finden sich hinter der Stadt Shchëlkovo (OK 1, OK 4) und hinter Orechowo Sujewo (OK 23).

Tabelle 22: Prozentuale Verteilung der Bindungsformen von Phosphor in Sedimenten der Kljasma sowie Gesamtphosphor in den ungesiebten und gesiebten Proben

Probenname	NH ₄ Cl-SRP [%]	BD-SRP [%]	NaOH-SRP [%]	HCl-SRP [%]	NRP [%]	Refraktär [%]	P ₂ O ₅ ungesiebt [10 g/kg]	P ₂ O ₅ (<20 µm) [10 g/kg]
OK 1	0	29	45	7	6	13	3,08	2,60
OK 4	0	37	50	5	8	0	1,95	2,91
OK 7	0	43	46	4	0	7	0,69	0,72
OK 10	0	42	18	3	0	37	0,72	0,97
OK 13	0	62	29	4	4	0	0,64	1,89
OK 16	0	31	49	6	1	13	0,56	3,85
OK 23	0	40	48	4	4	4	1,63	3,30
OK 27	0	65	26	3	6	0	0,27	1,54
OK 30	0	67	25	2	3	3	0,67	1,89
OK 37	0	61	21	2	7	9	1,14	1,17
OK 34	0	52	33	4	10	0	0,16	0,64
OK 45	0	56	16	3	5	20	0,26	1,16
OK 49	0	51	17	19	2	10	0,13	0,70

In den Proben hinter Shchëlkovo (OK 1, OK 4) und Orechowo Sujewo (OK 16, OK 23) dominieren die NaOH-SRP-Fraktionen deutlich, in Probe „OK 7“ halten sich NaOH-SRP- und BD-SRP-Fraktion die Waage, in allen anderen Proben dominiert die BD-SRP-Fraktion. Die NRP-Fraktion macht maximal 10% vom Gesamtphosphor aus, die HCl-SRP-Fraktion liegt in der Kljasma mit einer Ausnahme (OK 49) unter 10%.

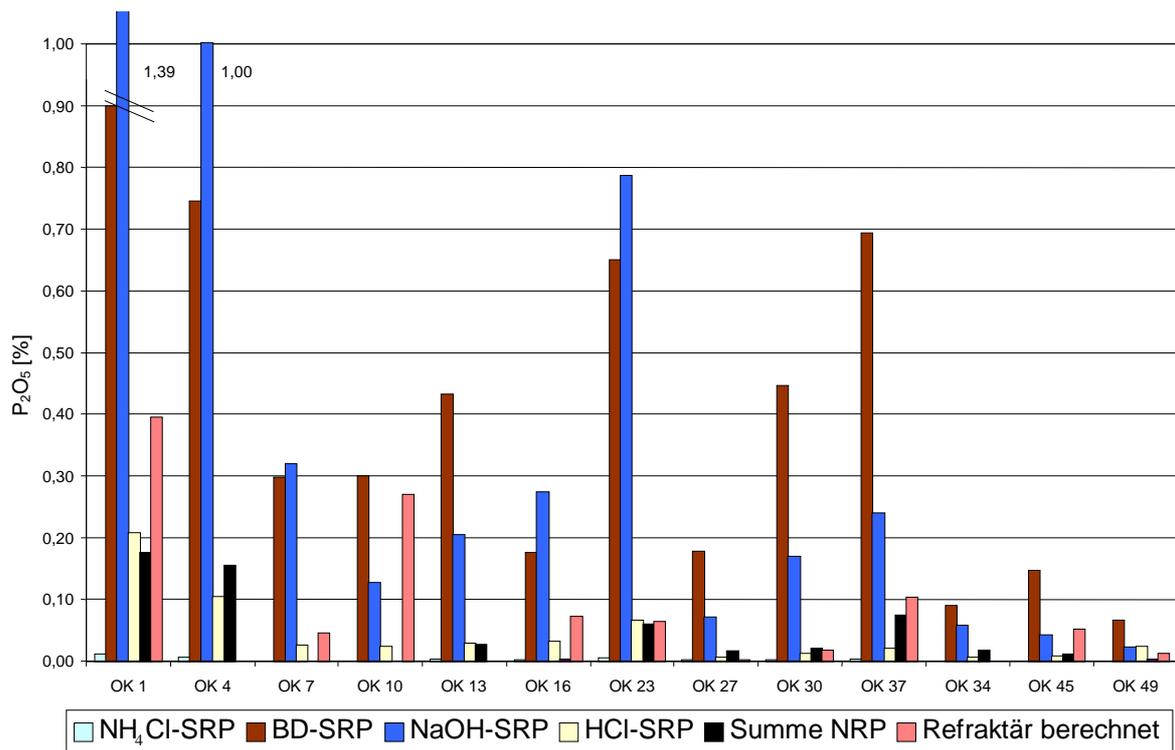


Abbildung 53: Bindungsformen von Phosphor in den Sedimenten der Kljasma

Volga zwischen dem Gorki Stausee und dem Tscheboksary Stausee

Die P₂O₅-Konzentrationen in den ungesiebten Proben liegen zwischen dem Gorki Stausee und dem Tscheboksary Reservoir zwischen 0,02% und über 0,56%.

Tabelle 23: Prozentuale Verteilung der Bindungsformen von Phosphor in Sedimenten der Wolga zwischen dem Gorki und dem Tscheboksary Stausee sowie Gesamtphosphor in den ungesiebten und gesiebten Proben

Probenname	NH ₄ Cl-SRP [%]	BD-SRP [%]	NaOH-SRP [%]	HCl-SRP [%]	NRP [%]	Refraktär [%]	P ₂ O ₅ ungesiebt [10 g/kg]	P ₂ O ₅ (<20 µm) [10 g/kg]
Gorki Stausee								0,60
Volga01	1	28	24	18	7	22	0,02	0,56
Volga02								0,71
Volga03	0	19	16	23	13	29	0,11	0,35
W23								0,69

Nur in zwei der fünf ungesiebten Proben wurde die P₂O₅-Konzentration bestimmt, daher läßt sich der refraktäre Anteil sowie die prozentuale Verteilung des Phosphors auf die Bindungsform in den anderen drei Proben nicht darstellen.

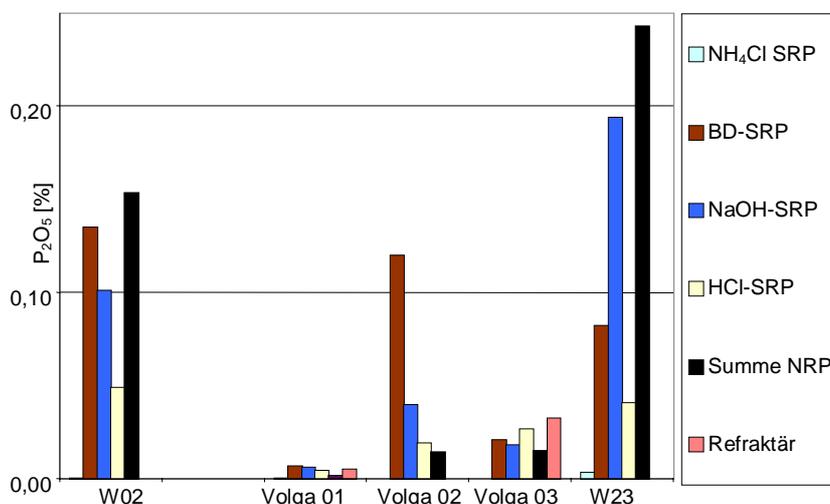


Abbildung 54: Bindungsformen von Phosphor in den Sedimenten der Wolga zwischen dem Gorki Stausee und dem Tscheboksary Reservoir

Abbildung 54 zeigt im Gorki Stausee (W02) eine Dominanz der NRP- und der BD-SRP-Fraktion, im weiteren Verlauf der Wolga nimmt zweimal die BD-SRP-Fraktion und einmal die NRP-Fraktion den größten Anteil ein. In Probe „Volga03“ mit dem geringsten P-Gehalt (<20 µm) sind die nicht extrahierbaren und die HCl-SRP-Anteile leicht erhöht.

Volga zwischen Tscheboksary Stausee und Samara Stausee

Die P₂O₅-Konzentrationen in den ungesiebten Sedimenten der Wolga vom Tscheboksary Reservoir bis Damm Kujbyshev (Samara Stausee) liegen zwischen 0,06% und 0,33%.

In diesem Abschnitt der Wolga überwiegt in 13 der 22 fraktionierten Proben der BD-SRP-Anteil, in zwei Proben mit dem geringsten P₂O₅-Konzentrationen (ungesiebt) liegt der refraktäre P-Anteil bei ca. 50%, in einer überwiegt der NRP-Anteil und in drei Proben bildet HCl-SRP die größte Fraktion.

Tabelle 24: Prozentuale Verteilung der Bindungsformen des Phosphors in den Sedimenten der Wolga zwischen dem Tscheboksary Reservoir und dem Samara Stausee sowie Gesamtphosphor in den ungesiebten und gesiebten Proben; *ΣFraktionen > Pgesamt

Probenname	NH ₄ Cl-SRP [%]	BD-SRP [%]	NaOH-SRP [%]	HCl-SRP [%]	NRP [%]	Refraktär [%]	P ₂ O ₅ ungesiebt [10 g/kg]	P ₂ O ₅ (<20 µm) [10 g/kg]
Volga04	0	27	21	27	4	20	0,17	0,29
Volga05*	0	23	7	15	55	0	0,06	0,35
Volga06	0	55	6	6	2	31	0,41	0,84
Lopatinski 1	0	35	9	29	11	15	0,07	0,39
Lopatinski 2	0	46	18	18	18	1	0,19	0,30
Volga07	3	19	5	16	9	48	0,03	0,43
Volga08	1	23	4	13	6	53	0,06	0,59
Volga10	0	55	13	12	13	7	0,30	0,55
Volga9	0	46	12	19	13	10	0,25	0,32
Volga11*	0	11	19	69	0	0	0,33	0,43
Volga12	0	64	12	14	7	2	0,25	0,56
Volga14	0	55	13	12	14	6	0,27	0,36
Volga16	0	38	11	28	5	18	0,24	0,33
Volga17	0	18	11	39	7	24	0,08	0,29
Volga18	0	32	21	18	7	22	0,27	0,29
Volga19	0	51	12	10	6	20	0,33	0,34
Volga20	0	35	16	10	9	30	0,28	0,30
Volga21	0	27	13	19	10	30	0,22	0,25
Volga22	0	30	12	17	14	26	0,13	0,28
Volga23	0	31	14	15	16	24	0,16	0,30
Volga26	0	28	13	15	13	31	0,20	0,27
Volga27	0	11	10	48	7	25	0,05	0,40

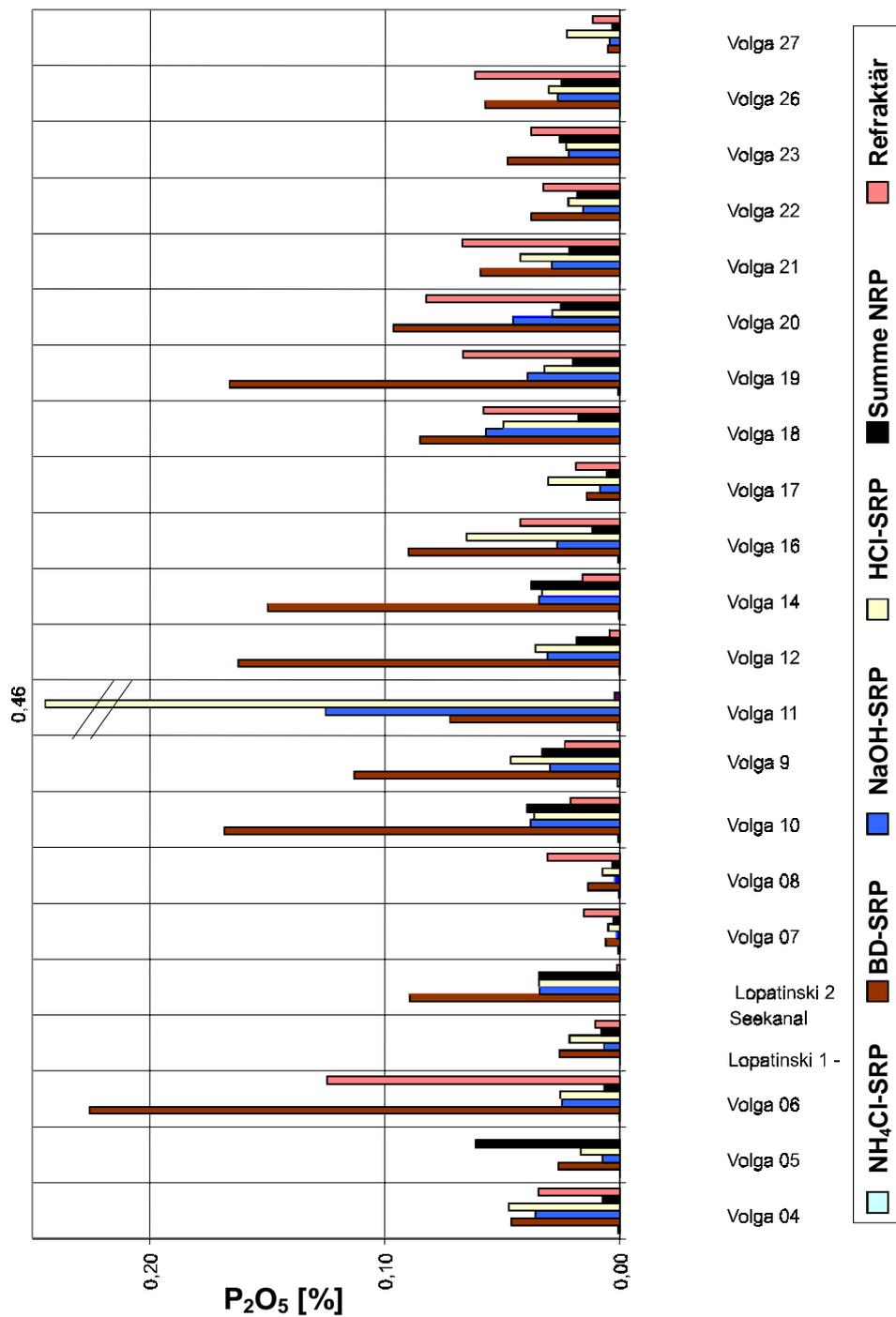


Abbildung 55: Bindungsformen von Phosphor in den Sedimenten der Wolga zwischen dem Tscheboksary Reservoir und dem Damm Kujbyshev (Samara Stauesee)

Wolga zwischen dem Samara Stausee und dem Saratow Stausee

Die P_2O_5 -Konzentrationen in den ungesieberten Sedimenten der Wolga zwischen Damm Kujbyshev und Saratow Reservoir liegen zwischen 0,10% und 0,30%.

In der ersten Probe nach Damm Kujbyshev ist die HCl-SRP-Fraktion wie auch in der letzten Probe des vorigen Flußabschnittes die dominierende Fraktion, in den folgenden Proben liegt ihr Anteil zwischen 16% und 41%

Die refraktären Anteile machen in den folgenden Proben zwischen 29% und 35% am Gesamtphosphor aus, der BD-SRP-Anteil liegt in allen Proben zwischen 15% und 26%, der NaOH-SRP-Anteil zwischen 8% und 26% und der NRP-Anteil zwischen 4% und 13%.

Tabelle 25: Prozentuale Zusammensetzung der Bindungsformen von Phosphor in den Sedimenten der Wolga zwischen Samara Stausee (Damm Kujbyshev) und Saratow Reservoir sowie Gesamtphosphor in den ungesieberten und gesieberten Proben

Probenname	NH ₄ Cl-SRP [%]	BD-SRP [%]	NaOH-SRP [%]	HCl-SRP [%]	NRP [%]	Refraktär [%]	P ₂ O ₅ ungesiebt [10 g/kg]	P ₂ O ₅ (<20 µm) [10 g/kg]
Volga28	1	15	9	61	13	1	0,10	0,40
WG 1	0	16	26	20	3	35	0,25	0,30
WG 4	0	15	8	41	4	31	0,16	0,26
WG 5	0	26	22	16	7	29	0,30	0,33
WG 7	0	24	17	17	7	34	0,29	0,28
WG 11	0	22	15	18	10	35	0,24	0,27

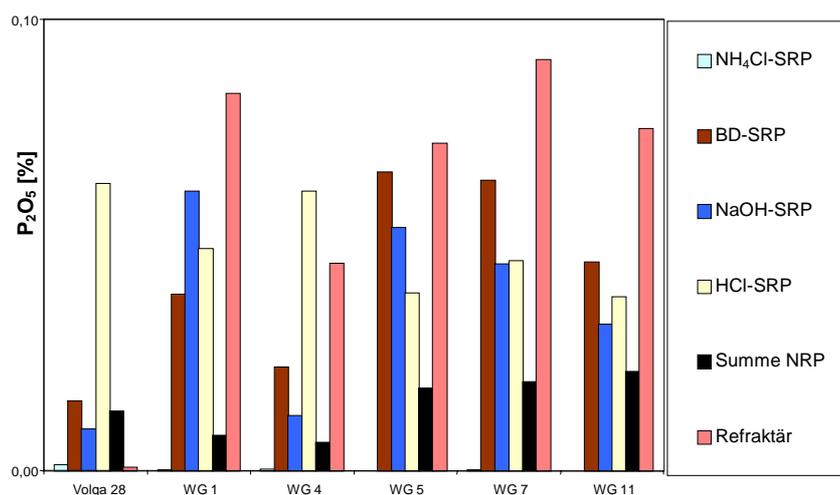


Abbildung 56: Bindungsformen von Phosphor in den Sedimenten der Wolga zwischen Samara Stausee (Damm Kujbyshev) und Saratow Reservoir

Wolga zwischen dem Saratow Stausee und dem Wolgograd Stausee

Die P₂O₅-Konzentrationen in den ungesieberten Sedimenten der Wolga zwischen dem Saratow Reservoir und dem Wolgograd Stausee liegen zwischen 0,19% und 0,34%.

Tabelle 26: Prozentuale Zusammensetzung der Bindungsformen von Phosphor in der Wolga zwischen dem Saratow Stausee und dem Wolgograd Stausee sowie Gesamtphosphor in den ungesieberten und gesieberten Proben

Probenname	NH ₄ Cl-SRP [%]	BD-SRP [%]	NaOH-SRP [%]	HCl-SRP [%]	NRP [%]	Refraktär [%]	P ₂ O ₅ ungesiebt [10 g/kg]	P ₂ O ₅ (<20 µm) [10 g/kg]
WG 13	0	33	16	21	2	28	0,21	0,38
WG 16	0	24	8	15	9	44	0,25	0,28
WG 20	0	18	10	24	7	41	0,23	0,26
WG 24	0	21	40	17	6	16	0,34	0,62
WG 31	0	20	6	38	2	34	0,21	0,25
WG 34	1	11	5	33	2	47	0,19	0,24
WG 50	0	22	12	25	12	30	0,30	0,32
WG 38	1	20	5	33	4	37	0,24	0,27
WG 42	0	34	11	15	9	31	0,32	0,33
WG 45	0	26	9	22	7	37	0,26	0,30
WG 48	1	15	29	17	7	32	0,41	0,37

Im letzten untersuchten Abschnitt liegt der refraktäre Anteil in 8 von 11 Proben über 30%. Der NaOH-SRP-Anteil ist in den zwei Proben mit den höchsten Phosphor-Konzentrationen erhöht (29% und 40%), in allen anderen Proben liegt er unter den Anteilen an BD-SRP (11% - 34%) und an HCl-SRP (15% - 38%).

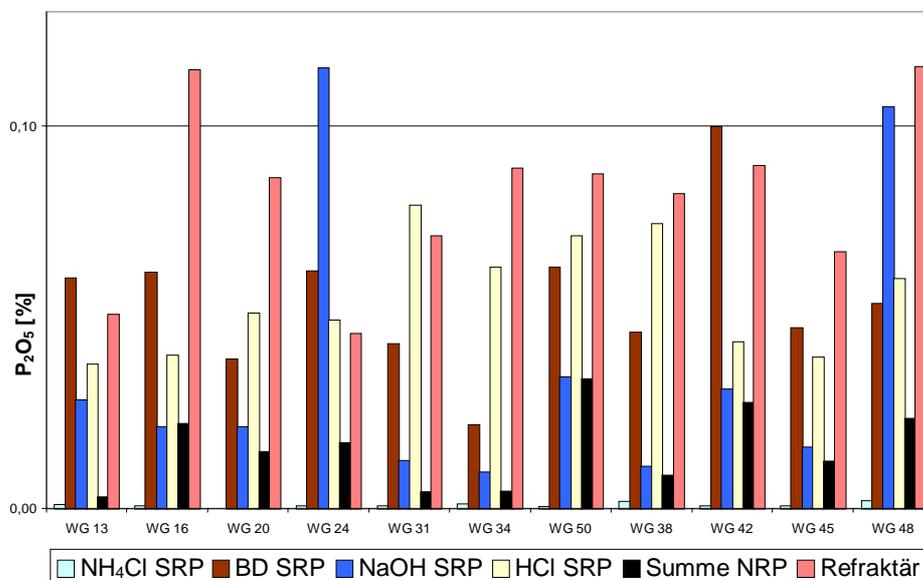


Abbildung 57: Bindungsformen von Phosphor in der Wolga zwischen dem Saratow Stausee und dem Wolgograd Stausee

Volga zwischen dem Gorki Stausee und dem Wolgograd Stausee

Abbildung 58 stellt über vier Flußabschnitte jeweils gemittelte extrahierte Mengen an P_2O_5 dar, wobei zu berücksichtigen ist, daß es sich in der Summe um P_2O_5 in der ungesiebten Probe handelt und somit die ungesiebten Proben mit einem höheren Phosphorgehalt einen erheblich größeren Einfluß auf die dargestellte Zusammensetzung des P-Pools haben als Proben mit einem geringem P-Gehalt.

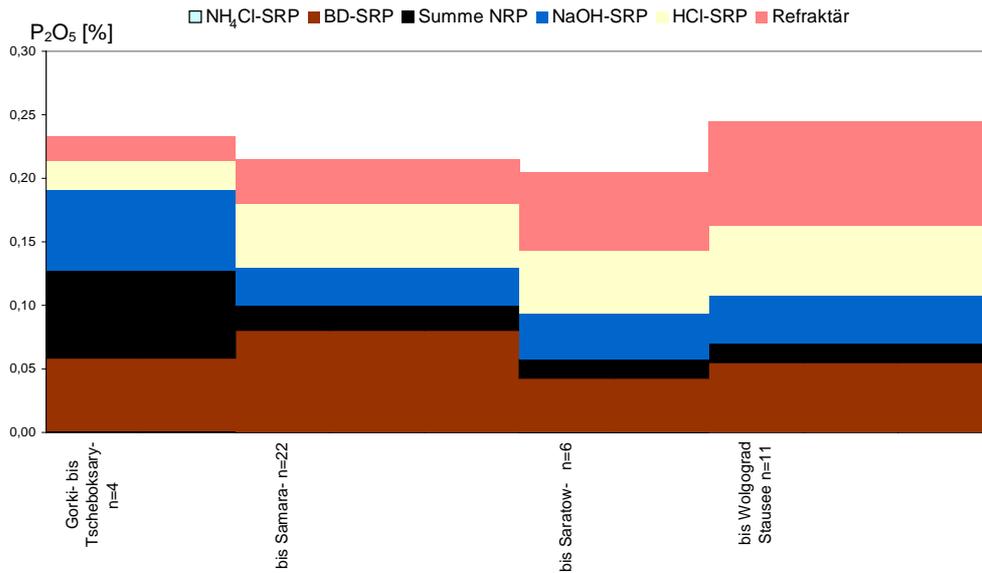


Abbildung 58: Sequentielle Extraktion von Phosphor; gemittelte Konzentrationen [%] in der Wolga über 4 Staustufen

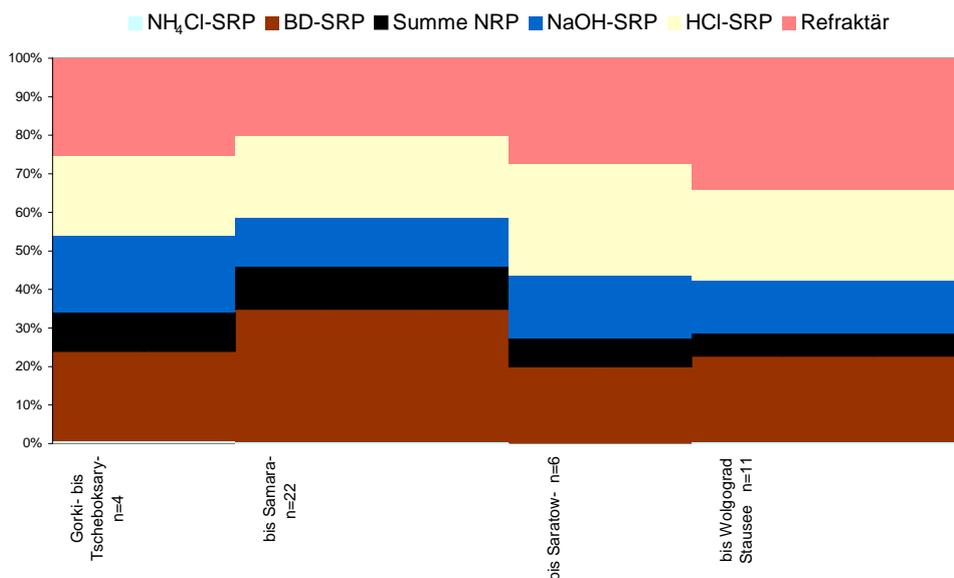


Abbildung 59: Sequentielle Extraktion von Phosphor; gemittelte prozentuale Zusammensetzung in der Wolga über 4 Staustufen

Abbildung 59 stellt die über vier Flußabschnitte gemittelte Zusammensetzung des P-Pools dar, wobei hier die prozentuale P-Zusammensetzung jeder Probe - unabhängig von der Konzentration - als Grundlage dient.

Vergleicht man die P_2O_5 -Konzentrationen in der Fraktion $< 20 \mu m$ (Abbildung 60) mit der in den ungesiebten Proben (Abbildung 58), fällt auf, daß im letzten untersuchten Abschnitt der Wolga zwar die höchsten P-Gehalte in den ungesiebten Proben gefunden werden, in der Fraktion $< 20 \mu m$ hingegen vergleichsweise geringe P-Gehalte zu finden sind.

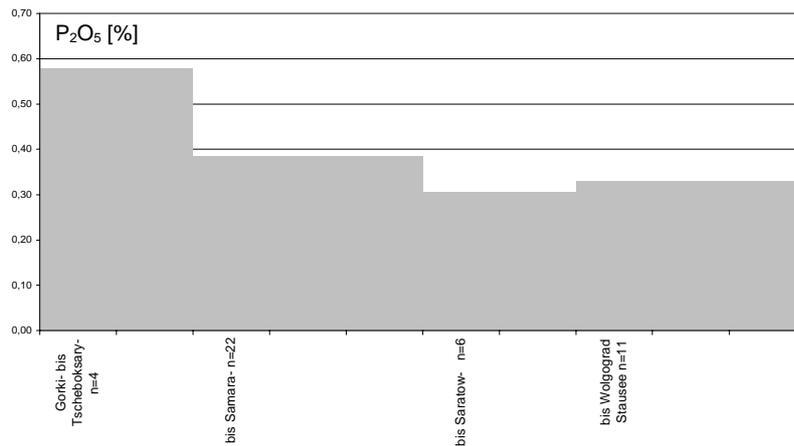


Abbildung 60: Über 4 Staustufen gemittelte P_2O_5 -Konzentrationen ($< 20 \mu m$) [%]

Eine Parallele zum Verlauf der P-Konzentrationen in der Fraktion $< 20 \mu m$ findet sich in der Summe von BD-SRP- und NRP-Fraktionen (Abbildung 58); gegenläufig verhält sich der Gehalt an nicht extrahierbarem P (refraktär).

Abbildung 58 zeigt, daß in den Proben mit höheren Phosphorgehalten (in der Fraktion $< 20 \mu m$) die BD-SRP-, NaOH-SRP- und die NRP-Fraktionen überwiegen, in den Proben mit niedrigeren P-Gehalten die refraktären und HCl-SRP-Anteile mehr als 50% ausmachen.

4.6.3. Elektronenmikroskopische Untersuchungen

Zwei Sedimentproben aus Rußland wurden elektronenmikroskopisch untersucht.

Bei einer Probe handelt es sich um Material aus der Moskwa vor der Okamündung (M 50) mit einem Gehalt von 1,48% P_2O_5 (ungesiebt) und einem Anteil von 15% BD-SRP, 35% NaOH-SRP und 38% HCl-SRP.

Die andere Probe (OK 1) wurde in der Kljasma bei der Stadt Shchëlkovo genommen, hat einen Gehalt von 2,60% P_2O_5 und einen Anteil von 29% BD-SRP und 45% NaOH-SRP.

M 50

In diesem Sediment wurden Verbindungen mit einem Phosphorgehalt von bis zu 5,7 Atom% gefunden, was einem P_2O_5 -Gehalt von 22% entspricht.

Abbildung 61 zeigt eine für dieses Sediment typische amorphe Eisenverbindung mit einem Durchmesser von 60 μm , die mit 6,9 Atom% Eisen und 5,6 Atom% Phosphor extrem P-reich ist.

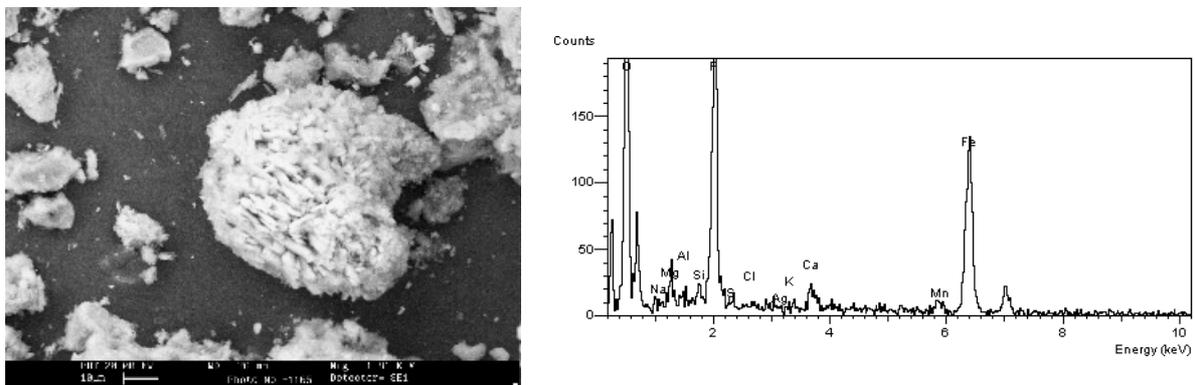


Abbildung 61: Elektronenmikroskopische Aufnahme bei 1810facher Vergrößerung einer Sedimentprobe aus der Oka (Probe M50-7) mit dem dazugehörigen Elementspektrum

Abbildung 62 zeigt phosphorhaltiges Calcium-Magnesiumkarbonat mit einem Durchmesser von 170 µm. Diese amorphe Struktur enthält 1,2 Atom% Phosphor (5 Gewichts% P₂O₅)

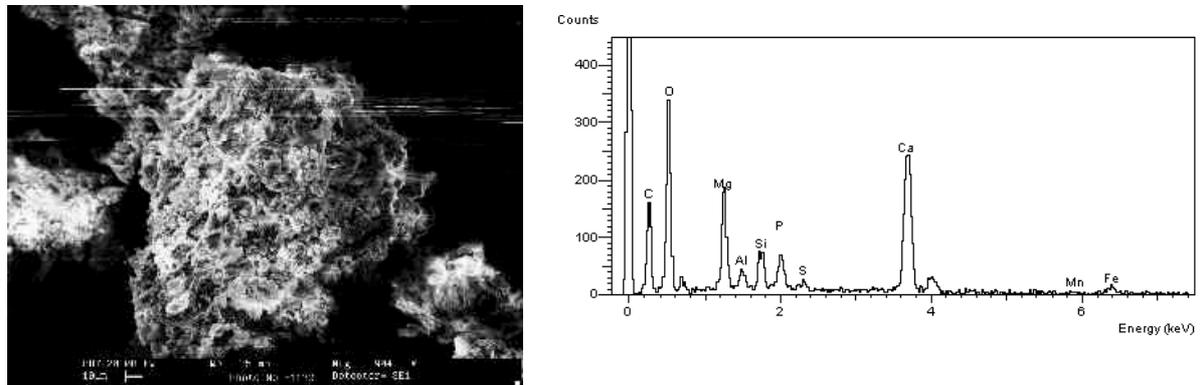


Abbildung 62: Elektronenmikroskopische Aufnahme bei 904facher Vergrößerung einer Sedimentprobe aus der Oka (Probe M50-9) mit dem dazugehörigen Elementspektrum

OK 1

In diesem Sediment konnten kaum kristalline Strukturen erkannt werden. Häufig waren amorphe kugelförmige Strukturen, die neben 1 Atom% bis 2,5 Atom% Phosphor noch Eisen, Aluminium und Silicium enthielten.

Abbildung 63 zeigt ein Calcit-Stäbchen von etwa 500 µm Länge. Phosphor ist in nennenswertem Umfang nicht enthalten.

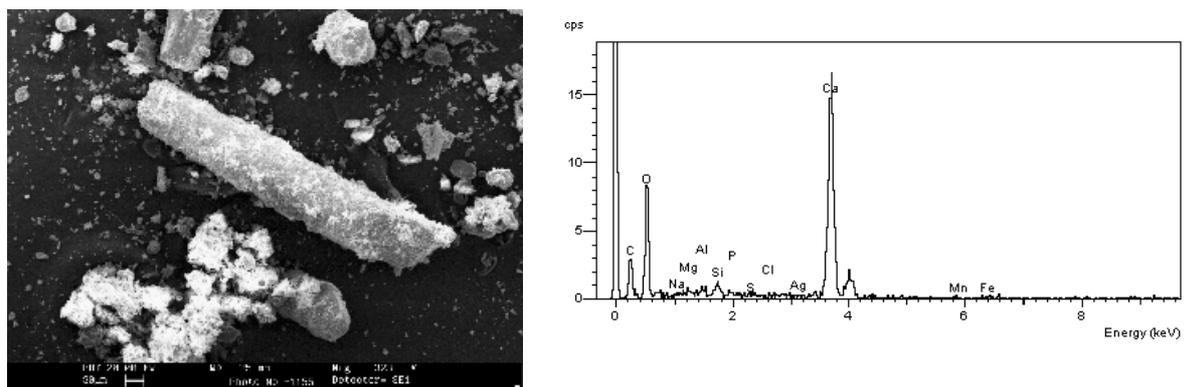


Abbildung 63: Elektronenmikroskopische Aufnahme einer Sedimentprobe aus der Kljasma (Probe OK 1-1 bei 323facher Vergrößerung) mit dem dazugehörigen Elementspektrum

Abbildung 64 zeigt eine amorphe silikat- und eisenhaltige Verbindung mit einer Breite von etwa 170 µm. Der Phosphorgehalt dieser Verbindung beträgt 2,5 Atom%, was einem P₂O₅-Gehalt von 9,9 Gewichts% entspricht.

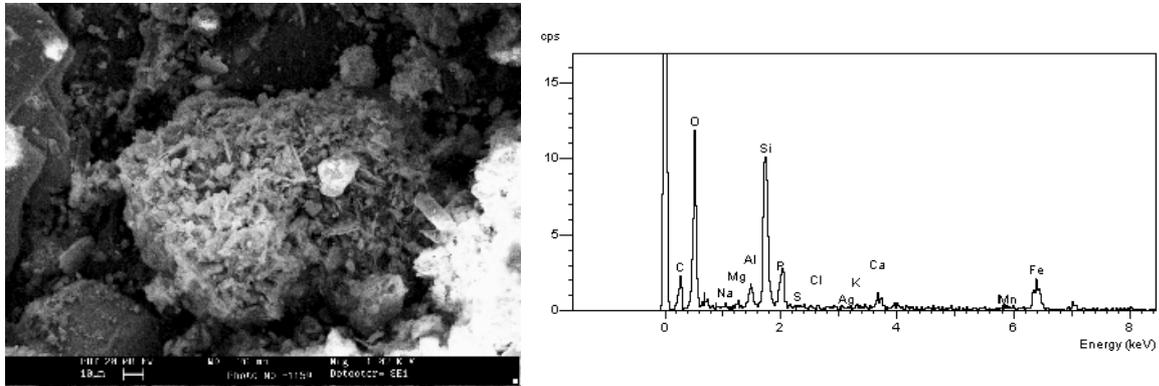


Abbildung 64: Elektronenmikroskopische Aufnahme einer Sedimentprobe aus der Kljasma (Probe OK 1-4 bei 1020facher Vergrößerung) mit dem dazugehörigen Elementspektrum

5. Auswertung und Diskussion

5.1. Nährstoffgehalt von Sedimenten kleiner Fließgewässer in Baden-Württemberg

Die Nähr- und Schadstoffgehalte limnischer Sedimente werden bestimmt durch regionale oder lokale Einträge sowie durch das Sedimentationsgeschehen im Gewässer und das Rücklösungsverhalten des betreffenden Stoffes im Sediment.

Durch die Bestimmung der Nähr- und Schadstoffe in limnischen Sedimenten lassen sich regionale oder lokale Belastungen von Gewässern und/ oder ihrer Umgebung feststellen, während die Gehalte an Nähr- und Schadstoffen im Wasserkörper starken zeitlichen Schwankungen unterliegen. Durch die Bestimmung von Nährstoffen in kleinen Fließgewässern lassen sich mögliche Punktquellen besser ausmachen als durch die Bestimmung dieser Stoffe in Flüssen und Seen mit einem großen Einzugsgebiet.

In der vorliegenden Arbeit wurde das Nährstoffelement Phosphor an 809 Sedimentproben aus 324 kleinen Fließgewässern Baden-Württembergs bestimmt. Es handelt sich somit um die umfangreichste Sedimentkartierung kleiner Fließgewässer - in Bezug auf das Element Phosphor - die in Baden-Württemberg durchgeführt wurde.

Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse der teilweise sehr sandigen Sedimente zu gewährleisten, wurde der Phosphorgehalt in der Korngrößenfraktion $<20\ \mu\text{m}$ bestimmt.

Tabelle 27: Ergebnisse der Phosphorbestimmung in Sedimenten kleiner Fließgewässer Baden-Württembergs

Anzahl n	Min	Max	Mittelwert	Median	Stdabwn	90er Perzentil
809	0,09% P ₂ O ₅	1,36% P ₂ O ₅	0,33% P ₂ O ₅	0,31% P ₂ O ₅	0,13	0,47% P ₂ O ₅

5.1.1. Regionale Übersicht

Um mögliche regionale Unterschiede in den Phosphorgehalten der untersuchten Sedimente sichtbar zu machen, wurde ausgehend von den Rechts- und Hochwerten ein Raster von 10 km Kantenlänge über das Probenahmegebiet gelegt, und alle in einem Raster zusammenfallenden Meßpunkte wurden gemittelt. Aufgrund der Lage der Fließgewässer fallen auf einige Rasterpunkte keine Proben, auf andere zwischen einer und acht Proben. Insgesamt entfielen 809 Proben auf 291 Rasterpunkte.

Als erste Bewertungsgrundlage wird die Einteilung der Rasterpunkte in I_{geo} -Klassen (MÜLLER 1978) vorgenommen, welche zur Bewertung der Schwermetallgehalte von Sedimenten entwickelt wurde. Als Backgroundwert wurde der Tongesteinstandard von WEDEPOHL (1991) eingesetzt, der für Phosphor Konzentrationen von 0,16% P_2O_5 angibt.

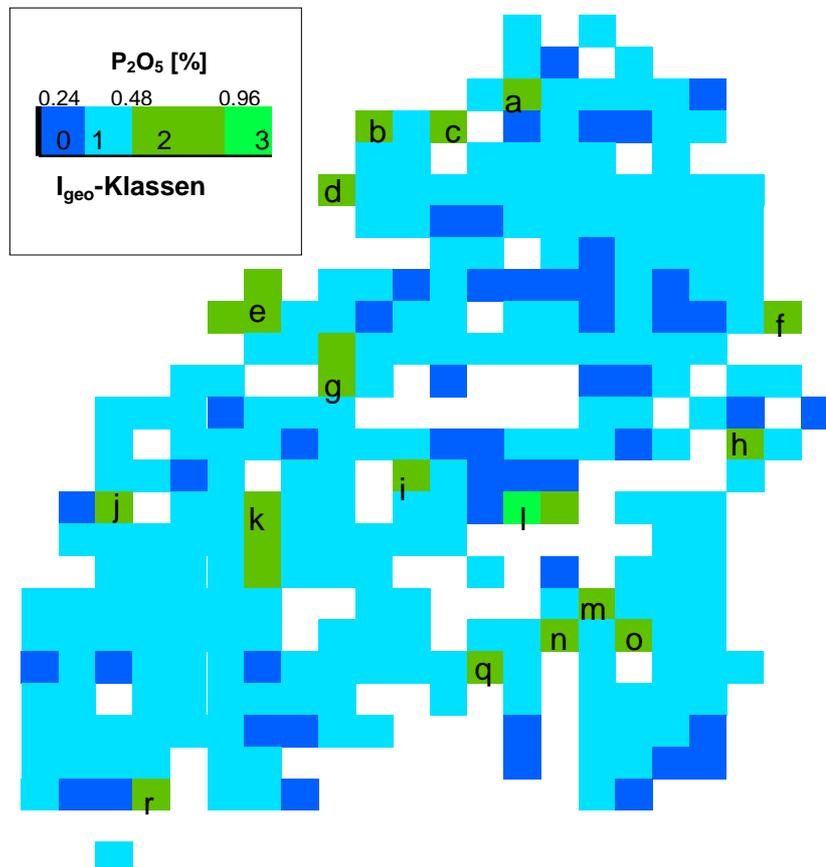


Abbildung 65: Phosphor-Konzentrationen in den Sedimenten kleiner Fließgewässer in Baden-Württemberg

Fast alle Mittelwerte über eine Fläche von 100 km² fallen bezüglich Phosphor in die I_{geo} -Klassen 0 bis 2, also sind „praktisch unbelastet“ bis „mäßig belastet“, nur eine Fläche ist „mäßig bis stark belastet“ (I_{geo} -Klasse 3). Hierbei handelt es sich um eine einzelne Probe (Abbildung 65, Punkt l) aus der Gächinger Lauter vor der Mündung in die Große Lauter bei Gomadingen mit 1,19% P_2O_5 . Der östlich davon gelegene Rasterpunkt, zu welchem ebenfalls nur eine Probe gehört, fällt in die I_{geo} -Klasse 2. Hier wurde in einer Probe aus dem Dolderbach bei Marbach, ebenfalls vor der Mündung in die große Lauter, ein P_2O_5 -Gehalt von 0,59% gemessen.

Eine Häufung von Rasterpunkten der I_{geo} -Klasse 2 findet sich südlich von Karlsruhe (Abbildung 65, Punkte e). Drei benachbarte Rasterpunkte, gemittelt über jeweils drei bzw. vier Proben, weisen Konzentrationen von 0,53% bis 0,92% P_2O_5 auf. Darunter fallen die Alb ($n = 5$), der Malscher Landgraben ($n = 2$) und der Federbach ($n = 3$).

Weitere drei in direkter Nachbarschaft befindliche Rasterpunkte, welche als „mäßig belastet“ angesehen werden können, finden sich südlich von Freudenstadt (Abbildung 65, Punkte k). Diese Fläche umfaßt neun Proben, von denen drei auf die Klein Kinzig und drei auf die Schiltach und eine auf den Lauterbach entfallen. Die Phosphor-Konzentrationen im Eschbach und im Forbach in diesem Gebiet sind deutlich geringer.

Zwei benachbarte Punkte der I_{geo} -Klasse 2 sind 10 km bis 20 km südwestlich von Pforzheim zu finden und durch jeweils eine Probe aus der Enz und dem Wurzbach charakterisiert.

Alle anderen 13, bezüglich Phosphor als „mäßig belastet“ angesehenen Rasterpunkte sind unregelmäßig über das Probenahmegebiet verteilt. Zu den Gewässern mit erhöhten Phosphor-Konzentrationen in diesen 13 Flächen gehören (Abbildung 65):

Morre (a), Laxbach (b), Höllbach (c), Landgraben (d), Sonnenbach (f), Brenz (h), Ammer (i), Schutter (j), Reutibach (m), Sodenbach und Schwarzach (n), Federbach (Alpenvorland) und Rotbach (o) sowie Kehlbach und Andelsbach (q).

Eine gewässerübergreifende Häufung an besonders P-reichen Gewässersedimenten läßt sich in der gerasterten Karte (Abbildung 65) nur in der Region zwischen Karlsruhe, Ettlingen und Rastatt finden (Abbildung 65, Punkte e). Südlich von Freudenstadt weisen zwar auch etliche Proben erhöhte Phosphor-Konzentrationen auf, jedoch sind hier nur drei von fünf beprobten Gewässern betroffen. Für alle anderen Rasterpunkte liegen erhöhte Phosphor-Konzentrationen innerhalb einer Fläche von 100 km^2 oder es liegen zu wenige Meßwerte pro Fläche für eine allgemeingültige Aussage vor (Abbildung 65, Punkte g und l).

Betrachtet man die Phosphor-Konzentrationen aller elf Rasterpunkte, die im Oberrheingraben nördlich von Lahr (Schwarzwald, ab HW 5 360 000) liegen, kann man bei einem Mittelwert von 0,51% P_2O_5 , einem Median von 0,46% P_2O_5 und einem Minimum von 0,39% P_2O_5 durchaus von einer Häufung an besonders P-reichen Gewässersedimenten in dieser dicht besiedelten, industrialisierten und intensiv landwirtschaftlich genutzten Region sprechen.

Vergleicht man die Phosphorgehalte der Sedimente einiger Seen in Baden-Württemberg (WOLF 1994) mit den gemittelten Werten kleiner Fließgewässer der umgebenden Region,

kann man trotz unterschiedlicher Gewässerstruktur vergleichbar hohe Phosphorkonzentrationen feststellen.

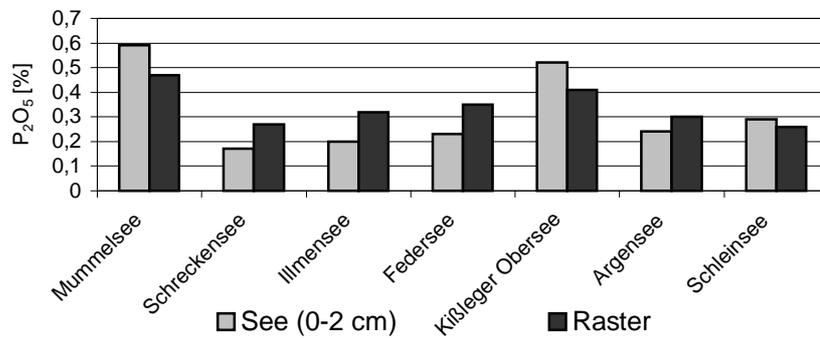


Abbildung 66: P_2O_5 -Konzentrationen von Seen in Baden-Württemberg im Vergleich mit gemittelten P_2O_5 -Konzentrationen kleiner Fließgewässer aus ihrer Umgebung (Raster aus Abbildung 65)

Genauere Übereinstimmungen sind nicht zu erwarten, da die Phosphorkonzentrationen in stehenden Gewässern stark von seeinternen Mechanismen gesteuert werden, dazu zählen Verdünnungseffekte durch Calcitfällung oder Anreicherung in der oberen Sedimentzone durch Redoxprozesse.

5.1.2. Korrelationsanalyse

Mit Hilfe einer Korrelationsanalyse läßt sich feststellen, inwieweit ein stochastischer Zusammenhang zwischen zwei Wertepaaren besteht. Der Korrelationskoeffizient r ist ein Maß für Stärke und Richtung des linearen Zusammenhangs (Kapitel 3.6).

Hilfreich bei der Interpretation ist die Kenntnis der Schwermetall- und Phosphorgehalte einiger potentieller Belastungsquellen:

Tabelle 28: Gehalte an P_2O_5 , Cd, Cu, Pb und Zink in verschiedenen Materialien (Mittelwerte) nach HEINRICHS (1993)

	P_2O_5 [%]	Cd [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Zn [mg/kg]
Mineraldünger	9,2	2	10	2	40
Komm. Klärschlamm	4,4	13	570	420	2 400
Rindergülle	2,3	0,37	49	14	110
Pflanzendetritus	0,23	0,25	5	7	35
Verbrennungsrückstand verbleites Benzin	0,34	45	4 600	110 000	1 400
Reifenabrieb	0,03	9	630	420	10 000

Die Phosphorgehalte der 809 Sedimentproben werden korreliert mit den Schwermetallgehalten, gemessen 1999 am Institut für Umwelt-Geochemie im Auftrag des Landesamtes für Umwelt, Baden-Württemberg.

Tabelle 29: Korrelationskoeffizienten nach Pearson sowie Mittelwert, Median und 90er Perzentil der Schwermetallgehalte kleiner Fließgewässer Baden-Württembergs (erhoben für LFU, 1999). Tongesteinstandard nach TUREKIAN & WEDEPOHL 1961.

Korrelationsfaktor r	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
P_2O_5 (n = 809)	0,22	0,13	0,30	0,03	0,20	0,09	0,44
P_2O_5 (n = 43) Oberrheingraben	0,25	0,15	0,50	0,61	0,28	0,46	0,49
	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Mittelwert [mg/kg] (n = 854)	0,85	50	51	0,63	39	71	215
Median [mg/kg](n=854)	0,51	42	37	0,20	37	43	162
90er Perzentil (n=854)	1,75	66	92	0,64	53	134	384
Tongesteinstandard [mg/kg]	0,3	90	45	0,4	68	20	95

Für die Gesamtheit aller Proben besteht nur eine sehr geringe ($|r| < 0,2$) bis geringe ($|r| < 0,5$) positive Korrelation zwischen Phosphor und den Schwermetallen, welche keinen Zusammenhang zwischen dem Auftreten erhöhter Phosphor-Konzentrationen und dem Auftreten erhöhter Schwermetallbelastung im Sediment herstellen läßt. Es liegt nahe, daß verschiedene Ursachen zu den teilweise recht hohen Phosphor-Konzentrationen in einigen Sedimenten geführt haben.

Betrachtet man die Korrelation nur für Proben des Oberrheingrabens nördlich von Lahr (Schwarzwald), findet man mittlere Korrelationen ($0,5 \leq |r| < 0,7$) zwischen Quecksilber, Kupfer und Phosphor. Auch die Korrelationen zwischen Blei und Phosphor sowie zwischen Zink und Phosphor haben sich erhöht. Ein Hinweis auf eine einzige gemeinsame Quelle der Nähr- und Schadstoffbelastung läßt sich allerdings nicht ableiten und bleibt im Einzelfall zu prüfen.

5.1.3. Nutzungsspezifische Betrachtung

Die Bodennutzung in der unmittelbaren Umgebung der Probenahmestelle wird in Beziehung gesetzt zum Phosphorgehalt der entsprechenden Sedimente. Man unterscheidet dabei zwischen Siedlungs-, Industrie- und Verkehrsfläche, zwischen Ackerland, Laubwald und Nadelwald sowie zwischen Ödland, Deponiegelände und Grünfläche. Des Weiteren werden noch Einleiter in der Umgebung der Probenahmestelle berücksichtigt.

Tabelle 30: Landnutzung und Einleitungen in der Umgebung der Probenahmestellen (auch Mehrfachnutzung)

P₂O₅ [%]	n	Mittel	Median	Min	Max	Stdabwn
Siedlung	266	0,35	0,33	0,14	1,35	0,14
Industrie	13	0,34	0,31	0,17	0,80	0,16
Verkehrsfläche	190	0,29	0,29	0,10	0,63	0,09
Ödland	7	0,29	0,31	0,19	0,36	0,06
Deponie	3	0,31	0,31	0,21	0,41	0,08
Ackerland	142	0,36	0,33	0,14	0,96	0,14
Grünfläche	316	0,32	0,31	0,10	1,36	0,12
Laubwald	107	0,29	0,28	0,14	0,67	0,10
Nadelwald	32	0,32	0,28	0,17	0,71	0,12
	n	Mittel	Median	Min	Max	Stdabwn
Kläranlage	26	0,33	0,33	0,15	0,50	0,08
Hofablauf	30	0,33	0,29	0,17	0,55	0,10
Straßenablauf	246	0,34	0,31	0,10	1,19	0,14

Die Mittelwerte an P₂O₅ für Sedimente in Umgebungen unterschiedlicher Bodennutzung liegen zwischen 0,29% und 0,36%, wobei die höchsten Werte in Sedimenten kleiner Fließgewässer zu finden sind, die von Ackerland (0,36%) und Siedlungsfläche (0,35%) umgeben sind. Die geringsten Phosphor-Konzentrationen finden sich in Sedimenten, umgeben von Laubwald, Ödland oder Verkehrsflächen (0,29%). Die Sedimente direkt hinter Kläranlagen (n = 26) weisen im Mittel keine erhöhten Phosphor-Konzentrationen auf. Auch Sedimente, welche direkt von Straßenablauf betroffen sind, sind im Mittel kaum zusätzlich mit Phosphor belastet.

Die Unterschiede in den Phosphorgehalten von Sedimenten mit unterschiedlicher Nutzung der Umgebung sind gering. Eine Erklärung hierfür mag sein, daß das Einzugsgebiet von Fließgewässern weit über die betrachtete Uferzone hinaus reicht und die Sedimente aufgrund hoher Strömungsgeschwindigkeit und turbulenter Strömung an sich schon einen Mittelwert über den Verlauf des Gewässers bis zur Probenahmestelle darstellen. In den dicht besiedelten Flächen Baden-Württembergs wechseln Bodennutzung entlang der Fließgewässers häufig

mehrfach und in dichter Folge, so daß sich der Einfluß nur einer Bodennutzungsart auf das Gewässersediment im Mittelwert kaum niederschlägt.

5.1.4. Einzelfallbetrachtung

Vier der Sedimentproben fallen bezüglich Phosphor in die I_{geo} -Klasse 3 („mäßig bis stark belastet“), 72 Proben in die I_{geo} -Klasse 2 („mäßig belastet“). Im folgenden werden Sedimentproben mit den höchsten P-Konzentrationen herausgegriffen und im Zusammenhang mit anderen Proben desselben Gewässers, mit Proben aus benachbarten Gewässern (Raster) und den Schwermetallgehalten der Sedimente (<20 µm) betrachtet.

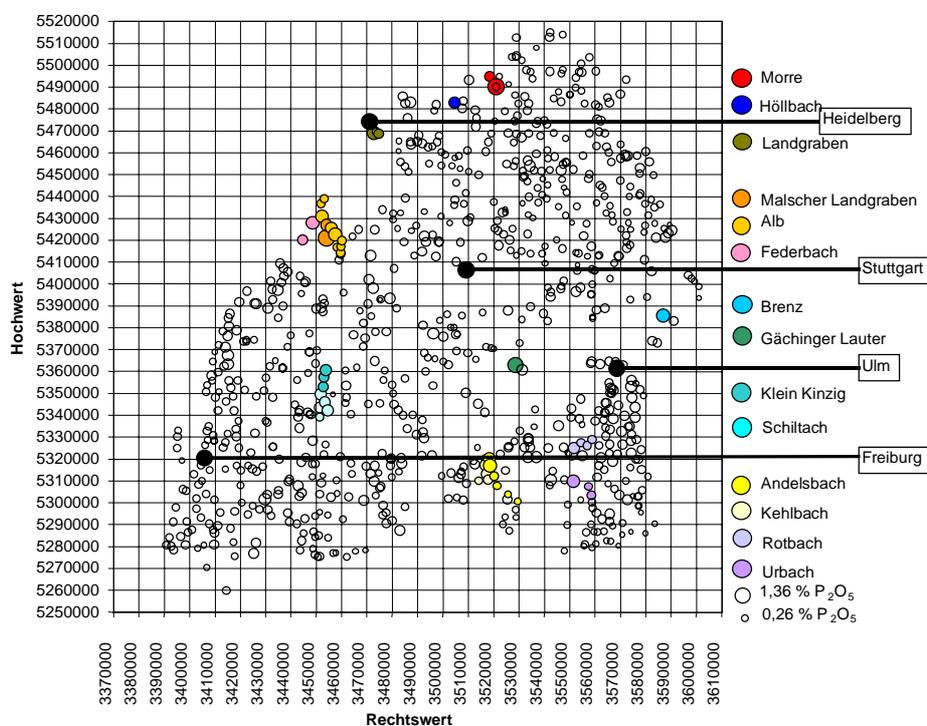


Abbildung 67: Phosphorgehalte kleiner Fließgewässer in Baden-Württemberg; Größe der Kreise ist proportional zur Phosphor-Konzentration, einzelne Bäche sind farblich hervorgehoben

Als häufig auftretende Phosphatquellen kommen nach Tabelle 28 Rindergülle, Klärschlamm und Mineraldünger in Betracht, mit Anreicherungsfaktoren von 7 bis 28 gegenüber dem Mittelwert der Phosphorgehalte in den untersuchten Sedimenten. Während die Belastung der Sedimente mit Rindergülle (aus landwirtschaftlichen Betrieben) der oben beschriebenen Zusammensetzung keine Erhöhung der Gehalte an Cd, Cu, Pb oder Zink zur Folge hat, enthalten Mineraldünger leicht erhöhte Cadmium-Konzentrationen und teilweise beträchtliche Nickelbeimengungen. Der Eintrag von Klärschlamm in das Sediment aus dem Überlauf von Kläranlagen, ungeklärtem Abwasser oder aus der Landwirtschaft wird den Anstieg aller

Schwermetall-Konzentrationen im Sediment bewirken. Die Zusammensetzung industrieller Abwässer schwankt je nach Betrieb stark.

Morre bei Stürzenhardt/ Hainstadt

Die höchsten Phosphor-Konzentrationen mit 1,36% wurden in einer Sedimentprobe der Morre im Odenwald, 3,5 km nordwestlich, stromabwärts von Buchen gefunden. Etwa 2 200 m stromaufwärts der Probenahmestelle befindet sich eine Kläranlage. Eine weitere Sedimentprobe der Morre bei Hettingenbeuern, etwa 5 km stromabwärts, weist mit 0,50% P_2O_5 ebenfalls noch erhöhte Phosphor-Konzentrationen auf. Das Steinbächle, ein Zufluß der Morre, fällt mit 0,33% P_2O_5 im Sediment in die I_{geo} -Klasse 1, im Eiterbach in der gleichen Region zwischen Buchen und Walldürn finden sich nur 0,18 und 0,20% P_2O_5 im Sediment.

Die eine Probe aus der Morre bildet zusammen mit der Probe aus dem Steinbächle und den Proben aus dem Eiterbach die Grundlage für die Berechnung des Rasterpunktes a (Abbildung 65) mit einem Mittelwert von 0,51% P_2O_5 ($n = 4$). Die Einstufung dieses Rasterpunktes in die I_{geo} -Klasse 2 ist eindeutig auf eine Punktquelle in der Morre zurückzuführen.

Die Schwermetallgehalte an dieser Probenahmestelle in der Morre liegen bezüglich Zink (I_{geo} -Klasse 2), Nickel und Kupfer (I_{geo} -Klasse 1) um das 2 bis 2,5fache über dem Mittelwert und oberhalb des 90er Perzentils aller Sedimentproben aus Baden-Württemberg ($n = 854$). Die Konzentrationen von Chrom, Blei (I_{geo} -Klasse 1) und Quecksilber im Sediment liegen dagegen im Bereich des Medians oder Mittelwertes. Eine Belastung der Sedimente mit Phosphor ist in diesem Fall begleitet von einer Belastung mit Zink, Nickel und Kupfer.

Malscher Landgraben, Alb und Federbach

Ähnlich hohe Phosphor-Konzentrationen wie in den Sedimenten der Morre finden sich in den Sedimenten des Malscher Landgrabens (1,35% P_2O_5) bei Bruchhausen, 3,2 km südwestlich von Ettlingen. Er ist Teil eines dichten Entwässerungssystems, welches die Landschaft um die Kiesgruben im Süden (stromaufwärts) durchzieht. Etwa 4 km stromaufwärts befindet sich eine Kläranlage.

Eine weitere Sedimentprobe im gleichen Gewässer 7 km flußabwärts weist P_2O_5 -Konzentrationen von 0,75% auf und gehört somit noch zu den 2% der am stärksten belasteten Sedimente bezüglich Phosphor in Baden-Württemberg. Die zweite Probe aus dem Malscher Landgraben liegt wenige hundert Meter flußaufwärts von einem Golfplatz.

Neben Phosphor in der Sedimentprobe des Malscher Landgrabens bei Bruchhausen fallen in dieser Probe noch Quecksilber, Blei und Zink in die I_{geo} -Klasse 3. Cadmium und Kupfer sind

ebenfalls angereichert (I_{geo} -Klasse 2). Die zweite Probe stromabwärts ist ebenfalls bezüglich Blei und Zink sowie zusätzlich mit Cadmium „mäßig bis stark belastet“ (I_{geo} -Klasse 3), bezüglich Kupfer „mäßig belastet“ (I_{geo} -Klasse 2) und bezüglich Quecksilber nur noch „unbelastet bis mäßig belastet“.

Auf den Rasterpunkt e (Abbildung 65, Mittelwert 0,92% P_2O_5) fallen neben den zwei Proben des Malscher Landgrabens noch zwei der insgesamt neun Proben aus der Alb mit 0,89% (in Rüppurr) und 0,68% P_2O_5 (in Ettlingen). Sie liegen jeweils 3,8 km bzw. 1,3 km hinter Kläranlagen. Die Alb flußaufwärts, Richtung Nordschwarzwald, weist dagegen in vier Proben nur 0,36% bis 0,38% P_2O_5 in ihren Sedimenten auf. Alle Proben der Alb sind bezüglich Chrom und Nickel unbelastet. Bezüglich Kupfer fallen - von der Quelle aus gesehen - nur die ersten vier der neun Proben in die I_{geo} -Klasse 0, gemeinsam mit dem Phosphorgehalt liegen die Konzentrationen an Kupfer in den folgenden Proben höher (I_{geo} -Klasse 1-2). Die höchsten Quecksilbergehalte (I_{geo} -Klassen 0-2) finden sich ebenso wie die höchsten Bleigehalte (I_{geo} -Klassen 2-4) in den drei Proben mit dem höchsten Phosphorgehalt (Rüppurr, Ettlingen sowie Daxlanden (0,80% P_2O_5). Ein sprunghafter Anstieg ist auch in der Zink-Konzentration ab der fünften Probe zu beobachten. Alle Sedimente fallen bezüglich Cadmium in die I_{geo} -Klassen 2-3. Beim Übergang vom Nordschwarzwald in die Rheinebene ist neben einem Anstieg im Phosphorgehalt der Sedimente der Alb auch ein Anstieg am Cu-, Hg-, Pb-, Zn-Gehalt zu verzeichnen.

Etwa 6 km östlich des Malscher Landgrabens fließt der Federbach mit 0,49% P_2O_5 im Sediment bei Bietigheim und mit 0,86% P_2O_5 13 km stromabwärts im Norden bei Dammfeld. Zwischen diesen beiden Proben liegen am Federbach und in seinem Einzugsgebiet drei Kläranlagen und etliche Entwässerungsgraben.

In dieser Region kann man nicht von einer einzelnen Punktquelle ausgehen, die zur erhöhten Phosphorakkumulation an dieser einen Probenahmestelle geführt hat, denn alle Proben in diesem Rasterpunkt und in der näheren Umgebung weisen erhöhte Phosphor- und Schwermetall-Konzentrationen auf.

Gächinger Lauter

Die Gächinger Lauter weist mit 1,19% P_2O_5 hohe Phosphor-Konzentrationen in ihrem Sediment auf. Sie ist knapp 4 km lang, entspringt in Gächingen fließt durch das Zizenhauser Tal und mündet in Gomadingen in die große Lauter. 4 km flußabwärts mündet der Dolderbach (0,59% P_2O_5) in die große Lauter. Es existieren keine weiteren Proben aus diesen Gewässern oder aus der nächsten Umgebung auf den gerasterten Flächen, so daß diese beiden Proben allein für die Rasterpunkte l (Abbildung 65) stehen.

In der Probe aus der Gächinger Lauter sind die Kupfergehalte um ein 4faches (I_{geo} -Klasse 2) und die Zink-Gehalte um ein 2,5faches (I_{geo} -Klasse 2) über dem Mittelwert aller Baden-Württembergischen Proben. Cadmium-, Chrom-, Quecksilber- und Blei-Gehalte liegen im Bereich der Mittelwerte. Anders verhält es sich in der Probe aus dem Dolderbach, hier liegen alle Schwermetallgehalte um den Mittelwert. Die Belastung der Gächinger Lauter mit Phosphor geht einher mit der Belastung durch Zink und Kupfer.

Andelsbach und Kehlbach

Der Andelsbach fließt im Süden durch den Illensee (0,20% P_2O_5 , WOLF 1994). Die Bachsedimente vor und nach dem See enthalten 0,25% bzw. 0,22% P_2O_5 . Im weiteren Verlauf liegen die Gehalte bei 0,33% (vor Pfullendorf) und 0,36% P_2O_5 (nach Pfullendorf). Stromabwärts bei Hausen, hinter einigen an den Bach angeschlossenen Teichen, die der Fischzucht dienen, erreichen Die P_2O_5 -Gehalte ein Maximum von 0,96% (I_{geo} -Klasse 3).

Etwa 3,5 km stromabwärts und 2 km oberhalb der Mündung des Kehlbaches in den Andelsbach liegen die Konzentrationen bei 0,72% P_2O_5 .

Vier Sedimentproben des Kehlbaches wurden analysiert. In der ersten Probe bei Hippertsweiler liegen die P_2O_5 -Gehalte bei 0,28%, bei der Kläranlage ca. 4 km stromabwärts liegen die Gehalte bei 0,42%, weiter stromabwärts, hinter der Mündung des Burraubaches, an dem eine Kläranlage und Fischteiche liegen, steigen die Konzentrationen auf 0,63% (Otterswang) bzw. 0,70% P_2O_5 (Bittelschieß vor der Mündung in den Andelsbach) an.

Die Sedimentprobe des Andelsbaches bei Hausen bildet zusammen mit vier Sedimentproben des Kehlbaches, zwei Proben aus der Ablach und einer Probe des Ringgenbaches Rasterpunkt q (0,50% P_2O_5 / Abbildung 65).

Betrachtet man die Schwermetallgehalte der Sedimente beider Bäche, fällt auf, daß fast alle Werte um die Mittelwerte für Baden-Württemberg herum streuen. Den 1,5fachen bis 1,9fachen Wert des Mittelwertes findet man für Zink (I_{geo} -Klasse 2) in den Sedimenten des Kehlbaches nach der Mündung des Burraubaches (0,63% bis 0,70% P_2O_5). Eine

Sedimentprobe des Andelsbaches bei Brunnhausen fällt bezüglich Quecksilber in die I_{geo} -Klasse 2 (0,33% P_2O_5). Die Belastung der Sedimente mit Phosphor geht im Andelsbach nicht mit einer Schwermetallbelastung einher.

Brenz

Die Brenz entspringt in der nordöstlichen schwäbischen Alb und mündet im Südosten in die Donau. In einer Sedimentprobe bei Herbrechtingen, flußabwärts von Heidenheim wurden P_2O_5 -Konzentrationen von 0,94% gefunden. Es liegen keine weiteren Proben aus der Brenz vor. Die Probenahmestelle befindet sich etwa 8 km flußabwärts eines Zementwerkes, der Kläranlage von Heidenheim, einer 50 ha großen Hühnerfarm, sowie direkt hinter einer weiteren kleinen Kläranlage bei Eselsburg. 5 km südöstlich dieser Probenahmestelle wurde in der Huerbe, einem Nebenfluß der Brenz, eine Sedimentprobe mit 0,34% P_2O_5 genommen. Während das Sediment der Huerbe mit Schwermetallen „unbelastet“ bzw. „unbelastet bis mäßig belastet“ ist, sind die Sedimente der Brenz bezüglich Cadmium, Chrom, Quecksilber und Zink „mäßig belastet“, bezüglich Blei sogar „mäßig bis stark belastet“. Auch die Kupferkonzentrationen liegen um das 2,5fache höher als der Mittelwert für alle Proben. Im direkten Vergleich liegen die Konzentrationen an Cadmium in der Brenz um das 2,5fache, die für Zink und Phosphor um das 3fache, für Blei um das 4fache, für Chrom um das 9fache und für Quecksilber sogar um das 13fache höher als im Sediment der Huerbe.

Leimbach und Landgraben

Der Leimbach entspringt im Kraichgau und mündet bei Schwetzingen in den Rhein.

Der Landgraben ist ein Seitenarm des Leimbaches, der sich bei St. Ilgen vom Leimbach trennt, an einer Kläranlage bei Sandhausen vorbeifließt und sich vor Oftersheim wieder mit dem Leimbach vereinigt. Während der Leimbach in seinem Sediment zwischen Sandhausen und Oftersheim 0,30% P_2O_5 enthält, finden sich im Landgraben bei Sandhausen, 1,3 km flußabwärts der Kläranlage 0,5% P_2O_5 und weitere 1,8 km weiter stromabwärts bei einem Golfplatz und einem landwirtschaftlichen Betrieb, 0,9% P_2O_5 . Diese drei Proben zusammen bilden den Rasterpunkt d (Abbildung 65). Trotz dieser geographischen Nähe unterscheidet sich der Landgraben auch bezüglich der Schwermetalle deutlich vom Leimbach. Insbesondere Chrom (2,6fach), Kupfer (2,2fach) Nickel (2,7fach) und Blei (2,5fach) sind im Landgraben zwischen Sandhausen und Oftersheim deutlich erhöht. Die Sedimente des Landgrabens bei Oftersheim stromabwärts der Probe zwischen Sandhausen und Oftersheim fallen bezüglich Chrom, Kupfer und Quecksilber sogar jeweils in die nächst-höhere I_{geo} -Klasse während die

Werte von Nickel und Blei bei Oftersheim geringer sind als flußaufwärts. Zu der hohen Belastung durch Schwermetalle und dem überdurchschnittlichen Phosphorgehalt kommen im Landgraben hinter der Probenahmestelle nahe der Kläranlage noch eine Belastung durch Chrom, Kupfer, Quecksilber und Phosphor hinzu.

Urbach und Rotbach

Der Urbach entspringt 30 km nordöstlich von Friedrichshafen (Bodensee), fließt nach Nordwesten über Bad Waldsee durch den Stadtsee und den Schloßsee und mündet schließlich über die Steinach in die Schussen. Die P_2O_5 -Konzentrationen liegen vor Bad Waldsee bei 0,35% und 0,32%. Nach Bad Waldsee, hinter einem ausgedehntem Feuchtgebiet und einer Kläranlage, liegen die Konzentrationen bei 0,79% P_2O_5 . Die Sedimente des Urbaches sind bezüglich aller Schwermetalle „unbelastet“ bzw. „unbelastet bis mäßig belastet“. Nur Zink bildet in der P-reichen Sedimentprobe eine Ausnahme (I_{geo} -Klasse 2). Der Anstieg der Phosphor-Konzentration in der letzten Sedimentprobe im Unterlauf des Urbaches (auf das 2,5fache der Konzentration der anderen Proben des Urbaches) ist begleitet von einem Anstieg (auf das 2,7fache) in der Zink-Konzentration.

15 km nördlich dieser Probe fällt noch eine Probe des Rotbaches mit einer erhöhten P_2O_5 -Konzentration von 0,69% auf (zusammen mit dem Federbach: Rasterpunkt o). Im Einzugsgebiet des beprobten Rotbaches liegen keine Kläranlagen. Auch hier und in den anderen drei Proben des Rotbachs stromabwärts sind die Sedimente „unbelastet“ bzw. „unbelastet bis mäßig belastet“ bezüglich aller Schwermetalle, eine Anreicherung von Schwermetallen zusammen mit Phosphor kann hier nicht festgestellt werden.

Höllbach

Der Höllbach entspringt 8 km westlich von Eberbach im Odenwald und fließt nach 6 km in die Iller. Die P_2O_5 -Gehalte liegen bei 0,74%. In seinem Einzugsgebiet befinden sich zwei kleine Kläranlagen im Abstand von 1 km, 2 km und 3,5 km. Die Sedimente fallen bezüglich Cadmium in die I_{geo} -Klasse 3, bezüglich Zink und Blei in die I_{geo} -Klasse 2, bezüglich Kupfer sind sie „unbelastet“ bis „mäßig belastet“, bezüglich Chrom, Quecksilber und Nickel sind sie „unbelastet“. Doch auch die Sedimente des Reisenbaches (3,5 km östlich der Probenahmestelle) und des Gammelsbaches bei Eberbach fallen bezüglich Cadmium in die I_{geo} -Klasse 3 bei Phosphor-Konzentrationen von 0,4% P_2O_5 und darunter.

Klein Kinzig und Schiltach

Die Klein Kinzig entspringt etwa 4 km südwestlich von Freudenstadt im Schwarzwald, wird 6 km südlich der Quelle zum Stausee Klein Kinzig aufgestaut und mündet 12 km stromabwärts in die Kinzig. Die Probe mit den höchsten Phosphorgehalten dieses Gewässers (0,71% P_2O_5) liegt bei dem Ort Oberes Dörfle, 2 km stromabwärts des Stausees, in dessen Einzugsgebiet eine kleine Kläranlage sowie ein Feuchtgebiet liegt. In einer Sedimentprobe 4 km stromabwärts sind noch 0,56% P_2O_5 enthalten, 1 km vor der Mündung in die Kinzig finden sich 0,50% P_2O_5 im Sediment. Die Proben der Klein Kinzig sind „unbelastet“ mit Chrom, Nickel und Quecksilber. Insbesondere in der Probe mit dem höchsten Phosphorgehalt hinter dem Stausee ist Blei (I_{geo} -Klasse 5), Cadmium (I_{geo} -Klasse 4), Zink (I_{geo} -Klasse 3) und Kupfer (I_{geo} -Klasse 1 bei doppelter Konzentration des Mittelwertes aller Proben) angereichert. In den Sedimentproben flußabwärts nehmen die Schwermetallgehalte stärker noch als die P-Gehalte ab und liegen bezüglich Blei, Cadmium, Zink und Kupfer um ein bis zwei I_{geo} -Klassen niedriger.

Die Schiltach mündet 4 km unterhalb der Kleinen Kinzig von Süden her in die Kinzig. Im Mündungsbereich enthält das Sediment 0,69% P_2O_5 . Flußaufwärts sind die Konzentrationen mit 0,6% (hinter Schramberg), 0,57% (vor Schramberg) und mit 0,34% P_2O_5 in der südlichsten Probe der Schiltach geringer. Die Sedimente des Lauterbachs, der bei Schramberg in die Schiltach mündet enthalten mit 0,58% P_2O_5 ähnlich hohe Phosphor-Konzentrationen wie die Schiltach in dieser Region. Die Sedimentproben der Eschach dagegen, genommen zwischen 5 km und 10 km östlich der Schiltach, enthalten nur zwischen 0,14% P_2O_5 und 0,29% P_2O_5 .

Die Proben der Schiltach sind „unbelastet“ mit Chrom oder Nickel. Eine Anreicherung von Blei („stark belastet“ bzw. „mäßig bis stark belastet“), Zink („mäßig bis stark belastet“), Cadmium („mäßig belastet“), Kupfer („mäßig belastet“) und Quecksilber („unbelastet bis mäßig belastet“) findet sich vor allem in den Sedimenten des Unterlaufes. Die Sedimente der südlichsten Probe des Oberlaufes sind bezüglich aller Schwermetalle „unbelastet“ bzw. „unbelastet bis mäßig belastet“. Wie in der Klein Kinzig finden sich auch in der Schiltach in den Proben mit dem höchsten Phosphorgehalt die höchsten Konzentrationen an Blei, Zink, Cadmium und Kupfer.

5.1.5. Zusammenfassung

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß von den 18 am stärksten mit Phosphor belasteten Sedimenten in sieben Sedimenten auch bezüglich der Schwermetalle Cd, Cu, Pb und Zn Anreicherungsfaktoren gegenüber dem Mittelwert aller Proben von 1,8 und darüber liegen (Tabelle 31). Im einzelnen sind dies zwei Proben aus der Alb und dem Malscher Landgraben, eine Probe aus dem Federbach, dem Landgraben und der Klein Kinzig. Berücksichtigt man noch die Diskrepanz zwischen Mittelwert und Median von Cadmium (Tabelle 29), indem man für dieses Schwermetall Anreicherungsfaktoren ab 1,5 (entspricht 0,77 mg/kg) mit einbezieht, fallen noch je eine Probe aus der Brenz und der Schiltach in die Kategorie der mit Cd, Cu, Pb Zn und Phosphor belasteten Proben. Im Einzugsgebiet all dieser Proben konnten Kläranlagen ausgemacht werden, insbesondere die Brenz ist zusätzlich durch ortsansässige Industrie belastet.

Tabelle 31: Die 18 phosphorreichsten Sedimente kleiner Baden-Württembergischer Fließgewässer mit Anreicherungsfaktoren gegenüber den Mittelwerten über alle Proben. P₂O₅: n = 809, Schwermetalle (Daten des LfU): n = 854

		Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	P ₂ O ₅
Morre	Stürzenhardt/ Hainstadt	0,4	0,9	2,5	0,4	2,1	0,6	2,0	4,1
Malscher Landgraben	Bruchhausen	1,8	0,9	4,3	4,8	1,1	2,3	4,3	4,1
Malscher Landgraben	KA-Weiherfeld	3,0	1,4	4,2	1,7	1,5	2,2	5,2	2,3
Alb	Daxlanden Mühlenburg	2,4	1,2	3,2	3,4	1,5	3,5	4,3	2,4
Alb	Rüppur	3,5	0,9	2,4	2,2	1,4	2,6	2,2	2,1
Alb	Ettlingen Süd	1,2	1,0	2,9	1,8	1,3	2,6	2,5	2,7
Federbach	Dammfeld	3,6	1,1	5,4	1,5	1,1	2,2	5,0	2,6
Gächinger Lauter	Mündung in gr. Lauter	1,0	1,1	3,9	0,8	1,0	0,3	2,5	3,6
Andelsbach	Hausen	0,8	0,8	0,9	0,3	0,9	0,5	1,2	2,9
Andelsbach	Krauchen Wies	1,1	0,9	0,9	0,4	0,8	0,5	1,2	2,2
Kehlbach	Bittelschieß	0,6	1,3	1,1	0,6	1,0	0,5	1,5	2,1
Brenz	Eselburg/ Herbrechtingen	1,5	7,6	2,4	2,4	1,2	1,9	2,2	2,9
Landgraben	Sandhausen/ Oftersheim	5,2	3,4	3,4	1,4	1,3	2,6	5,0	2,7
Urbach	Tannweiler	0,8	0,8	1,5	0,6	0,8	0,7	1,8	2,4
Rotbach	Eggelsbach	0,9	0,8	0,6	0,3	0,8	0,3	0,6	2,1
Höllbach	Unterhöllgrund	3,5	0,7	1,4	0,9	2,0	1,0	1,9	2,3
Klein Kinzig	Oberes Dörfle	5,3	0,9	2,2	0,5	1,1	7,1	3,5	2,1
Schiltach	Reichenbächle	1,5	1,0	4,7	1,8	1,7	4,0	2,8	2,1

Geringe Anreicherung bzw. unterdurchschnittlich hohe Schwermetallgehalte bei einer hohen Phosphorbelastung finden sich in zwei Proben des Andelsbaches sowie in einer Probe des Kehlbaches und des Rotbaches. In der Umgebung des Andelsbaches und des Kehlbaches sind Fischzuchtstationen angesiedelt, die für eine Belastung der Gewässer mit Nährstoffen in Frage kommen. In der Umgebung der quellnahen Sedimentprobe des Rotbaches, der in einem

Feuchtgebiet entspringt und dessen Umgebung landwirtschaftlich genutzt wird, finden sich keine Hinweise auf Einleiter.

5.2. Der Jungferweiher

Am Beispiel des Jungferweiher soll gezeigt werden, welche Mechanismen für eine Remobilisierung von Phosphor aus den Sedimenten verantwortlich sind, welche Bindungsformen für eine Rücklösung zur Verfügung stehen und wie sie identifiziert werden können. Dazu werden zuerst die Gesamtphosphor-Konzentrationen im Sediment in Bezug zur Phosphorbilanz für das gesamte Gewässersystem gesetzt und im Anschluß auf die Ergebnisse der sequentiellen Extraktion eingegangen. Da im folgenden auch Phosphorgehalte im Wasser berücksichtigt werden, sind die Konzentrationen neben P_2O_5 [%] teilweise auch in P [mg/kg] oder P [$\mu\text{g/l}$] angegeben, die Mengen neben P_2O_5 [kg] teilweise auch in P [kg].

5.2.1. Gesamtphosphor

Im Rahmen des F+E-Verbundforschungsvorhabens „Eintrag und Verbleib von Nähr- und Schadstoffen aus einem Mittelgebirgseinzugsgebiet in einen Flachsee“ (LÜSSE et al. 1998) und im Rahmen einer Voruntersuchung (EHWALD 1995) wurde das Einzugsgebiet des Jungferweiher, die Zuflüsse, die Sedimente und der Wasserkörper des Flachsees untersucht. Es wurde eine Stoffbilanz für die Wasserwirtschaftsjahre 1996 und 1997 für die Elemente Phosphor und Stickstoff erstellt.

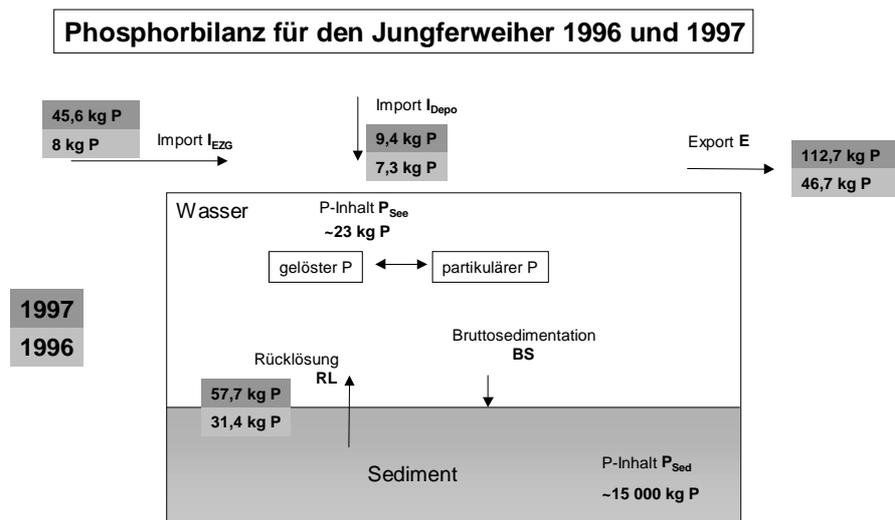


Abbildung 68: Phosphorbilanz für den Jungferweiher, Werte aus LÜSSE et al. 1997 und YAHYA & LUDWIG 1997. Import I_{EZG} = Eintrag über Uferzone und Zuflüsse, I_{Depo} = Eintrag über Atmosphäre und Niederschläge

Aus dieser Bilanz geht eindeutig hervor, daß der Austrag an Phosphor aus dem System den Eintrag in das System in den Wasserwirtschaftsjahren 1996 und 1997 überstieg. Da diese

Differenz nur über eine Freisetzung von Phosphor aus dem Sediment zu erklären ist, liegt im Jungferweiher über beide Jahre eine negative Nettosedimentation vor (Gleichung 1).

Aus zwei Porenwasserprofilen von Ehwald (1995) lassen sich Phosphorflüsse über die Sediment/ Wasser-Grenze nach dem Mechanismus der Molekulardiffusion über das 1. Fick'sche Gesetz berechnen.

Dabei liegen die Freisetzungsraten bei 2,1 (+/- 0,7) $\text{mg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{d}^{-1}$ im Sommer und bei 0,6 (+/- 0,3) $\text{mg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{d}^{-1}$ im Winter, was einer diffusionsbedingten P-Rücklösung von etwa 100 kg/a entspricht, von dem nur ein Teil der Sedimentneubildung zur Verfügung steht.

Für die Gesamtphosphorgehalte (in den ungesiebten Proben) in zwei Sedimentkernen in den oberen 5 cm wurden Konzentrationen zwischen 0,31% P_2O_5 und 0,38% P_2O_5 gefunden. Dies liegt im Bereich der von EHWALD (1995) bestimmten mittleren Konzentrationen in ungesiebten Oberflächenproben von 0,34% P_2O_5 (n = 40). Die Sedimente sind sehr feinkörnig und die Fraktion < 20 μm macht im Mittel von sechs Sedimentkernen 93% vom Gesamtsediment aus. Die Korngrößenverteilung ist recht homogen, und der Anteil der Fraktion < 20 μm fällt bis in Tiefen von 40 cm nicht unter 92% , der Anteil > 63 μm im Mittel nicht über 1% (YAHYA & LUDWIG 1997), so daß der Einfluß der Korngrößen auf die Phosphor-Konzentration in verschiedenen Sedimenthorizonten vernachlässigbar bleibt.

Die Sedimente des Jungferweiher fallen bezüglich Phosphor in die I_{geo} -Klasse 1, sind nach dieser Kategorie also „unbelastet bis mäßig belastet“. Dennoch handelt es sich um einen hypertrophen Flachsee. Hier zeigt sich deutlich, daß die Phosphorgehalte der Sedimente allein keine Grundlage zur Beurteilung der Gewässerqualität bezüglich des Trophiegrades zulassen. Ein geeigneteres Kriterium sind dagegen Phosphor-Konzentrationen im Porenwasser, welche über P-Rücklösung durch frühdiagenetische Prozesse gesteuert werden, der Sauerstoffgehalt über Grund oder üblicherweise die Intensität der Primärproduktion als Folge des Nährstoffangebots im Wasserkörper.

Betrachtet man das Sedimentprofil beider Kerne (Abbildung 69), sieht man, daß die Phosphor-Konzentrationen mit der Sedimenttiefe abnehmen und in der Schicht zwischen 35 cm und 40 cm um knapp 30% unter den Konzentrationen der obersten 5 cm liegen. Dies kann keine Folge gestiegener Phosphor-Konzentrationen in den Einträgen sein, denn wie bereits gezeigt, sind die Phosphoreinträge in den Weiher derart gesunken, daß zum Zeitpunkt der Untersuchung eine Auslaugung des Sediments bezüglich Phosphor stattfand.

Belegen läßt sich neben dem gesunkenen absoluten P-Eintrag, auch eine niedrige Eintragskonzentration in den Zuläufen: mit einer Millionen Kubikmeter Wasser über Zuläufe

und Niederschlag wurden im Wasserwirtschaftsjahr 1997 55 kg Phosphor in den Weiher eingetragen, was einer Durchschnittskonzentration von 54 µg P/l entspricht, im See selbst sind im Mittel dagegen 133 µg P/l bestimmt worden.

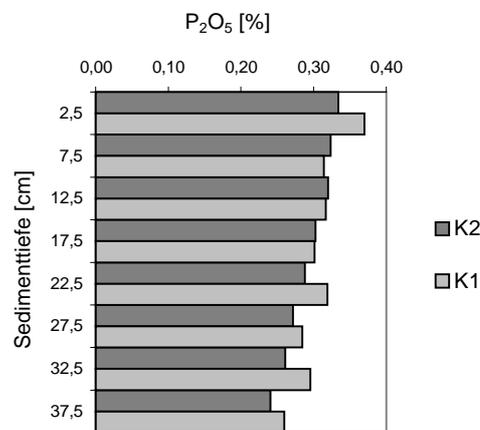


Abbildung 69: Profil der P₂O₅-Konzentration in zwei Sedimentkernen des Jungferweiher

Zwar liegen keine Daten zur Phosphor-Konzentration bezogen auf die Trockenmasse der über Zuflüsse und Deposition eingetragenen Partikel vor, aus dem Verhältnis von Phosphor zu dem Element Nickel, welches überwiegend geogenen Ursprungs ist, läßt sich jedoch abschätzen, daß die Phosphor-Konzentration in den eingetragenen Partikeln niedriger liegen muß als im Sediment. Während in der Oberflächenschicht der Sedimente das (Gewichts-) Verhältnis von Gesamtphosphor zu Nickel bei 21 liegt (ungesiebt), liegen die Verhältnisse im Eintrag in den Wasserwirtschaftsjahren 1996 und 1997 zwischen 9 und 14. Auch die (Gewichts-) Verhältnisse von Phosphor zu Kupfer liegen im Sediment (52) höher als in den Einträgen (10-18). Die Auswertung der Porenwasserprofile von EHWALD (1995) schließen eine Freisetzung von Kupfer und Nickel aus dem Sediment aus. Das bedeutet, daß das Konzentrationsprofil mit der Sedimenttiefe kein Abbild der Eintragungssituation sein kann, sondern daß verschiedene Mechanismen zu einer Anreicherung von Phosphor in den oberen Sedimenthorizonten geführt haben müssen.

Aus den Phosphorgehalten der beiden Sedimentkerne läßt sich eine im Sediment gespeicherte Menge an P₂O₅ von etwa 35 000 kg (15 000 kg P) ermitteln.

Gleichung 9

$$M_{P_2O_5} = C_{P_2O_5} \cdot A \cdot h \cdot (1 - WG) \cdot \gamma$$

- M_{P₂O₅}: Menge an P₂O₅ [kg]
- C (Mittlere P₂O₅-Konzentration über die Tiefe im Sediment): 3,0 [kg/t]
- A (Sedimentfläche): 200 000 m²
- h (Sedimentmächtigkeit): 0,35 m
- WG (Wassergehalt): 0,86
- γ (Dichte des Sediments): 1,2 t/m³

Auf 55 Jahre gerechnet entspricht das einer Sedimentationsrate von 640 kg P₂O₅ (280 kg P) pro Jahr, was dem 5fachen bis 18fachen des derzeitigen Eintrags entspricht.

Tabelle 32: Landnutzung im Einzugsgebiet des Jungferweihers (aus LÜSSE et al. 1997)

Nutzung/ Struktur	Fläche [km ²]	Fläche [%]
Forst	2,36	50,3
Landwirtschaft/ Wiese	1,00	21,3
Weiher (inkl. Sumpf)	0,36	7,6
Siedlung	0,90	19,2
Verkehr	0,07	1,5
Gesamtfläche	4,69	100
Abzgl. befestigte, kanalisierte Fläche	4,12	88

Der Vergleich der Luftbildaufnahmen des Einzugsgebietes des Jungferweihers vom Landesvermessungsamt Rheinland-Pfalz von 1990 mit älteren Aufnahmen aus den Jahren 1970 und 1936 zeigt, daß sich die Nutzung des Gebietes grundlegend geändert hat. Während heute Waldgebiete (50%) und extensiv als Wiese oder Weide genutzte Flächen (20%) den größten Anteil ausmachen (Tabelle 32) und nur noch eine Fläche von 0,045 km² als Ackerland genutzt wird, war Ackerbau die vorherrschende Landnutzung im Einzugsgebiet des Jungferweihers in der Vergangenheit.

LÜSSE et al. (1997) berechnen für den nutzungsspezifischen mittleren Abtrag von Phosphor aus Waldgebieten im Einzugsgebiet des Jungferweihers Werte von etwa 5 kg/km² und Jahr, von einer Fläche mit Ackerland, einer Streusiedlung und der Autobahn einen mittleren Jahresabtrag von etwa 400 kg Phosphor pro km². Der Abtrag von Phosphor aus den teilweise direkt am Ufer gelegenen früher intensiv landwirtschaftlich genutzten Flächen ist somit verantwortlich für die großen Mengen Phosphor, die im Sediment gespeichert sind.

5.2.2. Bindungsformen

Die Bindungsformen wurden mittels sequentieller Extraktion bestimmt (Tabelle 3). Der Phosphorgehalt der Oberflächensedimente (0-5 cm; n = 2) liegt zu etwa einem Viertel (26%) reduktiv löslich vor. Etwa ein Drittel (34%) liegt als NRP, also organisch gebunden vor. Die gegen Hydroxidionen austauschbaren Phosphate machen wiederum ein Viertel des Gesamtphosphors aus. Die restlichen 14% entfallen auf säurelösliche Phosphate (6%) und nicht extrahierbaren Phosphor (8%).

Der Anteil an **organisch gebundenem Phosphor** ist im Oberflächensediment des Jungferweiherers vergleichsweise hoch. Dies ist jedoch für einen hypertrophen Flachsee nicht verwunderlich, dessen hohe Phytoplanktondichte im Wasserkörper für eine stetige Nachlieferung an Biomasse sorgt. Der Gehalt an Biomasse, berechnet aus dem Gehalt an organisch gebundenem Kohlenstoff (Scheffer & Schachtschabel 1989) oder aus dem Glühverlust beträgt im Mittel (n = 40) knapp 40% im ungesiebten Oberflächensediment (YAHYA & LUDWIG 1997).

Gleichung 10: Verhältnis von organisch gebundenem Phosphor zur organischen Substanz im Sediment

$$V_{P/OM} = (C_{NRP} + C_{ref}) * C_{OM}^{-1}$$

V_{OM} : Massenverhältnis von Phosphor zur organischen Substanz

C_{OM} (Konzentration der organischen Substanz im Oberflächensediment): 392 g/kg (YAHYA & LUDWIG 1997)

$C_{NRP} + C_{ref}$ (Summe der mittleren Konzentrationen des „nicht molybdatreaktiven“ und des „refraktären“ Phosphors in der oberen 5 cm mächtigen Sedimentschicht aus der sequentiellen Extraktion): 0,63 g/kg

Rechnet man den organisch gebundenen Phosphor (NRP) und den refraktären Anteil dem organisch gebundenen Kohlenstoff zu, so erhält man einen Phosphorgehalt der organischen Substanz im Sediment von 0,16%. Untersuchungen an einer Phytoplanktonprobe haben ergeben, daß neben dem NRP und leicht austauschbarem (NH_4Cl -SR) P zu kleineren Anteilen Phosphor auch in anderen Fraktionen der Algenprobe gefunden wird, so daß diese Berechnung den wirklichen Phosphorgehalt der Biomasse im Sediment möglicherweise leicht unterschätzt. Die Phosphorgehalte von Pflanzen werden mit 0,1% bis 0,5% P angegeben (MÜLLER, EHWALD & HAMANN 1990); für Sediment-Bakterien lassen sich - aus einem P-Gehalt von $15 \mu\text{g}/\text{mm}^3$ Zellvolumen und einem Wassergehalt von $0,5 \text{ g}/\text{mm}^3$ (GÄCHTER & MEYER 1993) - Phosphor-Konzentrationen von 3% berechnen. In einer Blaualgenprobe (Cyanobakterien) aus der Wolga wurden vom Autor 0,6% Phosphor gefunden, in einer Fadenalge dagegen nur 0,07%. Der Phosphorgehalt der teilweise zersetzten organischen Substanz im Jungferweiher sediment liegt also im unteren Bereich der für Pflanzen angegebenen Phosphorgehalte.

Die **reduktiv lösliche Phosphorfraktion** stammt überwiegend aus Eisenhydroxiden. Der Eisengehalt in den ungesiebten Oberflächensedimenten ($n = 58$) des Jungferweiher liegt bei 29,9 g/kg. Bei einem Anteil von 26% bzw. einem Gehalt von 0,39 g/kg an reduktiv löslichem Phosphor erhält man ein Fe:P Massenverhältnis von 77:1, ein Fe:P Molverhältnis von 43:1. Dieses Verhältnis stellt allerdings einen Maximalwert für das Verhältnis von Eisen(III) zu reduktiv löslichem Phosphor dar, da nicht bekannt ist, welcher Anteil des Eisens im Oberflächensediment bereits als Fe(II) vorliegt und nicht mehr zur Bindung von Phosphor zur Verfügung steht. EHWALD (1995) findet in einem dreistufigen BCR Extraktionsverfahren nur knapp 40% des Eisens in der oberen 5 cm dicken Sedimentschicht des Jungferweiher leicht reduzierbar, dieser Anteil sinkt bis in eine Tiefe von 35 cm auf die Hälfte ab. ZINDER (1985) beschreibt für eine Adsorption an Eisenhydroxidoberflächen ein Fe:P Molverhältnis von 64 bei kristallinem Goethit, von 9 bei frisch gefälltem, amorphen Eisenhydroxid und von bis zu 3 oder 4 bei dünnen Eisenhydroxidüberzügen auf anderen Festkörpern wie Silikaten, Calciten oder Aluminiumoxiden in Sedimenten. Das Eisen/ BD-Phosphor-Verhältnis liegt also deutlich unter dem Bereich frisch gefällter Eisenhydroxide.

Das mit **Natronlauge extrahierbare Orthophosphat** stellt in den Oberflächensedimenten im Mittel 26% des gesamten Phosphatpools. Diese Bindungsform ist redoxunabhängig und steht für z.B. an Aluminiumoxid- oder an silikatischen Oberflächen adsorbierte Phosphate.

Einen geringen Anteil von 6% des Gesamtphosphors im Oberflächensediment nehmen die **säurelöslichen Phosphate** ein. Dies ist zu erwarten, denn in keiner Probe der Sedimente (EHWALD 1995) oder der Böden des Einzugsgebietes (YAHYA & LUDWIG 1997) konnte Karbonat nachgewiesen werden. Die Mitfällung von Phosphor mit Calciumkarbonat bei der authigenen Calcitfällung spielt in vielen Hartwasserseen eine wesentliche Rolle für die Phosphateliminierung (MÜLLER 1997). Dieser Mechanismus wird in jüngster Zeit (Seite 12) zur Seenrestaurierung künstlich induziert.

Mit 8% sind auch die **refraktären P-Anteile** gering, die sich nicht mit den angewandten Extraktionsmitteln, sondern nur mit Königswasser extrahieren lassen. Zu dieser Fraktion gehören stabile, in organischer Substanz eingebaute Phosphate.

Betrachtet man die gemittelten Anteile der Bindungsformen im Sedimentprofil und klammert die letzte Schicht zwischen 35 cm und 40 cm Tiefe aus, die bereits z.T. in die Talsole reicht, erkennt man für einige Fraktionen deutliche Tendenzen. Während der Anteil an der säurelöslichen (molybdatreaktiven) Fraktion mit der Tiefe leicht zunimmt und der gegen Hydroxidionen austauschbare (molybdatreaktive) Anteil deutlich von 26% auf 43% steigt, fallen die Anteile von organisch gebundenem Phosphor von 34% auf 28% und die reduktiv löslichen Anteile von 26% auf 14%.

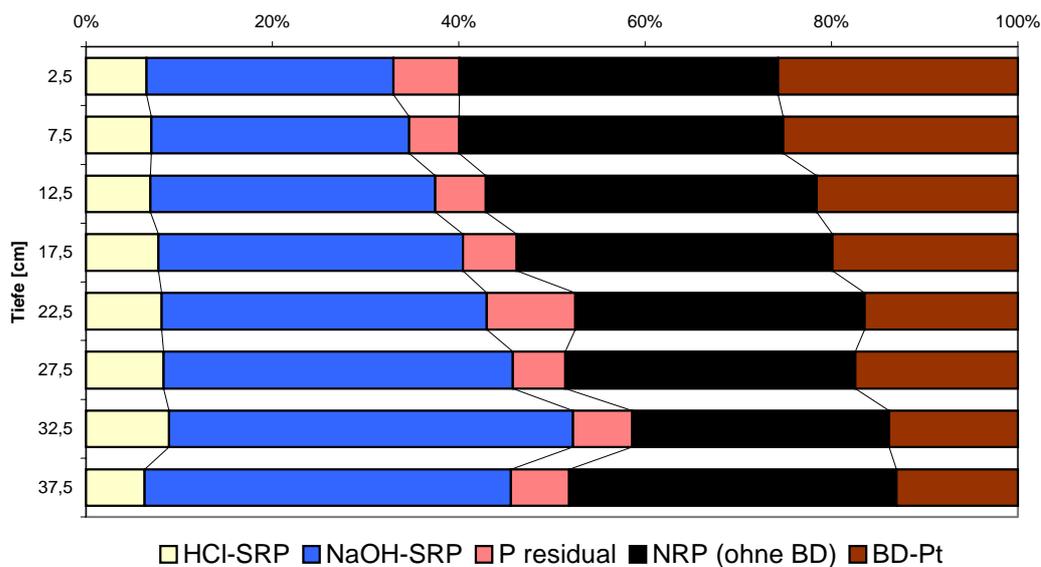


Abbildung 70: Prozentualer Anteil der Bindungsformen von Phosphor, gemittelt über zwei Sedimentkerne des Jungferweiher, im Tiefenprofil. SRP: anorganisches Orthophosphat, NRP: organisch gebundenes Phosphat, Pt: Gesamtphosphor in dieser Fraktion

Deutlich sieht man die Abnahme des (reduktiv löslichen) BD-Phosphors um fast 60% von 0,39 g/kg in den oberen fünf Sedimentzentimetern auf 0,16 g/kg in der Schicht zwischen 30 cm und 35 cm Tiefe und des NRP- bzw. des organisch gebundenen Phosphors von 0,52 g/kg auf 0,37 g/kg im Konzentrationsprofil, während die P-Konzentration in der säurelösliche Fraktion von den ersten 5 cm bis in 35 cm Tiefe konstant bleibt und die P-Konzentration in der NaOH-SRP-Fraktion leicht zunimmt (von 0,40 g/kg auf 0,50 g/kg) (Abbildung 71).

Nach Ablagerung der Schwebstoffe aus dem Wasserkörper beginnen, bedingt durch den Abbau organischer Substanz, frühdiagenetische Prozesse das Sedimentinventar zu verändern. Die Umwandlung in thermodynamisch stabilere anorganische Verbindungen ist kinetisch gehemmt und das Ausmaß dieser Veränderung wird gesteuert von der mikrobiellen Zersetzungsaktivität, die wiederum abhängig ist von der Menge und der Art des organischen

Substrates im Sediment, von Temperatur und den potentiellen Elektronenakzeptoren. Ein Redoxprofil (Abbildung 27), aufgenommen in einem Sedimentkern des Jungferweiher, hat gezeigt, daß mit Eintritt in das Sediment bereits negative Eh-Werte erreicht werden, also kein Sauerstoff für den Abbau mehr zur Verfügung steht. Nach dem aeroben Abbau folgt der Abbau über Denitrifikation, Manganreduktion und Eisen(III)reduktion (Tabelle 2).

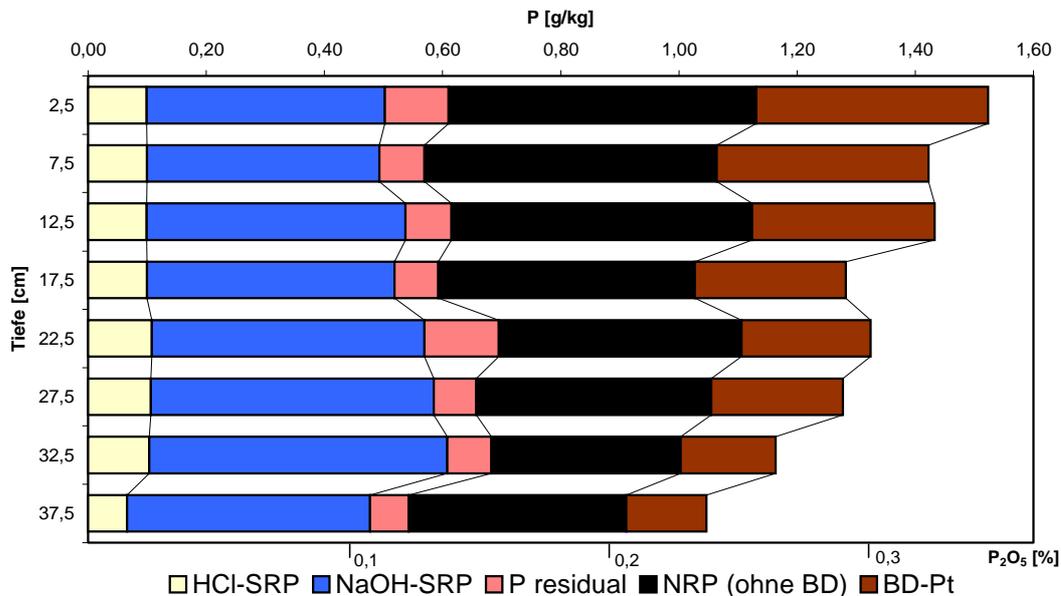


Abbildung 71: Konzentrationen der Bindungsformen von Phosphor, gemittelt über zwei Sedimentkerne des Jungferweiher, im Tiefenprofil. SRP: anorganisches Orthophosphat, NRP: organisch gebundenes Phosphat, Pt: Gesamtphosphor in dieser Fraktion

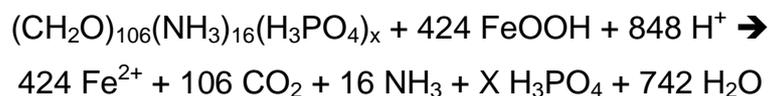
In Anbetracht frühdigenetischer Vorgänge im Sediment läßt sich der Verlauf der P-Fractionen mit der Sedimenttiefe als Folge des anaeroben mikrobiellen Abbaus organischer Substanz in Verbindung mit einer Eisenreduktion verstehen. An Eisenhydroxiden adsorbierte Phosphate gelangen nach der Reduktion von Eisen(III) in das Porenwasser, werden an andere Oberflächen gebunden und diffundieren in höhere Sedimentschichten. Dort können sie von nicht reduzierten Eisenhydroxiden oder frisch gefällten Eisenhydroxiden gebunden werden oder ins Freiwasser abgegeben werden. Analog zu der Abnahme der reaktiv löslichen Phosphate mit der Sedimenttiefe findet EHWALD (1995) auch eine Abnahme leicht reduzierbaren Eisens (s.o.). Dieses Modell erklärt auch die Anreicherung von Phosphor in der oberen Sedimentschicht, die im Jungferweiher trotz niedriger Einträge gefunden wird. Die gegen Hydroxidionen austauschbaren Phosphate sowie die säurelöslichen Phosphate sind redoxunabhängig, und geringe pH-Wert Schwankungen zwischen 6,8 und 7,8 (EHWALD 1995) im Porenwasser der 35 cm dicken Sedimentschicht (zwei Profile: Winter und Sommer) führen zu keiner Abnahme der P-Gehalte in dieser Fraktion.

Zur Bestätigung des Einflusses frühdiagenetischer Prozesse auf eine Phosphatfreisetzung lassen sich Porenwasserprofile des Jungferweiher heranziehen. Ammonium wird fast ausschließlich bei der Zersetzung von organischer Substanz freigesetzt; der Porenwassergehalt von Ammonium ist somit ein Parameter zur Abschätzung der Abbaurate. EHWALD (1995) findet in den Porenwasserprofilen einen starken Anstieg von Ammonium beim Übergang vom Freiwasser zum Porenwasser und einen weiteren Anstieg bis zur Grenzschrift Sediment-Talboden. Dies ist ein eindeutiger Hinweis auf das Stattfinden des Abbaus organischer Substanz auch in den unteren Sedimentzonen. Er berechnet aus dem Ammonium-Fluß über die Grenzschrift Sediment-Porenwasser und aus der Summenformel für organische Substanz eine Abbaurate von $424 \pm 66 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (Sommer) und eine Abbaurate von $120 \pm 40 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ im Winter. Die Nitratreduktion spielt im Sediment des Jungferweiher aufgrund niedriger Gehalte bereits in der obersten Sedimentzone nur eine untergeordnete Rolle. Der Abbau organischer Substanz kann also nur gekoppelt sein mit Mangan- und Eisenreduktion, Sulfatreduktion oder Fermentation.

Aus dem Abbau organischer Substanz von $424 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ im Sommer lassen sich ausgehend von einem P-Gehalt von 0,16% der organischen Substanz P-Freisetzungsraten von 0,7 bis $1,1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ berechnen. Dies entspricht jedoch nur einem Drittel bis der Hälfte der aus dem gleichen Porenwasserprofil berechneten P-Freisetzungsraten ohne Berücksichtigung der Annahme, daß ein Teil der freigesetzten Phosphate in der oberen Sedimentschicht zurückgehalten werden kann. Zu gleichem Ergebnis kommt man bei Berechnungen der P-Freisetzungsraten aus dem Winterprofil. Über die Hälfte des rückgelösten Phosphors muß also aus anderen Quellen als der organischen Substanz stammen.

Betrachtet man die Reduktion organischer Substanz (nach REDFIELD 1958) mit Eisen(III) als Reduktionsmittel wird die Bedeutung der Eisenreduktion für die Phosphatrücklösung deutlich:

Gleichung 11: Abbau organischer Substanz mit Eisen(III) als terminalem Elektronenakzeptor



X = 1 (REDFIELD 1958); $0,12 < X < 0,58$ (aus Angaben von MÜLLER et al. 1990, über die Phosphorgehalte organischer Substanz); X = 0,18 im Jungferweiher, berechnet über Gehalte an NRP und refraktärem Phosphor aus der sequentiellen Extraktion zweier Sedimentkerne

Bei der Freisetzung von einem Mol Phosphor aus P-reicher organischer Modellsubstanz (Phosphorgehalt von 0,87% nach REDFIELD, 1958) werden 424 Mol Eisen freigesetzt. Bei einem Eisen zu Phosphor Molverhältnis von 43:1 (abgeschätzter Maximalwert aus dem Verhältnis von Eisen und reduktiv löslichem Phosphor im Jungferweiher, oberer

Sedimenthorizont) werden fast 10 Mol Phosphor freigesetzt. Das heißt, ein Anteil der Eisenreduktion von 10% am Abbau der organischen Substanz reicht aus, um die gleichen Mengen an Phosphor aus beiden Bindungsformen freizusetzen. Bei Sedimenten mit P-ärmerer organischer Substanz, wie im Jungferweiher, verschiebt sich das Freisetzungspotential noch stärker auf die Seite der Eisenhydroxide.

Eine exakte Quantifizierung der Anteile der Bindungsformen an der Rücklösung läßt sich nicht vornehmen, da zum einen die P-Zusammensetzung des Sedimentes der tieferen Schichten zum Zeitpunkt der Sedimentneubildung unbekannt bleibt, sich zum anderen der P-Gehalt der organischen Substanz aus den Ergebnissen der sequentiellen Extraktion nur ungefähr abschätzen läßt und das Verhältnis von Eisen zu reduktiv löslichem Phosphor einen größeren Wert einnimmt, als das Verhältnis von (nicht bestimmtem) Eisen(III) zu Phosphor.

Zusammenfassend läßt sich dennoch feststellen, daß die Phosphor-Konzentrationen mit der Sedimenttiefe in den zwei untersuchten Sedimentkernen von den oberen 5 cm bis zu der Schicht zwischen 30 cm und 35 cm um etwa 350 mg/kg fallen. Eine Abnahme um etwa 200 mg/kg bis 230 mg/kg findet in der NRP-Fraktion und in der BD-Fraktion, also in der Fraktion organisch gebundener Phosphate und der reduktiv löslicher Phosphate, statt. Eine leichte Zunahme der Konzentration findet sich in der NaOH-SRP-Fraktion, also in der Fraktion der gegen Hydroxidionen austauschbaren Phosphate.

Ein Abbau der organischen Substanz konnte mittels Porenwasserprofilen von Ammonium bis in die unterste Sedimentschicht nachgewiesen werden und liegt (unter Verwendung der Summenformel für organische Substanz nach REDFIELD, 1958) zwischen $424 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ im Sommer und $120 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ im Winter. Aus der Berechnung des Phosphorgehaltes organischer Substanz mit Hilfe des sequentiellen Extraktionsverfahrens von etwa 1,6 g/kg läßt sich berechnen, daß nur etwa ein Drittel des aus dem Porenwasserprofil von Phosphor berechneten Phosphatfluxes von $2,2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ im Sommer und von $0,6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ im Winter über die Sediment-Wasser Grenze direkt aus der Mineralisierung organischer Substanz stammen kann.

Aus der Abschätzung des Eisen zu Phosphor Mol-Verhältnisses von 44 aus dem Verhältnis von Eisen zu reduktiv löslichem Phosphor geht hervor, daß bei Phosphorgehalten von 1,6 g/kg der organischen Substanz eine Beteiligung der Eisen(III)hydroxide als Elektronenakzeptoren von maximal 4% am Abbau der organischen Substanz ausreichen würde, die fehlenden 2/3 des berechneten Phosphatfluxes freizusetzen.

Die Eisenreduktion hat im Sediment des Jungferweiher aufgrund der Konzentrationsverhältnisse einen geringen Anteil am Abbau der organischen Substanz, spielt jedoch bezüglich der Phosphorfreisetzung eine bedeutende Rolle.

Die reduktiv lösliche P-Fraktion und die NRP-Fraktion fassen die Bindungsformen von Phosphor zusammen, die für eine Mobilisierung von Phosphor unter den Bedingungen, wie sie im Jungferweihersediment herrschen, in Frage kommen. Dazu gehören organisch gebundener Phosphor, der durch Mineralisierung freigesetzt wird und reduktiv löslicher Phosphor, der durch die anoxischen Verhältnisse insbesondere aus Eisenhydroxiden, die als terminale Elektronenakzeptoren bei der Mineralisierung eine Rolle spielen, mobilisiert wird.

5.3. Der Bodensee

5.3.1. Gesamtphosphor

Die Gesamtphosphorgehalte in den ungesiebten Proben eines Sedimentkerns aus dem Bodensee zwischen Utwil und Langenargen aus einer Tiefe von 252 m liegen zwischen 0,4% P_2O_5 und 0,16% P_2O_5 , der Mittelwert aller Meßwerte liegt bei 0,21%, der Mittelwert über den gesamten Sedimentkern unter Berücksichtigung des abnehmenden Wassergehaltes mit der Sedimenttiefe (Gleichung 12) liegt bei 0,17% P_2O_5 , der Mittelwert über die oberen 4 cm liegt bei 0,24%.

Gleichung 12: Berechnung der mittleren Konzentration

$$\bar{C} = \frac{\sum_1^n (h_n [cm] * DW_n [%] * C_n)}{\sum_1^n [h_n [cm] * DW_n [%]]}$$

- \bar{C} = mittlere Konzentration an P_2O_5
- h_n = Schichtdicke der Sedimentschicht n
- DW_n = Gehalt an Trockenmasse der Sedimentschicht n
- C_n = Konzentration an P_2O_5 der Schicht n

Es fallen deutlich die hohen Phosphorgehalte (Abbildung 72) im Oberflächenbereich, insbesondere in der obersten 0,5 cm dicken Sedimentschicht ins Auge.

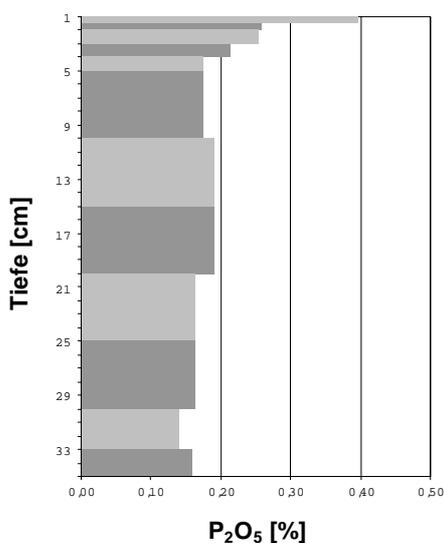


Abbildung 72: Phosphorgehalt eines Bodenseekerns

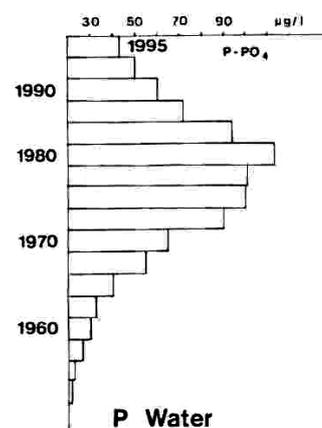


Abbildung 73: Entwicklung der Phosphor-Konzentration (Pges) im Rohwasser des Bodensee-Obersees (MÜLLER 1997)

Der Sedimentkern weist ab einer Tiefe von 32 cm eine tonige, graue Turbiditschicht auf, eine Folge der Trübstromsedimentation des Alten Rheines, welcher vor der Verlegung seiner Mündung 1900 das Sedimentationsgeschehen im tiefen Seebecken bestimmte (IGKB 1998), d.h. der Sedimentkern umfaßt einen Zeitrahmen von etwa 100 Jahren. Aus ¹³⁷Cäsium Aktivitätsbestimmungen berechnen die gleichen Autoren über die Maxima von 1986 (Tschernobyl) und 1963 (Kernwaffentests) Sedimentationsraten von 3-4 mm/a im zentralen Becken des Bodensees.

MÜLLER (1997) und die IGKB (1998) finden in Sedimentkernen des tiefen Beckens einen ähnlichen P-Verlauf im Sediment mit den höchsten Phosphor-Konzentrationen im obersten Sedimentzentimeter.

Vergleicht man den Verlauf des Phosphorgehaltes im Sediment zwischen 12 cm und 16 cm Tiefe bis zur Oberfläche mit dem Phosphorgehalt im Bodenseewasser in den letzten vier Jahrzehnten (Abbildung 73), kann man auch hier sehen, daß sich die seit den 80er Jahren gesunkenen Phosphor-Konzentrationen im Wasserkörper nicht in den P-Gehalten der jüngeren Sedimentschichten niederschlagen. Frühdiagenetische Prozesse müssen zu einer Rücklösung der bereits sedimentierten Phosphate und zu einer Anreicherung von Phosphor in der oberen Sedimentschicht geführt haben.

5.3.2. Bindungsformen

Der Phosphorgehalt des Oberflächensediments (gemittelt aus 0-4 cm Sedimenttiefe; n = 6) findet sich in einem Sedimentkern des Bodensees aus 252 m Tiefe zu 28% in der molybdatreaktiven HCl-Fraktion (Abbildung 74). Dieser relativ hohe Anteil an **säurelöslichem Phosphor** ist für einen Hartwassersee mit einem Gehalt von knapp 35% an CaCO_3 (MÜLLER 1997) in der oberen Sedimentschicht nicht verwunderlich. Bereits 1980 wurde die Phosphatelimination durch autochthone Calcitfällung im Bodensee-Obersee beschrieben (ROSSKNECHT 1980). Ordnet man den Phosphor in dieser Fraktion dem CaCO_3 zu, so ergibt sich daraus ein CaCO_3 :P Molverhältnis von 370:1 bzw. ein Phosphorgehalt des Calciumkarbonats von 0,08% (0,18% P_2O_5).

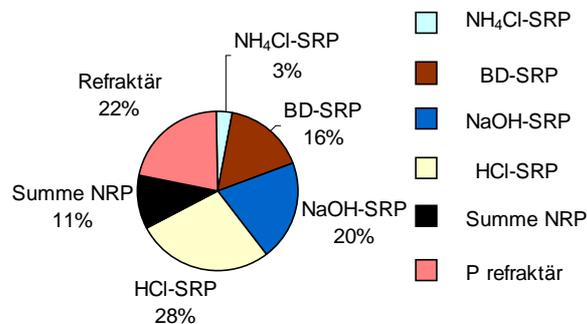


Abbildung 74: Zusammensetzung der Bindungsformen von Phosphor im Oberflächensediment (0-4 cm) eines Sedimentkernes aus dem tiefen Becken des Bodensees

Die zweitstärkste Fraktion im Oberflächensediment ist die der **nicht extrahierbaren P-Verbindungen** (22%), gefolgt von der NaOH-SRP-Fraktion (20%). Die refraktären P-Anteile bestehen z.T. aus schwer abbaubaren organischen Phosphorverbindungen. Da in einem Tiefsee im Gegensatz zu einem Flachsee die organischen Schwebstoffe zum großen Teil bereits im Wasserkörper aerob abgebaut werden, erreicht ein größerer Anteil an schwer abbaubaren organischen Verbindungen das Sediment. Dies erklärt auch den relativ geringen Anteil der **NRP-Fraktion** (11%) am Gesamtphosphor im Sediment. Ordnet man den nicht molybdatreaktiven Phosphor dem Gehalt an organischer Substanz im zentralen Becken des Bodensees (MÜLLER 1997) zu und legt einen Faktor von zwei zur Berechnung der organischen Substanz aus dem C_{org} -Gehalt zugrunde, findet man einen Phosphorgehalt (ohne refraktären Anteil) von 0,2% in der organischen Substanz der Oberflächenschicht, wobei die Gehalte zwischen 0,24% in der Schicht zwischen 0 und 0,5 cm (bei einem C_{org} -Gehalt von

32 g/kg) und 0,13% in der Zone zwischen 3 cm und 4 cm (bei einem C_{org} -Gehalt von 22 g/kg) schwanken. Die sinkenden Gehalte an (mit NaOH extrahierbarem) Phosphor der organischen Substanz mit der Tiefe weisen auf einen Abbau leichter mineralisierbaren Substrates oder auf einen größeren Anteil von phosphatspeichernden Sedimentbakterien gegenüber von organischer Materie pflanzlichen Ursprungs hin. Polyphosphat als P-Speicher von Sedimentbakterien (HUPFER, GÄCHTER & RÜEGGER 1995) konnte jedoch aufgrund hoher Nachweisgrenzen in den oberen 5 Millimetern des Sedimentkerns nicht gefunden werden (Abbildung 30).

Die **reduktiv löslichen Phosphate** machen in der 4 cm dicken Oberflächenschicht im Mittel nur 16% aus. Das Sediment ist bis in eine Tiefe von 2 cm hellbraun bis mittelbraun gefärbt, was auf Anwesenheit von Sauerstoff bzw. oxische Zustände schließen läßt. Erst unterhalb der 2 Zentimeter ist das Sediment von Eisen(II)sulfid schwarzbraun gefärbt.

Der als besonders leicht mobilisierbar geltende Phosphor aus der **NH₄Cl-Fraktion** liegt in der oberen Sedimentzone mit 3% vergleichsweise hoch (Abbildung 75 A). In Abbildung 75 B ist eine deutliche Abnahme mit der Sedimenttiefe zu beobachten: von 7% in den oberen 5 mm des Kerns sinkt sein Anteil mit der Tiefe, und bereits ab 3 Zentimetern liegt dieser Anteil der leicht austauschbaren, an Oberflächen adsorbierten Phosphate bei 1% und darunter.

In der Verteilung der Bindungsformen von Phosphor in dem 34 cm langen Sedimentkern, welcher einen Sedimentationszeitraum von etwa 100 Jahren widerspiegelt, finden sich deutliche Unterschiede.

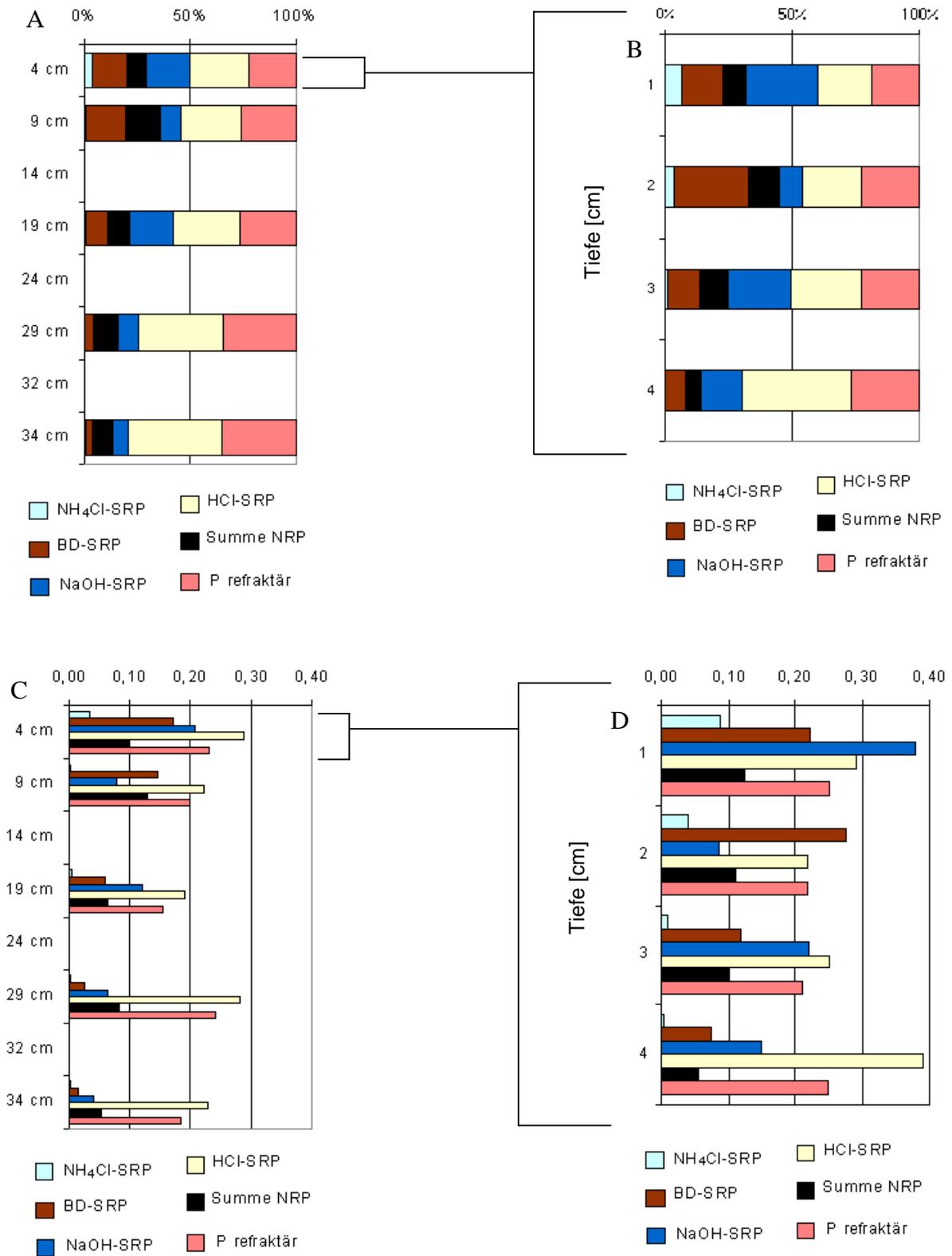


Abbildung 75 A, B: Anteile der Bindungsformen von Phosphor in Sedimenthorizonten des Bodensees (252 m Tiefe) in % von Gesamtphosphor

C, D: Konzentrationsprofile der Bindungsformen von Phosphor als P₂O₅ [%] in Sedimenthorizonten des Bodensees (252 m Tiefe)

Trotz ähnlich hoher Konzentrationen an BD-Phosphor in den oberen zwei Sedimentzentimetern macht diese Fraktion im obersten Zentimeter nur 16% des Gesamtphosphors aus, in der Schicht von 1 cm bis 2 cm dagegen 29% (Abbildung 75 B). Dies könnte ein Hinweis auf eine frische Ausfällung von Eisen(III)hydroxiden an der Redoxgrenzschicht sein, die eine hohe Adsorptionskapazität für Phosphat haben. In der oberen Schicht könnte eine Sättigung der Eisenhydroxide bezüglich der Phosphatadsorption vorliegen. Danach könnte aus tieferen anoxischen Horizonten rückgelöstes Phosphat nicht mehr vollständig von den Eisen(III)hydroxiden der oxischen Zone zurückgehalten werden. Berechnungen zur Phosphorfreisetzung aus Profundalsedimenten des Bodensees mit oxischer Oberflächenschicht von $1,4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ bis $2,7 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ (SROCZYNSKI 1996) und die hohen Gehalte an leicht austauschbarem, adsorbiertem Phosphor in der oberen Sedimentschicht sind ebenso mögliche Hinweise auf die fehlende Adsorptionskapazität der Eisen(III)hydroxide in der oberen Sedimentlage. Relativ hohe Anteile an BD-SRP finden sich noch in der Sedimentlage von 4 cm bis 9 cm Tiefe (Abbildung 75 A), die den Zeitraum von Anfang der 70er Jahre bis Mitte der 80er Jahre, also den Zeitraum des Eutrophierungsmaximums im Bodensee umfaßt.

Die gegen **Hydroxidionen** austauschbaren Phosphate machen zwischen 8% und 28% des Gesamtphosphors aus, wobei die höchsten Gehalte im obersten Zentimeter gefunden werden, die niedrigsten in der Turbiditschicht. Ein tendenzieller Verlauf ist mit der Tiefe nicht erkennbar.

Der „**nicht molybdatreaktive Phosphor**“ als Maß für organisch gebundenen Phosphor liegt im obersten Sedimentzentimeter in Konzentrationen von 0,12 g P/kg vor, die Konzentration nimmt möglicherweise als Folge der Mineralisierung oder der Verdünnung durch allochthones Material, welches bei dem Hochwasserereignis 1987 in den See gelangte (IGKB 1998), bis in 4 cm Tiefe auf 0,05 g/kg ab (Abbildung 75 D). In der Schicht zwischen 4 cm und 9 cm Tiefe, der Schicht des Eutrophierungsmaximums, findet sich auch ein Maximum in den Gehalten an NRP. Im weiteren Verlauf unterhalb liegen die Gehalte wieder deutlich niedriger. MÜLLER (1997) findet in einem Sedimentkern aus dem tiefen Becken des Bodensees aus dem Jahre 1995 die höchsten Gehalte an organischem Kohlenstoff (ca. 3%) in dem obersten Sedimentzentimeter und in einer Tiefe von 5 cm bis 10 cm, die niedrigsten Gehalte ab einer Tiefe von 16 cm ($< 1,7\%$), was einen Zusammenhang zwischen NRP und der organischen Substanz bestätigt.

Die **refraktären Anteile** sind in ihren Konzentrationen nur geringen Schwankungen unterworfen, ihr Anteil nimmt jedoch bei abnehmenden Gesamtphosphorgehalten von 19% (0 cm bis 1 cm) auf 35% (32 cm bis 34 cm) des Gesamtphosphors zu (Abbildung 75 C, D).

Zusammenfassend läßt sich festhalten, daß die Phosphorgehalte des Bodensees im untersuchten Sediment trotz gesunkener Einträge und Eintragskonzentrationen in der jüngsten Oberflächenzone am höchsten sind. Sowohl der Anteil der Phosphate in der HCl-SRP-Fraktion als auch die der nicht extrahierbaren Phosphate (refraktär), die beide als schwer mobilisierbar gelten, nehmen (mit einer Ausnahme in der Zone 3 cm bis 4 cm) mit der Sedimenttiefe von zusammen 40% (0-1 cm) auf 78% (32 - 34 cm) zu. Die als besonders leicht mobilisierbar geltenden, mit Ammoniumchlorid extrahierbaren Phosphate finden sich in Anteilen von 6,5% bis zu einem Prozent nur in den oberen drei Sedimentzentimetern.

Die als potentiell mobilisierbar beschriebenen Fraktionen der reduktiv löslichen Phosphate und der „nicht molybdatreaktiven“ Phosphate haben maximale Anteile von zusammen 41% in der Schicht zwischen 1 cm und 2 cm (Redoxgrenzschicht) und 37% in der Zone zwischen 4 cm und 9 cm (Eutrophierungszeitraum). In den tieferen Zonen nimmt ihr Anteil auf 14% ab. Bedingt durch den hohen Nährstoffeintrag in den Bodensee in den 70er und 80er Jahren haben sich große Mengen an Phosphor im Sediment eingelagert, von denen Teile unter den gegebenen Bedingungen zurückgelöst werden können. Die oxische Sedimentschicht ist nur in der Lage einen Teil der gelösten Phosphate aus dem Porenwasser neu zu binden.

5.4. Gewässersedimente im Pantanal, Brasilien

Es wurden fünf Sedimentkerne aus dem Pantanal, Brasilien, untersucht. Vier Sedimentkerne stammen aus drei Flachseen im Überschwemmungsgebiet des Rio Cuiabá, ein Kern stammt aus dem Rio Paraguai.

5.4.1. Gesamtphosphor in der Fraktion < 20 µm

Im Baía de Burro liegen die P_2O_5 -Konzentrationen im Oberflächensediment bei 0,13% und somit noch unterhalb der von TUREKIAN & WEDEPOHL (1961) bestimmten Konzentrationen für Tongesteinstandard (0,16%), der häufig als Referenzwert für den geogenen Background herangezogen wird. Mit 0,19% P_2O_5 liegt auch die Konzentration in der Oberflächensedimentprobe des Rio Paraguai noch vergleichsweise niedrig.

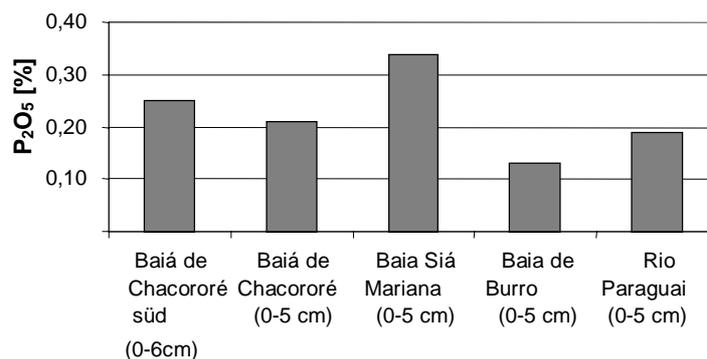


Abbildung 76: Gesamtphosphor (als P_2O_5) in Oberflächensedimentproben (<20 µm) im Pantanal

Im Baía de Chacororé liegen die P_2O_5 -Konzentrationen in den Oberflächensedimenten zwischen 0,21% und 0,25% P_2O_5 und damit im Bereich der in einem russischen Naturschutzgebiet gelegenen anthropogen unbelasteten Sedimente. Die höchsten Konzentrationen an P_2O_5 finden sich in den Proben des Schwarzwassersees Baía Siá Mariana mit 0,34%. Alle untersuchten Oberflächensedimentproben fallen somit bezüglich Phosphor in die I_{geo} -Klasse 0 und 1, gelten somit als „praktisch unbelastet“ bzw. „unbelastet bis mäßig belastet“ mit dem Nährstoffelement Phosphor.

Die P_2O_5 -Konzentrationsprofile in den Sedimentkernen sind in Abbildung 77 dargestellt. Die höchsten Konzentrationen finden sich im Baía Siá Mariana und dort in den Sedimentschichten unterhalb von 20 cm Tiefe (bis zu 0,67% P_2O_5). In diesem Sedimentkern verdoppeln sich die Konzentrationen mit der Tiefe und die Sedimentschichten zwischen 20 cm und 35 cm fallen in I_{geo} -Klasse 2, sind bezüglich Phosphor folglich „mäßig belastet“.

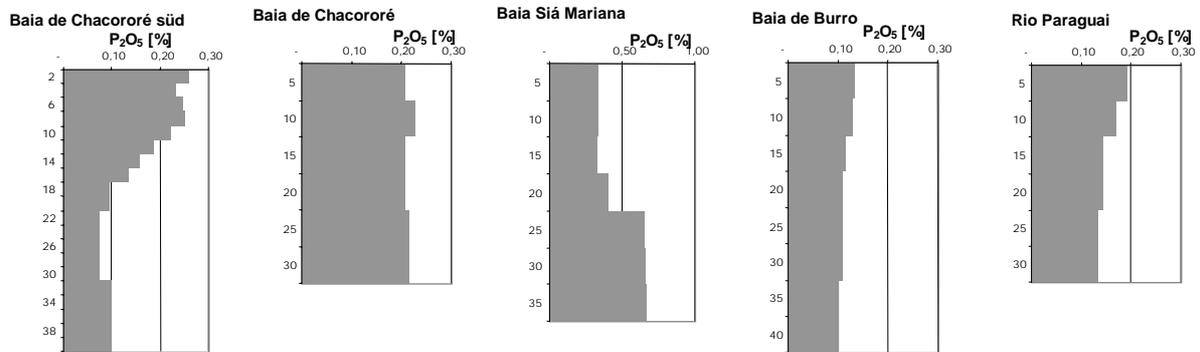


Abbildung 77: Konzentrationsverlauf von P_2O_5 [%] mit der Tiefe [cm] in 5 Sedimentkernen aus dem Pantanal (Fraktion $<20 \mu m$).

Dieser ungewöhnliche Konzentrationsverlauf deutet auf eine unterschiedliche Zusammensetzung und Herkunft des Materials in diesem Kern hin.

Eine Konzentrationsabnahme mit der Sedimenttiefe ist im Baía de Burro, im Rio Paraguai und ganz deutlich im Süden des Baía de Chacororé zu erkennen, während sich die P_2O_5 -Konzentration im nördlicheren Teil des Baía de Chacororé kaum mit der Tiefe ändert.

Um mehr über die Zusammensetzung der Sedimente zu erfahren, werden die vom Institut für Umwelt-Geochemie bestimmten Elementgehalte herangezogen.

In den tieferen Sedimenthorizonten vom Sedimentkern des Schwarzwassersees Baía Siá Mariana fallen neben den hohen Phosphor-Konzentrationen noch die höchsten Konzentrationen an Co, Cr, Cu, Li, Ni und Pb auf, die um die Faktoren 1,5 bis 2,3 über dem Median aller Proben dieser Region liegen (Tabelle im Anhang).

Nimmt man bei einer Korrelationsanalyse diesen Sedimentkern aus, finden sich hohe bis sehr hohe Korrelationen zwischen Phosphor und den Elementen geogener Herkunft Eisen, Kobalt und Mangan. Auch Quecksilber weist, wie häufig beobachtet, eine hohe Korrelation zu P auf.

Tabelle 33: Minimum, Maximum, Mittelwert und Median für folgende Elemente der 32 Proben aus Pantanal (<20 µm) sowie der Korrelationskoeffizient r (dimensionslos) für Phosphor und den entsprechenden Elementen für alle Proben (n = 25) ohne Kern Baía Siá Mariana. Schwermetalle bestimmt vom Institut für Umwelt-Geochemie Heidelberg

	P ₂ O ₅ [%]	Cd mg/kg	Co mg/kg	Cu mg/kg	Fe [%]	Hg mg/kg	Li mg/kg	Mn mg/kg	Ni mg/kg	Pb mg/kg	Zn mg/kg	C [%]
Min	0,08	< 0,01	6	8	0,7	0,01	12	120	9	14	15	0,41
Max	0,67	0,72	24	40	4,0	0,09	32	1343	37	29	91	5,88
MW	0,24	0,07	14	19	2,6	0,05	17	478	18	20	56	2,64
Med	0,20	0,04	13	18	2,5	0,05	15	333	16	19	55	2,35
Korr		0,41	0,88	0,45	0,9	0,79	0,07	0,92	0,48	0,31	0,66	0,2

Die hohen Korrelationskoeffizienten für Phosphor und Eisen sowie für Phosphor und Mangan weisen auf eine überwiegend geogene Herkunft des Phosphors sowie auf eine enge Verknüpfung von Phosphor und Eisen im Sediment.

5.4.2. Gesamtphosphor

Die Gehalte an P_2O_5 in den ungesiebten Oberflächensedimenten (bis 5 cm bzw. 6 cm Tiefe) liegen zwischen 0,09% im Baía de Burro und 0,27% im Baía Siá Mariana, einem huminstoffreichen Schwarzwassersee.

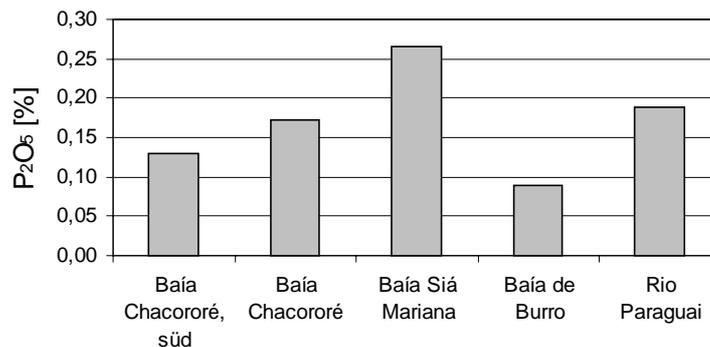


Abbildung 79: Gehalte an P_2O_5 (ungesiebte Oberflächenproben) in vier Seesedimenten und einem Flußsediment im Pantanal

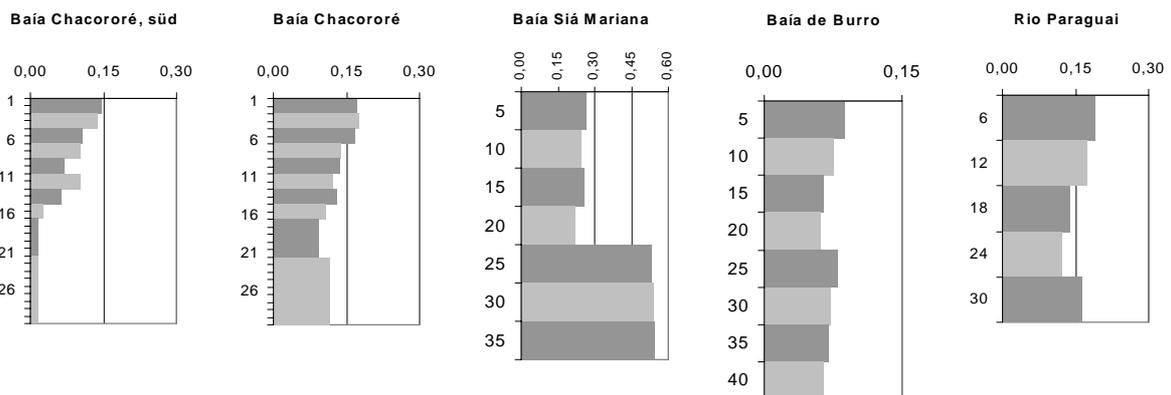


Abbildung 78: Konzentrationsverlauf von P_2O_5 [%] mit der Tiefe [cm] in 5 Sedimentkernen aus dem Pantanal (ungesiebte Proben)

Der Konzentrationsverlauf mit der Tiefe weist in einigen der Proben Parallelen auf. Die P_2O_5 -Gehalte nehmen von der obersten Schicht bis etwa in 20 cm Tiefe ab. Am größten ist der Konzentrationsgradient im Kern des südlichen Baía Chacororé, wobei hier der zunehmende Sandgehalt in der Tiefe die Konzentrationen beeinflusst. Unterhalb von 20 cm bzw. 24 cm Tiefe finden sich in den Sedimenten vom Baía Siá Mariana, abgeschwächt und nur in den ungesiebten Proben auch in den Sedimenten vom Baía de Burro und vom Rio Paraguai, wieder Lagen mit höheren Phosphor-Konzentrationen.

5.4.3. Bindungsformen

Die über die sequentielle Extraktion ermittelten Bindungsformen sind in Anteilen und Gehalten in Abbildung 80 dargestellt. Allen Sedimenten ist ein geringer Gehalt von **säurelöslichen Phosphaten** bis maximal 3% vom Gesamtphosphor gemein. Der Anteil der **reduktiv löslichen P-Fraktion** liegt in allen Proben zwischen 26% und 37% und ist somit stärkste bzw. zweitstärkste Fraktion.

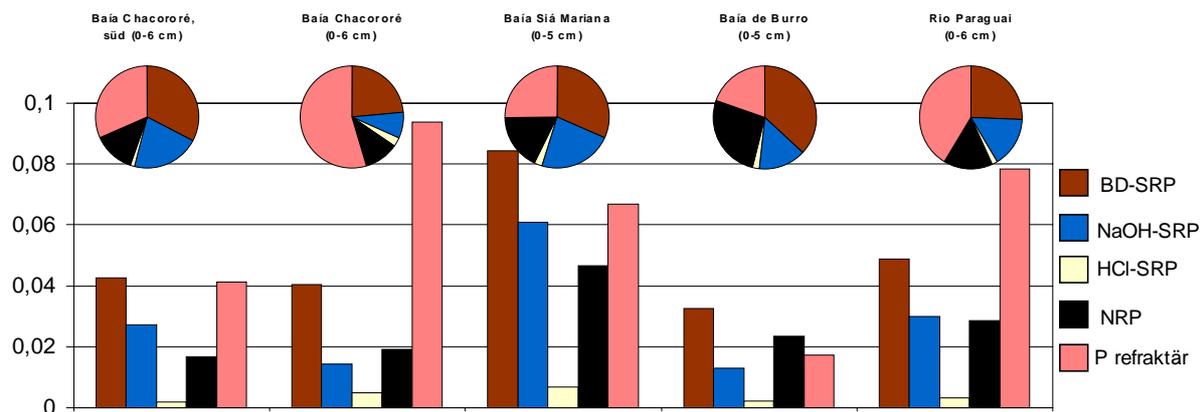


Abbildung 80: Bindungsformen von Phosphor in fünf Oberflächensedimenten (bis 5 cm bzw. 6 cm Tiefe) aus dem Pantanal in Anteilen am Gesamtphosphor (Kreisdiagramme) und in Gehalten an P₂O₅ [%] (Balkendiagramm). Refraktäre Anteile sind berechnet.

Die **nicht molybdatreaktiven Phosphate** machen zwischen 11% und 26% vom Gesamtphosphor aus. Die höchsten Gehalte finden sich im Schwarzwassersee Baía Siá Mariana (0,05% P₂O₅ bei einem Anteil von 18% an P gesamt), die höchsten Anteile im phosphorarmen Sediment des Baía de Burro. Die **gegen Hydroxidionen austauschbaren molybdatreaktiven Phosphate** machen zwischen 8% und 23% aus, und die P-Gehalte dieser Fraktion liegen in jeder Probe deutlich unter den P-Gehalten der BD-SRP-Fraktion und den refraktären P-Gehalten. Die höchsten Gehalte und Anteile dieser Fraktion finden sich im P-reichen Sediment des Baía Siá Mariana. Die Anteile **nicht extrahierbaren Phosphors** liegen zwischen 20% und 55% und sind in einem Kern des Baía Chacororé und im Rio Paraguai stärkste Fraktion.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die potentiell mobilisierbaren Phosphorfraktionen (BD-SRP und Summe NRP) zusammen zwischen 34% und 63% des Gesamtphosphors in den Sedimenten ausmachen und somit trotz teilweise geringer Konzentrationen eine Rücklösung mobilisierbarer Phosphate aus den Sedimenten von Bedeutung sein sollte.

Im folgenden soll die Änderung der Zusammensetzung des P-Pools mit der Tiefe in den untersuchten Sedimentkernen betrachtet werden. Dabei soll nicht auf jede Fraktion im einzelnen eingegangen werden, sondern es sollen deutliche Änderungen, Unterschiede und Gemeinsamkeiten herausgestellt werden.

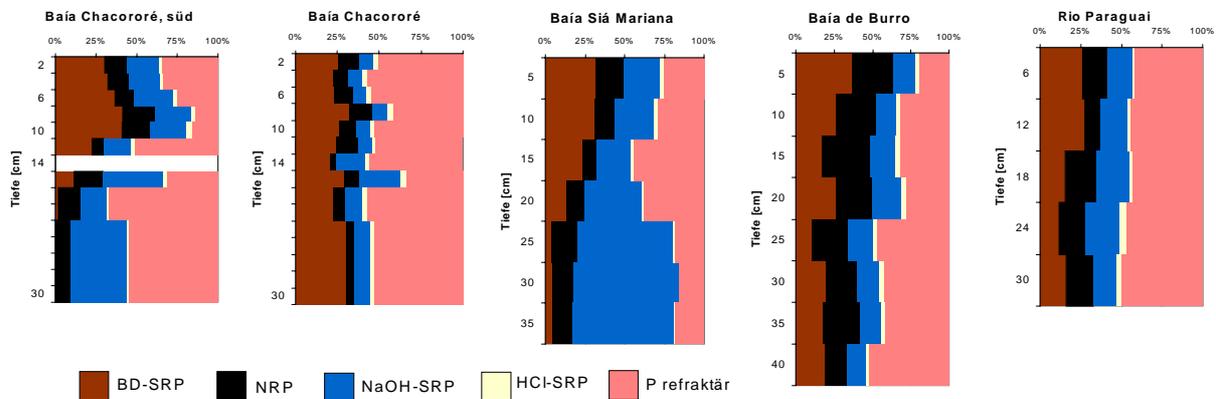


Abbildung 81: Bindungsformen von Phosphor in fünf Sedimentkernen aus dem Pantanal, Brasilien

Im Süden des Baía Chacororé ist die BD-SRP-Fraktion in den oberen 10 cm die dominierende. In den tieferen, sandigen und P-armen Schichten dominieren die nicht extrahierbaren Anteile und die NaOH-SRP-Fraktion.

Im anderen Kern aus dem Baía Chacororé verändert sich die P-Zusammensetzung mit der Tiefe kaum.

Im Baía Siá Mariana nehmen die Anteile der reduktiv löslichen Phosphate bis in 20 cm Tiefe auf die Hälfte ab. Ein deutlicher Wechsel in der P-Zusammensetzung findet sich ab 20 cm Tiefe. Ab hier macht der gegen Hydroxidionen austauschbare P-Anteil über 50% vom Gesamtphosphor aus, die reduktiv löslichen Phosphate liegen bei nur noch 4%. Ab dieser Tiefe sind auch die Phosphorgehalte etwa doppelt so hoch wie darüber (Abbildung 78).

Im Baía de Burro nimmt der Anteil reduktiv löslicher Phosphate ebenfalls deutlich mit der Tiefe ab, der Anteil refraktärer Phosphate nimmt dagegen zu.

Auch im Rio Paraguai ist eine Abnahme der Anteile der BD-SRP-Fraktion zugunsten der refraktären Anteile zu erkennen.

Verfolgt man den Verlauf der Anteile, die jede einzelne Fraktion in allen Proben am Gesamtphosphor ausmacht, mit der Tiefe und läßt dabei die Proben aus dem Baía Siá Mariana unterhalb von 20 cm Tiefe außer acht, die vermutlich mit ihren hohen Phosphorgehalten anderen Ursprungs sind und deren abweichende P-Zusammensetzung vermutlich nicht Folge frühdiagenetischer Prozesse ist, kann man deutliche Tendenzen erkennen.

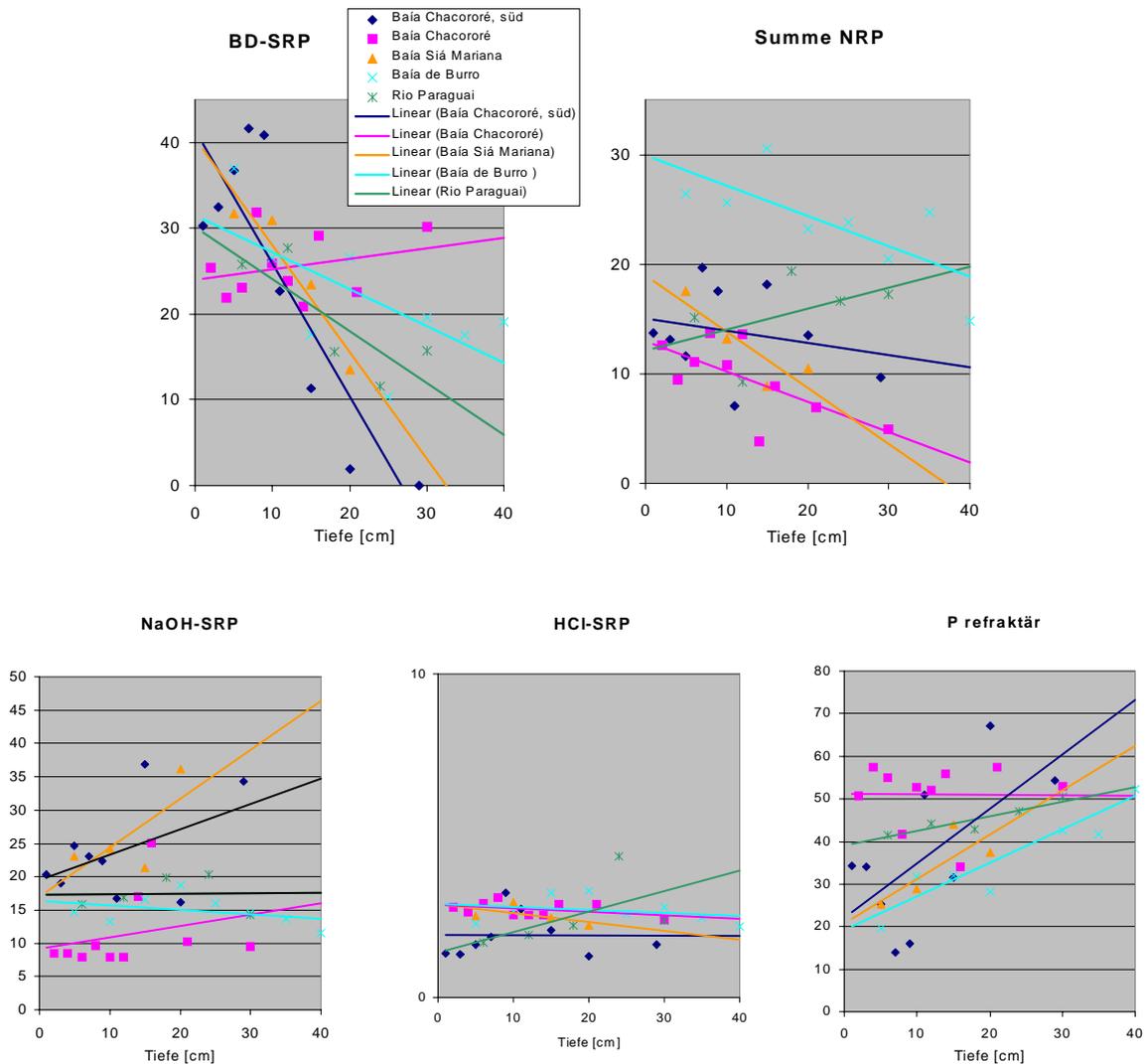


Abbildung 82: Anteile der P-Fractionen am Gesamtphosphor [%] mit der Tiefe in 5 Sedimentkernen aus dem Pantanal mit zugehörigen linearen Trendlinien

Die Anteile **reduktiv löslicher Phosphate** in allen Sedimentkernen mit Ausnahme eines Kerns aus dem Baía Chacororé nehmen rasch mit der Tiefe ab (Abbildung 82, BD-SRP). Eine teilweise schwächer abnehmende Tendenz zeigt sich für die Phosphate der **NRP-Fraktion** mit Ausnahme der Proben im Rio Paraguai (leichter Anstieg).

Als eher konstant oder ansteigend erweist sich der Verlauf der Anteile der anderen Fraktionen. Die Anteile der **NaOH-SRP-Fraktion** nehmen in den Kernen des Baía Chacororé leicht zu. Eine deutliche Zunahme findet sich im Baía Siá Mariana. In den beiden anderen Kernen bleiben die Anteile relativ konstant.

Die Anteile der **HCl-Fraktion** am Gesamtphosphor sind sehr gering. Eine leichte Zunahme findet sich nur im Rio Paraguai. **Die refraktären Anteile** nehmen tendenziell in allen Sedimenten mit der Tiefe zu, nur in einem Kern des Baía Chacororé bleiben sie konstant.

Die Eisen-zu-(reduktiv löslichem)-Phosphor-Molverhältnisse liegen in den untersuchten Oberflächensedimenten zwischen 59 und 77, im P-reichen Oberflächensediment des Baía Siá Mariana bei 37.

In vier der fünf untersuchten Sedimentkerne nehmen sowohl die Eisengehalte als auch die Anteile reduktiv löslichen molybdatreaktiven Phosphors (BD-SRP) tendenziell mit der Sedimenttiefe ab. Die Eisen zu BD-SRP-Molverhältnisse nehmen dagegen mit der Tiefe zu, was auf die Theorie der Phosphorfreisetzung durch Eisenreduktion mit teilweise anschließender Festlegung von Eisen in reduzierter Form hinweist.

Abschließend ist festzuhalten, daß in den untersuchten brasilianischen Sedimentkernen die Anteile potentiell mobilisierbarer Phosphate mit der Tiefe abnehmen, während die schwerer mobilisierbaren Anteile zunehmen. Eine beobachtete tendenzielle Abnahme der Gesamtphosphorgehalte ist hier vermutlich durch die Rücklösung von Phosphor aus der BD-SRP- und der NRP-Fraktion durch mikrobiellen Abbau und reduzierende Verhältnisse im Sediment bedingt. Diese beiden Fraktionen stellen zwischen einem Drittel und mehr als die Hälfte des vergleichsweise geringen P-Gehaltes im Sediment.

5.5. Seesedimente in Peking

Die vier untersuchten Flachseen liegen alle im Stadtgebiet von Peking und ähneln sich bezüglich Größe, Nutzung und der Nutzung des Einzugsgebietes.

5.5.1. Gesamtphosphor

Die geringsten Gesamtphosphorgehalte der gemessenen 12 Sedimentproben (ungesiebt) der vier Flachseen liegen bei 0,08% P_2O_5 in den sandigen Oberflächensedimenten des Kunming Sees. In den Oberflächensedimenten des Shui Zhui Sees liegen die P_2O_5 -Gehalte bei 0,19%, im Yuyuantan See im Mittel bei 0,23% und im Beihai See bei 0,29%. Die höchsten Konzentrationen finden sich mit 0,46% P_2O_5 in tieferen Sedimentschichten des Beihai Sees. Die Mittelwerte aller gemessenen Proben liegt ebenso wie der Median bei 0,25% P_2O_5 mit einer Standardabweichung von 0,09.

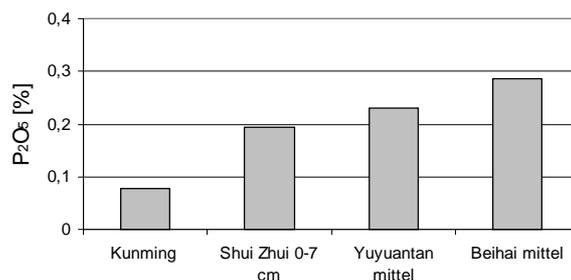


Abbildung 83: P_2O_5 -Konzentrationen in ungesiebten Oberflächenproben von vier Stadtseen in Peking

Der Konzentrationsverlauf in den zwei Sedimentkernen zeigt bezüglich Phosphor einen Anstieg mit der Tiefe an.

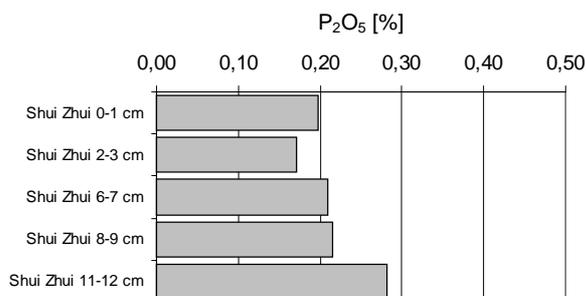


Abbildung 84: Konzentrationsprofil von P_2O_5 in einem Sedimentkern des Shui Zhui Sees

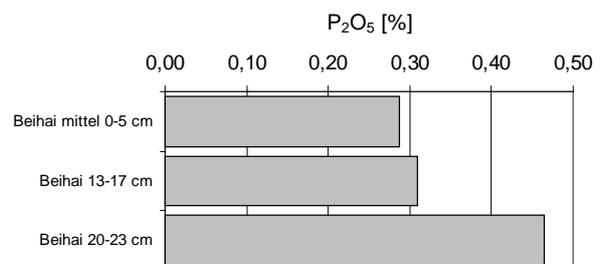


Abbildung 85: Konzentrationsprofil von P_2O_5 in einem Sedimentkern des Beihai Sees

5.5.2. Bindungsformen

Die Ergebnisse der sequentiellen Extraktion zeigen, daß die säurelöslichen Phosphate in allen Proben dominieren. Sie machen in den Oberflächenproben zwischen 58% bis zu 81% der extrahierbaren Phosphate aus. Die gegen Hydroxidionen austauschbaren Phosphate liegen in den oberen 5 cm bzw. 7 cm der Sedimente zwischen 6% und 19% (ohne refraktären Anteil), die nicht molybdatreaktiven zwischen 7% und 19%, die reduktiv löslichen Phosphate liegen in keiner Probe über 4% der extrahierbaren Phosphate.

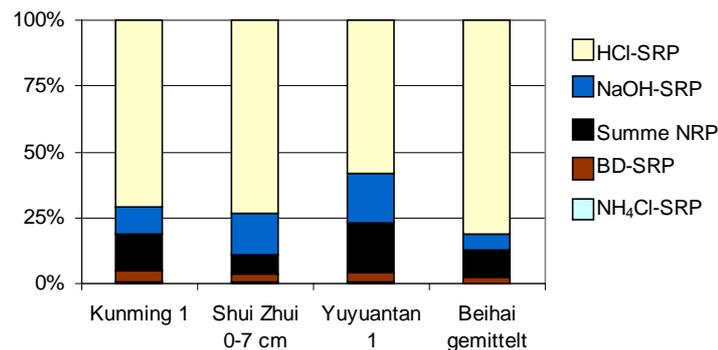


Abbildung 86: Anteile der verschiedenen P-Fractionen an der Summe dieser Fractionen in Oberflächensedimenten verschiedener Seen

Die besonders leicht mobilisierbare P-Fraktion liegt in keiner Probe über einem Prozent, die potentiell mobilisierbaren reduktiv löslichen und organischen (nicht molybdatreaktiven) Phosphate machen zusammen nur zwischen 10% und 23% aus, d.h. der größte Anteil des Phosphors in diesen Seen ist schwer mobilisierbar. Rechnet man noch den nicht bestimmten refraktären P-Anteil in diesen Proben dazu, verringert sich der Anteil der potentiell mobilisierbaren Fractionen entsprechend. Die Anteile der reduktiv löslichen Phosphate und

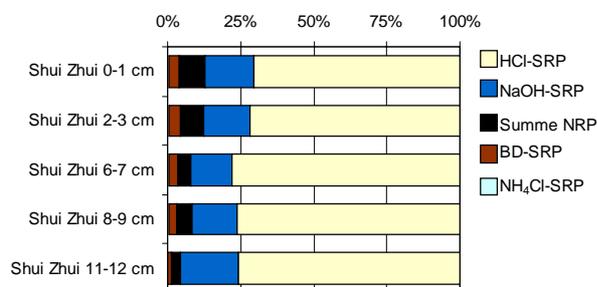


Abbildung 87: Anteile der verschiedenen P-Fractionen an der Summe dieser Fractionen in einem Sedimentkern des Shui Zhui Sees

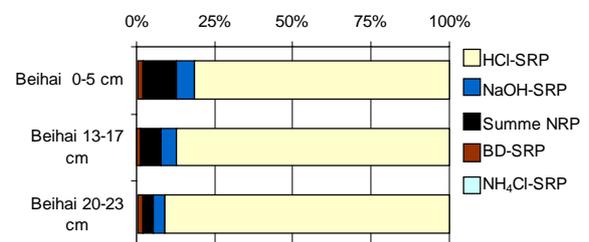


Abbildung 88: Anteile der verschiedenen P-Fractionen an der Summe dieser Fractionen in einem Sedimentkern des Beihai Sees

der organisch gebundenen Phosphate nimmt in den zwei untersuchten Sedimentkernen von der Oberflächenschicht (10% bzw. 12%) tendenziell bei steigenden Gesamtphosphorgehalten mit der Tiefe (5% bzw. 4% in 20 cm bzw. 11 cm Tiefe) ab. Eine Rücklösung sedimentgebundener Phosphate über den Abbau organischer Substanz oder reduktive Bedingungen im Sediment ist in diesen Seen dennoch aufgrund seiner Zusammensetzung in größerem Umfang nicht zu erwarten.

5.6. Gewässersedimente in Rußland

In Rußland wurden die Sedimente der Kljasma mit einer hohen Probendichte von 40 Proben auf einer Strecke von etwa 200 km beprobt. Des weiteren wurden Sedimente von neun Nebenflüssen der Kljasma in 16 Proben untersucht. In der Wolga wurden zwischen dem Gorki Stausee und dem Wolgograd Stausee auf einer Strecke von 1 700 km 83 Sedimentproben genommen. Aus neun Nebenflüssen der Wolga wurden 20 Sedimentproben in Mündungsnähe genommen. Vier Proben stammen aus der Oka und der Moskwa um die Stadt Kolomna, 16 Sediment- und Bodenproben wurden in einem Naturschutzgebiet an der Oka genommen. Von insgesamt 179 Proben wurde in 178 Proben der Phosphorgehalt in der Fraktion $< 20 \mu\text{m}$ bestimmt, in 136 Proben wurde der Phosphorgehalt in der ungesiebten Probe bestimmt, und 91 Proben wurden einer sequentiellen Extraktion zur Bestimmung der Bindungsformen von Phosphor unterzogen.

Zunächst soll ein Überblick über die Phosphorgehalte der untersuchten Sedimente in der Fraktion $< 20 \mu\text{m}$ gegeben werden, um dann auf P-Gehalte von gesiebten und ungesiebten Proben und auf die Verteilung dieser P-Gehalte auf die operationell definierten Bindungsformen in einzelnen Flüssen bzw. Flußabschnitten einzugehen.

5.6.1. Überblick über die Phosphorverteilung in Sedimenten einiger Gewässersysteme in Rußland (Fraktion $< 20 \mu\text{m}$)

Als erste Bewertungsgrundlage wird die Einteilung der limnischen Sedimente bezüglich Phosphor in I_{geo} -Klassen vorgenommen (Gleichung 8). Abbildung 89 gibt eine geographische Übersicht der beprobten Gebiete und stellt die Einteilung der Sedimente in I_{geo} -Klassen dar.

Auffallend sind die hohen P_2O_5 -Konzentrationen in den Sedimenten der Kljasma (I_{geo} -Klasse 2 bis 5), welche zwischen 0,64% und 3,85% liegen und in einigen Proben sogar die P_2O_5 -Gehalte von Klärschlamm (Tabelle 28) erreichen.

In I_{geo} -Klasse 4 fallen eine Probe aus der Moskwa und eine Probe aus der Oka im Mündungsbereich der Moskwa. Während die Sedimente der Oka vor der Mündung der Moskwa bei Kolomna in I_{geo} -Klasse 1 fallen, liegen die Sedimente der Oka dahinter in I_{geo} -Klasse 2. Die Sedimentproben aus dem See Protokskoye, dessen Einzugsgebiet in einem Naturschutzgebiet bei Serpuchow anthropogen relativ unbeeinflusst ist, fallen im Mittel (0,21% P_2O_5) in I_{geo} -Klasse Null.

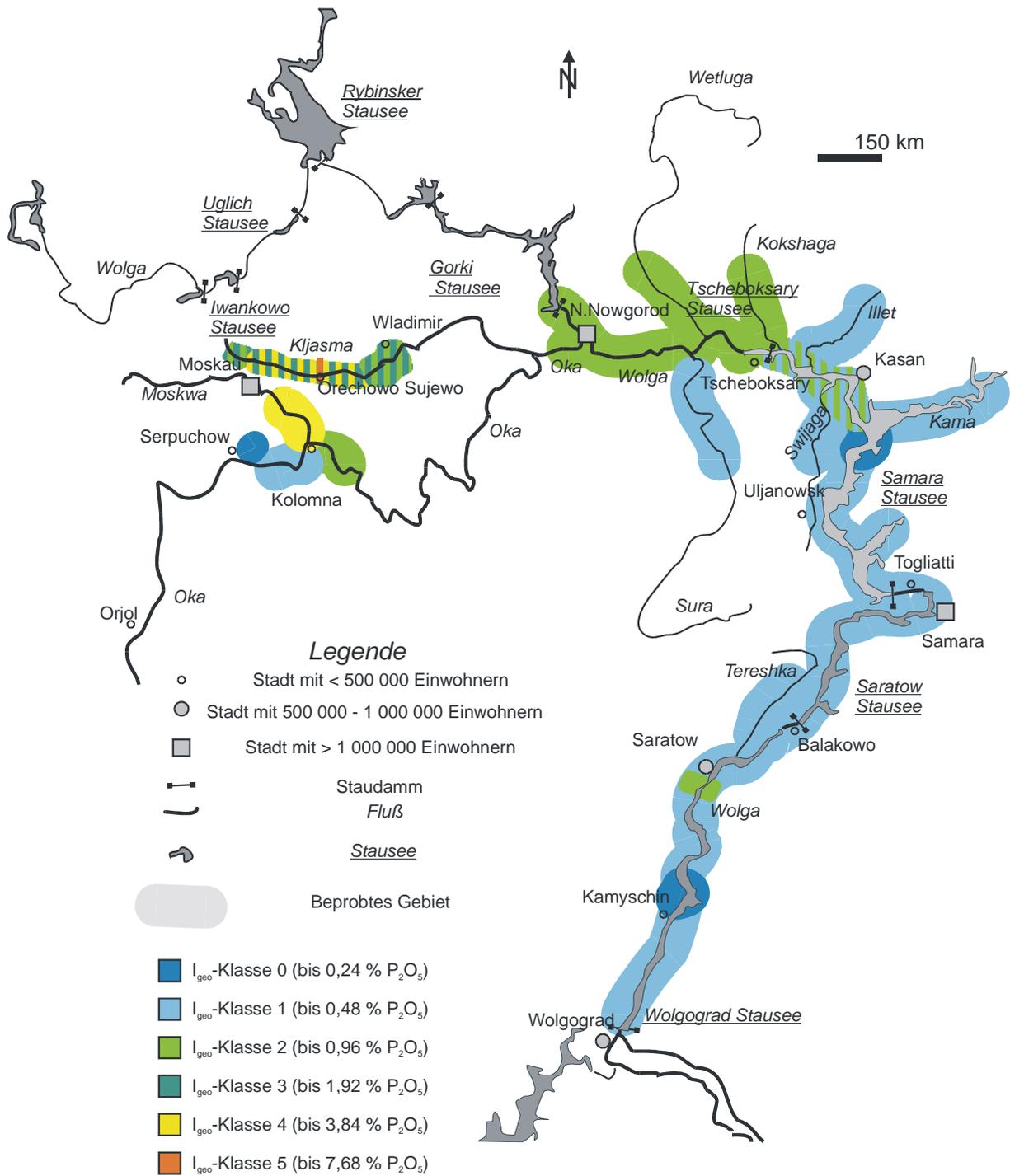


Abbildung 89: P₂O₅-Konzentrationen in limnischen Sedimenten in Rußland (< 20 µm)

Die Sedimente der Wolga fallen bezüglich Phosphor im Norden zwischen dem Gorki Stausee und dem Tscheboksary Stausee in I_{geo} -Klasse 2, zwischen dem Tscheboksary Stausee und der Kama in I_{geo} -Klasse 1 und 2, flußabwärts dann in I_{geo} -Klasse 1, vereinzelt in I_{geo} -Klasse 0. Nur hinter der Stadt Saratow finden sich nochmals Sedimente der I_{geo} -Klasse 2.

Abbildung 89 macht deutlich, daß der Oberlauf der Wolga zwischen dem Gorki Stausee und der Kama sowie ihre Nebenflüsse Oka, Wetluga, Kokshaga im allgemeinen stärker mit Phosphor belastet sind als der Unterlauf zwischen der Kama und dem Wolgograd Stausee. Besonders hohe P-Konzentrationen finden sich in den Sedimenten der Moskwa und der Kljasma, welche beide das nördliche Einzugsgebiet der Oka in der Moskauer Region entwässern.

5.6.2. Kljasma

Gesamtphosphor in der Fraktion < 20 µm

Die P₂O₅-Gehalte der Sedimente der Kljasma und der beprobten Nebenflüsse liegen überdurchschnittlich hoch. Alle Sedimentproben der Kljasma fallen in die I_{geo}-Klasse 2 bis 5, sind also „mäßig belastet“ bis „stark bis übermäßig belastet“ bezüglich Phosphor.

Tabelle 34: Ergebnisse der Phosphorbestimmung in den Sedimenten (< 20 µm) der Kljasma und ihrer Nebenflüsse

Anzahl n	Min	Max	Mittelwert	Median	90er Perzentil	Standardabwn
56	0,13% P ₂ O ₅	3,85% P ₂ O ₅	1,76% P ₂ O ₅	1,53% P ₂ O ₅	3,21% P ₂ O ₅	0,98

Besonders hohe Konzentrationen über 3% P₂O₅ finden sich hinter den Städten Shchëlko^o, Losino-Petrowskij, Noginsk, Pawlawskij Posad und hinter Orechowo Sujewo. Aber auch in der eher ländlichen Region zwischen Orechowo Sujewo und Wladimir finden sich Proben mit mehr als 2% an P₂O₅.

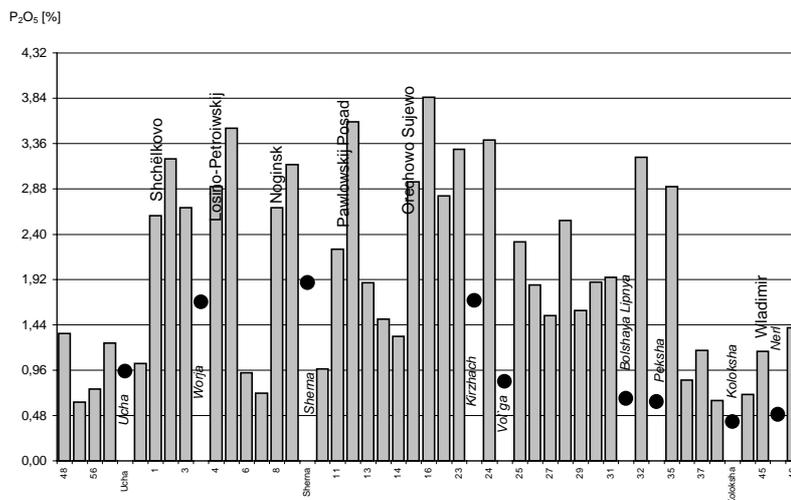


Abbildung 90: P₂O₅-Gehalte in Sedimenten (<20 µm) der Kljasma (Balken) und ihrer Nebenflüsse (Punkte/ kursive Beschriftung) in Fließrichtung mit Lage der Städte

Während die Sedimente der Kljasma vor Shchëlko^o zwischen 0,62% und 1,35% P₂O₅ enthalten, steigen die Gehalte hinter der Stadt auf bis zu 3,2% an. Shchëlko^o ist eine Industriestadt in der Moskauer Region mit Betrieben der chemischen Industrie, der Textilindustrie und des Maschinenbaus. Zusammen mit dem kommunalen Abwasser gelangen in Shchëlko^o im Jahr knapp 100 Millionen Kubikmeter Abwasser in die Kljasma (Tabelle

35), was ein Drittel des gesamten Abwasseraufkommens der Moskauer Region im Einzugsgebiet der Kljasma ausmacht.

Die höchsten Phosphor-Konzentrationen werden hinter Orechowo Sujewo gefunden. Diese Stadt hat ein Abwasseraufkommen von 130 Millionen Kubikmetern im Jahr und ist Sitz etlicher Industriezweige (Tabelle 35).

Tabelle 35: Industrie, Abwasseraufkommen und Einwohner der bedeutendsten Städte an der Kljasma (nach YAHYA et al. 2000)

Region/ Stadt (Einwohner)	Abwasser [10 ⁶ m ³ /Jahr]	Industrie					
		Maschinen- bau	Metallurgie	Chemie	Textil	Nahrungs- mittel	Kom- munal
Moskau Region	304						
Shchëlkovo (102 000)	98	X		X	X	X	X
Noginsk (120 000)	21	X			X	X	
Elektrostal' (143 000)	18	X	X				X
Pawlowskij Posad (71 000)	19	X			X		X
Orechowo Sujewo (133 000)	129	X		X	X	X	X
Wladimir Region	198						
Alexandrow - über Sherna	20	X			X		X
Wladimir (353 000)	104	X	X	X	X	X	X
Susdal & andere - über Nerl	23				X	X	X

Proben hinter der Stadt Wladimir, Hauptstadt der gleichnamigen Region, zeigen zwar einen Anstieg von 0,7% P₂O₅ auf etwa das Doppelte, die Konzentrationen erreichen aber nicht mehr das hohe Niveau der Sedimente der Kljasma in der Moskauer Region. Eine Ursache für den vergleichsweise geringen Anstieg der P-Konzentration - trotz des hohen Abwasseraufkommens hinter der Stadt Wladimir - kann darin liegen, daß die Kläranlage Wladimirs zu den besten Anlagen Rußlands zählt (LUCHKO 2000).

Die Nebenflüsse weisen in ihren Sedimenten im allgemeinen geringere Phosphorgehalte auf als die Kljasma im Mündungsbereich der entsprechenden Nebenflüsse. Die höchsten Konzentrationen zwischen 1,7% und 1,9% P₂O₅ finden sich in der Worja, der Sherna und der Kirzhach, welche in der Moskauer Region liegen und das nordwestliche Einzugsgebiet der Kljasma entwässern.

Korrelation

Eine Korrelationsanalyse von Phosphor und anderen Elementen der 56 Sedimentproben aus der Kljasma und ihrer Nebenflüsse, welche im gleichen Königswasseraufschluß von

Mitarbeitern des All Russian Research Institutes for Hydraulic Engineering, Moskau, am Institut für Umwelt-Geochemie, Heidelberg, bestimmt wurden, zeigt mittlere positive Korrelation zwischen Phosphor und Zink, Phosphor und Eisen, Phosphor und Cadmium, Phosphor und Arsen sowie Phosphor und Quecksilber (Tabelle 36), eine hohe bis sehr hohe Korrelation dagegen zwischen den Schwermetallen Cadmium, Zink und Silber untereinander. Dies ist ein Hinweis darauf, daß Phosphor nicht unbedingt aus den gleichen Punktquellen wie die Schwermetalle stammt, sondern zusätzlich noch über diffuse Einträge in die Sedimente gelangt.

Tabelle 36: Korrelationsfaktoren r für die Konzentrationen in der Fraktion < 20 µm (n = 56), Fettdruck: hohe bis sehr hohe positive Korrelation, kursiv: mittlere positive Korrelation, Elementgehalte aus YAHYA et al. 2000

	Zn	Pb	Hg	Cd	As	Mn	Fe	Ag	P ₂ O ₅
P ₂ O ₅	<i>0,51</i>	0,41	<i>0,61</i>	<i>0,55</i>	<i>0,58</i>	0,23	<i>0,53</i>	0,45	1,00
Ag	0,95	<i>0,53</i>	0,47	0,90	0,34	-0,05	-0,23	1,00	
Fe	-0,18	-0,18	0,17	-0,06	0,34	0,29	1,00		
Mn	0,01	0,10	0,11	0,02	0,08	1,00			
As	0,44	0,26	0,73	0,41	1,00				
Cd	0,90	<i>0,54</i>	<i>0,53</i>	1,00					
Hg	<i>0,54</i>	0,38	1,00						
Pb	<i>0,62</i>	1,00							
Zn	1,00								

Um zu erkennen, mit welchen Elementen Phosphor in besonders hohen Konzentrationen gemeinsam auftritt, ist der Konzentrationsverlauf von P₂O₅ in den Sedimenten der Kljasma zusammen mit einigen Metallen und Arsen in Fließrichtung in Abbildung 91 und Abbildung 92 dargestellt. Hinter der Stadt Shchëlkovo finden sich erhöhte Phosphor-Konzentrationen zusammen mit den höchsten Zink- und Cadmiumgehalten sowie hohen Bleigehalten. Hinter Noginsk und bei Pawlowskij Posad erreichen die Phosphor-Konzentrationen ähnliche Werte wie hinter Shchëlkovo, die Blei-, Zink- und Cadmiumgehalten weisen jedoch hier weit weniger ausgeprägte Konzentrationspeaks auf. Hinter der Stadt Orechowo Sujewo finden sich die höchsten Phosphor-Konzentrationen, die höchsten Blei- und verzögert sehr hohe Cadmiumgehalten. Im weiteren Verlauf (Probe 25 bis 46) finden zwei weitere Maxima der P-Konzentration keine Entsprechung in den Pb-, Zn- und Cd-Gehalten.

Der Verlauf der Quecksilber-Konzentration in den Sedimenten ähnelt dem Verlauf der P-Konzentrationen, mit Ausnahme einer Probe vor Noginsk mit hohen Hg-Konzentrationen bei geringen Phosphor-Konzentrationen und einer weiteren Ausnahme (Proben 32, 35) mit hohen P- bei vergleichsweise geringen Quecksilbergehalten (Abbildung 92). Schließt man diese Proben aus, findet sich eine hohe Korrelation ($r = 0,75$) für Quecksilber und Phosphor in den verbleibenden 37 Sedimentproben der Kljasma. Das bedeutet, daß der Eintrag von Phosphor

über die Haupteintragspfade wie Abwasser und Ausschwemmung gedüngter Flächen in die Sedimente der Kljasma in den meisten Fällen begleitet ist von einem Eintrag an Quecksilber. Eine ähnliche Beobachtung konnte in den Sedimenten kleiner Fließgewässer im Oberrheingraben (Tabelle 29) gemacht werden, die eine mittlere positive Korrelation von Quecksilber und Phosphor ($r = 0,61$) aufweisen.

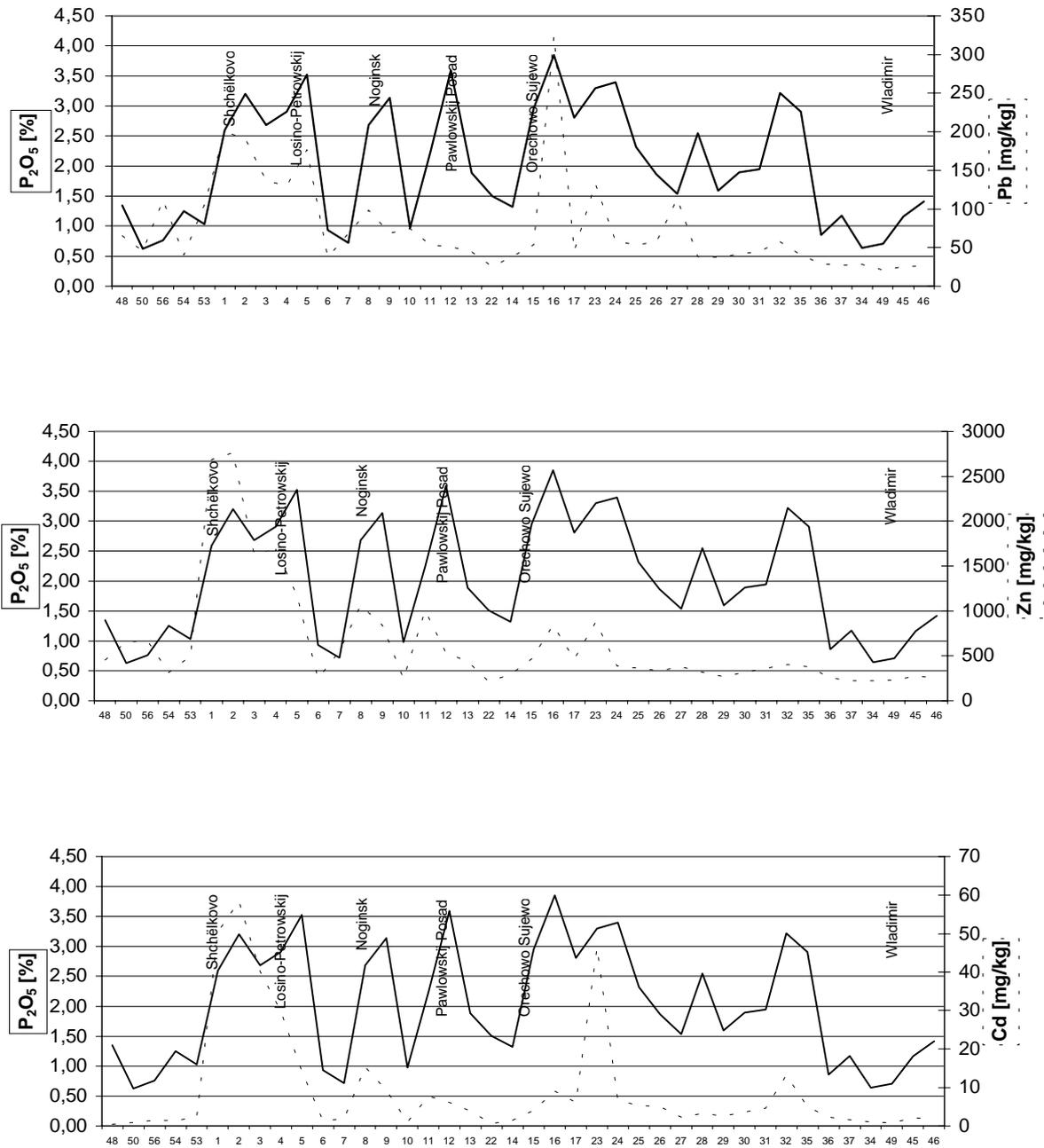


Abbildung 91: Der Konzentrationsverlauf von P_2O_5 in den Sedimenten der Kljasma (Fraktion $< 20 \mu m$) im Vergleich mit den Gehalten an Blei, Zink und Cadmium. Darstellung in Fließrichtung

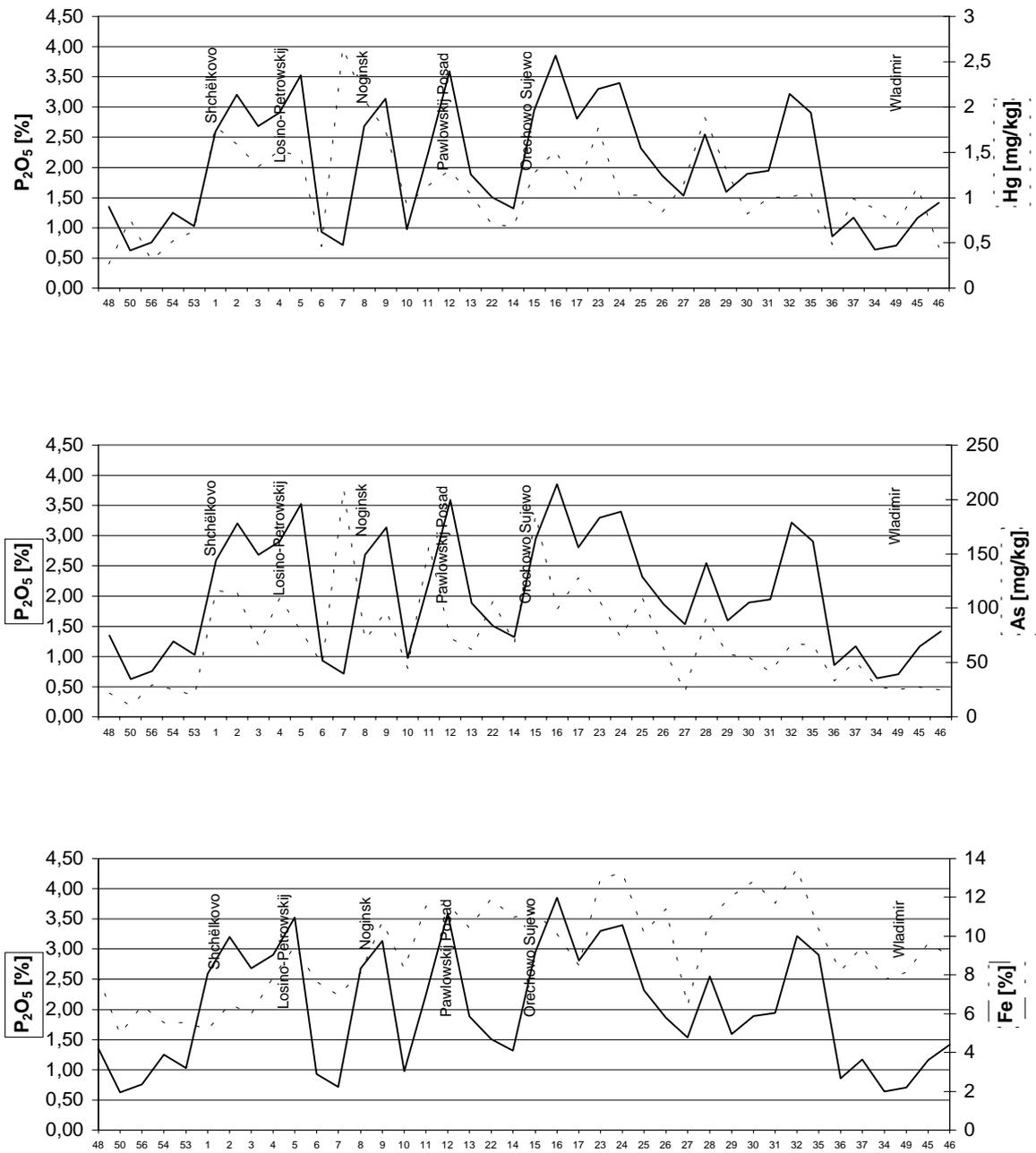


Abbildung 92: Der Konzentrationsverlauf von P_2O_5 in den Sedimenten der Kljasma (Fraktion $< 20 \mu m$) im Vergleich mit den Gehalten an Quecksilber, Arsen und Eisen. Darstellung in Fließrichtung

Bindungsformen

In 13 Sedimentproben der Kljasma wurden die Bindungsformen des Phosphors mittels sequentieller Extraktion bestimmt. Da die Bestimmung methodisch bedingt in der ungesiebten Probe erfolgt (Abbildung 93), jedoch auch sandige Sedimentproben mit einem geringen Feinkornanteil analysiert wurden, wurden für eine bessere Vergleichbarkeit in Abbildung 94 die gemessenen Anteile jeder Fraktion auf den Gesamtphosphorgehalt der gesiebten Probe umgerechnet (Gleichung 6).

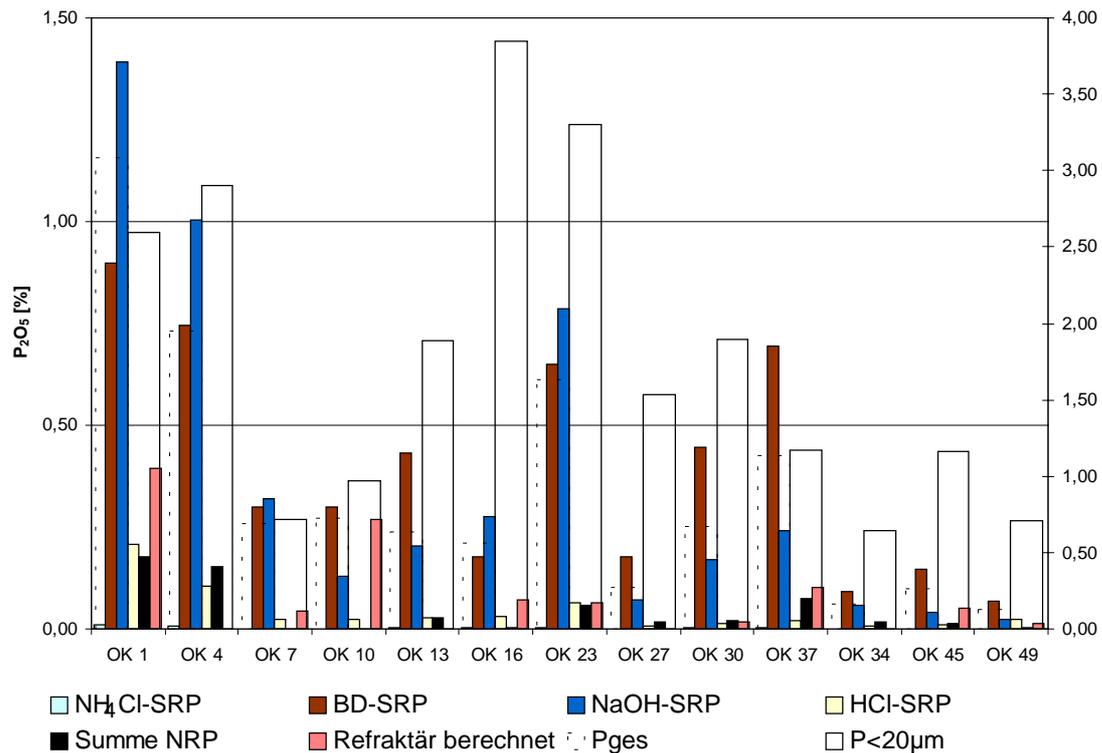


Abbildung 93: Bindungsformen von Phosphor in den ungesiebten Proben (linke Achse) mit Gesamtphosphorgehalt in gesiebter (<20 µm) und ungesiebter Probe als P₂O₅ (rechte Achse)

Die **säurelöslichen Anteile** machen bis auf eine Ausnahme (OK 49) zwischen 2% und 7% des Gesamtphosphors aus. Dieser geringe Anteil überrascht nicht, da die Sedimente aufgrund der Geologie des Einzugsgebietes (YAHYA et al. 2000) karbonatarm sind. In einer Probe elektronenmikroskopisch nachgewiesenes Calcit (Abbildung 63) enthielt Phosphor nicht in auffälliger Konzentration.

Auch die „**nicht molybdatreaktiven**“ Phosphate machen nur bis maximal 10% vom Gesamtphosphor in den Sedimenten dieses Flusses aus. Die höchsten Konzentrationen liegen hier bei 0,18% P₂O₅ (OK 1, ungesiebt) und 0,22% P₂O₅ (OK 4, berechnet auf < 20 µm). Höhere Anteile in dieser Fraktion sind in Gewässern mit hoher Primärproduktion zu erwarten, die in der Kljasma aufgrund der Strömung begrenzt wird.

Die (berechneten) **refraktären Anteile** liegen im Mittel aller Proben bei 9% vom Gesamtphosphor, erreichen in Probe „OK 10“ jedoch 37%.

Die als schwer mobilisierbar geltende **NaOH-SRP-Fraktion** macht in den Sedimenten der Kljasma zwischen 17% und 50% vom Gesamtphosphor aus. In den Proben mit besonders hohen Phosphor-Konzentrationen hinter Shchëlko (OK 1, OK 4) und hinter Orechowo Sujewo (OK 16, OK 23) mit mehr als 2% P₂O₅ sowie in Probe „OK 7“ ist sie stärkste Fraktion mit 45% bis 50% Anteil. In den Proben der im Vergleich zur Moskauer Region weniger dicht besiedelten und landwirtschaftlich geprägten Wladimir Region (OK 27 bis OK 49) sowie in Probe „OK 10“ und „OK 13“ liegt der Anteil der gegen Hydroxidionen austauschbaren molybdatreaktiven Phosphate nur zwischen 17% und 33%. Die Anteile der NaOH-SRP-Fraktion liegen also überwiegend in den Proben am höchsten, welche die höchste Phosphorbelastung aufweisen. Hohe positive Korrelationen lassen sich herstellen zwischen dem Anteil der NaOH-SRP-Fraktion am Gesamtphosphorgehalt mit dem Gesamtphosphorgehalt ($r = 0,7$) und mit dem Quecksilbergehalt ($r = 0,76$), eine mittlere positive Korrelation zwischen dem Anteil der NaOH-SRP-Fraktion und dem Bleigehalt (0,69) und dem Zink- und Cadmiumgehalt (0,66). Ein Zusammenhang zwischen dem Anteil dieser Fraktion zu den überwiegend geogen eingetragenen Elementen Eisen und Mangan ist nicht zu finden ($|r| < 0,2$).

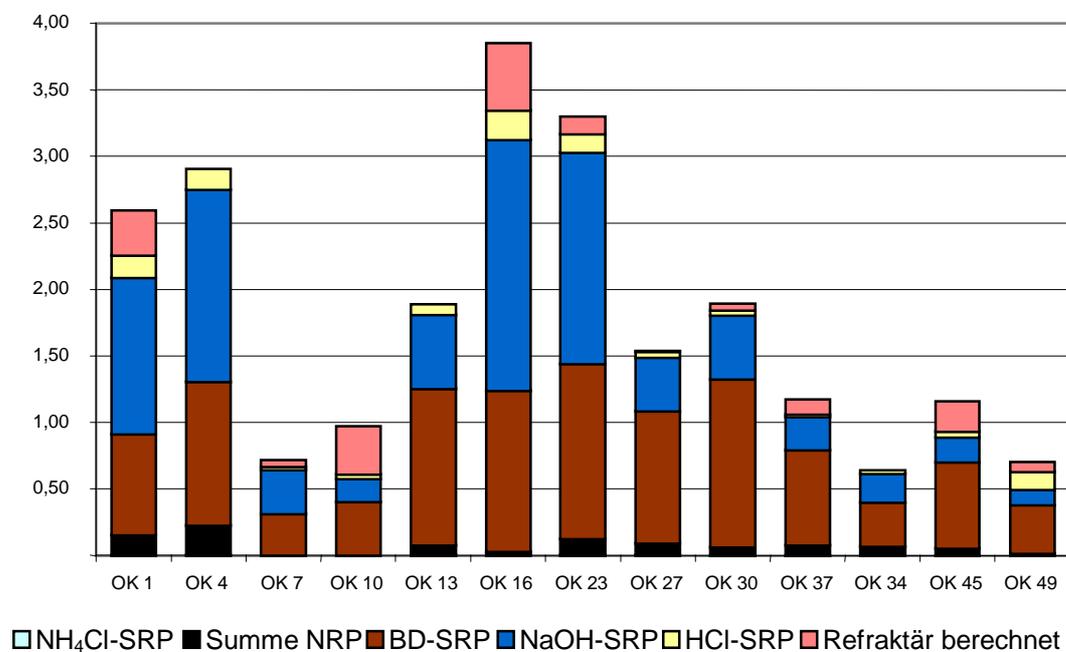


Abbildung 94: Bindungsformen von P (als P₂O₅) bestimmt in den ungesiebten Proben der Kljasma und umgerechnet auf die Gehalte in der Fraktion < 20 µm

Auch wenn die Aussagekraft einer Korrelationsanalyse von nur 13 Proben gering ist, so ist doch der Einfluß von industriellem und kommunalem Abwasser nicht nur auf den Gesamtphosphorgehalt der Sedimente, sondern auch auf seine Zusammensetzung hinter den Industriestädten Shchëlkovo und Orechowo Sujewo unverkennbar.

Die **reduktiv löslichen molybdatreaktiven Phosphate** machen in den Sedimenten der Kljasma zwischen 29% und 67% vom Gesamtphosphatgehalt aus. Der Anteil dieser Fraktion liegt bei über 50% in den Sedimenten flußabwärts von Probe „OK 27“ sowie in einer Probe vor Orechowo Sujewo. Die reduktiv löslichen Phosphate dominieren also in den Proben der ländlicheren Wladimir Region. Es finden sich bezüglich der Elemente Blei, Cadmium, Zink und Quecksilber hohe negative und mittlere negative Korrelationen (Tabelle im Anhang) zu dem Anteil der BD-SRP-Fraktion am Gesamtphosphor. Die Phosphate dieser Fraktion stammen somit vermutlich eher aus diffusen Quellen als aus Punktquellen.

Zu berücksichtigen ist allerdings auch die Möglichkeit, daß sich die Bindungskapazität von Eisenhydroxiden bezüglich Phosphor bei steigendem Phosphoreintrag erschöpft und der Anteil an BD-SRP trotz hoher Phosphoreinträge zurückgeht. Ein Hinweis darauf ergibt sich bei der Betrachtung der Molverhältnisse. Das Molverhältnis von reduktiv löslichem Phosphor aus der BD-SRP-Fraktion (umgerechnet auf die Gehalte in der Fraktion < 20 µm) zu Eisen (Fraktion < 20 µm) liegt in den deutlich NaOH-SRP dominierten Proben (OK 1, OK 4, OK 16, OK 23) zwischen 9 und 13. In den Proben mit den größten BD-SRP-Anteilen (OK 13, OK 27, OK 30, OK 37) liegen die Verhältnisse zwischen 8 und 17. Das heißt, auch in Proben mit einem relativ geringen BD-SRP-Anteil liegen die Eisen zu BD-SRP-Molverhältnisse ähnlich hoch, wie in Proben mit sehr hohen BD-SRP-Anteilen.

Die Gehalte der potentiell mobilisierbaren Phosphate der BD-SRP- und der NRP-Fraktion (als P_2O_5 in der Fraktion < 20 µm) in der Kljasma reichen von 0,31% bis 1,43%, ihre Anteile am Gesamtphosphor von 35% bis 70%.

Die höchsten Konzentrationen dieser potentiell mobilisierbaren Fraktionen mit 1,2% bis 1,4% P_2O_5 finden sich in Proben, deren Gesamtphosphorgehalte (< 20 µm) zwischen 3,85% und 1,89% P_2O_5 liegen. Im einzelnen handelt es sich dabei um drei Proben um die Stadt Orechowo Sujewo (OK 13-23), um eine Probe hinter der Stadt Shchëlkovo (OK 4) und um eine Probe aus der Wladimir Region (OK 30).

5.6.3. Oka, Moskwa und das „Prioksko-Terrasny State Nature Reserve“

Gesamtposphor in der Fraktion < 20 µm

Die P_2O_5 -Gehalte der Proben aus der Oka und der Moskwa liegen zwischen 0,41% P_2O_5 in der Oka vor Kolomna und 2,37% P_2O_5 in der Moskwamündung in Kolomna. Die Konzentrationen von P_2O_5 in den Sedimenten der Oka liegen hinter Kolomna bei 0,82% bzw. vor der Wolga bei 0,80% P_2O_5 . Durch den Einfluß der stark mit Phosphor belasteten Moskwa erhöhen sich auch die P_2O_5 -Konzentrationen in den Sedimenten der Oka.

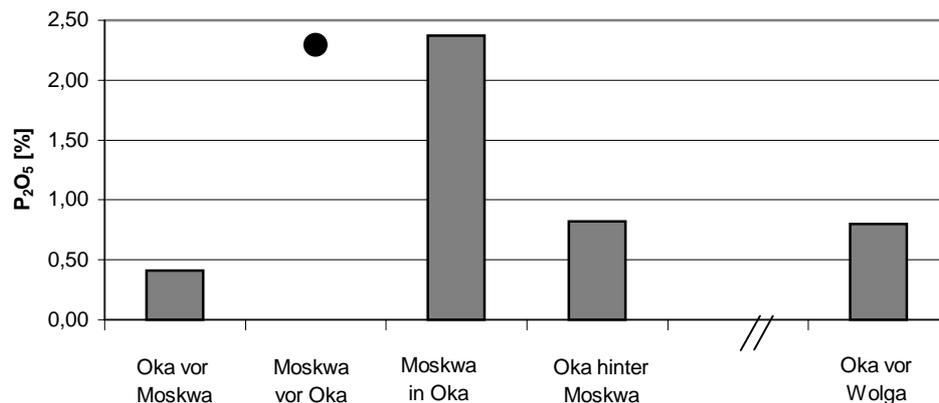


Abbildung 95: Phosphorgehalte von Oberflächensedimentproben der Oka und der Moskwa in der Fraktion < 20 µm

Um abzuschätzen, ob die ermittelten Phosphorgehalte aus den 1997 genommenen Sedimentproben repräsentativ für die Oka und die Moskwa sind, lassen sich die Ergebnisse mit denen von KORNDÖRFFER (1993) vergleichen: KORNDÖRFFER ermittelt für die Okasedimente (< 20 µm) einen durchschnittlichen P_2O_5 -Gehalt von 0,48% vor der Moskwa ($n = 17$), einen mittleren P_2O_5 -Gehalt von 0,83% hinter der Moskwa ($n = 27$) und P_2O_5 -Gehalte zwischen 0,96% und 1,76% in der Moskwa ($n = 8$). 1996 werden von anderen Autoren (YAHYA et al. 2000) in drei Sedimentproben aus der Moskwa P_2O_5 -Konzentrationen zwischen 1,85% und 3,45% gefunden. Die Proben sind zumindest hinsichtlich ihrer Phosphorgehalte repräsentativ für die jeweiligen Flußabschnitte.

Um, abgesehen vom Nährstoffeintrag über die Luft, anthropogen unbelastete Sedimente im Einzugsgebiet der Oka zum Vergleich heranziehen zu können, wurden Boden- und Sedimentproben aus einem nicht für die Öffentlichkeit zugänglichen Naturschutzgebiet untersucht.

Dieses 1945 angelegte Naturschutzgebiet, das Prioksko-Terrasny State Nature Reserve, ist am linken Ufer der Oka gelegen und nur Mitarbeitern wissenschaftlicher Einrichtungen zugänglich. Die hier gefundenen P_2O_5 -Konzentrationen liegen zwischen 0,32% in den Sedimenten einer Quelle und 0,20% in Proben eines Sedimentkerns, genommen in dem Flachsee Protokskoye.

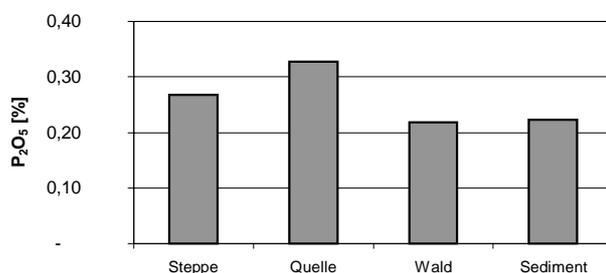


Abbildung 97: P_2O_5 -Gehalt in Bodenproben und im Oberflächensediment einer Quelle und eines Flachsees ($< 20 \mu m$) im Einzugsgebiet der Oka

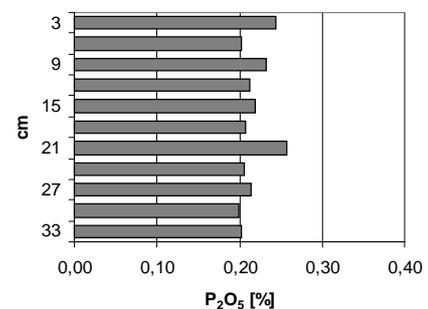


Abbildung 96: P_2O_5 -Gehalt im Sedimentkern eines Flachsees ($< 20 \mu m$) im Einzugsgebiet der Oka

Zieht man für die Abschätzung der Backgroundwerte die Sedimente dieses Flachsees heran, sollte die Hintergrundkonzentration in diesem Gebiet im Bereich des Mittelwertes (0,22%) oder Medians (0,21%) liegen. Diese Werte liegen zwar leicht über der von der Literatur (TUREKIAN & WEDEPOHL 1991) genannten Konzentrationen von 0,16% P_2O_5 , berücksichtigt man dabei jedoch die mögliche lokale Variationsbreite aufgrund der Unterschiede in der Geologie des Einzugsgebietes, ist der ermittelte Wert als durchaus realistisch zu betrachten und liegt noch deutlich unter den in der anthropogen belasteten Oka und ihrer Nebenflüsse Moskwa und Kljasma ermittelten Phosphorgehalten. (0,48% bis 3,85%).

Bindungsformen

Die Zusammensetzung des Phosphors in der Oka vor und nach der Moskwamündung ändert sich durch den Einfluß der Moskwa und der Stadt Kolomna. Die Sedimente im Mündungsbereich selbst sind bestimmt von dem Einfluß der Moskwa, was sich sowohl im P-Gehalt als auch in der P-Zusammensetzung zeigt (Abbildung 98).

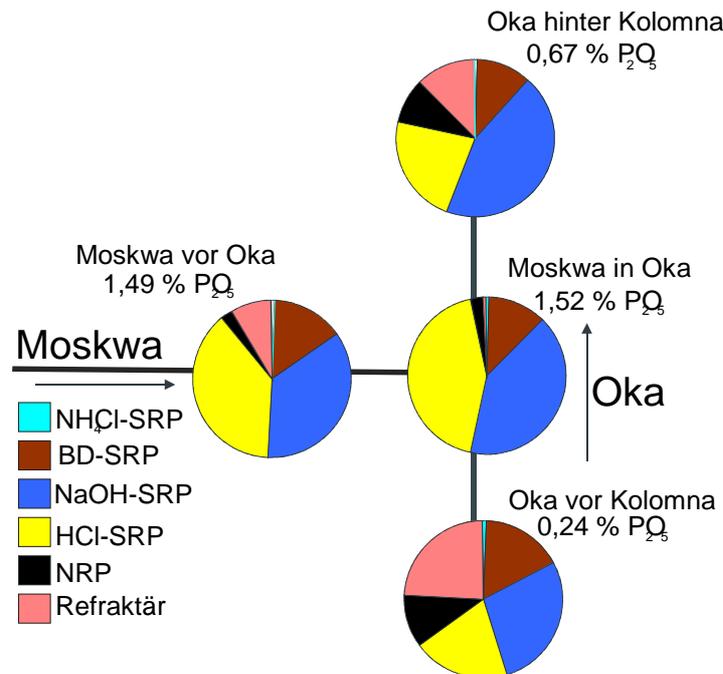


Abbildung 98: Bindungsformen von Phosphor in Oberflächensedimenten der Oka und der Moskwa sowie Gesamtposphorgehalte in den ungesiebten Proben (als P₂O₅)

In der Moskwa selbst stellen die säurelösliche Fraktion und die NaOH-SRP-Fraktion jeweils etwas mehr als ein Drittel des Gesamtphosphors. Der relativ hohe Anteil der HCl-SRP-Fraktion ist überraschend, da der von KORNDÖRFFER (1993) ermittelte Karbonatgehalt der Oka und der Moskwa bei Kolomna nur bei 2% bis 5% liegt. Elektronenmikroskopische Untersuchungen konnten jedoch die Existenz phosphatreicher Calcium/ Magnesiumkarbonate belegen (Abbildung 62), die mit einem P₂O₅-Gehalt von etwa 5 Gewichts% überproportional zum Gesamtphosphorgehalt der ungesiebten Sedimentprobe der Moskwa vor der Oka beitragen. Calciumphosphate und P-haltige Calciumkarbonate werden häufig als Düngemittel (Superphosphat, Thomasmehl) eingesetzt. Calciumphosphate bilden sich nach BLIEFERT (1995) in alkalischen Böden nach P-Düngung. Sowohl Calciumphosphate als auch P-haltige Karbonate sind überwiegend in der HCl-SRP-Fraktion zu erwarten.

Die potentiell mobilisierbaren Fraktionen (BD-SRP und NRP) machen zusammen nur 18% des Gesamtphosphors in der Sedimentprobe der Moskwa aus.

In der Oka vor der Moskwamündung liegen die Anteile der säurelöslichen und gegen Hydroxidionen austauschbaren molybdatreaktiven Phosphate mit 20% und 27% etwas niedriger als in der Moskwa, die potentiell mobilisierbaren Anteile liegen dagegen mit zusammen 28% etwas höher.

In der Oka hinter der Moskwamündung machen die säurelösliche und die NaOH-SRP-Fraktion zusammen genau zwei Drittel des Gesamtphosphors aus, wobei im Vergleich zur Probe vor Kolomna die Zunahme in der NaOH-SRP-Fraktion von 27% auf 43% am größten ausfällt. Der Anteil der potentiell mobilisierbaren Fraktionen fällt von 28% um sieben Prozentpunkte.

Wie auch in der Kljasma hinter den Städten Shchëlkovo und Orechowo Sujewo schlägt sich eine starke anthropogene P-Belastung durch die Moskwa und die Stadt Kolomna vor allem in der Erhöhung der NaOH-SRP-Anteile nieder. Zwar gelten diese Anteile als weniger mobil, dennoch findet sich trotz einer prozentualen Abnahme der Anteile in den leichter mobilisierbaren Fraktionen eine Zunahme in den absoluten Gehalten dieser Fraktionen in den Sedimenten hinter Kolomna von 0,07% P_2O_5 auf das Doppelte (ungesiebte Proben).

Die Konzentration und die Zusammensetzung des Phosphors in den ungesieberten Boden- und in der Oberflächensedimentprobe (gemittelt) des Prioksko-Terrasny State Nature Reserve ist in Abbildung 99 dargestellt.

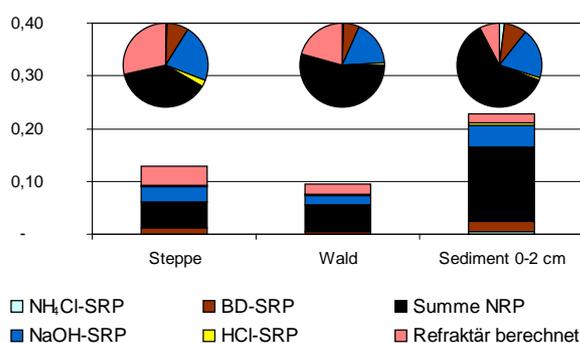


Abbildung 99: P_2O_5 -Konzentration und Zusammensetzung in den ungesieberten Proben des Prioksko-Terrasny State Nature Reserve, Oberflächensediment gemittelt aus Kern 1 und Kern 3

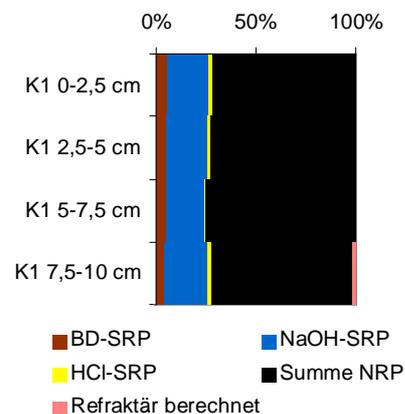


Abbildung 100: P-Zusammensetzung eines Sedimentkerns im See Protokskoye

Insbesondere in den Sedimentproben und der Bodenprobe des Nadelwaldes, aber auch in der Bodenprobe der Steppe ist der nicht molybdatreaktive Anteil des Phosphors am größten. BLIEFERT (1995) gibt an, daß in Böden etwa 40% des Phosphors organisch gebunden vorliegen, nach HAIDER (1996) liegen die Anteile organisch gebundenen Phosphors zwischen

10% und über 70%. Im Wald bzw. Steppenboden werden hier 54% bzw. 38% des Phosphors in der NRP-Fraktion gefunden. Die (berechneten) refraktären Anteile liegen im Steppenboden mit 28% vergleichsweise hoch. Da sich die organisch gebundenen Phosphate in der NRP-Fraktion und zu einem unbekanntem Teil in den refraktären Anteilen wiederfinden, liegt der Anteil der organisch gebundenen Phosphate in den untersuchten Böden im oberen Bereich der von der Literatur genannten Werte.

Die Anteile der NaOH-SRP-Fraktion liegen in allen Proben (Tabelle 21) zwischen 16% und 27%.

Die reduktiv löslichen Anteile liegen nur zwischen 4% und 13% vom Gesamtphosphor. Bei einem mittleren Gehalt von 0,22% P_2O_5 und 1,3% Eisen (YAHYA et al. 2000) im Sediment ($< 20 \mu m$; $n = 11$) des untersuchten Flachsees, einem BD-SRP-Anteil von im Mittel 6% ($n = 6$) läßt sich ein mittleres Eisen zu (reduktiv löslichem) Phosphor Molverhältnis von 1:125 berechnen. Das maximale Fe:(BD-SR)P-Verhältnis liegt in einer Oberflächenprobe (K3, 0-2 cm) bei 1:58.

In diesem anthropogen unbelasteten Gebiet sind die Phosphorgehalte entsprechend gering. In der Zusammensetzung überwiegen die der organischen Substanz zugeschriebenen P-Anteile.

5.6.4. Wolga

Gesamtposphor in der Fraktion < 20 µm

Die P₂O₅-Gehalte der Wolga zwischen dem Gorki Stausee und dem Wolgograd Stausee und ihrer Nebenflüsse im Mündungsbereich reichen von 0,23% bis zu 0,84%. Alle Proben liegen somit in den I_{geo}-Klassen 0 bis 2, sind bezüglich Phosphor also „praktisch unbelastet“ bis „mäßig belastet“.

Tabelle 37: P₂O₅-Konzentrationen in den Sedimenten der Wolga und ihrer Nebenflüsse zwischen dem Gorki Stausee und dem Wolgograd Stausee in der Fraktion < 20 µm

	Anzahl	Min	Max	Mittelwert	Median	90er Perzentil	Standard- abwn
	n	[% P ₂ O ₅]					
Wolga und Nebenflüsse	103	0,23	0,84	0,36	0,32	0,55	0,13
Wolga	83	0,23	0,84	0,35	0,32	0,54	0,12

Der Mittelwert aller Proben aus der Wolga und ihrer Nebenflüsse von 0,36% P₂O₅ liegt deutlich unter dem für die Kljasma bestimmten Mittelwert von 1,89% oder den in der Oka gefunden Konzentrationen (0,48% bis 1,52%). Er liegt jedoch noch deutlich über der in einem anthropogen unbelasteten Gebiet ermittelten Backgroundkonzentration von 0,22% P₂O₅ und um den Faktor 2,25 über dem Backgroundwert nach dem Tongesteinstandard von 0,16% P₂O₅ (TUREKIAN & WEDEPOHL 1961).

Betrachtet man den Verlauf der Konzentration in den Sedimenten der Wolga und ihrer Nebenflüsse zwischen dem Gorki Stausee (schiffbare Flußkilometer 850) und dem Wolgograd Stausee (schiffbare Flußkilometer 2540) kann man deutliche Belastungsschwerpunkte ausmachen (Abbildung 101).

Sedimente, welche bezüglich Phosphor in die I_{geo}-Klasse 2 fallen und somit „mäßig belastet“ sind, finden sich überwiegend zwischen den Gorki Stausee und Samara Stausee im nordwestlichen Teil des Probenahmegebietes. Nur eine Sedimentprobe hinter dem Industriegebiet von Saratow fällt im weiteren Verlauf der Wolga noch in diese I_{geo}-Klasse.

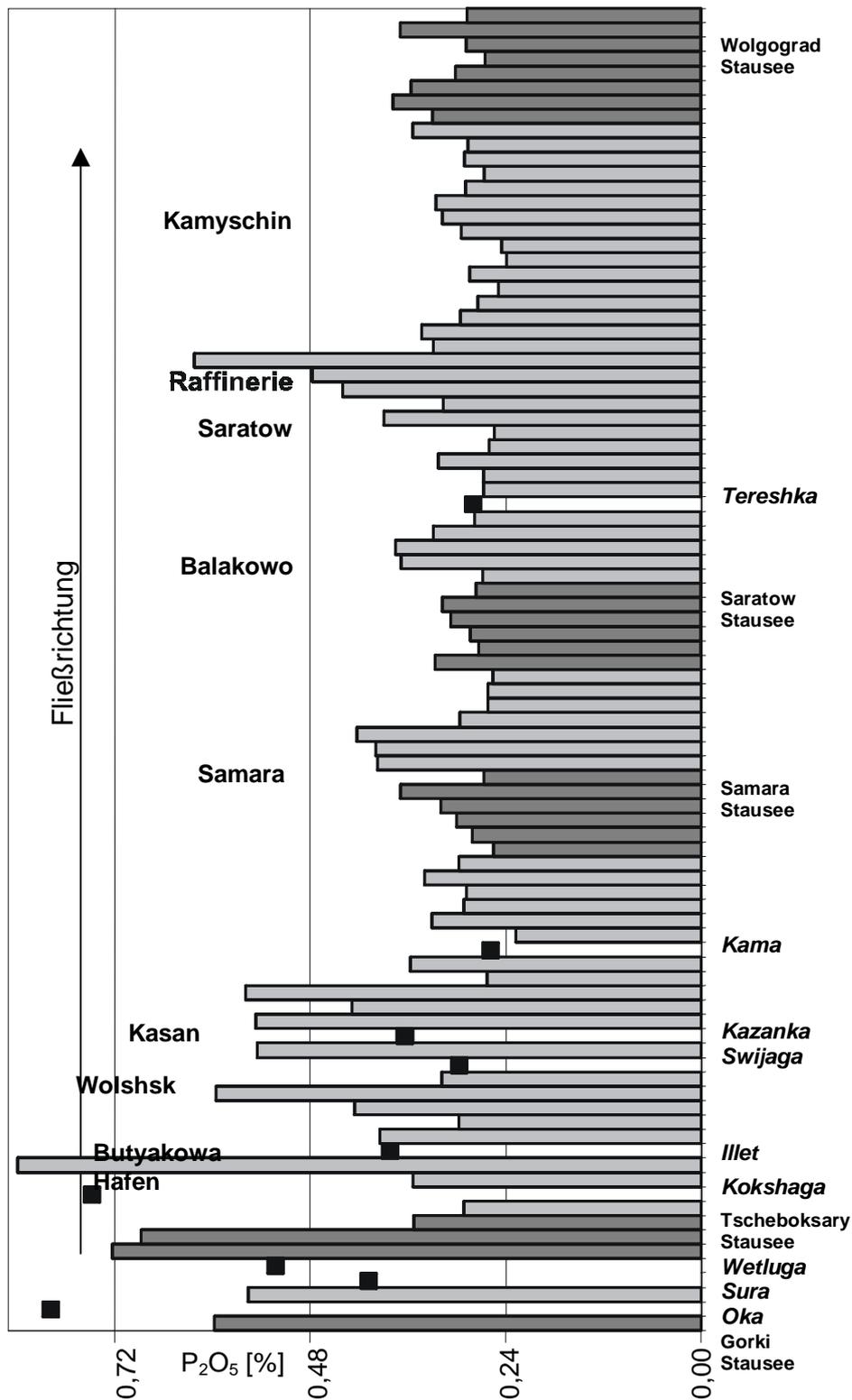


Abbildung 101: P_2O_5 -Konzentrationen in der Wolga (Balken) und in ihren Nebenflüssen (Quadrate, gemittelt) in der Fraktion $< 20 \mu m$ zwischen dem Gorki Stausee und dem Wolgograd Stausee; Proben vor den Staudämmen sind dunkelgrau markiert.

Einen Überblick über die mittlere Phosphor-Konzentration der Sedimente zwischen den einzelnen Staustufen gibt Abbildung 102.

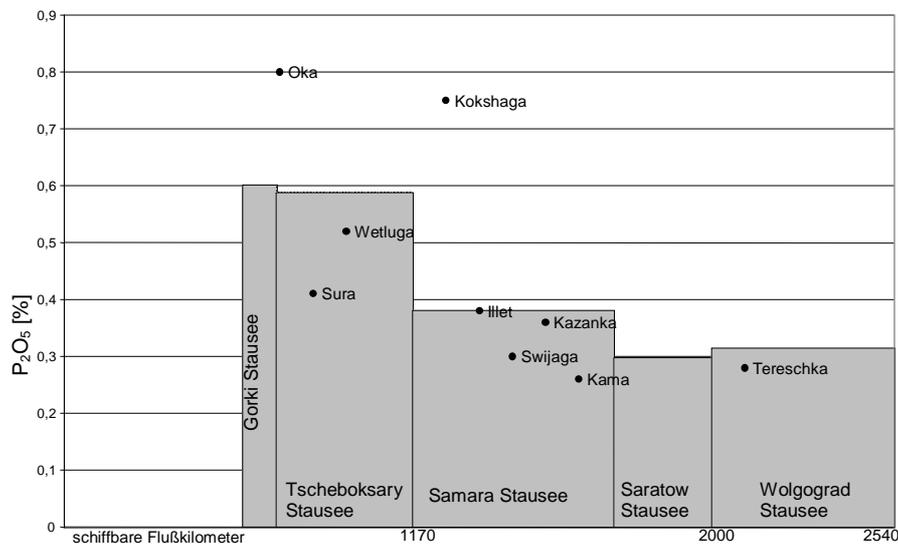


Abbildung 102: P_2O_5 -Konzentrationen der Sedimente gemittelt über Flußabschnitte zwischen den Staustufen der Wolga (Fraktion $< 20 \mu m$)

Abbildung 102 erweckt den Eindruck einer Abnahme der P_2O_5 -Konzentrationen in den Wolgasedimenten vom Gorki Stausee über den Tscheboksary Stausee und den Samara Stausee bis zum Saratow Stausee. Da jedoch der Gorki Stausee nur durch eine Probe (0,60% P_2O_5) und die Wolga bis zum Tscheboksary Stausee nur durch vier Proben charakterisiert sind, müssen für eine Betrachtung des Verlaufs über diese zwei Abschnitte noch die Ergebnisse anderer Autoren herangezogen werden. Müller ermittelt 1997 in acht Proben aus dem Gorki Stausee einen mittleren P_2O_5 -Gehalt von 0,45%, wobei die Konzentrationsspanne zwischen 0,36% und 0,60% liegt (MÜLLER, et al. 2000 a, MÜLLER et al. 2000 b, MÜLLER et al. 2000 c). Für den folgenden Abschnitt bis zum Tscheboksary Stausee kann aus 23 Sedimentproben ein Mittelwert von 0,56% ermittelt werden (0,27% bis 0,86%).

Berücksichtigt man diese Daten, liegen die höchsten Phosphor-Konzentrationen zwar noch immer in den beiden nördlichsten Flußabschnitten, das Maximum befindet sich allerdings jetzt im Tscheboksary Stausee. Eine Ursache für die mittlere Konzentrationszunahme bezüglich Phosphor hinter dem Gorki Stausee ist wahrscheinlich der Einfluß der stark mit Phosphor belasteten Oka.

Korrelation

Um einen möglichen Zusammenhang zwischen der anthropogenen Belastung der Wolgasedimente mit Phosphor und mit Schwermetallen sichtbar zu machen, werden die Phosphor-Konzentrationen mit den in den gleichen Aufschlüssen vom Institut für Umwelt-Geochemie gemessenen Schwermetall-Konzentrationen korreliert:

Tabelle 38: Korrelation zwischen Phosphor, Lithium und Schwermetallen in Sedimenten der Wolga und ihrer Nebenflüsse. n = Anzahl der Proben

	P	Pb	Cd	Hg	Zn	Cu	Ni	Cr	Li	Mn	Fe	Ag	Co
n	103	102	102	102	102	102	102	102	52	102	102	50	50
P	1,00	0,33	0,26	0,28	0,44	0,16	0,10	0,20	-0,23	0,29	0,61	0,82	-0,05
Pb		1,00	0,61	0,28	0,86	0,75	0,19	0,24	-0,19	-0,03	0,10	0,90	-0,13
Cd			1,00	0,26	0,56	0,77	0,13	0,57	-0,18	-0,10	-0,10	0,84	-0,11
Hg				1,00	0,39	0,31	0,26	0,25	-0,09	0,26	0,16	0,90	-0,07
Zn					1,00	0,71	0,31	0,39	0,09	0,06	0,38	0,82	0,06
Cu						1,00	0,30	0,61	-0,01	-0,03	0,05	0,88	0,09
Ni							1,00	0,34	0,32	0,35	0,44	0,18	0,58
Cr								1,00	-0,17	0,06	0,23	0,68	0,15
Li									1,00	0,07	0,56	-0,22	0,63
Mn										1,00	0,35	-0,18	0,52
Fe											1,00	-0,23	0,83
Ag												1,00	-0,15
Co													1,00

Tabelle 38 zeigt mittlere bis hohe positive Korrelationen der Schwermetalle Blei, Zink, Cadmium, Kupfer und Silber untereinander, die vermutlich über gemeinsame Eintragungspfade in die Sedimente gelangen.

Auch zwischen den Elementen Eisen, Kobalt und Lithium untereinander finden sich mittlere bis hohe Korrelationen. Die Konzentration dieser Elemente sind in der Regel anthropogen unbeeinflusst.

Phosphor dagegen weist sowohl eine mittlere positive Korrelation zu Eisen auf, als auch zu Silber. Hier zeigt sich, daß Phosphor in der Wolga nicht wie die Schwermetalle Cadmium, Blei und Zink überwiegend aus industriellem und kommunalem Abwasser stammt, sondern auch über diffuse Quellen in die Gewässersysteme eingetragen wird.

Um möglicherweise gemeinsame Eintragungsschwerpunkte für Schwermetalle und Phosphor aufzuzeigen, werden die Konzentrationen von Phosphor und einigen Schwermetallen in den Sedimenten im Verlauf der Wolga und ihrer Nebenflüsse gemeinsam dargestellt (Abbildung 103 und Abbildung 104).

Während man für die Elemente Zink, Cadmium, Quecksilber und Blei deutliche Belastungsschwerpunkte ausmachen kann (Abbildung 103, Abbildung 104) und die

Konzentrationen für z.B. Cd an einer Probenahmestelle das 27fache des Medians aller Proben erreicht, sind die Konzentrationsunterschiede für das Element Eisen im Verlauf der Wolga gering (Abbildung 104). Auch für Phosphor sind die Maxima weniger stark ausgeprägt und das Konzentrationsmaximum in den Sedimenten der Wolga liegt bei dem 2,6fachen des Medians.

Die Belastungsschwerpunkte liegen im einzelnen in einer Probe des Hafens von Butyakowa, hier sind die Blei und Zink-Konzentrationen deutlich erhöht, auch die P_2O_5 -Konzentration liegt mit 0,72% vergleichsweise hoch.

Im weiteren Verlauf fällt eine Probe bei Kasan und eine vor dem Samara Stausee durch hohe Cadmium-Konzentrationen auf.

Hinter der Stadt Samara liegen die Zink-, die Blei- und die Quecksilber-Konzentrationen besonders hoch, die P_2O_5 -Konzentration ist mit bis zu 0,42% geringfügig erhöht.

Die höchsten Cd- und Pb-Konzentrationen der untersuchten Wolgasedimente sowie hohe Zink- und Quecksibergehalte finden sich hinter der Stadt Saratow, auch die Phosphor-Konzentrationen (0,62%) sind auf der Höhe der Raffinerie von Saratow sehr hoch.

Eine weitere Probe bei der Stadt Kamyschin zeichnet sich durch hohe Blei- und Zink-Konzentrationen aus.

Während für einige Schwermetalle einzelne Punktquellen für einen drastischen Konzentrationsanstieg im Sediment der Wolga verantwortlich gemacht werden können, findet sich der Einfluß dieser Punktquellen nicht oder nur abgeschwächt in den Phosphor-Konzentrationen wieder.

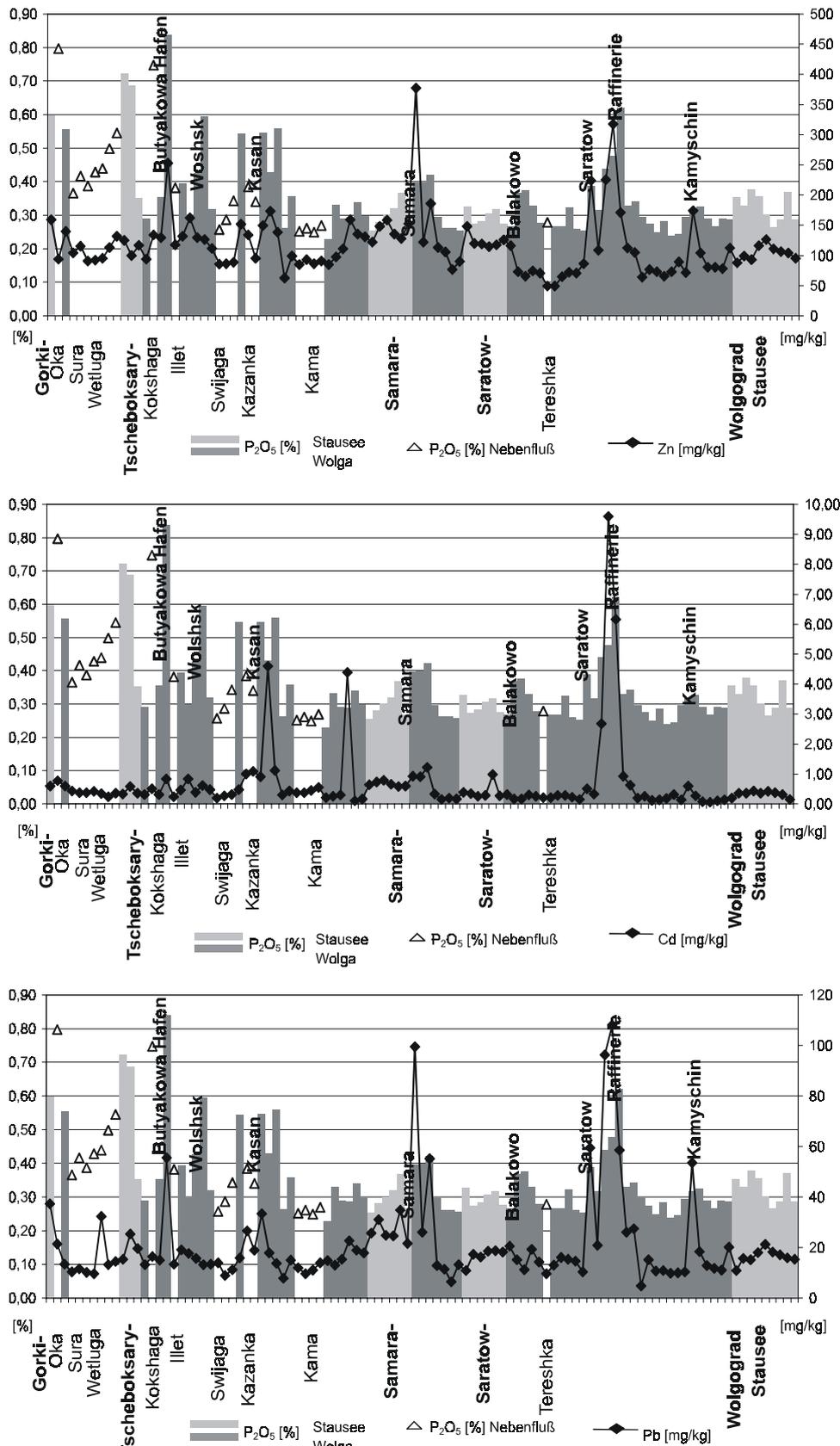


Abbildung 103: Konzentrationsverlauf von Zn, Cd und Pb im Vergleich zum Konzentrationsverlauf von P_2O_5 in den Sedimenten der Wolga und ihrer Nebenflüsse (Fraktion < 20 μm)

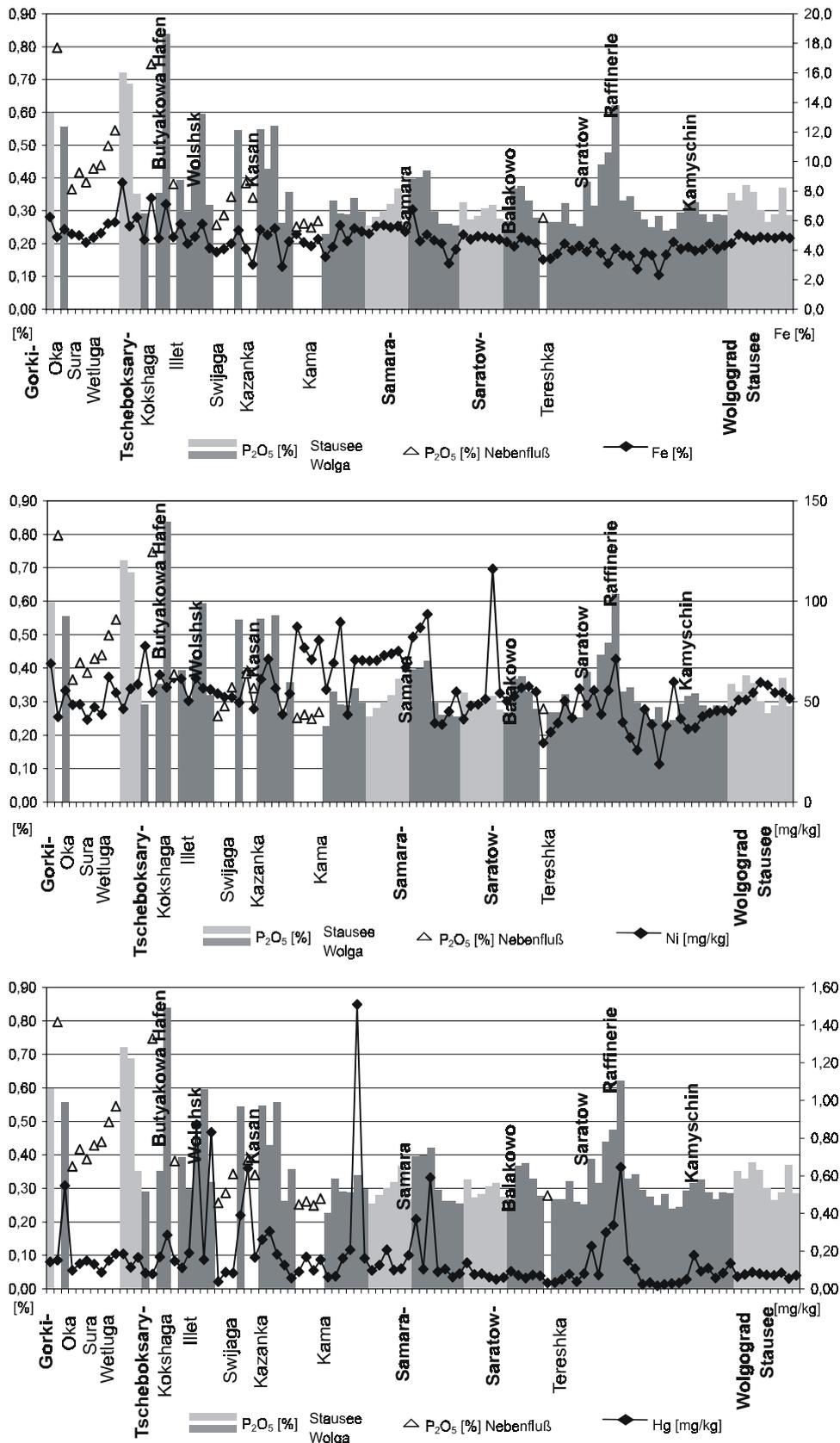


Abbildung 104: Konzentrationsverlauf von Fe, Ni und Hg im Vergleich zum Konzentrationsverlauf von P_2O_5 in den Sedimenten der Wolga und ihrer Nebenflüsse (Fraktion < 20 μm)

Gesamtposphor und Bindungsformen

Die P₂O₅-Gehalte der ungesiebten Sedimentproben der Wolga und ihrer Nebenflüsse reichen von 0,02% (Volga02, vor der Einmündung der Sura) bis zu 0,51% (Wetluga). Der Mittelwert liegt mit 0,22% P₂O₅ um etwa 40% unter den P₂O₅-Gehalten der Fraktion < 20 µm.

Die Abweichungen zwischen dem Gesamtposphorgehalt und dem Phosphorgehalt der gesiebten Proben können je nach Korngrößenanteil beträchtlich sein.

Tabelle 39: P₂O₅-Konzentrationen in den Sedimenten Wolga und ihren Nebenflüssen zwischen dem Gorki Stausee und dem Wolgograd Stausee (ungesiebte Proben)

		Anzahl	Min	Max	Mittelwert	Median	90er Perzentil	Standard-abwn
		n	[% P ₂ O ₅]					
Wolga	und Nebenflüsse	100	0,02	0,51	0,22	0,23	0,35	0,10
Wolga		81	0,02	0,41	0,23	0,24	0,34	0,09

Zwar sind die Elementgehalte der ungesiebten Sedimente von Bedeutung für die Nutzungsmöglichkeit von Baggergut und zur Berechnung von absoluten Mengen, für einen Vergleich verschiedener Proben eignen sich jedoch besser die Gehalte der gesiebten Proben, da die Elementgehalte stark von der Korngröße und somit der Größe der Partikeloberfläche abhängen. In Abbildung 105 sind die P₂O₅-Gehalte der gesiebten und ungesiebten Sedimentproben gegenübergestellt.

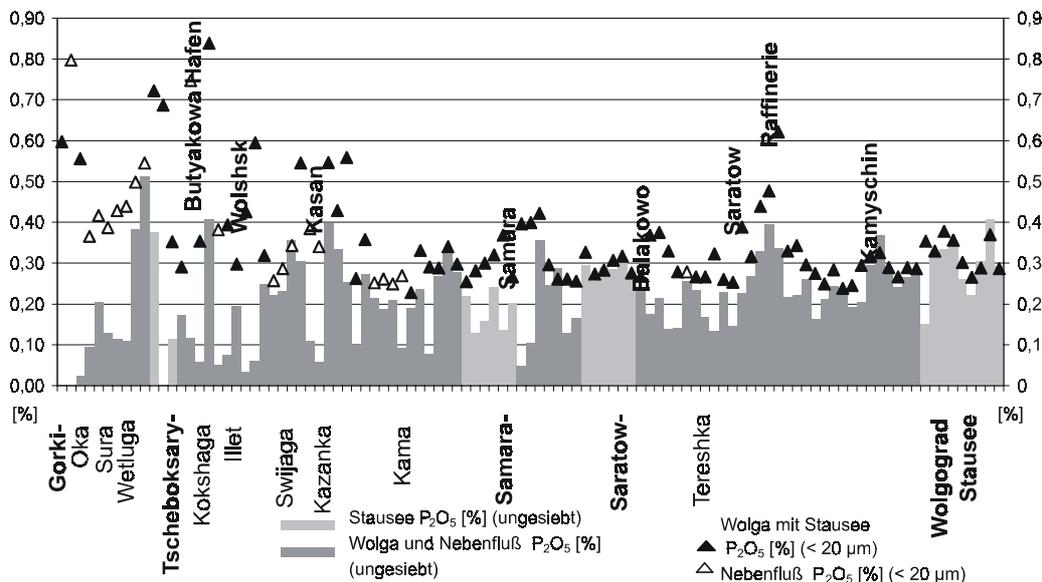


Abbildung 105: P₂O₅-Konzentrationen in den ungesiebten und in den gesiebten (< 20 µm) Sedimentproben der Wolga und ihrer Nebenflüsse

Große Unterschiede finden sich überwiegend in den Proben flußaufwärts der Kama, während die Proben des Saratow Stausees und des Wolgograd Stausees einen höheren Feinkornanteil

haben. Die unterschiedliche Korngrößenverteilung in den Sedimenten der Wolga ist auch die Ursache für den Anstieg der gemittelten P_2O_5 -Konzentrationen vom Tscheboksary Stausee bis zum Saratow Stausee bzw. Wolgograd Stausee in den ungesiebten Sedimenten.

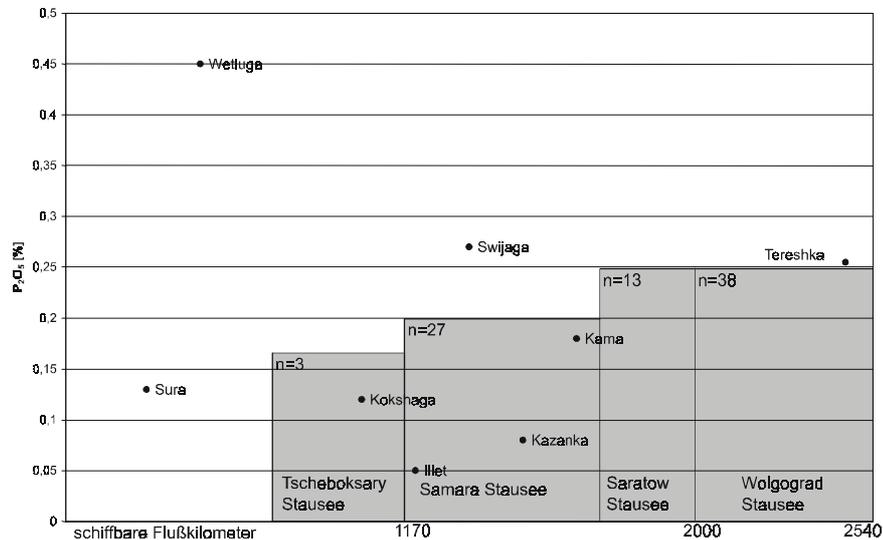


Abbildung 106: P_2O_5 -Konzentrationen der Sedimente gemittelt über Flußabschnitte zwischen den Staustufen der Wolga (ungesiebt)

Aufgrund der hohen Probenanzahl wurde nur ein Teil der Sedimentproben aus der Wolga und ihren Nebenflüssen einer sequentiellen Extraktion zur Ermittlung der Bindungsformen von Phosphor unterzogen. Welche der oben besprochenen Proben diesem Verfahren unterworfen wurden, ist Abbildung 107 zu entnehmen.

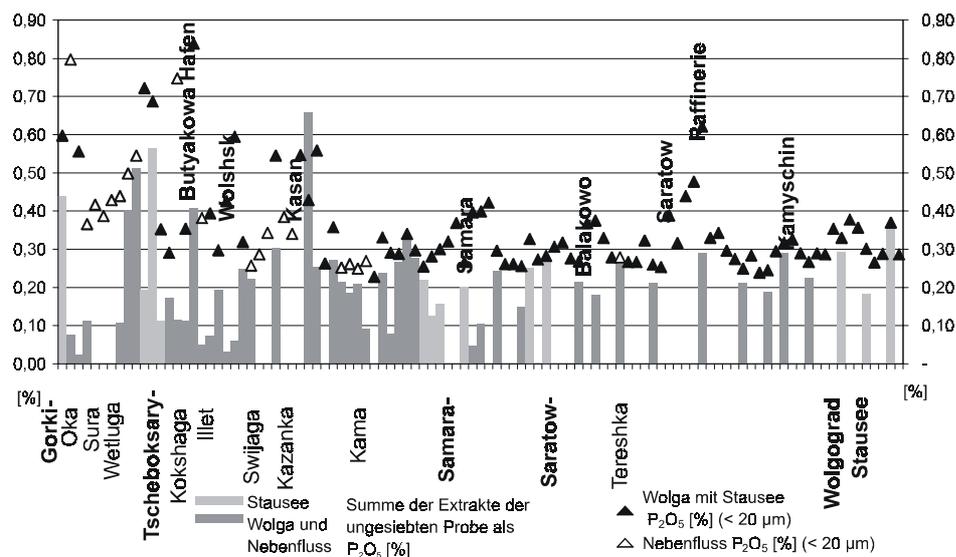


Abbildung 107: Auswahl der extrahierten Sedimentproben (Balken) als Summe der Fraktionen (ungesiebt)

Eine Übersicht über die Ergebnisse der Fraktionierung nach PSENNER et al. (1988) der Sedimente aus der Wolga und ihren Nebenflüssen gibt Abbildung 108.

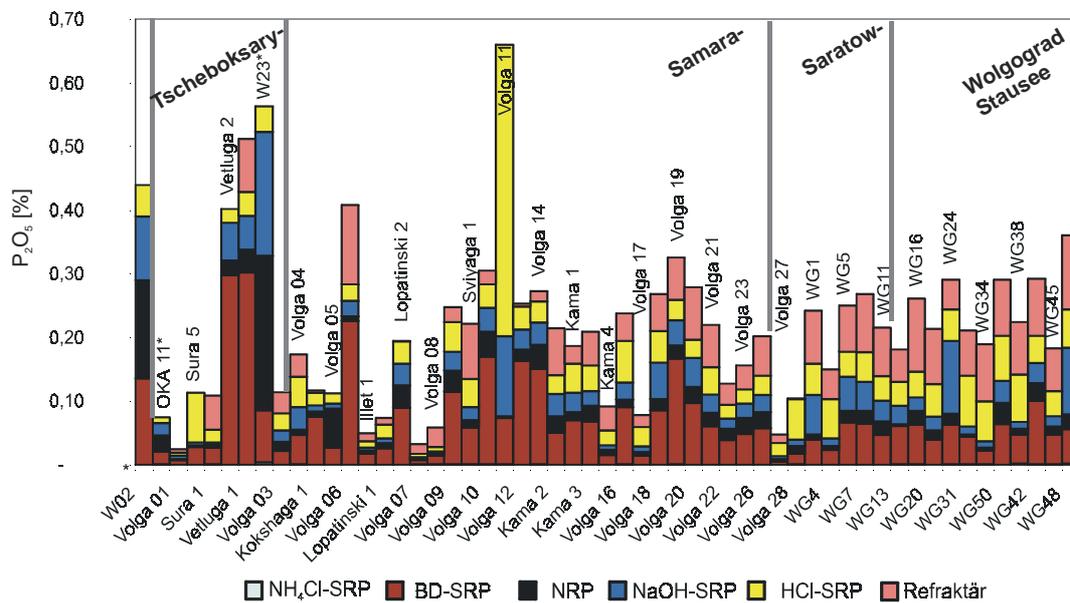


Abbildung 108: Ergebnisse der Fraktionierung nach Psenner et al. (1988); Gehalte an P_2O_5 [%] in der jeweiligen Bindungsform (ungesiebte Probe); (*) Gehalte an refraktärem P nicht bestimmt

Die höchsten Konzentrationen an potentiell mobilisierbarem Phosphor der BD-SRP-Fraktion und der NRP-Fraktion mit zusammen etwa zwischen 0,29% P_2O_5 und 0,34% P_2O_5 finden sich in einer Probe des Gorki Stausees (vor dem Tscheboksary Stausee), in der Wetluga und in einer Probe des Tscheboksary Stausees. Konzentrationen zwischen 0,15% und 0,23% an P_2O_5 in diesen beiden Fraktionen finden sich in sechs Proben der Wolga bis zum Samara Stausee. Weiter flußabwärts macht die Summe dieser beiden Fraktionen unter 0,13% P_2O_5 aus.

Um Auffälligkeiten in der P-Zusammensetzung in Sedimenten erkennen zu können, wurde aus dem Mittelwert und dem Median der P_2O_5 -Gehalte jeder P-Fraktion eine mittlere P-Zusammensetzung berechnet (Abbildung 109). Auch wenn Mittelwert und Median jeder Fraktion im absoluten Gehalt an P_2O_5 leicht abweichen, ist die aus dem Median und dem Mittelwert gebildete Zusammensetzung fast identisch.

Für eine bessere Vergleichbarkeit werden die Ergebnisse der sequentiellen Extraktion auf den Phosphorgehalt in der Fraktion $< 20 \mu m$ bzw. auf die Zusammensetzung in % vom Gesamtphosphor umgerechnet. Aufgrund der großen Datenmenge werden die Sedimente der

Wolga und der Nebenflüsse in einzelnen Abschnitten zwischen den Staustufen dargestellt und besprochen.

Tabelle 40: mittlere Verteilung des Phosphors auf die einzelnen Fraktionen, ermittelt aus 52 bzw. 55 Sedimentproben der Wolga und ihren Nebenflüssen

NH ₄ Cl-SRP	BD-SRP	NRP	NaOH-SRP	HCl-SRP	Refraktär
< 1%	31%	9-11%	14% - 15%	21%	22% - 25%

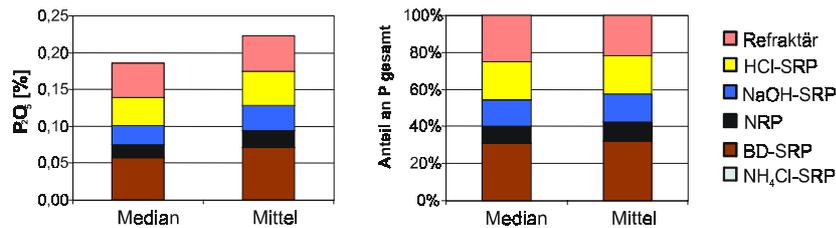


Abbildung 109: Hypothetische mittlere Zusammensetzung des Phosphor pools der Sedimente der Wolga und ihrer Nebenflüsse, ermittelt aus dem Mittelwert und dem Median über 55 bzw. 52 Proben

Wolga zwischen Gorki Stausee und Tscheboksary Stausee

Die Aufteilung des Phosphors auf die einzelnen Bindungsformen ist in Abbildung 110 dargestellt als Anteil der jeweiligen Fraktion an der Summe der extrahierten Fraktionen.

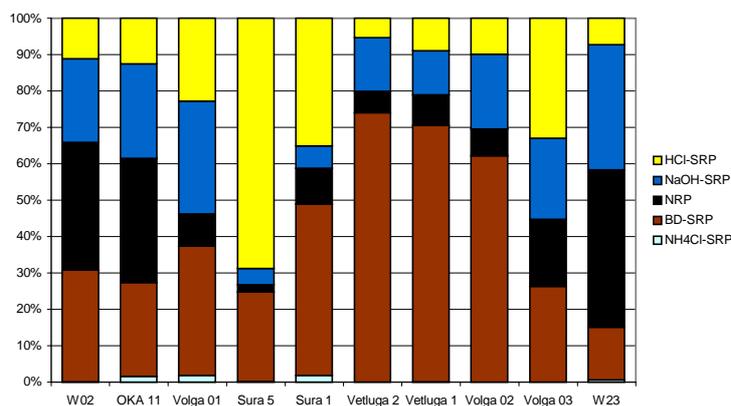


Abbildung 110: Anteil der einzelnen P-Fraktionen an der Summe aller extrahierten Fraktionen (ohne refraktären Anteil)

Zugunsten einer besseren Vergleichbarkeit der Daten wurde auf die Darstellung der nicht extrahierbaren (refraktären) Anteile, die in diesem Abschnitt nicht für alle Proben bestimmt wurden, verzichtet.

Die höchsten reduktiv löslichen **BD-SRP**-Anteile (über 70%) und -Gehalte (0,30% P₂O₅) sind in diesem Abschnitt in der Wetluga zu finden. Auch die Probe „Volga02“ weist noch einen BD-SRP-Anteil von 60% am extrahierbaren Phosphor und einen BD-SRP-Gehalt von 0,12% P₂O₅ auf und ist möglicherweise durch die flußaufwärts einmündende Wetluga beeinflusst. Probe „Volga02“ enthält mit 8,6% auch die höchsten Eisen-Konzentrationen der 10 Proben aus dieser Region. Es besteht zwischen den BD-SRP-Anteilen und dem Eisengehalt in den 10 Sedimentproben nur eine geringe positive Korrelation (r = 0,39), ohne die Proben aus der Wetluga dagegen eine mittlere positive Korrelation (r = 0,66)

Tabelle 41: Korrelation zwischen Anteilen der P-Fractionen (in % an der Summe der extrahierbaren Phosphate ohne refraktären Anteil) und Gesamtphosphor, Eisen und Cadmium (< 20 µm) an 10 Sedimentproben aus Wolga, Sura und Wetluga; (*) ohne Wetluga

	BD-SRP	NaOH-SRP	HCl-SRP	NRP
P₂O₅ (< 20 µm)	-0,03	0,60	-0,69	0,55
Fe	0,39/0,66*	0,12	-0,35	-0,15
Cd	-0,69	0,61	-0,10	0,69

Die höchsten **nicht molybdatreaktiven Anteile**, die für organisch gebundenen Phosphor stehen, finden sich in Probe „W23“, die direkt vor der Staumauer des Tscheboksary Stausees genommen wurde. Ihr Anteil an NRP liegt bei über 40% des extrahierten Phosphors, ihr NRP-Gehalt in der ungesiebten Probe liegt bei 0,23% P₂O₅.

Auch die Probe vor der Staumauer des Gorki Stausees hat einen NRP-Anteil von über 30% am extrahierten Phosphor und einen NRP-Gehalt von 0,15% P₂O₅.

Zwar liegt auch der NRP-Anteil der Probe aus der Oka über 30% des extrahierten Phosphors, der NRP-Gehalt dieser sandigen Probe liegt jedoch nur bei 0,03% P₂O₅.

Alle anderen Proben haben einen NRP-Anteil von weniger als 20% und Gehalte bis maximal 0,04% P₂O₅ in der ungesiebten Probe.

Die relativ hohen Gehalte an organisch gebundenem Phosphor in den beiden Proben vor den Staumauern sind vermutlich eine Folge erhöhter Bioproduktion in Bereichen mit beruhigter Strömung und einem ausreichenden Nährstoffangebot.

Die säurelöslichen **HCl-SRP**-Anteile liegen in der Sura am höchsten, erreichen jedoch in keiner (ungesiebten) Probe Gehalte von mehr als 0,08% P₂O₅.

Die **NaOH-SRP**-Anteile liegen in der Wolga zwischen 22% und 34%, in der Sura und der Wetluga zwischen 5% und 15% des extrahierbaren Phosphors. Die höchsten Anteile und die höchste Konzentration an NaOH-SRP (0,19% P₂O₅ der ungesiebten Probe) enthält Probe „W23“ hinter der Stadt Tscheboksary. Hohe Anteile und Konzentrationen insbesondere in

dieser Fraktion konnten auch in der Oka hinter der Stadt Kolomna oder in der Kljasma hinter den Städten Shchëlkovo oder Orechowo Sujewo gefunden werden, und die Anteile dieser Fraktion sind somit vermutlich bedingt durch den Einfluß von industriellem und kommunalem Abwasser erhöht. Zu dieser Vermutung paßt auch die gefundene mittlere positive Korrelation zwischen den Anteilen dieser Fraktion (an der Summe der extrahierten Fraktionen) und dem Gesamtphosphorgehalt ($r = 0,6$; $n = 10$) sowie der Cadmium-Konzentration ($r = 0,61$; $n = 10$).

Volga zwischen Tscheboksary Stausee und Samara Stausee

Aufgrund der unterschiedlichen Korngrößenverteilung in diesem Abschnitt liegen die P_2O_5 -Konzentrationen der extrahierten ungesiebten Proben zwischen 0,03% und 0,41%. Die Konzentrationen der gleichen Proben in der Fraktion $< 20 \mu m$ liegen dagegen zwischen 0,25% und 0,84%. Der folgende Vergleich bezieht sich daher auf die Verteilung der Bindungsformen auf die P_2O_5 -Gehalte in der Fraktion $< 20 \mu m$ (über Gleichung 6 berechnet).

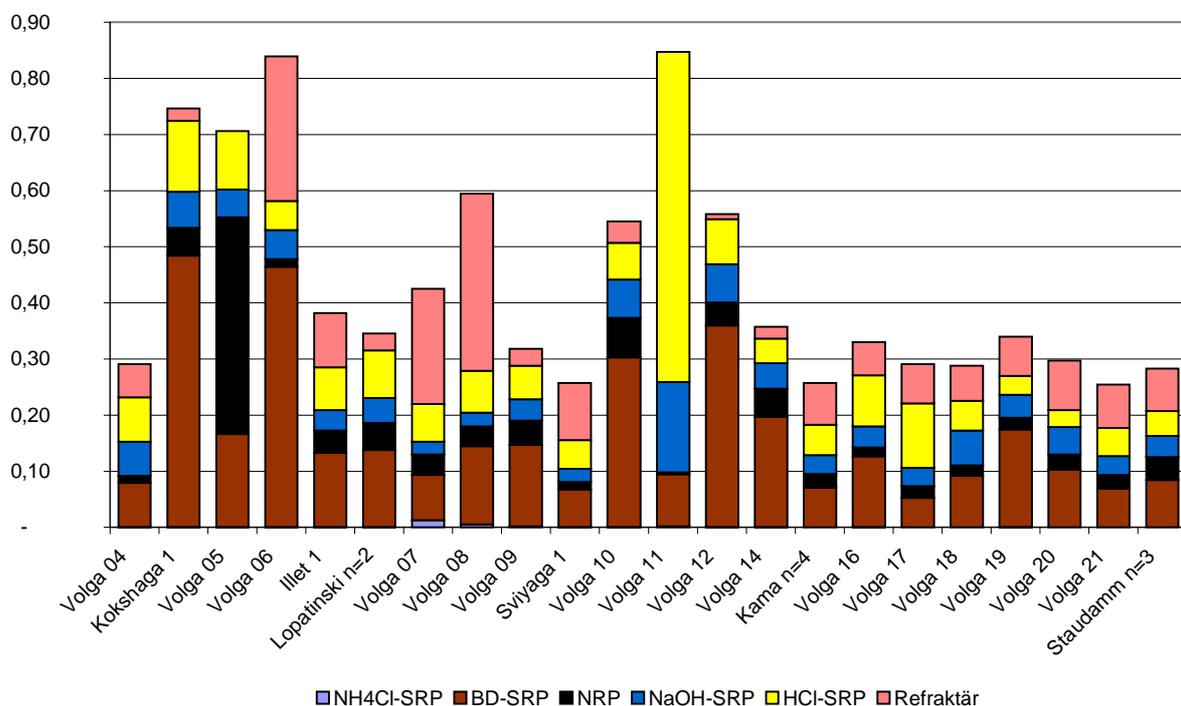


Abbildung 111: Anteile der Bindungsformen von Phosphor an den P_2O_5 -Gehalten [%] der gesiebten Sedimentproben ($< 20 \mu m$)

Die P_2O_5 -Gehalte in der **BD-SRP-Fraktion** liegen in den gesiebten Proben im Mittel bei 0,15% ($n = 28$), die Anteile an allen Fraktionen (inklusive der nicht extrahierbaren refraktären

Fraktion) im Mittel bei 35%. Die höchsten Gehalte in dieser reduktiv löslichen P-Fraktion (0,48% P_2O_5) finden sich in dem Nebenfluß Kokshaga, der wie die Wetluga (mit ebenfalls hohen BD-SRP-Gehalten) vor dem Tscheboksary Stausee das nordwestliche Einzugsgebiet der Wolga in diesem Bereich entwässert. Hohe Anteile dieser Fraktion wurden in der Kljasma überwiegend in intensiv landwirtschaftlich genutzten Regionen gefunden. Die Erosion landwirtschaftlich genutzter Flächen kommt als Phosphatquelle für diese beiden Flüsse in Betracht, die mit 0,52% P_2O_5 bzw. 0,75% P_2O_5 eine hohe Belastung an Phosphor in den Sedimenten (Fraktion $< 20 \mu\text{m}$) aufweisen.

Gehalte von über 0,3% P_2O_5 mit Anteilen von über 50% an der Summe aller Fraktionen treten noch in den Sedimenten des Hafens von Butyakowa (Volga06), in einer Probe vor und in einer Probe hinter der Stadt Kasan (Volga10, Volga12) auf.

Die Gehalte der **nicht molybdatreaktiven P-Fraktion** liegen im Mittel bei 0,04% ($n = 28$), ihr Anteil bei 11%. Auffallend hohe Konzentrationen an P_2O_5 in dieser Fraktion finden sich in Probe „Volga05“, die im strömungsberuhigten Bereich hinter einer Insel genommen wurde. Es handelt sich dabei um eine sehr sandige Probe mit einem Gesamtphosphorgehalt von 0,06% P_2O_5 in der ungesiebten Probe und einem Phosphorgehalt von 0,35% P_2O_5 in der gesiebten Probe. Die Summe aller Fraktionen übersteigt in dieser Probe den Gesamtphosphorgehalt, so daß von einer Inhomogenität in der extrahierten Probe auszugehen ist, die weitere Folgerungen nicht zuläßt.

Die größten Anteile der NRP-Fraktion bei allerdings geringer Variationsbreite finden sich mit 18% in einer Probe aus dem Lopatinski-See (auf einer Wolga Insel) und in zwei Proben vor dem Samara Staudamm (Volga22 mit 14,5% und Volga23 mit 16,5%). Die leicht erhöhten Anteile können auf eine verstärkt stattfindende Primärproduktion bei geringerer Strömungsgeschwindigkeit zurückgeführt werden. Daß die P-Gehalte hier nicht die hohen Werte vor dem Tscheboksary oder dem Gorki Staudamm erreichen, kann an einem insgesamt niedrigerem Nährstoffangebot im Wasserkörper liegen, welches sich wiederum im Sediment widerspiegelt (0,28% bzw. 0,30% P_2O_5 in den Sedimenten vor dem Samara Staudamm gegenüber 0,69% P_2O_5 vor dem Gorki Stausee (W02) oder 0,60% P_2O_5 vor dem Tscheboksary Stausee (W23), bezogen auf Fraktion $< 20 \mu\text{m}$).

Die P-Zusammensetzung im Flußsediment ist schließlich nicht nur ein Abbild der Zusammensetzung eingetragener Partikel, sondern u.a. auch eine Folge der Eintragskonzentration und der Umwandlungsprozesse im Wasserkörper bedingt durch biologische, physikalische und chemische Einflüsse.

Der Eintrag großer Phosphatmengen begünstigt in einem für Bioproduktion geeigneten Gewässer die „Festlegung“ von Phosphor in wenig stabiler Bindungsform, was wiederum zur Rücklösung von Phosphor über das Sediment in den Wasserkörper führt.

Die säurelösliche **HCl-SRP-Fraktion** macht im Mittel 20% der Summe aller Fraktionen aus, die mittlere Konzentration beträgt 0,08% P_2O_5 . Eine Probe (Volga11) fällt mit einem HCl-SRP-Anteil von 69% und einer P_2O_5 -Konzentration von 0.59% in dieser Fraktion auf. Sie wurde etwa 500 m unterhalb einer Kläranlage genommen. Auch in dieser Probe übersteigt die Summe aller Fraktionen den Gesamtphosphorgehalt, und möglicherweise haben mitextrahierte Apatitpartikel oder phosphathaltige Karbonate, wie sie in der Moskwa nachgewiesen wurden, zu den hohen extrahierten HCl-SRP-Anteilen geführt.

Der Anteil der **NaOH-SRP-Fraktion** an der Summe aller Fraktionen liegt im Mittel bei 12%, der mittlere Gehalt bei 0,05% P_2O_5 . Ein Konzentrationsmaximum von 0,16% P_2O_5 (Anteil von 19%) findet sich in der Probe hinter der Kläranlage (Volga11).

Einen Anteil von über 20% macht diese Fraktion nur in einer Sedimentprobe hinter dem Tscheboksary Stausee (Volga04) und in einer weiteren (Volga18) in der Stadt Uljanowsk aus. Neben den relativ hohen NaOH-SRP-Anteilen fallen in Probe „Volga11“ und „Volga18“ noch die höchsten Cd-Konzentrationen mit über 4 mg/kg, die höchsten Kupfer-Konzentrationen mit über 90 mg/kg und die höchsten Chrom-Konzentrationen mit über 140 mg/kg auf.

Volga zwischen Samara Stausee und Saratow Stausee

Die P_2O_5 -Gehalte der sieben extrahierten Sedimentproben zwischen dem Hafen von Togliatti (Volga27: Schleusenbereich des Samara Stausees) und dem Staudamm des Saratow Stausees liegen zwischen 0,05% und 0,3% in der ungesiebten Probe und zwischen 0,26% und 0,4% in der Fraktion $< 20 \mu m$.

Die Darstellung der P-Fractionen (Abbildung 112) bezieht sich auf die P_2O_5 -Gehalte in der gesiebten Probe.

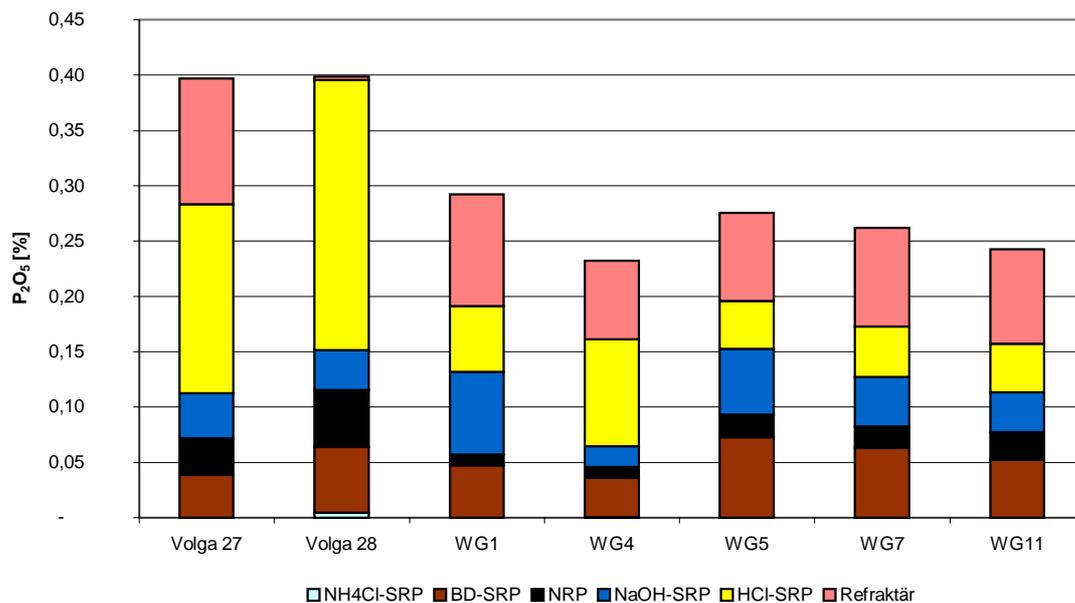


Abbildung 112: Anteile der Bindungsformen von Phosphor an den P_2O_5 -Gehalten [%] der gesiebten Sedimentproben ($< 20 \mu m$)

Probe „Volga27“ wurde im Hafen von Togliatti, Probe „Volga28“ im Hafen von Samara genommen. Proben „WG 5“, „WG 7“ und „WG 11“ vor dem Staudamm des Saratow Stausees.

Die Gehalte an reduktiv löslichem P_2O_5 in der **BD-SRP-Fraktion** liegt im Mittel bei 0,05% ($n = 7$). Die BD-SRP-Anteile machen im Mittel 18% an der Summe aller Fraktionen aus. Der höchste Gehalt mit 0,07% liegt in Probe „WG 5“, vor dem Staudamm des Saratow Stausees. In den Proben direkt vor dem Stausee liegen alle BD-SRP-Anteile über 20%.

Die **NRP-Fraktion** macht im Mittel 8% an der Summe aller Fraktionen aus. Die Konzentrationen an P_2O_5 liegen im Mittel bei 0,02% P_2O_5 . Relativ hohe Gehalte an P_2O_5 (0,03% bis 0,05%) finden sich in den beiden Proben aus den Häfen von Togliatti und Samara, mittlere Gehalte in den Proben vor dem Staudamm und geringe Gehalte (0,01%) im Verlauf

der Wolga dazwischen. Anteile zwischen 13% und 10% finden sich nur in Probe „Volga28“ im Hafen von Samara und in Probe „WG 11“ vor dem Staudamm.

Die P_2O_5 -Gehalte in der **HCl-SRP-Fraktion** liegen im Mittel bei 0,1%, ihr mittlerer Anteil bei 31%. Auffallend hohe Gehalte in dieser Fraktion (0,17% bis 0,24% P_2O_5) finden sich in den Sedimenten der Häfen von Samara und Togliatti. Diese Sedimente haben einen geringen Feinkornanteil und fallen auch durch vergleichsweise hohe Cadmium-Konzentrationen (0,92 mg/kg), Nickel-Konzentrationen (82 mg/kg bzw. 87 mg/kg) und Gesamtphosphorkonzentrationen (0,40% P_2O_5) auf.

Der **NaOH-SRP-Anteil** liegt im Mittel bei 15%, der mittlere Gehalt bei 0,04% P_2O_5 . Probe „WG 1“ enthält mit 0,07% P_2O_5 den höchsten Gehalt an Phosphor und mit 26% auch den größten Anteil dieser Fraktion.

Während die potentiell mobilisierbaren Fraktionen vor dem Staudamm zusammen etwa ein Drittel des Phosphors im Sediment stellen, liegt der Anteil flußaufwärts bei nur 20%. Die Sedimentproben im Hafen von Saratow und Togliatti unterscheiden sich durch ihren hohen Anteil an HCl-SRP deutlich von den Proben flußaufwärts oder flußabwärts.

Wolga zwischen Saratow Stausee und Wolgograd Stausee

Die P_2O_5 -Gehalte liegen in den ungesiebten extrahierten Sedimenten der Wolga und des Nebenflusses Tereshka zwischen dem Saratow Stausee und dem Wolgograd Stausee zwischen 0,19% und 0,41%. In der Fraktion $< 20 \mu m$ liegen die P_2O_5 -Gehalte dieser Proben zwischen 0,24% und 0,62%.

In der Darstellung der Bindungsformen von Phosphor (Abbildung 113) beziehen sich die P_2O_5 -Gehalte in jeder Fraktion auf die Gehalte in der gesiebten Probe.

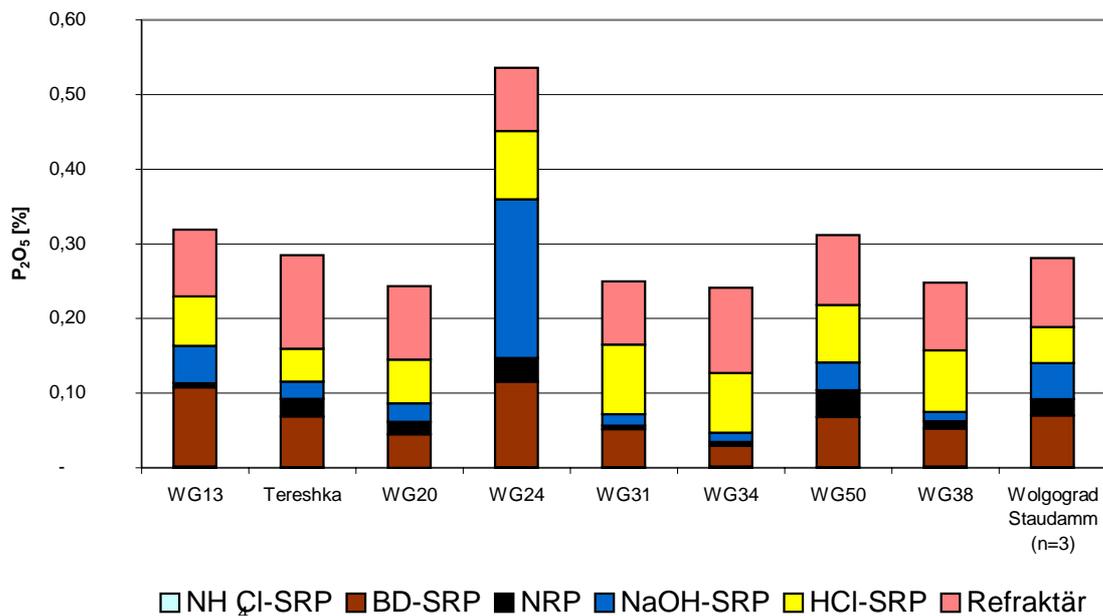


Abbildung 113: Anteile der Bindungsformen von Phosphor an den P_2O_5 -Gehalten [%] der gesiebten Sedimentproben ($< 20 \mu m$)

Die P_2O_5 -Konzentrationen in der **BD-SRP-Fraktion** liegen im Mittel bei 0,07%, ihr mittlerer Anteil an der Summe aller Fraktionen liegt bei 22%. Einen P_2O_5 -Gehalt von 0,1% bzw. 0,11% bei einem Anteil von über 30% am Gesamtphosphor findet sich in den Proben „WG 13“ hinter dem Saratow Staudamm und „WG 42“ vor dem Staudamm des Wolgograd Stausees.

Die organisch gebundenen Phosphate der **NRP-Fraktion** machen in diesem Flußabschnitt im Mittel nur 6% der Summe aller Fraktionen aus. Hinter der Stadt Kamyschin (WG 50) und in Probe „WG 42“ finden sich die höchsten Gehalte (0,04% bzw. 0,03%) und die größten Anteile (12% bzw. 10%) dieser Fraktion.

Im Mittel 24% des Phosphors liegen in diesem Abschnitt in der **HCl-SRP**-Fraktion vor, was einer mittleren Konzentration von 0,07% P_2O_5 entspricht.

In Probe „WG 24“, welche im Bereich einer Raffinerie im Industriegebiet von Saratow genommen wurde, fallen die hohen Gehalte (0.21%) an **NaOH-SRP** auf, die einen Anteil von 40% an der Summe aller Fraktionen stellen. Der Mittelwert über die Anteile dieser Fraktion an der Summe aller Fraktionen zwischen dem Saratow Stausee und dem Wolgograd Stausee liegt dagegen bei nur 14%, der Mittelwert der Konzentration in dieser Fraktion bei 0,05% P_2O_5 . Es findet sich in diesem Abschnitt eine hohe positive Korrelation ($r = 0,89$, $n = 11$) zwischen dem Anteil der NaOH-SRP-Fraktion und dem Gesamtphosphorgehalt. Probe „WG 24“ weist neben hohen Phosphor-Konzentrationen auch hohe Schwermetallgehalte auf. Die Cadmium-Konzentration liegt in diesem Sediment bei 6 mg/kg. Der Einfluß von Industrie spiegelt sich hier nicht nur im Gesamtphosphorgehalt der Sedimente wieder, sondern die Probe aus dem Industriegebiet von Saratow unterscheidet sich auch deutlich in der P-Zusammensetzung von den anderen Proben aus dieser Region.

Wolga zwischen Gorki Stausee und Wolgograd Stausee

Da aufgrund verschiedener Einflüsse im Verlauf der Wolga die Zusammensetzung von Phosphor variiert, ist es für einen Vergleich der Zusammensetzung der Wolgasedimente interessant, die Proben vor den Staumauern zu vergleichen, da sich hier im strömungsberuhigten Bereich die von der Wolga mitgeführten Schwebstoffe absetzen und sich somit ein Bild von der mittleren Belastung ergibt, welches weniger geprägt ist von „untypischen“ Einflüssen und Bereichen wie Abwasserkanälen oder Hafenbecken.

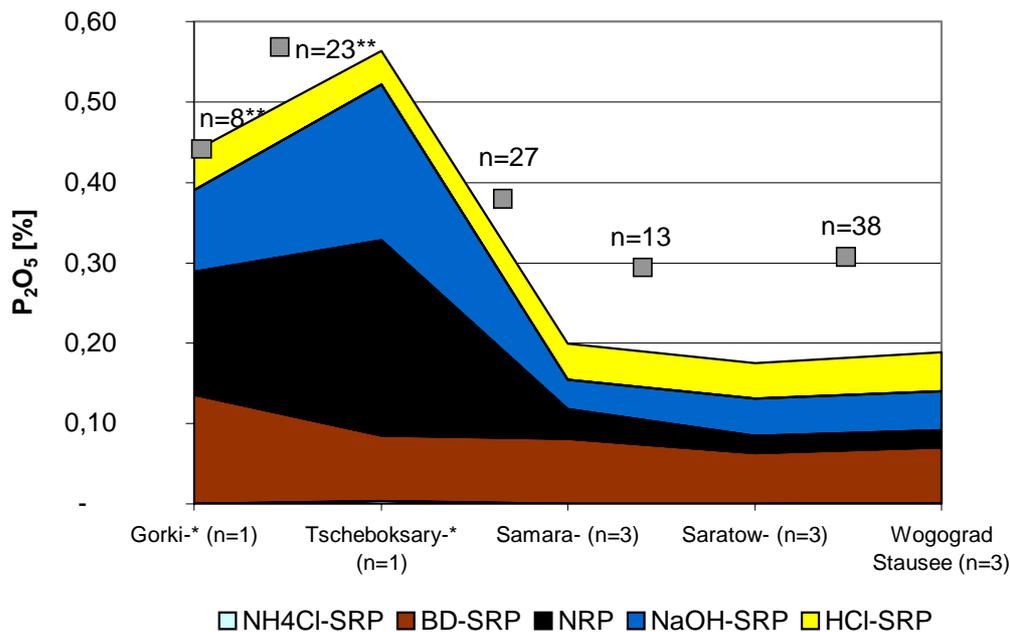


Abbildung 114: Bindungsformen von Phosphor in den Sedimenten vor den fünf Staustufen (Flächen, gemittelt) bezogen auf die Fraktion < 20 µm (*ungesiebte Proben) und P₂O₅-Konzentration (Quadrate) der gesiebten Proben zwischen den Staustufen (** Daten von G. MÜLLER 2000 C)

Da die Anteile von nicht extrahierbarem Phosphor in zwei Staustufen nicht bestimmt oder berechnet wurden und da ihr Anteil für eine mögliche Rücklösung keine Rolle spielt, wurde auf seine Darstellung in Abbildung 114 verzichtet.

Neben den hohen P₂O₅-Konzentrationen in der Fraktion < 20 µm in den Sedimenten zwischen den Staustufen des Gorki Stausees und des Tscheboksary Stausees, auf die oben bereits eingegangen wurde, fallen insbesondere die hohen NRP-Gehalte in den beiden nördlichen Staustufen auf. Die Konzentration an P₂O₅ der **NRP-Fraktion** und der **BD-SRP-Fraktion**, welche beide als potentiell mobilisierbar gelten, machen in diesen Sedimenten in der Summe etwa 0,3% an P₂O₅ aus.

Auch die Konzentration der weniger mobilen **NaOH-SRP-Fraktion**, welche häufig in Sedimenten mit einer hohen Schwermetallbelastung anthropogen erhöht ist, liegt in den

beiden oberen Staustufen um den Faktor 2 bis 4 über den Konzentrationen dieser Fraktion in den unteren Staustufen.

Mit 0,04 P₂O₅ bis 0,05% P₂O₅ liegt die säurelösliche **HCl-SRP-Fraktion** trotz deutlicher Konzentrationsunterschiede im Gesamtphosphorgehalt vor den fünf Staumauern in ähnlichen Konzentrationsbereichen, was auf einen geogenen Ursprung schließen läßt, wie er bereits von anderen Autoren (WILLIAMS et al. 1976 b, REID et al. 1980) für die säurelöslichen Phosphate (Apatit-Phosphor) des Williams-Extraktionsverfahrens in anderen Regionen beschrieben wurde. Daß diese Aussage nur bedingt zutreffend ist, zeigen einzelne Proben z.B. im Hafen von Togliatti oder Samara bzw. aus der Moskwa, die besonders hohe HCl-SRP-Konzentrationen bei einer hohen anthropogen P-Belastung aufweisen.

Abschließend läßt sich festhalten, daß nicht nur die Phosphatbelastung der Wolga im Gorki Stausee und im Tscheboksary Stausee am größten ist, sondern auch die Konzentration der für eine mögliche Rücklösung relevanten Bindungsformen in den Sedimenten dieser beiden Stauseen am höchsten sind. Das im Sediment gespeicherte Phosphat kann noch über einen langen Zeitraum unter reduktiven Bedingungen und über den mikrobiellen Abbau organischer Bestandteile aus tieferen Sedimentschichten herausgelöst werden und über das Porenwasser den Wasserkörper auch bei reduzierten externen P-Einträgen mit dem Nährstoffelement Phosphor versorgen.

5.6.5. Zusammenhang zwischen Phosphorgehalt, P-Zusammensetzung und den Gehalten anderer Elemente in den untersuchten russischen Sedimenten

Die **Gesamtphosphor-Konzentrationen** aller untersuchten Sedimentproben in Rußland weisen sowohl eine hohe positive Korrelation zu den Eisengehalten als auch zu den Quecksilbergehalten in den Sedimenten auf. Eine mittlere positive Korrelation findet sich zwischen dem Gesamtphosphorgehalt und den Gehalten der Elemente Zink, Arsen, Cadmium und Blei (Tabelle 42).

Neben dem Eintrag von Phosphor über industrielles und kommunales Abwasser zusammen mit den Elementen Blei, Zink, Cadmium und Arsen weist die Korrelation von Eisen, welches überwiegend geogenen Ursprungs ist, und Phosphor auf einen gemeinsamen Eintragspfad dieser beiden Elemente hin. Der gemeinsame Eintrag von Phosphor und Eisen dürfte auf die Erosion P-reicher Böden und die Ausfällung von Eisenhydroxiden im Wasserkörper unter Mitfällung von gelösten Phosphaten zurückzuführen sein.

Tabelle 42: Korrelation von den Anteilen jeder P-Fraktion am Gesamtphosphor (in % von 100%) mit den Elementgehalten (< 20 µm). Fett: mittlere und hohe Korrelationskoeffizienten.*In 7 Proben wurde der refraktäre Anteil nicht ermittelt bzw. war negativ. Datentabelle im Anhang

Anteile/ Gehalte		<i>P₂O₅</i>	<i>NH₄Cl-SRP</i>	<i>BD-SRP</i>	<i>NaOH-SRP</i>	<i>HCl-SRP</i>	<i>NRP</i>	<i>Refraktär*</i>
	n	177	81	81	81	81	81	74*
<i>P₂O₅</i>	177	1,00	0,07	0,21	0,66	-0,24	-0,23	-0,47
Pb	177	0,60	-0,01	0,04	0,57	-0,20	-0,16	-0,29
Cd	177	0,60	-0,01	0,04	0,52	-0,18	-0,12	-0,29
Hg	176	0,77	0,07	0,30	0,57	-0,38	-0,21	-0,45
Zn	177	0,68	-0,01	0,08	0,54	-0,20	-0,16	-0,32
Cu	121	0,41	-0,12	-0,21	0,38	0,33	-0,20	-0,32
Ni	121	0,10	-0,10	0,10	-0,13	0,31	-0,28	-0,12
Cr	121	0,34	-0,08	-0,01	0,09	0,48	-0,30	-0,39
Fe	177	0,75	-0,12	0,59	0,30	-0,34	-0,36	-0,34
As	112	0,69	-0,20	0,35	0,54	-0,49	-0,27	-0,49
Li	53	-0,29	-0,48	-0,05	-0,26	0,19	-0,45	-0,04
Co	54	0,01	0,15	0,09	-0,09	0,08	-0,29	0,06

Um Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen bestimmten P-Bindungsformen im Sediment und anderen Elementgehalten im Sediment zu erhalten, lassen sich Korrelationsanalysen durchführen. Dabei ist es wenig sinnvoll, den in der ungesiebten Probe bestimmten Gehalt einer P-Phase mit Elementgehalten der ungesiebten Probe zu vergleichen, da sowohl die Schwermetallgehalte als auch die Phosphorgehalte stark von der Korngröße abhängen. Eine hohe Korrelation zwischen den zu vergleichenden Parametern ergibt sich somit bereits allein aufgrund von „Verdünnungseffekten“ durch grobkörnige Partikel.

Eine höhere Aussagekraft hat eine Korrelation, die anteilig auf den Gesamtphosphorgehalt in der gesiebten Probe umgerechnete P-Phasen mit den Elementgehalten in der Fraktion < 20 µm vergleicht (Tabelle 43). Ein Hinweis auf Zusammenhänge zwischen der *P-Zusammensetzung* im Sediment und bestimmten Elementen läßt sich aber auch so nicht ableiten, da trotz sinkender Anteile einer P-Fraktion am Gesamtphosphor die P-Gehalte in dieser Fraktion abhängig von der Gesamtphosphor-Konzentration sinken, konstant bleiben oder fallen können.

Aus diesem Grund wird der Anteil jeder P-Fraktion an der Summe aller Fraktionen unabhängig von der Gesamtphosphor-Konzentration mit den Elementgehalten in der gesiebten Probe korreliert (Tabelle 42).

Dabei findet sich für alle Sedimentproben aus Rußland eine mittlere positive Korrelation zwischen dem Anteil der **NaOH-SRP-Fraktion** und dem Gesamtphosphorgehalt sowie zwischen den Anteilen dieser P-Fraktion und den Elementen Blei, Quecksilber, Zink, Arsen und Cadmium (Tabelle 42). Noch deutlicher wird der Zusammenhang bei dem Vergleich der absoluten Konzentration der NaOH-SRP-Fraktion und den Elementen Blei, Cadmium und Zink (< 20 µm, Tabelle 43).

Da diese Elemente überwiegend über Industrie und kommunales Abwasser in die Sedimente gelangen, gelangt mit ihnen wohl Phosphor in besonderem Maße auch in dieser Bindungsform in die Sedimente.

Tabelle 43: Korrelation für die P₂O₅-Konzentrationen in den einzelnen P-Fraktionen (umgerechnet auf gesiebte Proben) und die Elementgehalte (< 20 µm); Fett: hohe und sehr hohe Korrelationskoeffizienten; Datentabelle im Anhang

Gehalte/ Gehalte		P ₂ O ₅	NH ₄ Cl-SRP	BD-SRP	NaOH-SRP	HCl-SRP	NRP	Refraktär
	n	177	72	73	73	73	73	68
P ₂ O ₅	177	1,00	0,78	0,86	0,97	0,42	0,32	0,38
Pb	177	0,60	0,61	0,65	0,87	0,24	0,22	0,56
Cd	177	0,60	0,44	0,58	0,75	0,12	0,40	0,25
Hg	176	0,77	0,48	0,68	0,67	0,08	0,23	0,23
Zn	177	0,68	0,51	0,58	0,76	0,19	0,40	0,32
Cu	121	0,41	0,33	0,06	0,56	0,55	-0,06	0,00
Ni	121	0,10	0,01	0,05	-0,01	0,12	-0,12	-0,06
Cr	121	0,34	0,19	0,18	0,32	0,54	-0,09	-0,04
Fe	177	0,75	0,28	0,82	0,51	-0,06	0,07	0,24
As	112	0,69	0,28	0,55	0,59	-0,05	0,37	0,20
Li	53	-0,29	-0,38	-0,22	-0,06	-0,25	-0,27	-0,34
Co	54	0,01	-0,04	-0,07	-0,09	-0,05	-0,32	-0,15

Der Anteil der **BD-SRP-Fraktion** weist eine mittlere positive Korrelation zum Eisengehalt in den Sedimenten auf (Tabelle 42). Eine hohe Konzentration an Eisenoxiden und -hydroxiden

im Sediment spiegelt sich erwartungsgemäß auch in erhöhten Anteilen der reduktiv löslichen Phosphate wider.

Daß sich die an Eisen gebundenen Phosphate auch überwiegend in der BD-SRP-Fraktion wiederfinden, macht die hohe Korrelation von den Eisengehalten mit den P_2O_5 -Gehalten in der BD-SRP-Fraktion ($r = 0,82$) deutlich (Tabelle 43).

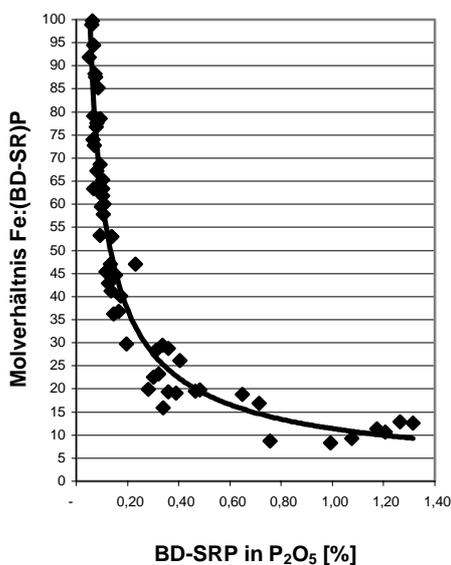


Abbildung 115: Molverhältnis von Eisen zu BD-SRP, aufgetragen gegen den Gehalt an BD-SRP (berechnet auf Fraktion < 20 μm) in 73 Oberflächensedimenten aus Rußland

Betrachtet man das Molverhältnis von Eisen zu reduktiv löslichem molybdatreaktivem Phosphor bei steigenden Gehalten von BD-SRP ergibt sich ein asymptotischer Verlauf. Bei zunehmenden Konzentrationen an reduktiv löslichem Phosphor im Sediment fällt das Molverhältnis von Eisen zu BD-SRP rasch, dann immer schwächer ab und sinkt bis auf ein Verhältnis von etwa acht bis zehn. In den untersuchten Oberflächensedimenten sind vermutlich mindestens acht Mol Eisen nötig, um ein Mol Phosphor zu adsorbieren, und ein weiterer Konzentrationsanstieg von Phosphor in dieser Bindungsform im Sediment ist ohne eine entsprechende Zunahme der Eisen-Konzentration nicht mehr möglich.

Auch wenn kein Zusammenhang zwischen dem *Anteil* der BD-SRP-Fraktion (an der Summe aller Fraktionen) und den anthropogen eingetragenen Schwermetallen erkennbar ist (Tabelle 42), finden sich doch in den *absoluten Konzentrationen* der reduktiv löslichen molybdatreaktiven Phosphate mittlere positive Korrelationen zu den Elementen Blei, Cadmium, Quecksilber und Zink (Tabelle 43). Die Korrelation ist zwar weniger deutlich ausgeprägt als für die Phosphate der NaOH-SRP-Fraktion, dennoch sind in der Regel in Proben mit erhöhten Cadmium-, Blei- oder Zink-Konzentrationen auch die Konzentrationen der BD-SRP-Fraktion erhöht. Industrielles und kommunales Abwasser erhöht zwar

insbesondere die NaOH-SRP-Anteile, jedoch auch die Konzentrationen in der BD-SRP-Fraktion.

Für die Anteile und Konzentrationen der **NRP-Fraktion** ist kein gesicherter Zusammenhang zu einem der betrachteten Elemente herzustellen und der Gehalt organisch gebundener Phosphate hängt stark vom Gewässertyp und den äußeren Bedingungen ab. So konnten in den Sedimentproben vor den Staudämmen der Wolga häufig höhere NRP-Konzentrationen nachgewiesen werden als in den meisten Proben im Flußverlauf oberhalb der Dämme, und die höchsten NRP-Anteile fanden sich in den P-armen Sedimenten eines Flachsees.

6. Gesamtzusammenfassung und Ausblick

Eutrophierung als Folge hoher Nährstoffeinträge, insbesondere zu hoher Phosphoreinträge stellt gegenwärtig und auch zukünftig ein schwerwiegendes Problem für viele Binnen- und Küstengewässer dar. Um präventive Maßnahmen ergreifen zu können, ist die Kenntnis des Gewässerzustandes und der Eintragungssituation erforderlich. Während die Gehalte an Nähr- und Schadstoffen im Wasserkörper starken zeitlichen Schwankungen unterliegen, ist die Untersuchung von Gewässersedimenten ein hilfreiches Mittel, Belastungsschwerpunkte und damit verbunden auch mögliche Eintragungspfade von Schadstoffen in Gewässer auszumachen.

Dazu wurden in dieser Arbeit die Konzentrationen des Nährstoffelementes Phosphor in unterschiedlichen limnischen Sedimenten bestimmt.

- Eine umfangreiche Sedimentkartierung kleiner Fließgewässer bezüglich Phosphor wurde in Baden-Württemberg vorgenommen.
- Die Phosphorgehalte von Sedimenten des größten Flusses Europas, der Wolga und ihrer Nebenflüsse sowie der Kljasma wurden anhand zahlreicher Untersuchungen in einer zusammenhängenden Studie dargestellt.
- In etlichen Stichproben wurde der Phosphorgehalt einiger weiterer limnischer Sedimente bestimmt.

Eine Bewertung erfolgte über die Einteilung in I_{geo} -Klassen (MÜLLER 1978).

Die gewonnenen Ergebnisse können als Grundlage zur Planung zukünftiger Untersuchungen dienen sowie bei der Bewertung oder Einordnung anderer limnologischer Daten aus den Probenahmegebieten helfen.

Der in Sedimenten gebundene Phosphor ist nicht nur ein statisches Abbild der Eintragungssituation, sondern er kann auch abhängig von den äußeren Bedingungen und der Bindungsart mobilisiert werden. Das Sediment kann somit auch zu einer bedeutenden Phosphatquelle für den überstehenden Wasserkörper werden.

Um den Einfluß frühdiagenetischer Prozesse auf die P-Zusammensetzung in limnischen Sedimenten zu verfolgen, wurden Sedimentkerne einem von Psenner (PSENNER et al. 1988) entwickeltem sequentiellen Extraktionsverfahren zur Bestimmung der Bindungsformen von Phosphor unterzogen. Dieses Verfahren wurde auch zur Spezifizierung des bestimmten Gesamtposphors und zur Abschätzung der potentiell mobilisierbaren Anteile in zahlreichen

Fluß- und Seesedimenten eingesetzt. Ergänzend kamen in Einzelfällen elektronenmikroskopische Untersuchungen mit energiedispersiver Röntgenanalyse zum Einsatz.

Um einen möglichen Zusammenhang zwischen den ermittelten Phosphorgehalten und weiteren Sedimentparametern zu erkennen, wurden u.a. die von anderen Wissenschaftlern bestimmten Schwermetallgehalte in die Auswertungen mit einbezogen.

Gesamtphosphorgehalte

Der P_2O_5 -Gehalt aller Proben lag in der Korngrößenfraktion $< 20 \mu m$ zwischen 0,08 % und 3,85 %.

Die mittleren Phosphorgehalte kleiner Fließgewässer in Baden-Württemberg liegen bei 0,33 % P_2O_5 , wobei Konzentrationen bis zu 1,36 % P_2O_5 gefunden wurden. Die höchsten mittleren Phosphorkonzentrationen der Sedimente aus dieser Region wurden in Proben aus Gewässern mit einem landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebiet bestimmt, die geringsten Phosphorkonzentrationen in Proben aus Gewässern, welche von Laubwald oder Verkehrsflächen umgeben sind.

Die Flußsedimente ($< 20 \mu m$) der Wolga enthalten im Mittel 0,36 % P_2O_5 . Die der Kljasma und der Moskwa im Mündungsbereich in die Oka, welche beide durch dicht besiedelte und industrialisierte Gebiete fließen, weisen dagegen im Mittel fünf bis sieben mal so hohe Konzentrationen auf. Daran erkennt man, daß der Konzentrationsbereich, in dem das Nährstoffelement Phosphor in Sedimenten zu finden ist, anthropogen bedingt sehr breit sein kann.

Die mittleren Phosphorkonzentrationen der anthropogen relativ unbeeinflussten (Oberflächen-) Sedimente des Lake Protokskoe, der in einem Naturschutzgebiet liegt, und der vier Flachseen aus dem Pantanal sind mit 0,22 % bzw. 0,23 % P_2O_5 vergleichsweise niedrig.

In den Sedimenten eines eutrophen Flachsees mit ehemals intensiv landwirtschaftlich genutztem Einzugsgebiet, dem Jungferweiher in der Eifel, liegen die P_2O_5 -Konzentrationen im Mittel dagegen bei 0,35 % P_2O_5 .

Zwar wurde in vielen Fällen ein Zusammenhang zwischen erhöhten Schwermetallgehalten und erhöhten Phosphorkonzentrationen in den Sedimenten gefunden, welcher sich mit einem gemeinsamen Eintrag aus Punktquellen erklären läßt, dennoch konnte gezeigt werden, daß der Eintrag von Phosphor aus diffusen Quellen von Bedeutung ist.

Maßnahmen zur Sanierung von Gewässern beruhen vor allem auf der Verringerung von Schadstoffeinträgen. Die in dieser Arbeit durchgeführte Identifizierung von Belastungsschwerpunkten bezüglich des Nährstoffelementes Phosphor sowohl in kleinen Fließgewässern Baden-Württembergs, als auch in größerem Maßstab in den Gewässersystemen Kljasma und Wolga, ermöglicht, einzelne Meßergebnisse in einen größeren Zusammenhang einzuordnen und kann bei zukünftigen Bemühungen um eine Eintragsverminderung in den untersuchten Regionen von Nutzen sein.

Bindungsformen

Die Kenntnis der Anteile potentiell mobilisierbarer P-Fraktionen am Gesamtphosphorgehalt im Sediment ist hilfreich für die Bewertung des P-Freisetzungspotentials der Sedimente. So stellen Sedimente - unter sonst gleichen Bedingungen - mit einem hohen Gesamtphosphorgehalt bei geringen potentiell mobilisierbaren Anteilen eine geringere Gefahr für den überstehenden Wasserkörper bezüglich einer Eutrophierung dar als Sedimente mit mittleren P-Gehalten und hohen potentiell mobilisierbaren Anteilen.

Zur Charakterisierung unterschiedlicher Bindungsformen des Phosphors in limnischen Sedimenten wurde ein sequentielles Extraktionsverfahren (PSENNER 1988) eingesetzt, welches Phosphorverbindungen mit ähnlichen Lösungseigenschaften in operationell definierten Fraktionen zusammenfaßt.

Änderung der P-Zusammensetzung mit der Sedimenttiefe in den untersuchten Sedimentkernen

Für das Sediment des Jungferweiher konnte gezeigt werden, daß die Phosphate der BD-Fraktion, also die unter reduktiven Bedingungen löslichen Phosphate und die P-Verbindungen der NRP-Fraktion, also die organisch gebundenen Phosphate, mit der Sedimenttiefe abnehmen.

Auch für die Sedimentkerne aus vier Flachseen und für den Sedimentkern aus dem Rio Cuiabá im Pantanal wurde bezüglich der Sedimentzusammensetzung eine tendenzielle Abnahme der BD-SRP- und der NRP-Anteile mit der Tiefe gefunden, während die Anteile der anderen Bindungsformen konstant bleiben bzw. zunehmen.

Im Bodensee nimmt insbesondere der Anteil der säurelöslichen Phosphate (HCl-SRP) zulasten anderer Bindungsformen mit der Tiefe zu.

Vergleicht man die Sediment-P-Zusammensetzung der untersuchten Sedimentkerne in den obersten Sedimentschichten mit der Zusammensetzung in tieferen Zonen, wird deutlich, daß

die Phosphate der BD-SRP- und der NRP-Fraktion im Oberflächensediment in der Regel einen größeren Anteil am Gesamtphosphor stellen, als in tieferen Sedimenthorizonten.

Nur über Langzeituntersuchungen kann festgestellt werden, wie groß der Einfluß einer möglicherweise veränderten P-Zusammensetzung in den sedimentierenden Partikeln auf die sich mit der Zeit (mit der Tiefe) verändernde Sediment-P-Zusammensetzung wirklich ist. Dennoch kann die Abnahme des mit Hilfe des Extraktionsverfahrens identifizierten organisch gebundenen Phosphors (NRP), welcher durch Mineralisierung freigesetzt wird, zu einem wesentlichen Teil auf frühdiagenetische Prozesse zurückgeführt werden.

Auch reduktiv löslicher Phosphor wird während der Frühdiagenese durch anoxische Verhältnisse insbesondere aus Eisenhydroxiden, welche als terminale Elektronenakzeptoren bei der Mineralisierung eine Rolle spielen, mobilisiert.

Phosphor aus den unteren Sedimentschichten wird folglich aus diesen beiden mit Hilfe der sequentiellen Extraktion erfaßten Fraktionen mobilisiert, was zu einer Anreicherung dieses Nährstoffes in den oberen Sedimenthorizonten sowie zu einer Phosphatrücklösung führen kann.

Die Zunahme der refraktären P-Verbindungen sowie der säurelöslichen und der gegen Hydroxidionen austauschbaren (molybdatreaktiven) P-Anteile mit der Tiefe weist auf eine Festlegung von Sediment-P in diesen Fraktionen.

Auch wenn das Verfahren der sequentiellen Extraktion keine Auskunft darüber geben kann, in welcher genauen Bindungsform das Element Phosphor im Sediment auftritt, konnte in dieser Arbeit bestätigt werden, daß es geeignet ist, um für eine P-Rücklösung in Frage kommende P-Fraktionen zu identifizieren, nämlich die unter den in Sedimenten herrschenden reduzierenden Bedingungen löslichen Phosphate (BD-SRP-Fraktion) und die durch mikrobiellen Abbau mobilisierbaren organisch gebundenen Phosphate der NRP-Fraktion.

P-Spezifizierung in Oberflächensedimenten

Während sich die P-Zusammensetzung in ähnlichen Gewässertypen in gleichen Regionen stark ähnelt, gibt es in der P-Zusammensetzung in gleichen Gewässertypen aus unterschiedlichen Regionen große Unterschiede. Allerdings ist den untersuchten Flachseen (ohne Pekinger Stadtseen) ein hoher Anteil an organisch gebundenem P (charakterisiert durch die NRP- und die refraktäre Fraktion im Extraktionsschema) von 43 % bis 59 % gemein.

Die P-Zusammensetzung der Sedimente des Bodensees, einem tiefen Hartwassersee, unterscheidet sich durch einen höheren Anteil an säurelöslichem Phosphat und einen geringeren Gehalt an organischem Phosphat von den meisten untersuchten Flachseen.

Die Sedimente der untersuchten Flüsse haben ebenfalls im Mittel geringere Anteile an organisch gebundenem Phosphor als die Flachseen.

In den russischen Sedimenten konnte eine enge Beziehung gefunden werden zwischen den (durch Abwassereinleitung charakteristisch in erhöhter Konzentration auftretenden) Elementen Cadmium, Zink und Blei und dem Gesamtphosphorgehalt sowie den Anteilen der NaOH-SRP-Fraktion, die gegen Hydroxidionen austauschbares Orthophosphat umfaßt.

Die P-Zusammensetzung in den Sedimenten ist sowohl vom Typ des Gewässers, als auch von der Geologie des Einzugsgebietes und dem anthropogenen Einfluß abhängig. So enthalten Flachseen zumeist einen höheren Anteil organisch gebundener Phosphate als Fließgewässer, da in Flüssen aufgrund höherer Strömungsgeschwindigkeit die Primärproduktion limitiert wird. Ein kalkreiches Einzugsgebiet (Bodensee) schlägt sich im erhöhten Anteil der säurelöslichen Phosphate nieder, und die massive Einleitung von Abwasser erhöht insbesondere die Anteile der gegen Hydroxidionen austauschbaren, adsorbierten Phosphate (Kljasma).

Das Verfahren der sequentiellen Extraktion wird auch in Zukunft seinen Einsatz finden, wenn die Zusammensetzung oder Veränderung von P-Bindungsformen in Sedimenten, Böden oder auch Klärschlamm von Interesse ist. Zwar erlauben andere Methoden zur P-Spezifizierung wie die Elektronenmikroskopie mit energiedispersiver Röntgenanalyse oder die Kernresonanzspektroskopie teilweise konkretere Aussagen zu den Bindungsarten, sie erreichen aufgrund geringer Empfindlichkeit jedoch rasch ihre Grenzen.

Obwohl die sequentielle Extraktion wie gezeigt als ein hilfreiches Instrument zur Charakterisierung des Phosphor-Pools in Sedimenten eingesetzt werden kann, ist für ein weitergehendes Verständnis der Vorgänge im Sediment die Einbeziehung aller am Phosphatkreislauf beteiligten Kompartimente, die Entwicklung und der Einsatz weiterer Methoden sowie eine interdisziplinäre Zusammenarbeit erforderlich.

7. Literatur

- Bauer H-D, Uhlmann D. 1989. Nachweis phosphorspeichernder Bakterien im Belebtschlamm mittels Elektronenmikroskopie und Röntgenspektroskopie. *Wasser Abwasser*. 130/2: 73-75
- Beijing This Month Online. Nov 99 Iss 72:
<http://www.chinesebusinessworld.com/btm/072.html>
- Bliefert C. 1995. *Umweltchemie*. 1. Nachdruck. Weinheim: VCH
- Blösch J, Armengol J, Giovanoli F, Stabel H-H. 1988. Phosphorus in suspended and settling particulate matter of lakes. *Archiv für Hydrobiologie*. Beih 30: 84-90
- Boers P, Van der Does J. 1993. How to quantify the impact of internal phosphorus loading on the phosphorus concentration in shallow lakes. In: Boers PCM, Clappenberg ThE, Van Raaphorst W (Hrsg). *Developments in Hydrobiology*. Dordrecht: Kluwer. 84: 373
- Chang SC, Jackson ML. 1957. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Science*. 84: 133-144. (Zit nach Hupfer 1995)
- Cech JS, Hartman P. 1993. Competition between polyphosphate and polysaccharide accumulating bacteria in enhanced biological phosphate removal systems. *Wat Res*. 27/7: 1219-1225
- CNPIEC. -. Beijing: The latest tourist map. China National Publication I/E Corp.
- Clark JE, Wood HG. 1987. Preparation of standards and determination of sizes of long-chain polyphosphates by gel electrophoresis. *Anal Biochem*. 161: 280-290
- Clark JE, Beegen H, Wood HG. 1986. Isolation of intact chains of polyphosphate from „*Propionibacterium Shermanii*“ grown on glucose or lactate. *Journal of Bacteriology*. 168: 1212-1219
- Deppe Th, Benndorf J. 1998. Ein kombiniertes Verfahren der Gewässerinternen Phosphatfällung und Tiefenwasserförderung zur Blaualgenbekämpfung in eutrophierten Standgewässern. In: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH (Hrsg). *Entwicklung von Gewässertechnologien zur Sanierung von Talsperren und Seen*. Dresden: Abschlußbericht 1998 des vom BMFT geförderten Verbundvorhabens „Stehende Gewässer“. 261-298
- Ehwald F. 1995. Geochemische Untersuchungen an Sedimenten und Porenwässern des Jungferweiher, einem polytrophem Flachsee in der Eifel. *Heidelberger Beiträge zur Umwelt-Geochemie*. 2. Heidelberg
- Einsele W. 1938. Über chemische und kolloidchemische Vorgänge in Eisen-Phosphat-Systemen unter limnischen und limnologischen Gesichtspunkten. *Arch Hydrobiol*. 33: 361-387 (Zit nach Zinder, 1985)

- Fels. 2000. <http://www.geologie.uni-stuttgart.de/fels/index.html>
- Fröhlich PN, Klinkhammer GP, Bender ML, Lüttke NA, Heath GR, Cullen D, Dauphin P, Hammond D, Hartman B, Maynard V. 1979. Early oxidation of organic matter in pelagic sediments of the eastern equatorial Atlantic: suboxic diagenesis. *Geochim Cosmochim Acta* 43: 1075-1090
- Gächter R, Meyer JS. 1993. The role of microorganisms in mobilization and fixation of phosphorus in sediments. In: Boers PCM, Clappenberg ThE, Van Raaphorst W (Hrsg). *Developments in Hydrobiology*. Dordrecht: Kluwer. 103-123
- Gleisberg D. 1991. Kontrolle des Phosphors in der Umwelt - zu Vorkommen, Elimination und Algenverfügbarkeit. *Z Wasser - Abwasser-Forsch.* 24: 157-164
- Goltermann HL. 1996. *Hydrobiol.* 5:1ff (Zit nach Ruban et al. 1999)
- Haider K. 1996. *Biochemie des Bodens*. Stuttgart: Enke Verlag
- Heinrichs H. 1993. Die Wirkung von Aerosolkomponenten auf Böden und Gewässer industriereferner Standorte: eine geochemische Bilanzierung. *Habilitationsschrift* (unveröffentlicht). Universität Göttingen. (Zit nach Wolf 1994)
- Heinrichs H, Herrmann AG. 1990. *Praktikum der Analytischen Geochemie*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag. 482-488
- Hesse M, Meier H, Zeeh B. 1991. *Spektroskopische Methoden in der organischen Chemie*. 4. Auflage. Stuttgart, New York: Georg Thieme Verlag
- Hieltjes AHM, Lijklema L. 1980. Fractionation of inorganic phosphates in calcareous sediments. *J Environ Qual.* 9/3:405-407. (Zit nach Hupfer 1995)
- Hupfer M. 1995. Bindungsformen und Mobilität des Phosphors in Gewässersedimenten. In: Steinberg C, Klapper B (Hrsg). *Handbuch der Angewandten Limnologie*. Landsberg: Ecomed. 1-22
- Hupfer M, Zippel B. 1998. Steuerung der Phosphat-Retention durch Seeinterne Maßnahmen Erfahrungen und konzeptionelle Ansätze. In: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH (Hrsg). *Entwicklung von Gewässertechnologien zur Sanierung von Talsperren und Seen*. Dresden: Abschlußbericht 1998 des vom BMFT geförderten Verbundvorhabens „Stehende Gewässer“. 25-54
- Hupfer M, Gächter R, Giovanoli, R. 1995. Transformation of phosphorus species in settling seston and during early sediment diagenesis. *Aquatic Science.* 57/4: 305-324
- Hupfer M, Gächter R, Rügger H. 1995. Polyphosphate in lake sediments: ³¹P NMR spectroscopy as a tool for its identification. *Limnol Oceanogr.* 40/3: 610-617
- Hylander L D, Meili M, Oliveira L J, Castro e Silva E, Guimarães J R D, Araujo D M, Neves R P, Stachiw R, Barros A J P, Silva G D. 2000. Relationship of mercury with

- aluminum, iron and manganese oxy-hydroxides in sediments from the Alto Pantanal, Brazil. *The Science of the Total Environment* (in print)
- IGKB (Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee). 1998. Zustand des Seebodens 1992-1994 Sedimentinventare - Phosphor - Oligochaeten. *Ber Int Gewässerschutzkomm Bodensee*. 46
- IGKB (Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee). 1999. Phosphor und Stickstoff aus diffusen Quellen im Einzugsgebiet des Bodensees 1996/97. *Ber Int Gewässerschutzkomm Bodensee*. 51:69-70
- Imisiecke G, Münkner J, Lorenz B, Bachinski N, Müller WEG, Schröder HC. 1996. Inorganic Polyphosphates in the developing freshwater sponge *Ephydatia Muelleri*: effect of stress by polluted waters. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 15/8: 1329-1334
- Kleeberg A. 1997. Interactions between benthic phosphorus release and sulfur cycling in lake Scharmützelsee (Germany). *Water, Air and Soil Pollution*. 99: 392-399
- Korndörfer J. 1993. Umweltgeochemische Untersuchungen an Sedimenten der Oka/Rußland (Abschnitt Kaluga - Nizhni Novgorod). Diplomarbeit. Universität Heidelberg
- Koschel RH, Dittrich M, Casper P, Gonsiorczyk T, Heiser A, Rossberg R. 1998. Induzierte hypolimnische Calcitfällung zur Restaurierung geschichteter eutropher Seen. In: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH (Hrsg). *Entwicklung von Gewässertechnologien zur Sanierung von Talsperren und Seen*. Dresden: Abschlußbericht 1998 des vom BMFT geförderten Verbundvorhabens „Stehende Gewässer“. 55-97
- Kunst S. 1991. Untersuchungen zur biologischen Phosphoreliminierung im Hinblick auf ihre Abwassertechnische Nutzung. In: Seyfried CF (Hrsg). *Veröffentlichungen des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität Hannover*. 77
- LAWA (Länderarbeitsgemeinschaft Wasser). 1985. *Seen in der Bundesrepublik Deutschland*. Essen: Woeste Druck. 20-22
- Landner L, Wahlgren U. 1988. Eutrophication of lakes and reservoirs in warm climates In: *Environmental Health*. Copenhagen: World Health Organization, Regional Office for Europe
- Leitão JM, Lorenz B, Bachinski N, Wilhelm C, Müller WEG, Schröder HC. 1995. Osmotic-stress-induced synthesis and degradation of inorganic polyphosphates in alga *Phaeodactylum Tricornutum*. *Mar Ecol Prog Ser*. 121: 279-288
- Liebezeit G. 1991. Analytical phosphorus fractionation of sediment trap material. *Marine Chemistry*. 33: 61-69
- Liebezeit G, Kraul T. 1999. Analytical fractionation of particulate phosphorus in the Wadden Sea, southern North Sea. *Senckenbergiana maritima*. 30: 67-72

- Lorenz B, Batel R, Bachinski N, Müller WEG, Schröder HC. 1995. Purification and characterization of two exopolyphosphatases from the marine sponge *Tethya Lyncurium*. *Biochimica et Biophysica Acta*. 1245: 17-28
- Lorenz B, Müller WEG, Kulaev IS, Schröder HC. 1994. Purification and characterization of an exopolyphosphatase from *Saccharomyces Cerevisiae*. *J Biol Chem*. 269/35: 22198-22204
- Luchko R. 2000. <http://www.erlangen-haus.nm.ru/wunder1.htm>
- Lüsse B. 1997. Abschlußbericht 1997 des F+E-Verbundforschungsvorhaben 02-WT9320/8. Eintrag und Verbleib von Nähr- und Schadstoffen aus einem Mittelgebirgseinzugsgebiet in einen Flachsee. Landesamt für Wasserwirtschaft. Rheinland Pfalz
- Mortimer CH. 1941. The exchange of dissolved substances between mud and water in lakes I. *J Ecol*. 29: 280-329. (Zit nach Zinder, 1985)
- Müller G. 1978. Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins Veränderungen seit 1971. *Umschau der Wissenschaft und Technologie*. 79: 778-783
- Müller G. 1997. Chronologie des anthropogenen Phosphoreintrags in den Bodensee und seine Auswirkung auf das Sedimentationsgeschehen. In: Matschullat Tobschall Voigt (Hrsg). *Geochemie und Umwelt*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag
- Müller G, Ehwald F, Hamann A. 1990. Langzeituntersuchung über das Verhalten von Phosphor, Stickstoff und Bor bei der mechanisch-biologischen Abwasserreinigung am Beispiel der kommunalen Kläranlagen Bammental und Wiesloch (Rhein-Neckar). *Heidelberger Geowissenschaftliche Abhandlungen*. 34. Heidelberg
- Müller G, Yahya A, Ottenstein R, Raynin V, Kolomiytsev N, Naydenko VV, Sobol SV. 2000 a. Some results of pollution research in the bottom deposits of the Volga River. In: *Melioracijan I Vodonoe Chozjastvo (Melioration and Water Resources)* 3: 40-44
- Müller G, Yahya A, Ottenstein R, Raynin V, Kolomiytsev N, Naydenko VV, Sobol SV, Shagidullin PP, Trofanchuk V. 2000 b. Heavy metal composition of sediments in the middle and lower course of the Volga River, Russian Federation. In: 11th Annual International Conference on Heavy Metals in the Environment. J Nriagu (Editor). Contribution #1118. University of Michigan, School of Public Health. Ann Arbor, MI (CD-ROM)
- Müller G, Yahya A, Schöler HF. 2000 c. First results of a study on Volga-sediment quality. Wolga-Rhein-project - pre-phase - 1997-1999 with support of Bundesministerium für Bildung und Forschung. Institute of Environmental Geochemistry, University of Heidelberg/ All Russian Research Institute for Hydraulic Engineering and Land Reclamation, Moscow
- Müssig-Zufika M, Jekel M. 1992. Methoden zur differenzierten Bestimmung von Orthophosphat, kondensierten Phosphaten und Polyphosphaten. *Z-Wasser-Abwasser-Forsch*. 25: 353-356

- Nriagu JO, Moore PB. 1984. Phosphate Minerals. Berlin Heidelberg: Springer Verlag
- Paul L, Schröter K, Labahn J, Habi M. 1998. Eine Vorsperre in der Talsperre- Der Einsatz einer Folientauchwand zur Verminderung des Nährstoffeintrages. In: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH (Hrsg). Entwicklung von Gewässertechnologien zur Sanierung von Talsperren und Seen. Dresden: Abschlußbericht 1998 des vom BMFT geförderten Verbundvorhabens „Stehende Gewässer“. 135-175
- Pettersson K, Boström B, Jacobsen O-S. 1988. Phosphorus in sediments - speciation and analysis. *Hydrobiologia*. 170: 91-101
- Psenner R, Pucsko R, Sager M. 1984. Die Fraktionierung organischer und anorganischer Phosphorverbindungen von Sedimenten: Versuch einer Definition ökologisch wichtiger Fraktionen. *Arch Hydrobiol. Suppl* 70: 115-155
- Psenner R, Boström B, Dinka M, Pettersson K, Pucsko R, Sager M. 1988. Fractionation of phosphorus in suspended matter and sediment. *Arch Hydrobiol. Beih* 30: 99-103
- Redfield AC. 1958. The biological control of chemical factors in the environment. *Am Sci*. 46: 206-226
- Reid RP, Pharo CH, Barnes WC. 1980. Direct determination of apatite in lake-sediments. *Can J Fish Aquat Sci*. 37: 640-646
- Rönicke H, Beyer M, Zippel B, Herzsprung P, Elsner W, Luther G. 1998. Steuerung der Phosphordynamik und der Phytoplanktonabundanz durch Aufspülung seeinternen Kalzits. In: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH (Hrsg). Entwicklung von Gewässertechnologien zur Sanierung von Talsperren und Seen. Dresden: Abschlußbericht 1998 des vom BMFT geförderten Verbundvorhabens „Stehende Gewässer“. 99-131
- Röske I, Uhlmann D. 1992. Eine einfache Methode zur Unterscheidung von Polyphosphat und chemisch gebundenem Phosphat in Belebtschlamm aus Anlagen mit weitergehender Abwasserbehandlung. *Wasser Abwasser*. 133/2: 87-91
- Rosknecht H. 1980. Phosphatelimination durch autochthone Calcitfällung im Bodensee-Obersee. *Arch Hydrobiol*. 88/3: 328-344
- Ruban V, Lopez-Sanchez JF, Pardo P, Rauret G, Muntau H, Quevauviller Ph. 1999. Selection and evaluation of sequential extraction procedures for the determination of phosphorus forms in lake sediment. *J Environ Monit*. 1: 51-56
- Ruttenberg KC. 1992. *Limnol Oceanogr*. 7: 1460ff. (Zit nach Ruban et al. 1999)
- Scharf B. 1996. Seentherapie. Habilitationsschrift. Braunschweig
- Sroczynski G. 1996. Phosphorfreisetzung aus Profundalsedimenten des Bodensees (Obersee). Diplomarbeit. Universität Konstanz

- Turekian KK, Wedepohl KH. 1961. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Bull Geol Soc Am.* 72: 175-192
- Uhlmann D, Bauer H-D. 1988. A remark on mikroorganisms in lake sediments with emphasis on polyphosphate-accumulating bacteria. *Int Revue ges Hydrobiol.* 73/6: 703-708
- Uhlmann D, Röske I, Hupfer M, Ohms G. 1990. A simple method to distinguish between polyphosphate and other phosphate fractions of activated sludge. *Wat Res.* 24/11: 1355-1360
- Vaeth E, Sladek P, Kenar K. 1987. Ionen-Chromatographie von Polyphosphaten und Phosphonaten. *Fresenius Z anal Chem.* 329: 584-589
- Van der Does JP, Verstraelen P, Boes J, Van Roestel R, Roijackers R, Moser G. 1992. Lake restauration with and without dredging of phosphorus-enriched upper sediment layers. *Hydrobiologia.* 233: 197-210. (Zit nach Hupfer & Zippel 1998)
- Waara T, Jansson M, Pettersson K. 1993. Phosphorus composition and release in sediment bacteria of the genus *Pseudomonas* during aerobic and anaerobic conditions. *Hydrobiologia.* 253: 131-140
- Wedepohl KH. 1991. The composition of the upper`s earth crust and the natural cycles of selected metals. Metals in natural raw materials. Natural resources. In: Merian E (Hrsg). *Metals and their Compounds in the Environment. Occurrence, Analysis and Biological Relevance.* 1438 S. Weinheim: Verlag Chemie
- Wehrli B, Wüest A. 1996. Zehn Jahre Seenbelüftung: Erfahrungen und Optionen. Dübendorf-Zürich: Schriftenreihe der Eawag: 9
- Williams JD, Syers JK, Armstrong DE, Harris F. 1971. Fractionation of inorganic phosphate in calcareous lake sediments. *Soil Sci Soc Amer Proc.* 35: 250-255. (Zit nach Hupfer 1995)
- Williams JDH, Jaquet J-M, Thomas RL. 1976 a. Forms of phosphorus in the surficial sediments of Lake Erie. *J Fish Board Can.* 33: 413-429
- Williams JDH, Murphy TP, Mayer T. 1976 b. Rates of accumulation of phosphorus forms in Lake Erie sediments. *J Fish Res Board Can* 33: 430-439
- Wolf U. 1994. Nähr- und Schadstoffbelastung kleiner Seen in Baden-Württemberg unter Berücksichtigung der Sedimentationsgeschichte: die Rolle der kleinen Stehgewässer im regionalen Verbund. Göttingen: Cuvillier Verlag
- Yahya A, Ludwig A. 1997. Stoffwechselprozesse an der Sediment-Wasser-Grenzschicht und Bodenanalytik. In: Abschlußbericht des F+E-Verbundforschungsvorhabens 02-WT9320/8. Eintrag und Verbleib von Nähr- und Schadstoffen aus einem Mittelgebirgseinzugsgebiet in einen Flachsee. Landesamt für Wasserwirtschaft. Rheinland Pfalz

- Yahya A, Ludwig A, Ottenstein R, Gastner M, Reichelt M, Krause S, Niedan V, Eiden R, Kolomiytsev N, Zimina-Shaldybina L, Ilina T. 2000. Oka Elbe Project Part 2: Heavy metals and organic pollutants in Oka River sediments. Research Project 02WT9615/15 with support of Bundesministerium für Bildung und Forschung. Institute of Environmental Geochemistry, University of Heidelberg/ All Russian Research Institute for Hydraulic Engineering and Land Reclamation, Moscow
- Zhou M M, Liu J Y, Bertine K K, Koide M, Goldberg E D. 1989. Atmospheric pollution in Beijing, China, as recorded in sediments of the Summer Palace Lake. *Environmental Conservation*. 16/3: 233-236
- Zinder B. 1985. Phosphatrücklösung aus Sedimenten als Folge der Reduktion von Eisenhydroxiden. Dissertation. ETH Zürich
- Zöfel P. 1985. Statistik in der Praxis. Stuttgart: Fischer Verlag

Datenanhang

Inhalt

Teil 1: Sedimente kleiner Fließgewässer in Baden-Württemberg	2
Elementkonzentrationen	3
Korrelationsdiagramme	18
P ₂ O ₅ -Konzentrationen gemittelt über Rasterpunkte...	20
Teil 2: Jungferweiher	21
Ergebnisse der sequentiellen Extraktion	22
Teil 3: Bodensee	23
Ergebnisse der sequentiellen Extraktion	24
Teil 4: Gewässersedimente im Pantanal, Brasilien	25
Ergebnisse der sequentiellen Extraktion	26
Elementkonzentrationen	27
Korrelationsdiagramme	28
Teil 5: Seesedimente in Peking	30
Ergebnisse der sequentiellen Extraktion	31
Teil 6: Gewässersedimente in Rußland	32
Russische Orts- und Gewässernamen	33
Ergebnisse der sequentiellen Extraktion	35
Elementkonzentrationen	39
Korrelationsdiagramme für alle russischen Sedimentproben	48
Oberflächensedimente	51

Datenanhang

Teil 1: Sedimente kleiner Fließgewässer in Baden-Württemberg

Die angegebenen Werte beziehen sich auf die Elementgehalte der Korngrößenfraktion $< 20 \mu\text{m}$.

Die Lage der Probenahmepunkte ist über Rechtswert (RW) und Hochwert (HW) definiert.

Die Konzentrationen an Cadmium, Chrom, Kupfer, Quecksilber, Nickel, Blei und Zink in den Gewässersedimenten wurden im Auftrag des Landesamtes für Umweltschutz Baden-Württemberg am Institut für Umwelt-Geochemie gemessen. Die Ergebnisse sind Eigentum des Landesamtes.

Gewässer	Ort	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	P ₂ O ₅	RW	HW
		[mg/kg]	[%]								
Aalbach	Bettingen	0,30	32	35	0,08	31	30	136	0,28	3542422	5514973
Ablach	Ablach	0,37	45	33	0,47	37	73	146	0,34	3516921	5319981
Ablach	Beckerhöfe	0,29	50	31	0,18	36	45	157	0,43	3506286	5311226
Ablach	Krachenwies-Mengen	0,56	48	45	0,24	38	35	151	0,29	3522517	5322276
Ablach	Leitishofen	0,22	24	18	0,15	16	23	71	0,22	3512041	5318832
Ablach	Mündung in Donau	0,98	46	46	0,42	41	76	216	0,38	3525787	5325032
Ablach	Schnerkingen	0,46	36	22	0,11	26	28	100	0,32	3508326	5316338
Acher	Achern	2,22	28	122	2,11	31	137	398	0,53	3430848	5388937
Acher	Gamshurst	1,82	30	117	0,42	23	121	448	0,49	3426344	5390892
Acher	Kappelrodeck	0,24	27	47	0,17	42	59	123	0,30	3434894	5384517
Acher	Maiwald	1,33	28	105	0,41	24	88	417	0,45	3425700	5391100
Acher	Ottenhofen	2,15	36	67	0,34	20	109	241	0,35	3437410	5381413
Adelsmanns Rot	Böhmen Säge.	0,33	23	21	0,15	28	68	141	0,18	3573314	5427993
Adelsmanns Rot	Gaishardt	0,11	24	20	0,16	28	78	145	0,18	3574135	5424999
Adelsmanns Rot	Mündung Kocher	0,17	25	21	0,09	26	57	155	0,22	3572516	5419178
Adelsmanns Rot	Zollhof	0,43	26	23	0,18	32	40	151	0,27	3572584	5432703
Agenbach	Wildberg	0,37	34	48	0,22	32	36	173	0,32	3481630	5388819
Aiternbach	Utzenfeld/Farnbühl	3,21	76	138	1,84	35	227	351	0,30	3417897	5296254
Aitrach	Auffingen	0,29	45	29	0,12	33	31	125	0,36	3475052	5306686
Aitrach	Hausen-Kirchen	0,37	38	24	0,12	25	31	139	0,34	3475567	5307466
Aitrach	Neuortal	0,27	37	18	0,07	26	43	100	0,26	3473378	5303327
Aitrach	Talhof	0,16	41	17	0,11	21	33	106	0,51	3468833	5301160
Aitrach+ wurzach	Aitrach	0,47	37	27	0,16	37	21	114	0,26	3581064	5311942
Aitrach+ wurzach	Altmannhofen	0,46	25	30	0,21	34	36	149	0,30	3578683	5305903
Aitrach+ wurzach	Bad Wurzach	1,52	46	140	0,30	60	101	162	0,19	3565152	5308462
Aitrach+ wurzach	Banhofen Brücke	0,92	40	38	0,25	32	45	219	0,44	3569548	5303489
Aitrach+ wurzach	Reichhofen	0,85	32	35	0,26	36	35	200	0,53	3572757	5301428
Aitrach+ wurzach	Truschwende Brücke	0,42	33	27	0,31	41	38	151	0,29	3567761	5306291
Aitrach+ wurzach	Unterzeil	0,21	38	29	0,07	43	16	98	0,16	3575008	5303032
Alb	Daxlanden/Mühlburg	2,04	58	163	2,14	60	249	929	0,80	3452300	5430950
Alb	Eggenstein	1,08	100	86	0,74	49	108	399	0,38	3453200	5439000
Alb	Ettlingen Süd	1,06	48	150	1,16	51	181	533	0,89	3457400	5422580
Alb	Fischweier	3,35	26	56	0,79	34	147	306	0,36	3459860	5417150
Alb	Frauenalb	1,75	24	63	0,85	26	150	325	0,37	3459050	5410990
Alb	Marxzell	1,60	26	52	0,48	52	150	275	0,36	3459600	5414280
Alb	Neurod/Kochmühle	1,79	31	55	0,49	46	146	292	0,38	3460210	5419780
Alb	Raffinerie/Ölhafen	1,88	82	118	0,90	85	126	602	0,40	3451900	5436700
Alb	Rüppur	2,95	45	123	1,37	56	183	472	0,68	3455950	5425600
Alte Dreisam	Bahlingen	1,56	55	80	0,42	29	62	305	0,28	3406896	5332878
Alte Weschnitz	Hemsbach	0,97	68	72	0,35	29	114	325			
Ammer	Gültstein	0,70	58	53	0,43	75	45	221	0,35	3492126	5381138
Ammer	Poltringen	0,57	37	71	0,52	48	52	292	0,58	3496277	5377379
Ammer	Tübingen	0,33	43	44	0,24	31	32	188	0,36	3505111	5376819
Ammer	Untergeisingen	0,54	33	61	0,29	41	23	233	0,42	3500145	5375809
Andelsbach	Brunnhäusen/Brücke	0,45	39	39	1,81	36	34	164	0,33	3521282	5307856
Andelsbach	Gaugelmühle	0,85	65	32	0,16	39	39	165	0,36	3520223	5312233
Andelsbach	Hausen	0,66	40	43	0,17	35	34	266	0,96	3518581	5316962
Andelsbach	Illwangen	0,54	37	30	0,15	51	27	100	0,25	3529362	5300671
Andelsbach	Illwangen/Gampenhof	0,35	38	27	0,11	39	27	101	0,22	3525681	5303826
Andelsbach	Krauchen Wies	0,97	45	48	0,27	32	35	259	0,72	3518281	5320156
Angenbach	Mambach	0,50	67	29	0,31	30	70	129	0,29	3416155	5288303
Arbach	Eningen	0,74	20	13	0,11	26	22	98	0,22	3519063	5370757
Arbach	Pfullingen	2,08	37	171	1,70	32	76	575	0,26	3517032	5371252
Arbach	Talgut Lindenhof	0,36	24	15	0,08	24	9	85	0,20	3520063	5370337
Aschbach	Adolzhausen	0,27	27	31	0,09	53	19	97	0,42	3562365	5474687
Aschbach	Schneidmühle	0,32	39	28	0,22	38	22	138	0,27	3561499	5480917
Aßmannhardter Mühlbach	Aßmannshardt	0,08	25	17	0,07	31	20	84	0,18	3554910	5335747
Aßmannhardter Mühlbach	Schemmerhofen	0,35	48	47	0,15	32	33	224	0,35	3560046	5337434
Aubächle/Holenbach	Obereggen	0,94	57	68	0,32	37	195	272	0,31	3398916	5291367
Aubächle/Holenbach	Schliengen	0,46	44	62	0,25	37	62	231	0,30	3393396	5291232

Gewässer	Ort	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	P ₂ O ₅	RW	HW
		[mg/kg]	[%]								
Baierzer Rot	Burgrieden	0,54	55	41	0,22	41	39	186	0,36	3569238	5344582
Baierzer Rot	Dellmansingen	0,49	50	50	0,26	38	38	242	0,41	3566764	5352162
Baierzer Rot	Edel/Erolzheim	0,42	74	34	0,18	43	39	158	0,37	3576453	5328988
Baierzer Rot	Eichenberg	0,47	44	36	0,17	32	32	133	0,35	3578267	5324208
Baierzer Rot	Gutenzell	0,56	44	32	0,20	40	30	138	0,35	3574558	5331229
Baierzer Rot	Kleinschajhausen	0,28	62	38	0,28	43	39	168	0,45	3571728	5339579
Baierzer Rot	Konradswiler	0,44	37	30	0,10	24	21	134	0,25	3573809	5316167
Baierzer Rot	Ober Baierz	0,28	36	27	0,12	40	28	107	0,27	3572079	5309778
Baierzer Rot	Rot a.d. Rot	0,56	50	25	0,16	38	15	122	0,33	3576059	5319549
Baierzer Rot	Schwendi	0,48	43	35	0,15	37	18	164	0,36	3573829	5334854
Baierzer Rot	Stetten	0,76	46	42	0,23	64	36	180	0,35	3566589	5349972
Baibach	Unterbalmach	0,32	30	27	0,33	36	29	124	0,24	3554764	5488151
Bära	Bärental-Hammer	1,54	50	61	0,18	48	41	312	0,41	3492589	5329488
Bära	Hammer-Schmiede Friedin.	1,51	38	68	0,20	49	28	417	0,38	3495850	5321832
Bernauer Alb	Hof	3,71	79	56	0,28	41	88	215	0,31	3427427	5297052
Bernauer Alb	Innerlehen	3,17	94	61	0,19	44	87	215	0,30	3432189	5294081
Bettingerbach	Ölmühle	0,14	56	30	0,15	35	21	88	0,26	3565996	5402429
Bettingerbach	Schwäb. Gemünd	0,15	58	23	0,14	36	28	91	0,28	3558788	5406743
Bibers	Baumgarten	0,04	57	29	0,19	46	21	115	0,22	3548639	5441773
Bibers	Goldbach-Ziegelhütte	0,14	54	31	0,22	38	19	121	0,26	3547023	5447857
Bibers	Hinterziegelhalden	0,26	27	23	0,40	21	26	69	0,15	3547754	5443967
Bibers	Vohenstein	0,18	27	28	0,12	37	44	125	0,25	3552909	5435382
Bieber	Beuren	0,70	49	24	0,11	49	28	134	0,28	3477543	5295456
Bieber	Blumenfeld Wannenhof	0,19	45	23	0,10	35	31	115	0,34	3476438	5298820
Bieber	Büsslingen	0,42	49	25	0,11	45	28	132	0,30	3476309	5294291
Bieber	Thayien	0,19	36	27	0,09	41	25	128	0,38	3477764	5290577
Biederbach	Elzach	0,36	57	42	0,18	34	43	167	0,26	3430011	5337338
Bierletter bach	Dürnau	0,42	61	32	0,11	39	29	140	0,37	3541628	5324873
Blau	Altental	0,55	55	45	0,38	42	64	58	0,41	3562029	5363434
Blau	Arnegg	0,62	50	33	0,29	35	49	207	0,35	3565426	5364674
Blau	Blaubeuren	0,70	35	43	0,45	32	60	211	0,42	3558699	5364464
Blau	Blaustein	0,98	39	37	0,51	28	59	185	0,33	3568224	5364603
Blau	Söflingen	0,80	47	56	0,85	34	63	276	0,34	3570965	5363013
Blau Schelkl. Ach	Blaubeuren	0,55	33	34	0,37	22	4	163	0,38	3558358	5363712
Blaubach	Blaubach See	0,35	46	38	0,29	54	27	122	0,42	3571859	5459112
Blaubach	Blaufelden	0,54	39	29	0,18	66	25	143	0,25	3570134	5463566
Blauwasser	Braisach-Wolfshöhle	6,14	81	158	0,72	45	161	1287	0,31	3395054	5324837
Blauwasser	Burkheim	0,76	31	53	0,51	31	67	158	0,32	3395109	5330172
Blauwasser	Sasbach-Jechting	0,53	35	79	0,32	30	41	210	0,22	3395485	5332967
Bleichbach	Muckental	0,55	47	70	0,18	48	40	180	0,39	3417569	5341933
Bleichbach	Rheinhausen/Mühlenhof	0,61	77	60	0,21	62	46	156	0,26	3409536	5328399
Bleichbach	Sandmühle	0,67	107	50	0,25	76	52	133	0,31	3411209	5342134
Bocksbach	Kleinsteinbach	0,64	45	56	0,17	49	49	249	0,29	3466780	5424980
Bocksbach	Reichenbach/Karlsbach	0,18	38	27	0,08	41	26	115	0,26	3464430	5421750
Bohrerbach	Günterstal	0,71	47	28	0,24	35	47	129	0,19	3414038	5315222
Bollenbach	Laimnau	0,68	49	37	0,27	44	49	169	0,26	3547974	5277962
Booser Ach	Althausen	0,75	34	50	0,41	30	50	315	0,67	3542562	5310306
Booser Ach	Musbach	0,36	37	27	0,10	38	23	97	0,32	3543258	5314316
Booser Ach	Zollenreute	0,48	36	26	0,23	44	37	132	0,30	3547927	5310596
Bottwar	Großbottwar	0,42	36	57	0,18	33	37	239	0,28	3521414	5428997
Bottwar	Oberstenfeld	0,21	41	57	0,14	36	30	226	0,36	3523439	5432791
Bottwar	Steinheim	0,96	67	68	0,16	43	49	291	0,30	3520339	5425457
Brändbach	Oberbränd	0,59	243	66	0,48	228	65	53	0,17	3448352	5311876
Brehmbach	Königsheim	1,34	49	33	0,09	51	30	129	0,40	3542208	5497074
Brehmbach	Taubersbischofsheim	0,67	43	36	0,15	35	34	159	0,24	3547148	5497867
Brenz	Eselburg/Herbrechtingen	1,25	379	124	1,54	48	132	473	0,94	3586850	5385700
Brettach	Bemberg	0,44	39	37	0,29	56	29	194	0,47	3572214	5458282
Brettach	Bretzfild	0,49	30	50	0,43	39	44	183	0,27	3532146	5449297
Brettach	Langenbrettach	0,66	43	42	0,26	38	46	150	0,25	3527873	5453818
Brettach	Laukenmühle	0,74	29	60	0,27	25	78	241	0,27	3539219	5440651

Gewässer	Ort	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	P ₂ O ₅	RW	HW
		[mg/kg]	[%]								
Brettach	Liebesdorf	0,47	29	28	0,16	45	33	145	0,30	3566390	5455575
Brettach	Neuenstadt	0,52	44	43	0,22	40	43	166	0,30	3525078	5454907
Brettach	Stausee	0,36	38	37	0,37	51	22	151	0,38	3570274	5457386
Brettach	Unterheimbach	0,36	35	55	0,17	29	85	241	0,24	3537253	5444001
Brettach	Vordermühle	0,78	29	48	0,22	32	85	246	0,25	3540894	5438852
Brettach	Weißleinsburg	0,38	33	45	0,26	34	49	126	0,23	3531398	5451756
Brettach	Wiesental	0,12	30	37	0,14	31	60	168	0,27	3533122	5446912
Brettach-J1	Brettheim	0,52	17	20	0,11	26	40	90	0,31	3580039	5460619
Brettach-J2	Rohrturm	0,51	15	20	0,08	26	38	115	0,28	3576605	5458778
Brettach-J3	Michelbach	0,42	21	22	0,11	23	28	117	0,36	3581410	5455882
Brettach-J4	Wallhausen	0,37	48	28	0,21	40	35	140	0,43	3577860	5453154
Brettach-J5	Bernberg	0,27	45	29	0,20	42	43	154	0,41	3572854	5458517
Brettenbach	Emmendingen	0,51	44	42	0,16	31	221	137	0,26	3414926	5331723
Brettenbach	Freiamt	0,59	46	47	0,24	33	207	172	0,23	3419241	5337288
Brettenbach	Sexau	0,57	47	48	0,15	35	120	150	0,34	3418451	5330158
Brettenbach	Staudenhöfe	0,55	50	36	0,18	37	123	148	0,28	3418259	5333698
Brielbach/Hepbach	Ehingen	10,92	51	79	0,40	31	573	830	0,32	3485012	5298211
Bruchbach	Stein	0,44	37	60	0,25	31	56	198	0,37	3473170	5424680
Bruchbach (Bruchgraben)	Elsenz/Eichmühle	0,11	39	24	0,05	34	20	109			
Brugga	Eichbach	5,67	53	79	0,35	27	548	763	0,32	3420273	5314804
Brugga	Vordertal	4,72	60	76	3,89	28	598	722	0,27	3420236	5307822
Buchenbach	Höfen	0,35	48	59	0,20	28	45	215	0,27	3530994	5415032
Buchenbach	Oppelbohm	0,22	27	16	0,09	29	42	126	0,22	3534579	5414060
Buchenbach	Wolfsölden Mühle	0,43	53	53	0,43	38	56	274	0,34	3526158	5420266
Bühler	Bühler	0,18	22	28	0,06	22	87	135	0,17	3570293	5425168
Bühler	Geislingen	0,27	36	38	0,13	42	35	186	0,30	3557459	5448136
Bühler	Heilberg	0,24	27	23	0,12	30	70	145	0,23	3567119	5428572
Bühler	Kottspiel	0,18	26	29	0,08	26	57	152	0,21	3566748	5431517
Bühler	Obersondheim	0,23	32	32	0,13	30	39	148	0,26	3566022	5435866
Bühler	Pommertsweiler	0,48	26	13	0,13	29	55	126	0,29	3572225	5422123
Bühler	Unter Scheffach	0,29	45	32	0,09	35	23	111	0,30	3561965	5445202
Bühler	Vellberg	0,37	33	29	0,10	33	36	121	0,26	3563720	5440216
Butzbach	Sparwiesen	0,31	37	33	0,12	52	46	175	0,41	3542382	5394268
Butzbach	Uhingen	0,51	54	44	0,14	51	79	199	0,32	3542447	5396378
Deggenhauser Ach	Altenbeuren	0,16	32	30	0,12	35	21	106	0,19	3524442	5293485
Deggenhauser Ach	Deggenhausen	0,29	41	26	0,08	36	20	95	0,25	3528597	5296797
Deggenhauser Ach	Neutracht	0,27	41	32	0,15	41	26	108	0,22	3523466	5290066
Deggenhauser Ach	Oberboshasel	0,43	42	45	0,14	39	30	159	0,46	3525481	5290141
Deggenhauser Ach	Untersiggingen	0,47	40	38	0,12	45	27	73	0,21	3528666	5293182
Dießener Bach	Dettingen	0,58	20	49	0,17	26	49	186	0,42	3473144	5364948
Dolderbach	Marbach	0,10	44	46	0,28	46	48	273	0,59	3531256	5360650
Dorfbach/Kapuzingergra.	Ellenbogen Wald	0,36	38	31	0,13	30	35	112	0,22	3406979	5353840
Dorfbach/Kapuzingergra.	Mahlberg	0,34	26	34	0,23	16	31	120	0,21	3411479	5350679
Dossinger Tal	Neresheim	0,64	35	22	0,34	31	30	187	0,33	3596922	5404074
Durbach	Ebersweier	0,91	54	100	0,89	30	165	463	0,26	3425423	5374398
Durbach	Eichenkönig	0,63	43	100	0,58	25	73	309	0,24	3422392	5374398
Dürmach	Laubheim	0,72	62	36	0,13	40	36	175	0,37	3564055	5345702
Dürmach	Maselheim	0,47	42	34	0,14	38	33	159	0,42	3565922	5333528
Dürmach	Mittelbuch	0,21	42	24	0,10	40	25	119	0,29	3565571	5322784
Dürmach	Mündung Saubach	0,25	30	38	0,13	54	9	89	0,34	3563923	5341178
Dürmach	Ringschnait	0,18	57	33	0,13	44	38	383	0,35	3565795	5326663
Dutlacher Graben	Forst	0,67	173	137	2,06	50	334	526			
Dutlacher Graben	Kirrlach	1,28	344	233	1,59	88	387	848			
Dutlacher Graben	Weiherr	0,62	190	127	1,24	53	241	513			
Dutlacher Graben	Wiesental/Hambrücken	1,25	326	174	1,71	69	339	704			
Ebertsbronnerbach	Laudenbach	0,57	39	36	0,17	27	30	171	0,35	3507730	5480091
Egau	Ballmertshofen	0,46	29	12	2,15	24	14	69	0,16	3601129	5393724
Egau	Härtsfeld	0,43	35	15	0,09	30	20	82	0,17	3601083	5398689
Egau	Neresheim	0,38	32	33	0,82	26	35	150	0,22	3598063	5402504
Egau	Stein	0,36	34	17	0,15	29	18	118	0,19	3599292	5401244

Gewässer	Ort	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	P ₂ O ₅	RW	HW
		[mg/kg]	[%]								
Eggenbach-Haselbach	Eggenreute	0,26	48	31	0,14	40	15	118	0,26	3558311	5290103
Eggenbach-Haselbach	Engelitz	0,40	45	39	0,24	38	43	148	0,30	3555909	5280847
Eggenbach-Haselbach	Winkelmühle	0,71	48	36	0,18	47	36	171	0,28	3556469	5286326
Ehrenbach	Am Bahnhof	1,05	23	29	0,14	21	71	171	0,24	3460509	5292456
Ehrenbach	Dillendorfer Säge	0,94	43	40	0,22	36	89	165	0,20	3454662	5294317
Ehrenbach	Wellendingen	0,85	30	31	0,15	27	84	143	0,19	3451457	5295647
Ehrlos	Berg	0,37	41	36	0,16	34	12	149	0,34	3554432	5347524
Eiterbach	Hornbach/Groß	0,65	43	35	0,09	45	113	97	0,20	3522250	5494750
Eiterbach	Walldürn	0,30	28	28	0,05	30	28	78	0,16	3525950	5491350
Eisenbach	Hammereisenbach	2,23	42	88	0,28	24	89	173	0,39	3449470	5317791
Ellenberger Rot	Hammer Mühle	0,09	34	11	0,06	19	21	47	0,10	3589575	5427139
Elsach	Bad Urach	0,77	28	22	0,17	39	40	94	0,24	3530235	5373017
Elta	Saitingen	0,21	51	51	0,13	51	27	130	0,42	3479700	5320272
Elta	Würmlingen	0,26	69	39	0,15	46	25	223	0,54	3483685	5317992
Engebach	Istein	0,62	43	59	0,21	42	39	130	0,33	3390784	5280692
Engebach	Welmtingen	0,57	44	41	0,15	48	39	123	0,28	3392095	5284173
Enz	Mühlhausen	2,65	69	114	0,72	44	118	348	0,51	3492650	5421800
Enz	Neuenburg	2,83	29	80	0,68	26	108	288	0,61	3471400	5413050
Enzbach	Walheim	0,25	58	38	0,12	34	20	104	0,23	3510963	5430546
Epbach	Cappel	0,61	46	40	0,17	36	42	160	0,28	3538864	5451662
Epbach	Neuenstein	0,76	48	35	0,30	44	41	155	0,24	3542244	5451968
Epbach	Waldenburg	0,29	45	76	0,25	38	32	277	0,49	3546514	5451796
Erfa	Breitenau	0,46	42	35	0,19	38	31	130	0,24	3531040	5502257
Erfa	Bretzingen	0,26	37	37	0,04	46	31	86	0,24	3535224	5493847
Erfa	Hartheim	0,56	48	34	0,12	43	39	127	0,29	3532928	5497674
Erfa	Riedern	0,44	41	32	0,14	34	87	183	0,27	3528608	5503834
Erlbach	Erbach	0,28	30	30	0,11	30	34	148	0,39	3565419	5354732
Erlbach	Bieringheim/Stau	0,28	38	31	0,10	32	28	127	0,29	3538532	5467662
Erlbach	Erlbach	0,36	41	43	0,11	37	20	119	0,28	3540922	5473067
Erlbach	Erlbach	0,48	40	29	0,12	42	48	135	0,20	3487524	5424292
Erlbach	Öbronn-Dürren	0,46	39	38	0,10	36	22	101	0,21	3482183	5425212
Eschach	Aichhalden/Bühlen	0,48	15	19	0,25	13	26	56	0,14	3456682	5349382
Eschach	Dunningen	0,99	51	31	0,17	42	63	141	0,29	3463669	5340437
Eschach	Erenried	0,37	31	17	0,10	20	17	53	0,14	3583774	5290383
Eschach	Haselburg	0,44	32	18	0,11	27	16	56	0,15	3578091	5295368
Eschach	Läutkirsch	0,12	31	23	0,06	32	22	74	0,14	3577261	5298503
Eschach	Nibelhöfe	0,59	33	35	0,42	37	34	156	0,25	3577028	5302834
Eschach	Seedorf	1,01	34	33	0,32	31	56	102	0,22	3461533	5345488
Eschbach	Freib./Ebnet	0,77	60	37	0,17	48	53	178	0,25	3418631	5317114
Eschach2	Läutkirsch	0,75	36	83	0,39	23	75	308	0,26	3577261	5298503
Eschach2	Nibelhöfe	0,92	37	115	0,34	27	84	367	0,29	3577028	5302834
Eschbach	Stegen	0,59	100	49	0,25	84	50	178	0,26	3423202	5316862
Ette	Bachmühle	0,38	31	35	0,33	48	22	131	0,29	3557906	5468642
Ette	Ettenhausen	0,38	33	34	0,23	47	22	136	0,29	3563866	5468851
Ette	Zaisenhausen	0,47	37	34	0,25	51	25	131	0,31	3561683	5469683
Ettenbach	Holzmühle	0,76	45	78	0,22	42	59	232	0,36	3410269	5348099
Ettenbach	Kappel Grafenhausen	0,66	55	61	0,28	45	60	190	0,31	3406642	5350684
Ettenbach	Münchweier	0,66	58	47	0,25	59	64	208	0,27	3414389	5346197
Eyb	Eybach	0,95	44	43	0,29	48	76	193	0,34	3563951	5388852
Eyb	Geislingen	0,64	29	51	0,35	33	71	203	0,40	3560630	5388262
Faulenbach	Weilheim	1,07	98	113	0,20	56	58	336	0,42	3483520	5320287
Federbach	Bad Buchau	0,38	16	21	0,10	36	16	44	0,45	3547574	5325252
Federbach	Bietigheim	0,98	39	85	0,39	32	71	541	0,49	3444640	5420231
Federbach	Dammfeld	0,20	29	33	0,26	35	41	213	0,24	3448560	5427950
Federbach	Dammfeld	3,03	56	277	0,97	43	155	1081	0,86	3448560	5427950
Federbach	Ingoldingen	0,41	38	28	0,13	36	35	147	0,49	3554958	5321514
Federbach	Steinhausen	0,23	33	30	0,13	30	10	69	0,57	3550938	5321777
Federbach	Steinhauser Ried	0,61	5	11	0,08	10	31	50	0,24	3549418	5322902
Fehla	Burladingen	0,51	33	42	0,57	43	94	217	0,43	3509096	5350101
Fehla	Mündung Lauchert	0,70	35	50	0,25	31	40	181	0,40	3516553	5341333

Gewässer	Ort	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	P ₂ O ₅	RW	HW
		[mg/kg]	[%]								
Fehla	Neufra	0,59	35	72	0,35	25	52	249	0,43	3513803	5345327
Feuerbach	Erfingen-Kirchen	0,33	52	42	0,14	49	36	142	0,29	3392782	5280138
Feuerbach	Holzen	0,26	54	37	0,14	52	37	129	0,30	3396411	5284458
Feuerbach	Mühlhausen	1,57	38	114	0,38	45	66	613	0,35	3515467	5412092
Fichtenberger Rot	Böhringweiler	0,36	34	23	0,12	28	77	166	0,25	3537554	5437332
Fichtenberger Rot	Fichtenberg	0,47	25	33	0,09	42	51	149	0,16	3550950	5428082
Fichtenberger Rot	Oberrot Neumühle	0,55	32	35	0,14	41	43	143	0,25	3548324	5431541
Fichtenberger Rot	Unterrotbrücke/Gaildorf	0,11	27	33	0,12	32	42	126	0,22	3556807	5427541
Fichtenberger Rot	Weiherrbronn	0,58	24	61	0,17	25	175	169	0,29	3533888	5439896
Fichtenberger Rot	Wielandsweiler	0,32	24	22	0,63	28	52	144	0,19	3545505	5435331
Fischach	Herlebach	0,17	35	21	0,06	37	27	98	0,20	3560580	5437170
Fischach	Unterfischach	0,23	27	24	0,09	38	9	112	0,20	3564342	5432441
Forbach	kniebis	1,05	133	32	0,37	126	73	112	0,27	3450186	5369570
Förstbächle	Brackenheim	0,24	45	45	0,31	34	25	182	0,28	3504837	5438632
Frankenbach	Espachweiler	0,48	36	23	0,14	30	39	122	0,17	3579425	5423590
Gabelbach	Ernstal	1,24	23	23	0,31	39	45	141	0,41	3510390	5493344
Gächinger Lauter	Mündung in gr. Lauter	0,87	56	200	0,49	39	19	540	1,19	3528569	5363263
Gammelsbach	Eberbach	3,08	34	28	0,19	70	57	214	0,36	3497400	5482070
Gauangelbach	Diehlheim	0,55	34	31	0,12	30	56	229	0,19	3482670	5465250
Gauangelbach	Schatthausen	0,77	45	37	0,14	37	45	332	0,15	3482450	5460750
Gauchach	Ditteshausen- Unterbrand	0,27	35	39	0,22	23	54	125	0,36	3452133	5309047
Gauchach	Unadingen-Lochmühle	0,35	30	35	0,08	34	73	155	0,18	3458166	5304202
Geschwender Rot	Geschwender Mühle	1,19	65	50	0,28	33	99	345	0,37	3555493	5421921
Geschwender Rot	Hönig Brücke Mühle	0,41	35	28	0,12	28	25	195	0,35	3558559	5417282
Geschwender Rot	Taiferrot	0,11	33	18	0,08	40	54	86	0,21	3561368	5412927
Gießbach	Albris	0,37	32	30	0,15	36	22	98	0,15	3570915	5285439
Gießbach	Lochhammer	0,76	37	28	0,17	36	30	125	0,19	3566278	5282418
Glotter	Nimburg	1,32	114	134	0,83	94	158	558	0,33	3409240	5330744
Glotter	Ober Glottertäl	0,94	49	74	0,23	33	209	375	0,29	3424252	5322922
Glotter	Ober Reute	1,02	53	75	0,23	37	355	395	0,31	3413980	5327722
Glotter	Riegel	1,36	55	76	0,40	35	134	372	0,31	3407525	5334888
Glotter	Unter Glottertäl	1,02	46	86	0,36	32	211	371	0,27	3419390	5325039
Goldersbach	Bebenhausen	0,15	27	26	0,21	36	48	72	0,17	3504546	5380133
Goldersbach	Mündung Arenbach	0,20	26	21	0,21	35	23	64	0,17	3503220	5380178
Goldersbach	Rottenberg	0,18	32	25	0,17	34	37	77	0,18	3498770	5383292
Goldersbach	Tübingen	0,19	43	28	0,10	36	42	97	0,21	3505826	5377039
Gottmadinger Dorfbach	Gottmadingen	0,43	50	47	0,12	42	26	157	0,51	3482878	5287235
Gottmadinger Dorfbach	Riedheim	0,37	53	36	0,11	52	31	158	0,37	3479878	5291757
Grimmbach	Mündung Kocher	0,37	40	27	0,08	43	26	96	0,28	3557833	5450196
Grobbach	Grobbachhalde	0,41	16	12	0,12	11	32	65	0,19	3444180	5395618
Grobbach	Lichtental	1,32	23	26	0,38	14	89	157	0,30	3445475	5400548
Gronach	Ellrichhausen	1,23	41	24	0,12	43	44	163	0,25	3583291	5449808
Gronach	Gröningen	0,14	52	27	0,11	42	26	103	0,28	3577689	5450604
Großbach	Degerfelden/Rheinfeld	0,25	42	34	0,10	46	40	108	0,20	3406679	5270320
Grünbach	Gerlachshelm	0,25	36	33	0,11	36	31	106	0,31	3552454	5494152
Grünbach	Grünfeld	0,21	32	31	0,08	37	25	89	0,28	3553762	5496847
Grünbach	Ilmspan	0,24	43	31	0,11	42	31	116	0,31	3557822	5503583
Grünbach	Paimar	0,24	44	30	0,08	38	29	126	0,29	3554627	5500612
Grundelbach	Obereisesheim Altböhl. Hof	0,28	44	34	0,10	38	33	160	0,30	3514211	5449837
Gruppenbach	Wüstenhausen	0,43	45	35	0,21	32	38	153	0,26	3520073	5437408
Gutach	Hausach	1,87	41	173	0,71	23	141	324			
Gutach	Hornberg	1,05	37	109	0,97	20	104	301	0,29	3443041	5341257
Gutach	Niederwasser	1,97	42	220	0,69	25	177	298	0,39	3442866	5339052
Gutach	Steigerbauernhof	1,37	40	126	0,62	22	124	310	0,32	3441570	5344842
Gutach	Triberg	3,08	47	240	0,56	20	160	384	0,41	3443322	5334233
Halbbach/Klingengraben	Bechtersbohl	0,40	50	56	0,20	34	26	180	0,35	3451330	5275417
Hardheimer Bach	Hardheim	0,26	39	25	0,07	37	34	125	0,23	3534643	5496859
Hardtbach	Hockenheim / Talhaus	4,17	43	63	0,44	42	240	1016			
Hardtbach	Walldorf	8,38	33	59	0,38	42	397	1550			
Harmersbach	Krähenstein	1,13	53	70	0,85	23	60	162	0,32	3436766	5361587

Gewässer	Ort	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	P ₂ O ₅	RW	HW
		[mg/kg]	[%]								
Harmersbach	Krähenstein	0,24	54	50	0,36	58	80	215	0,23	3436766	5361587
Hasel	Altmatt	0,37	56	101	0,89	21	51	97	0,23	3417397	5281784
Hasel	Wehr	0,52	69	252	0,26	40	58	269	0,24	3417881	5275514
Haslach	Aitrach	0,46	38	30	0,15	41	18	112	0,35	3578540	5315338
Haslach	Falkau	1,26	134	34	0,32	74	98	81	0,38	3434917	5303826
Haslach	Lenzkirsch	2,97	46	57	0,25	28	69	245	0,39	3443287	5302941
Haslach	Rot a.d. Rot	0,80	42	33	0,20	44	31	157	0,36	3577129	5319848
Hasselbach	Ballenberg-Unter wittst.	0,34	41	28	0,10	39	36	173	0,32	3540012	5474771
Heimbach	Leinstetten	0,46	29	49	0,14	33	37	159	0,26	3466027	5361749
Heimbach	Römlingsdorf	0,62	37	52	0,33	42	66	259	0,42	3461867	5353707
Heimbach	Wälde	0,51	27	41	0,07	32	64	188	0,27	3461502	5360324
Heimbach	Waldwössingen	1,18	42	37	0,15	44	31	195	0,33	3461878	5348103
Hergstbach	Korb-Dippach	0,25	38	33	0,09	47	34	91	0,28	3528897	5468603
Hergstbach	Rauchsen	0,27	41	30	0,13	44	21	48	0,24	3527976	5464658
Herrenwiesenbach	Botenheim	0,27	39	43	0,09	34	23	101	0,22	3504707	5436087
Herrnmühlbach	Eichstetten	0,84	40	94	0,40	27	108	454	0,26	3407015	5328733
Heudorfer Bach	Blochingen	0,47	57	29	0,11	44	28	133	0,30	3525832	5325802
Hiffelbach	Seckach	0,25	38	29	0,09	39	43	125	0,23	3524226	5478938
Hirschbach	Tannen	0,08	43	27	0,10	43	24	89	0,22		
Hirschbach	Tiefensall	0,36	48	33	0,09	45	19	116	0,26		
Hodbach		0,30	26	20	0,13	25	22	81	0,23		
Höllbach	Unterhöllgrund	2,94	36	71	0,54	76	72	409	0,74	3504700	5482850
Holzbach/Maisenbach	Marxzell (Holztal)	5,57	38	50	0,60	106	106	375	0,47	3459600	5413800
Huerbe	Burgberg	0,50	43	24	0,12	45	31	151	0,34	3591118	5383162
Hühler Ach	Altshausen	0,24	41	24	0,10	57	13	74	0,27	3542176	5308043
Iller	Illerrieden	0,23	21	39	0,15	37	17	97	0,19	3579095	5348998
Iller	Illerzell	0,59	60	779	0,45	57	61	773	0,34	3577920	5351670
Iller	Kirchberg	0,51	23	39	0,44	22	22	102	0,18	3576035	5354508
Ingerkinger Rotbach	Obersulmetingen	0,92	47	36	0,09	43	32	227	0,34	3561523	5342058
Insenbach	Grobach	0,60	46	38	0,18	38	34	151	0,27	3499370	5454050
Insenbach	Steinsfurt	0,37	48	27	0,09	45	25	83	0,25	3494550	5455050
Josbach	Hölzlebruck	0,77	50	31	0,18	18	55	136	0,39	3439332	5310742
Kalttenbach	Pfohlbach	0,51	42	21	0,10	44	42	106	0,22	3527103	5503633
Kammbach	Bohlsbach	0,33	34	53	0,27	19	36	155	0,23	3422457	5373618
Kammbach	Neusand	0,38	41	38	0,62	26	25	133	0,29	3421404	5373618
Kander	Eimeldingen	0,68	49	53	0,25	42	81	210	0,35	3393574	5278378
Kander	Kandern	0,61	55	38	0,55	29	110	192	0,32	3399355	5286622
Kander	Kandern	0,91	48	41	0,21	35	75	221	0,29	3400924	5287576
Kander	Marzell	0,35	62	35	0,37	33	90	202	0,30	3404473	5293095
Kander	Wollbach	1,02	37	61	0,39	30	110	219	0,34	3398297	5280681
Kanzelbach	Ladenburg	2,13	46	63	0,97	37	159	454			
Kärbach	Krottental	0,31	34	27	0,14	33	20	95	0,22	3560880	5286670
Katzbach	Eichelberg/Tiefenbach	0,16	35	35	0,28	26	29	71			
Katzbach	Odenheim	0,22	35	28	0,11	30	29	98			
Katzbach	Zeutern	0,38	40	57	0,16	33	40	188			
Katzenbach	Bad Niedermau	0,30	36	31	0,16	45	41	134	0,31	3492781	5368633
Katzenbach	Dettingen	0,09	37	22	0,07	49	24	61	0,19	3496837	5365823
Katzenbach	Landstr. 389	0,24	55	35	0,09	45	45	108	0,24	3494142	5366373
Katzenbach	Ofterdingen	0,23	47	22	0,06	53	13	63	0,22	3500265	5364559
Katzentalbach	Norfheim	0,25	37	38	0,09	31	30	106	0,23	3509087	5441376
Kehlbach	Bittelschieß	0,50	65	58	0,36	40	36	322	0,70	3517006	5317302
Kehlbach	Hippetsweiler	0,36	60	24	0,11	46	27	106	0,28	3514091	5310131
Kehlbach	Otterswang	0,53	58	58	0,55	47	53	401	0,63	3517196	5313328
Kehlbach	Pfullendorf	0,41	66	38	0,18	46	43	172	0,43	3517830	5310561
Kembach	Urphar	0,24	45	47	0,14	33	43	187	0,35	3542095	5512784
Kempfelbach	Bilfingen	1,50	39	85	0,83	36	90	212			
Kempfelbach	Ersingen	1,26	45	117	1,18	40	119	268			
Kempfelbach	Singen	0,99	39	76	0,60	35	71	211			
Kerbsbach/Kirbach	Heukopf	0,19	68	34	0,07	34	22	92	0,18	3492714	5433158
Kerbsbach/Kirbach	Rechtenhofen	0,24	71	34	0,09	32	21	62	0,18	3502727	5427851

Gewässer	Ort	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	P ₂ O ₅	RW	HW
		[mg/kg]	[%]								
Kerbsbach/Kirbach	Spielberg	0,10	40	26	0,08	31	28	73	0,19	3499327	5430841
Kessach	Hüngheim	0,42	39	25	0,08	39	41	86	0,23	3537247	5474533
Kessach	Merchingen	0,56	47	34	0,17	39	39	131	0,28	3536850	5473338
Kessach	Unter Kess.-Wiedern	0,57	42	37	0,06	37	29	192	0,45	3530963	5466928
Kessach	Unter-Ober-Kessach	0,46	45	31	0,08	36	29	107	0,33	3533792	5468714
Kirnach	Kirnachtal/See	1,41	28	30	0,22	45	34	111	0,24	3453638	5326633
Kirnach	Oberkirnach	1,37	40	86	0,44	28	51	292	0,46	3448577	5328447
Kirnaun	Altenheim/Untermühle	0,40	43	48	0,08	44	39	134	0,34	3532240	5485680
Kirnaun	Rosenberg/Talmühle	0,51	46	49	0,12	49	42	140	0,35	3533300	5479200
Kirnaun	Sindolsheim/Talmühle	0,48	44	43	0,10	46	43	176	0,37	3533750	5482350
Kirnbach	Niefern	0,89	33	94	0,72	37	62	249	0,30	3484626	5419291
Klein Kinzig	Oberes Dörfle	4,47	45	115	0,30	45	507	756	0,71	3453830	5360543
Klein Kinzig	Reinerzau	1,62	16	45	0,29	27	84	446	0,56	3453225	5357414
Klein Kinzig	Schenken Zell	1,82	21	45	0,24	28	78	220	0,50	3452851	5353132
Kleine Wiese	Hott	0,77	95	27	0,21	77	70	164	0,37	3411054	5289513
Kleine Wiese	Langenau	1,58	56	45	0,23	39	126	165	0,42	3409672	5280997
Kleine Wiese	Neuenweg	0,83	72	25	0,22	38	83	152	0,33	3412172	5295599
Kleine Wiese	Niedertegergau	0,90	88	38	0,35	42	103	173	0,34	3409836	5286223
Klemmbach	Mühlheim	0,83	41	128	1,08	36	288	336	0,32	3394482	5297886
Klemmbach	Schweighof	0,81	59	44	0,27	33	259	258	0,29	3402787	5297342
Klotzbach	Böbingen	0,14	60	24	0,11	35	26	78	0,26	3567571	5409453
Kocher	Hardthausen-Kocherst.feld	0,61	40	36	0,16	36	37	188	0,23	3528800	5456100
Kocher	Kocherstetten	0,97	40	38	0,44	46	55	344	0,30	3555200	5458750
Kohlbach	FleHINGEN	2,30	60	60	0,27	63	36	249	0,38	3485150	5439200
Kohlbach	Sulzfeld	0,88	44	44	0,39	62	40	140			
Köhlgartenwiese	Tegernau	0,43	58	26	0,17	28	78	113	0,31	3409365	5287632
Köhlgartenwiese	Wies	0,76	64	32	0,18	35	112	154	0,30	3407690	5290372
Köllbach	Berneck	0,39	56	18	0,17	38	29	116	0,26	3471733	5385117
Köllbach	Hornberg	0,41	14	10	0,14	17	24	76	0,17	3467237	5387584
Kötach	Biesingen	0,20	18	23	0,08	22	19	74	0,38	3469566	5316721
Kötach	Geisingen	0,29	65	34	0,09	53	32	192	0,49	3473002	5309730
Kötach	Unterbaldingen-See	0,38	62	35	0,11	54	29	154	0,42	3471496	5313197
Kotbach	Lauchringen	0,36	41	30	0,20	27	24	203	0,30	3449540	5276151
Krähbach	Hagenbuch	0,08	88	20	0,21	41	15	87	0,26	3460700	5396254
Krähenbach	Esslingen	0,16	58	26	0,11	44	33	143	0,38	3479260	5317137
Krähenbach	Möhringen	0,20	60	24	0,21	37	18	115	0,23	3482595	5314195
Krebsbach	Bernau	0,29	56	31	0,13	35	38	110	0,25	3495970	5462872
Krebsbach	Helmhof	0,33	69	32	0,09	36	39	110	0,26	3499422	5460397
Krebsbach	Obergimpfern	0,09	18	12	0,05	22	17	54	0,17	3504741	5457683
Krebsbach	Untergimpfern	0,20	21	19	0,09	25	22	89	0,22	3501037	5459057
Kreßbach	Rindelbach/Keßsee	0,36	43	20	0,41	26	38	130	0,21	3583750	5427723
Kreuzbach	Enzweihingen	0,52	43	89	0,28	39	61	287	0,41	3498550	5419380
Kreuzbach	Grenzbachhof	0,75	42	109	0,34	38	78	314	0,42	3491791	5414876
Kreuzbach	Großglattbach	0,60	39	96	0,33	35	63	311	0,41	3493242	5419255
Kreuzbach	Wimsheim	0,47	38	112	0,56	45	80	201	0,26	3488876	5412947
Kriegbach	Kronau/Kirrlach	0,67	59	61	0,29	49	43	223			
Kriegbach	Reilingen / Kirrlach	0,60	52	54	0,23	49	43	193			
Kriegbach	Weiber/Langenbrücken	0,94	65	95	0,28	51	50	264			
Krottenbach	Eschach	0,07	52	17	0,04	31	25	95	0,38	3462814	5302693
Krumbach	Krumbach	0,56	58	35	0,17	54	31	153	0,39	3503237	5313711
Krumbach	Schwandorf	0,33	41	30	0,10	40	14	121	0,27	3499617	5312236
Krumbach	Unter Bichtlingen	0,37	40	31	0,15	37	28	115	0,25	3507351	5314381
Krumm	Eislingen	0,18	53	32	0,12	49	40	187	0,56	3552510	5396368
Krumm	Eschenbäche	0,12	45	27	0,13	45	35	140	0,48	3554300	5398443
Kupfer	Forchtenberg	0,40	47	29	0,10	56	19	129	0,26	3541111	5461096
Kupfer	Kupferzell	0,32	56	38	0,18	70	21	145	0,28	3548823	5455436
Kupfer	Neureut	0,35	56	33	0,18	66	13	102	0,29	3544167	5458112
Kupfer	Stegmühle	0,36	49	35	0,17	56	23	161	0,31	3551434	5452287
Kupfer	Ulrichsberg	0,42	55	32	0,19	60	28	137	0,30	3548328	5455836
Kürzach	Gronau	0,48	29	28	0,27	23	36	97	0,19	3524594	5432786

Gewässer	Ort	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	P ₂ O ₅	RW	HW
		[mg/kg]	[%]								
Landgraben	Leimen/Sandhausen	3,26	93	213	0,63	46	210	941			
Landgraben	Oftersheim	7,28	239	142	0,49	51	167	850			
Landgraben	Sandhausen	3,88	81	84	0,42	57	258	814	0,50	3474510	5468650
Landgraben	Sandhausen/Oftersheim	4,43	170	174	0,87	52	184	1069	0,90	3472800	5469020
Laubach	Erlenmoos	0,37	35	36	0,11	50	19	89	0,49	3574290	5322529
Laubach	Huggenlaubach	0,37	36	30	0,14	43	35	138	0,29	3573239	5334969
Laubach	Laubach/Edelbeuren	0,43	51	64	0,23	40	34	191	0,46	3574192	5328104
Laufbach	Balzhofen	1,45	43	72	0,35	34	76	296	0,40	3432619	5397629
Laufbach	Grubhurst	0,78	48	47	0,34	35	77	242	0,38	3432149	5401194
Laufbach	Lauf	7,23	42	119	0,40	31	132	313	0,36	3436775	5389849
Laufbach	Walzfeld	1,22	41	57	0,36	30	86	234	0,35	3432723	5392804
Lauter	Bernhalden	0,56	33	33	0,15	26	66	114	0,18	3533670	5431622
Lauter	Neulaufen	0,48	33	27	0,14	22	56	99	0,16	3531209	5436916
Lauter	Sulzbach	0,61	40	37	0,17	30	57	133	0,17	3535425	5430098
Lauterbach	Lauterbach	1,27	44	216	1,04	51	180	528	0,58	3451442	5343498
Laxbach	Heddesbach	3,73	54	57	1,31	58	106	398	0,59	3487150	5482850
Leimbach	Sandhausen	4,12	31	39	0,28	21	103	806	0,30	3473670	5469500
Lein	Abtsgemünd	0,23	37	26	0,07	37	42	144	0,32	3573944	5417744
Lein	Durlangen	0,29	39	26	0,13	38	47	93	0,19	3557030	5412672
Lein	Heuchlingen	0,26	47	26	0,08	49	47	135	0,36	3569211	5412973
Lein	Kapf	0,23	31	24	0,11	37	72	145	0,31	3553433	5414012
Lein	Leinroden	0,13	35	30	0,09	46	42	144	0,36	3572639	5416289
Lein	Pfahlbronn	0,22	57	32	0,16	48	48	171	0,39	3569653	5412736
Lein	Täferrot	0,28	26	23	0,10	37	46	124	0,30	3561698	5413032
Lein	Welzheim	0,81	40	26	0,09	48	75	197	0,31	3547157	5416246
Leudelsbach	Markgröningen	0,36	41	49	0,17	37	48	262	0,29	3507080	5419100
Lierbach	Lierbach	0,75	22	32	0,23	18	63	110	0,22	3439801	5376318
Lierbach	Oppenau	1,26	34	32	0,39	26	81	144	0,23	3438646	5371294
Linach	Fuchsloch	1,24	51	35	0,15	27	49	136	0,40	3445834	5320707
Lindach	Kirschheim u.t.	0,31	57	40	0,13	49	10	212	0,37	3534636	5389654
Lindach	Neidlingen	0,32	23	32	0,21	34	56	198	0,28	3541322	5383077
Lindach	Weilheim Teck	0,41	47	32	0,13	50	33	220	0,39	3539687	5386577
Lindenbach	Ditzingen	0,91	53	877	3,36	46	136	929	0,37	3505295	5410097
Lindenbach	Weilindorf	0,22	25	27	0,35	36	25	125	0,18	3509211	5407875
Lipbach	Mühlheim	0,63	24	39	0,11	31	33	151	0,34	3491605	5321442
Lobbach	Lobenfeld	1,00	53	39	0,18	50	54	229	0,34	3490630	5467950
Lobbach	Meckesheim	0,85	50	40	0,17	49	36	198	0,33	3487150	5464830
Lochbach	Herbsthausen	0,32	72	44	0,08	46	24	101	0,38	3560935	5475407
Lochbach	Märkelsheim	0,30	62	46	0,62	47	20	123	0,40	3560254	5481906
Mahlspürer Aach	Frickenweiler	0,26	40	29	0,13	32	36	124	0,24	3505661	5302300
Mahlspürer Aach	Ittenweiler Stockach	0,25	43	26	0,10	38	32	114	0,30	3502326	5302026
Mahlspürer Aach	Seelfingen	0,26	37	63	0,22	39	37	196	0,38	3508190	5301210
Malscher Landgraben	Bruchhausen	1,52	47	218	3,03	42	165	923	1,35	3454030	5420880
Malscher Landgraben	KA-Weiherfeld	2,52	71	215	1,09	57	155	1127	0,75	3454100	5427000
Marbach	Faurnd.	0,61	44	40	0,30	52	62	193	0,38	3546523	5397883
Marbach	Zell	0,14	36	25	0,09	46	58	148	0,28	3547568	5401518
Massenbach	Marienhof	0,33	50	29	0,18	34	24	151	0,26	3505332	5446138
Mauchenbach	Untereggingen	1,09	21	23	0,18	17	32	165	0,22	3454688	5284041
Maulach	Mündung Jagst	0,50	32	30	0,15	42	33	107	0,28	3577793	5441359
Maulach	Roßfeld	0,81	46	84	0,16	58	62	136	0,26	3573826	5444593
Menzenschwander Alb	Menzenschw. Vorderdorf	1,79	55	35	0,39	23	111	231	0,34	3430777	5296828
Menzenschwander Alb	Menzenschw. Wasserfall	2,08	34	32	0,38	20	92	205	0,67	3429793	5301548
Mettma	Heidenmühle/Bulgenb.	1,18	29	29	0,23	13	173	107	0,29	3442473	5290347
Mettma	Lochmühle	0,92	31	25	0,17	15	129	104	0,25	3444969	5285951
Möhlín	Hochstetten	1,80	56	41	3,44	42	278	385	0,19	3396996	5319272
Möhlín	Unter-Ambringen	2,22	46	82	0,38	40	251	330	0,26	3404819	5309766
Monbach	Vor Mündung	0,78	42	51	0,22	62	59	259	0,33	3480670	5407150
Moosalb	Schöllbronnermühle	3,31	34	28	0,25	100	55	187	0,38	3458160	5416650
Morre	Hettingenbeuren	0,52	54	55	0,14	58	42	229	0,50	3518240	5494800
Morre	Stürzenhardt/Hainstadt	0,34	45	126	0,26	83	42	433	1,36	3521020	5490250

Gewässer	Ort	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	P ₂ O ₅	RW	HW
		[mg/kg]	[%]								
Muckbach	Tauberbischofsheim	0,37	37	35	0,09	39	24	102	0,27	3546714	5496043
Mudbach	Mudau	1,79	44	41	0,58	52	74	218			
Mühlbach	Altenheimer Mühle	0,65	46	81	0,58	34	67	370	0,25	3411493	5372112
Mühlbach	Auenheimer Mühle	1,66	62	96	0,38	39	103	378	0,43	3415932	5386347
Mühlbach	Auenheimer Mühle	1,99	65	113	0,47	37	92	516	0,39	3415241	5384627
Mühlbach	Bergfelden	0,74	35	40	0,11	39	45	217	0,27	3476464	5356022
Mühlbach	Eschenheim Neuried	0,74	48	88	0,57	32	60	356	0,18	3409867	5368907
Mühlbach	Hundsfeld	0,50	56	39	0,14	38	46	296	0,32	3413023	5378307
Mühlbach	Lochmühle Rheinbisch.	1,27	63	113	0,51	38	83	516	0,43	3419538	5391802
Mühlbach	Meißenheim	0,73	48	88	0,75	34	77	390	0,25	3409193	5364514
Mühlbach	Mittelgrund	0,97	64	110	0,53	38	88	467	0,40	3422578	5396734
Mühlbach	Mühlheim	0,48	31	50	0,33	38	40	224	0,27	3476914	5360392
Mühlbach	Willstätt	0,71	52	92	0,41	33	113	350	0,45	3418588	5378832
Mühlenbacher Talbach	Farnis	0,73	64	60	0,20	38	47	132			
Mühlenbacher Talbach	Haslach	1,74	74	73	0,22	44	68	222	0,38	3432890	5348178
Murg	Forbach	1,52	22	33	0,27	14	75	168	0,34	3452730	5393060
Murg	Forbach	2,02	26	38	0,36	15	116	251	0,33	3453247	5391229
Murg	Herrischried	1,21	51	43	0,27	22	67	170	0,47	3426196	5281687
Murg	Hottingen	2,67	73	75	0,35	27	188	653	0,56	3425277	5276897
Murg	Kirschbaumwasen	1,01	163	46	0,33	125	80	174	0,38	3452626	5387257
Murr	Mündung Otterbach	0,42	104	45	0,30	68	57	224	0,32	3521550	5424350
Murr	Wehr Kirchberg	0,37	64	49	0,52	34	57	191	0,31	3523850	5422800
Nassach	K 1412	0,30	38	28	0,11	35	64	150	0,23	3541342	5398283
Nassauerbach	Schäfersheim	0,29	41	32	0,19	41	39	181	0,32	3564984	5485033
Nau	Langenau	0,55	30	35	0,29	36	49	224	0,41	3582646	5373917
Nau	Sexenmühle	0,48	53	27	0,23	22	18	153	0,34	3584677	5373077
Neipperger Bächle	Meimsheim/Hausen	0,27	59	80	0,26	41	19	154	0,24	3508342	5436647
Neugraben	Bötzingen	1,01	62	80	0,52	31	129	356	0,26	3406051	5326383
Neugraben	St. Nikolaus	0,97	40	47	0,23	24	73	246	0,23	3405171	5320017
Neugraben	Tingen	1,30	52	118	0,37	35	98	434	0,30	3404532	5317162
Neugraben	Wolfenweiler	0,52	61	66	0,27	46	76	292	0,27	3407837	5314948
Neumagen	Bad Krozingen	5,00	50	66	43	36	720	871	0,29	3403560	5308421
Neumagen	Biengen	5,38	51	61	0,76	31	649	878	0,32	3401762	5313175
Neumagen	Kropfbach	2,70	49	65	0,36	37	685	683	0,28	3406451	5303912
Neumagen	Mulden	6,19	51	84	0,54	34	898	840	0,27	3409833	5301368
Nollenbach	Sentenhart	0,36	53	22	0,18	36	37	119	0,37	3509421	5308756
Nollenbach	Wackershofen	0,45	69	24	0,15	29	19	138	0,44	3507231	5313126
Nordrach	Hinter Merkenbach	0,63	32	27	0,13	18	35	150	0,18	3433920	5364844
Nordrach	Nordrach	1,35	49	40	0,15	27	52	196	0,29	3431619	5362324
Nordrach	zell	0,81	51	61	0,16	27	57	205	0,29	3430185	5357102
Obere Argen	Eglofs	0,10	21	27	0,13	27	29	111	0,10	3569319	5280402
Obere Argen	Epplings	0,19	20	23	0,09	23	28	86	0,17	3564529	5282741
Obere Argen	Hiltensweiler	0,54	15	30	0,12	30	28	113	0,19	3558882	5279401
Obere Argen	Weibrechts	0,54	16	26	0,12	31	29	100	0,19	3560438	5281233
Obere Bära	Nußplingen	0,91	24	42	0,70	37	34	178	0,37	3492074	5332132
Obere Bära	Ober Diegesheim	0,76	30	32	0,22	39	35	145	0,31	3491994	5337841
Ohren	Ohrenberg	0,44	34	53	0,17	42	61	226	0,46	3533272	5456433
Ohren	Ohringen	0,49	43	43	0,10	39	51	178	0,29	3535838	5452072
Ohren	Unter Ohren	0,53	35	65	0,18	38	53	209	0,65	3534228	5453976
Ohren	Unterhöfen	0,55	31	35	0,07	34	65	121	0,20	3539312	5447983
Ohren	Untersteinbach Mühle	0,49	41	34	0,06	38	52	115	0,19	3541268	5445316
Oos	Lichtental	2,18	33	109	0,29	25	223	428	0,42	3445680	5400933
Oos	Oos	1,04	19	81	2,46	20	214	340	0,35	3438764	5405543
Oos	Oosscheuern	0,88	17	75	0,54	19	137	306	0,32	3443665	5403643
Osterhofer Ach	Osterhofen	0,50	36	43	0,17	41	41	203	0,35	3560953	5311598
Otterbach	Riedern	0,29	43	35	0,21	50	57	247	0,40	3528872	5504409
Pfuhlbach	Faurndan	0,30	49	37	0,10	54	44	171			
Pfuhlbach	Bezgenried										
Pleutersbach	Pleutersbach	0,47	33	16	0,24	30	44	79	0,24	3496642	5479358
Prägbach	Beim Bernauer Kreuz	0,68	36	14	0,16	15	36	92	0,23	3424931	5298539

Gewässer	Ort	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	P ₂ O ₅	RW	HW
		[mg/kg]	[%]								
Prägbach	Präg	1,74	81	48	0,23	38	79	147	0,33	3423144	5294573
Ramsbach	Holzheim / Eisingen	0,11	56	21	0,64	37	27	105	0,32	3558442	5395200
Raumünzach	Ebersbronn	1,74	6	39	0,25	7	84	121	0,47	3449961	5388654
Raumünzach	Raumünzach	4,17	11	32	0,25	6	50	144	0,48	3452051	5389244
Rechenberger Rot	Buchmühle	0,78	23	29	0,17	29	106	195	0,25	3585715	5436433
Rechenberger Rot	Mündung Jagst	0,69	22	18	0,16	30	116	160	0,21	3581115	5431542
Rechenberger Rot	Rechenbach	0,37	34	29	0,17	28	108	175	0,28	3583555	5434853
Rechte Murg	Obertal	1,45	24	31	0,28	24	76	107	0,24	3447345	5377443
Reichenbach	Heizmannshof	2,76	25	37	0,36	16	48	232	0,36	3446707	5341473
Reichenbach	Hornberg	2,63	29	43	0,43	21	49	189	0,36	3443336	5342257
Reichenbach	Neuerbaderhof	3,17	18	39	0,39	30	32	191	0,29	3447472	5340328
Reichenbach	Waldhasenhof	2,99	22	37	0,32	31	41	214	0,35	3447932	5340288
Reiglersbach	Stimpfach	0,02	26	22	0,10	32	36	154	0,25	3579878	5436649
Reiglersbach	Weipertshofen	0,12	34	19	0,11	38	27	162	0,25	3582243	5438793
Reisenbach	Reisenbacher Grund	1,91	36	22	0,26	76	74	228	0,40	3508200	5483700
Reutibach	Rettighofen	0,39	32	31	0,15	36	40	167	0,31	3550625	5339177
Reutibach	Unterweiler	0,70	45	61	0,18	32	22	280	0,54	3545748	5335006
Riedgraben	Bermatingen	0,32	37	45	0,93	25	41	140	0,22	3526020	5287111
Ringgenbach	Ringgenbach	0,65	46	35	0,17	31	36	161	0,42	3512511	5317447
Rinschbach	Adelsheim	0,27	36	46	0,09	35	38	147	0,32	3528300	5474300
Rinschbach	Hemsbach	0,31	39	32	0,06	35	33	164	0,29	3529250	5476900
Rinschbach	Hofsheim	0,22	34	23	0,05	31	34	98	0,23	3529670	5482360
Rinschbach	Rinschheim	0,23	39	20	0,05	36	37	98	0,24	3528370	5486300
Rippbach	Böttingen	0,27	53	25	0,09	37	25	85	0,35	3570133	5486802
Rippbach	Riedenheim	0,28	42	24	0,07	36	25	76	0,33	3572233	5493218
Röhlinger Sechta	Delkingen	0,43	52	36	0,13	66	47	225	0,46	3584145	5421008
Röhlinger Sechta	Haisterhofen	0,39	36	28	0,14	61	65	194	0,56	3588011	5421274
Röhlinger Sechta	Röhlingen	0,14	45	27	0,13	63	55	189	0,43	3589086	5423059
Rohmbach	Dossenheim	8,97	41	109	0,41	115	202	1615	0,40	3475710	5478500
Rohmbach	Ladenburg	1,72	45	55	0,83	43	156	410			
Rombach + Aal	Aalen	0,22	70	31	0,10	43	40	180	0,34	3579600	5411062
Rot+Schw. Rot	Bruckhof	0,49	18	23	0,10	22	21	74			
Rot+Schw. Rot	Buchengehrener Säge	0,51	21	16	0,10	28	58	124	0,21	3552503	5414436
Rotbach	Biberach	0,52	62	45	0,21	43	27	211	0,38	3558884	5328947
Rotbach	Eggelsbach	0,78	40	32	0,19	32	23	133	0,69	3551694	5324916
Rotbach	Oberdorf	0,54	42	32	0,11	41	22	215	0,40	3554630	5327468
Rotbach	Reutte	0,45	48	32	0,12	42	43	185	0,37	3556985	5326168
Rötelbach	Bad Überkingen Kirche	0,29	16	16	0,08	25	17	67	0,21	3558980	5384947
Rötelbach	Eberbach	0,48	36	30	0,20	45	24	112	0,29	3560503	5463040
Rötelbach	Hertensteiner Mühle	0,46	35	30	0,12	49	35	108	0,33	3564464	5462757
Rötelbach	Stöckenholz	0,42	34	33	0,23	51	27	117	0,29	3565557	5460272
Rötelbach	Waldrand/Brücke	0,22	9	9	0,01	17	11	32	0,18	3559160	5384192
Rötenbach	Bräulingen	1,51	41	42	0,16	47	63	146	0,26	3458022	5310336
Rötenbach	Stausee	0,61	35	18	0,17	21	23	121	0,25	3579719	5426767
Rötenbach	Unterbränd	0,60	33	21	0,08	26	114	146	0,15	3452767	5312397
Saalbach	Gondelsheim	0,66	44	44	0,21	39	59	157			
Saalbach	Hambrücken / Hüttenheim	0,82	50	65	0,41	42	79	259			
Saalbach	Heidelsheim	0,91	42	50	0,22	40	70	196			
Saalbach	Karlsdorf / Bruchsal	0,66	43	71	0,30	40	59	308			
Saalbach(Weissach)	Bretten	0,56	43	39	0,35	40	25	127	0,26	3480220	5432350
Saalbach(Weissach)	Diedelsheim	1,14	57	70	0,42	53	67	305	0,29	3476200	5433910
Saalbach(Weissach)	Knittlingen	0,65	46	42	0,12	38	26	112	0,21	3483200	5432500
Sall	Hohensall	0,36	33	29	0,19	40	31	107	0,26	3541447	5457257
Sall	Mangoldsall	0,35	35	32	0,22	42	33	116	0,29	3547248	5454676
Sall	Ziegelhütte	0,32	38	32	0,23	47	33	127	0,30	3536847	5459388
Salzach	Bretten	1,24	45	55	0,78	22	68	186			
Salzach	Ruit	1,04	57	73	0,57	26	78	237	0,23	3480250	5429500
Sandbach	Bühl	3,03	34	170	1,00	28	157	590	0,64	3435009	5397214
Sandbach	Hügelsheim	1,40	40	104	0,59	30	204	417	0,45	3436951	5407203
Sandbach	Iffeheim	0,75	37	84	0,74	28	141	382	0,41	3435800	5409501

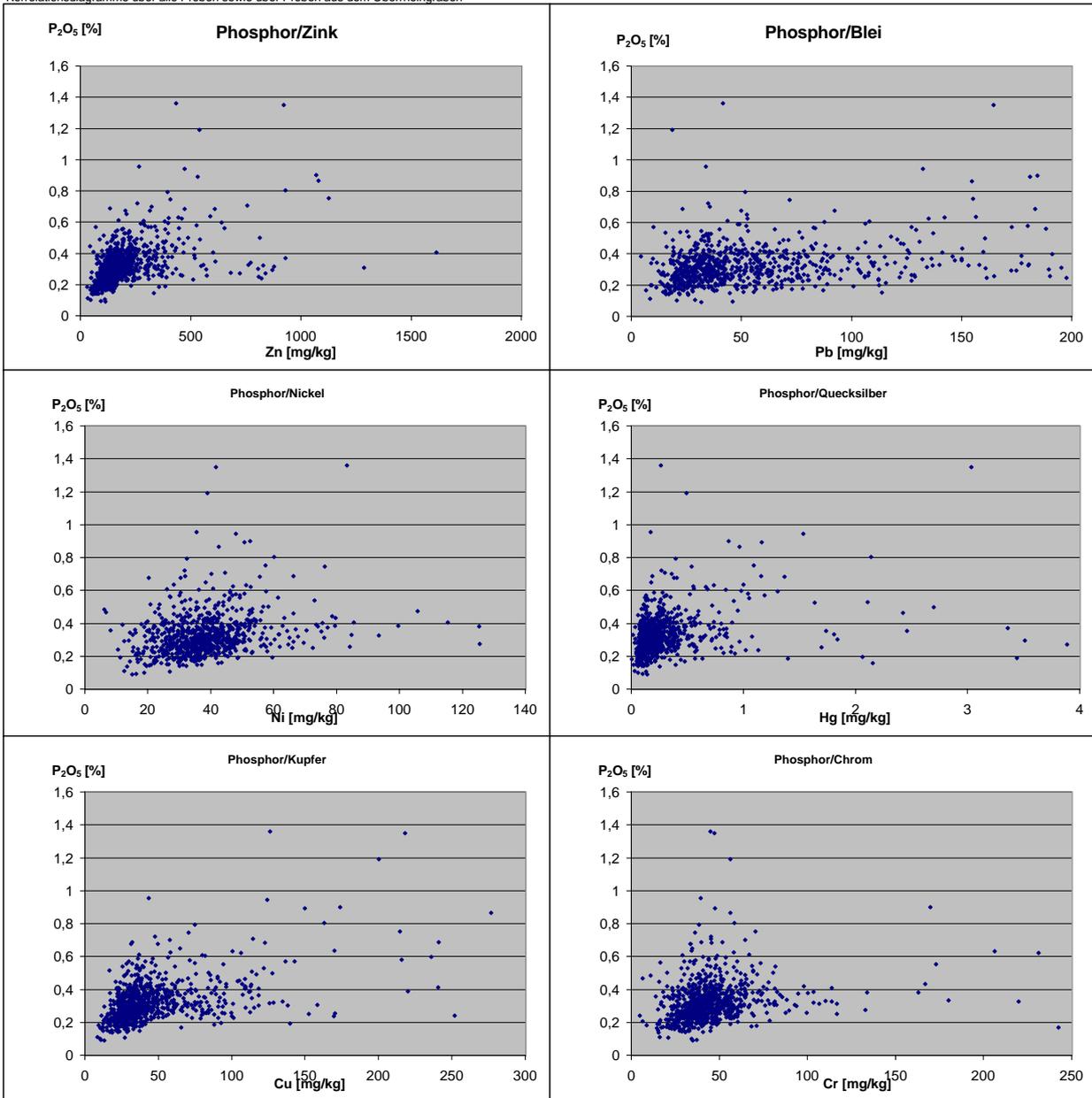
Gewässer	Ort	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	P ₂ O ₅	RW	HW
		[mg/kg]	[%]								
Sandbach	Sinzheim	0,78	43	82	0,38	32	89	307	0,35	3437256	5403638
Sandbach	Weienung	1,28	45	89	0,38	38	100	313	0,37	3436230	5400758
Saubach	Äpfingen	0,28	36	27	0,10	35	26	122	0,28	3564007	5334233
Saubach	Baltringen	0,37	62	36	0,16	47	36	157	0,31	3563467	5337908
Saubach	Ellmannsweiler	0,29	39	24	0,08	36	25	74	0,37	3564190	5330468
Saubach	Vor Mündung Dürnbach	0,34	41	24	0,13	42	28	91	0,29	3563878	5341183
Schaich	Dettenhausen	0,37	36	46	0,28	42	58	187	0,26	3507531	5385607
Schaich	Neuhausen	0,18	38	26	0,08	36	68	94	0,22	3515512	5387009
Schaich	Schaichhof	0,29	43	28	0,09	53	32	113	0,23	3501620	5385992
Schefflenz	Allfeld	0,33	46	31	0,12	39	41	120	0,31	3517830	5464850
Schefflenz	Billigheim	0,51	47	29	0,11	40	29	132	0,23	3518970	5468700
Schefflenz	Höchstberg	0,33	47	36	0,12	42	34	251	0,31	3516910	5460600
Schefflenz	Mittel/Oberschefflenz	0,31	45	29	0,08	38	35	111	0,19	3520300	5474300
Scherzach	Grünkraut	0,26	56	24	0,10	42	25	117	0,25	3549019	5289886
Scherzach	Richlisreute	0,20	34	39	0,16	40	35	115			
Schiltach	Hinterhof	1,29	41	236	0,98	46	222	642	0,60	3453497	5346023
Schiltach	Reichenbächle	1,26	52	241	1,16	66	282	610	0,69	3451821	5349677
Schiltach	Schramberg	1,20	30	143	0,31	49	127	339	0,57	3454543	5342093
Schiltach	Tennenbronn	0,88	28	46	0,36	16	49	170	0,34	3451483	5339053
Schlichem	Böhringen	0,18	33	30	0,03	48	24	113	0,28	3475120	5345417
Schlichem	Dautmergen	0,46	55	49	0,07	73	22	216	0,39	3480786	5344912
Schlichem	Epfendorf	0,18	31	28	0,05	43	26	116	0,28	3470639	5345152
Schlichem	Hausen	0,34	93	18	0,04	58	20	103	0,31	3488179	5340133
Schlichem	Ratshausen	0,08	74	19	0,02	45	32	103	0,33	3484404	5339918
Schlichem	Schönberg	0,43	54	32	0,24	51	35	157	0,38	3482513	5342433
Schlierbach	Stausee	0,08	41	17	0,06	35	33	50	0,18	3587390	5425344
Schlücht	Grafenhausen	1,41	41	40	0,28	29	177	221	0,34	3445569	5292748
Schlücht	Gutweil	0,82	110	56	0,23	85	140	215	0,33	3443725	5278441
Schlücht	Ühlingen	1,61	42	47	0,22	29	181	232	0,33	3448973	5286752
Schlücht	Witznau	0,99	35	46	0,21	22	125	202	0,37	3444231	5282701
Schmerach	Unter Schmerach	0,51	34	30	0,20	39	22	143	0,33	3570104	5447287
Schmerach	vor Mündung Bühler	0,34	35	28	0,11	38	28	115	0,29	3563001	5444005
Schmichen	Dellmensingen	0,55	65	34	0,11	41	30	164	0,44	3567434	5351442
Schmidbach	Schmidhausen	0,25	29	24	0,14	20	26	83	0,14	3524508	5434201
Schmie	Illingen	0,25	33	47	0,19	31	35	203	0,31	3495909	5422337
Schmie	Lienzingen	0,24	31	25	0,08	40	27	117	0,23	3489604	5426522
Schöbach	Bottingen	0,97	38	52	0,41	33	106	180	0,26	3409536	5328399
Schöbach	Vorstetten	1,32	57	60	0,26	46	84	260	0,32	3413211	5325202
Schönbach	Durchhausen	0,27	48	30	0,08	48	27	143	0,41	3475945	5322581
Schönbach	Seitingen	0,52	59	18	0,14	43	35	133	0,33	3479330	5320067
Schönenbach	Todtnau	1,37	59	56	0,24	27	1573	262	0,24	3420538	5300092
Schönertsbach	Dörlesberg	0,13	33	12	0,02	31	17	62	0,15	3536842	5508023
Schönmünz	Stuhlberg										
Schönmünz	Zwiggabel										
Schüpfbach	Kupprichhausen	0,28	37	26	0,21	35	23	97	0,20	3545458	5487738
Schüpfbach	Unterschüpf	0,50	39	25	0,11	33	23	106	0,20	3550180	5486712
Schutter	Dudenheimer Mühle	1,46	231	106	0,66	53	135	461	0,62	3415218	5367432
Schutter	Goldscheuer	1,38	269	90	0,78	53	122	381	0,47	3415017	5376122
Schutter	Hugsweiler	0,99	220	91	0,66	36	153	385	0,32	3414518	5259767
Schutter	Kuhbach-Lahr	1,56	180	95	0,79	45	268	320	0,33	3419033	5355998
Schutter	Müllen	1,47	173	94	1,05	46	129	385	0,55	3414197	5371152
Schutter	Schutterzell	0,97	206	101	0,74	51	142	444	0,63	3415163	5363313
Schutter	Sondheim	1,14	290	91	0,95	52	131	388	0,48	3415522	5380707
Schutter	Wittelbach	0,92	55	68	0,27	38	180	306	0,33	3421855	5351523
Schutterkanal	Nonnweiler	0,95	167	107	0,53	80	150	351	0,43	3408594	5358109
Schwabbach	Rappach	0,25	49	54	0,11	50	36	182	0,29	3531527	5448732
Schwarer Kocher	Ober Kochen	0,89	51	41	0,32	52	70	211	0,42	3582430	5405790
Schwarza	Oberschwarzthalde	0,72	38	24	0,30	19	51	152	0,40	3438703	5295508
Schwarza	Schwarzabbruck	1,33	14	23	0,36	8	37	112	0,36	3439332	5291281
Schwarzach	Ertingen	0,51	43	48	0,26	33	53	345	0,55	3533648	5329246

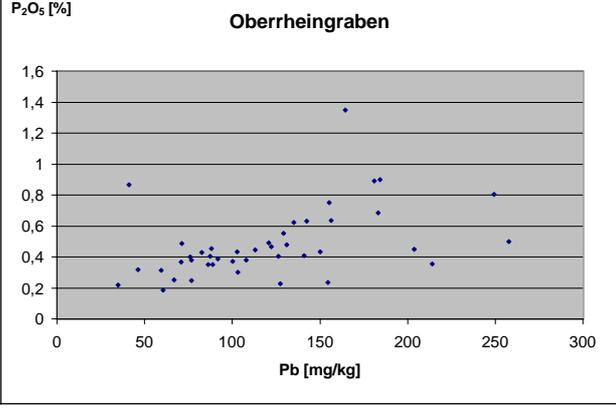
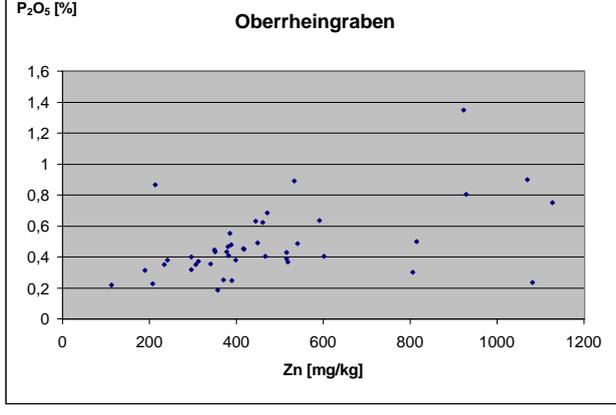
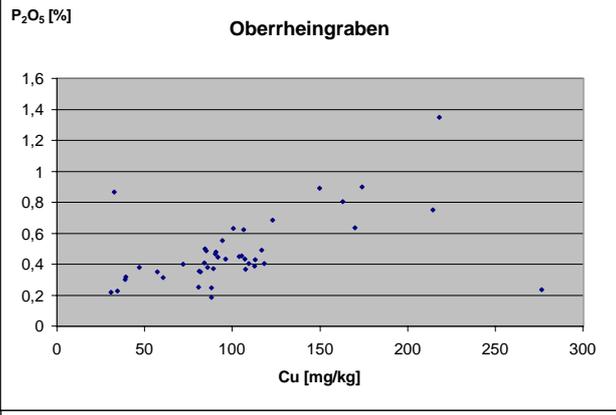
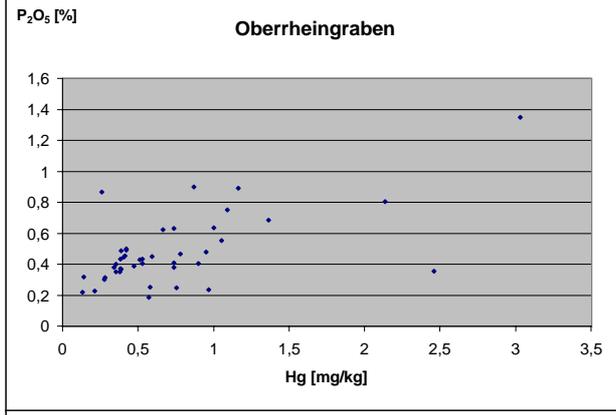
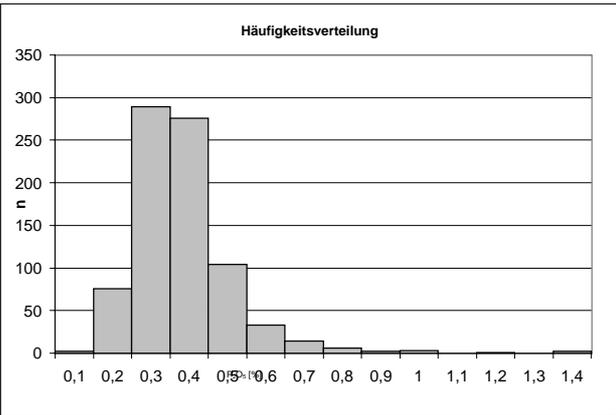
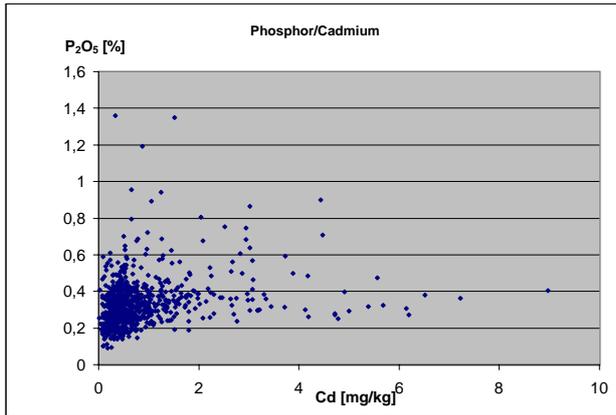
Gewässer	Ort	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	P ₂ O ₅	RW	HW
		[mg/kg]	[%]								
Schwarzach	Ertingen	0,78	62	37	0,26	33	24	115	0,34	3533648	5329246
Schwarzach	Marbach	0,77	45	60	0,53	31	82	434	0,43	3534493	5325321
Schwarzach	Riedlingen	0,38	30	20	0,18	30	33	86	0,19	3536019	5334637
Schwarzach	Saulgau	0,94	49	82	0,85	36	88	381	0,60	3536852	5320872
Schwarzach	Aglasterhausen	0,67	81	41	0,17	43	52	202	0,32	3498670	5467700
Schwarzach	Bechtersbohl	0,49	48	91	0,21	38	26	155	0,23	3450680	5275116
Schwarzach	Buchenhof	0,52	35	29	0,13	28	35	160	0,27	3462034	5275227
Schwarzach	Eschelbronn / Neidenstein	0,64	69	41	0,15	38	43	222	0,38	3489950	5465150
Schwarzach	Grießen	0,40	31	27	1,02	24	23	96	0,24	3456820	5276990
Schwarzach	Helmstadt / Bergen	0,50	78	37	0,14	40	42	159	0,33	3497900	5464900
Schwarzach	Meckesheim	0,58	75	38	0,17	40	36	198	0,42	3487570	5463850
Schwarzach	Neidenstein	0,67	77	39	0,15	40	49	207	0,40	3491970	5464200
Schwarzach	Weibstadt	0,72	117	34	0,64	37	50	182	0,31	3494220	5462550
Schwarzach	Weibstadt / Kläranlage	0,35	75	39	0,14	36	47	138			
Schweizerbach	Brucker Säge	0,26	37	11	0,10	16	46	94	0,09	3553114	5408742
Schweizerbach	Lorch	0,21	33	23	0,09	35	51	118	0,27	3552894	5406182
Schweizerbach	Seemühle	0,18	35	13	0,14	15	32	113	0,09	3552851	5406800
Seckach	Roigheim	0,33	44	42	0,47	39	50	184	0,38	3525690	5468837
Seebach-Gutach	Bärental-Unter	6,51	36	34	0,34	19	115	190	0,38	3430692	5303903
Seebach-Gutach	Bruderhalde	1,72	54	39	0,17	35	65	235	0,31	3435056	5305686
Seebach-Gutach	Föhrenbühl	2,86	62	128	2,70	36	161	488	0,50	3442835	5307593
Seebach-Gutach	Neustadt	1,00	24	36	203	12	53	107	0,39	3439116	5309547
Seebach-Gutach	Zipfelsäge	3,09	65	109	2,42	32	124	468	0,46	3444322	5304521
Seegraben	Riedern/Grießen	0,57	32	26	0,10	25	25	106	0,20	3457700	5277126
Sindelbach	Aldorf	0,48	38	50	0,06	38	30	122	0,25	3543851	5469131
Sindelbach	Dörrenzimmern	0,59	44	53	0,08	47	49	105	0,26	3548362	5466632
Sodenbach	Fulgenstadt	0,55	48	36	0,20	30	49	286	0,59	3533537	5320762
Sodenbach	Herbertingen	0,48	58	55	0,33	39	58	250	0,47	3532043	5325257
Sodenbach	Schwarzach	0,48	38	45	0,23	33	43	235	0,44	3533758	5328086
Sonnenbach	Erpfental	0,15	82	26	0,13	73	76	161	0,54	3590361	5424559
Soppenbach	Beuren	0,12	53	23	0,12	40	21	81	0,25	3528108	5327917
Soppenbach	Heiligkreuztal	0,30	36	23	0,11	42	23	93	0,33	3530269	5332898
Speltach	Fichtenhaus	0,05	29	21	0,13	36	15	82	0,19	3573602	5440043
Speltach	Jagstheim	0,31	31	26	0,12	35	35	129	0,26	3577493	5440289
Stehbach	Moosbeuren	0,18	57	26	0,09	43	24	125	0,38	3553910	5338417
Stehbach	vor Mündung Tobelbach	0,54	32	29	0,16	39	25	153	0,38	3550826	5343102
Steina	Bettmaringen	4,19	41	41	0,22	29	92	224	0,26	3449583	5294051
Steina	Löhningen	1,19	39	38	0,14	31	127	189	0,26	3449584	5284203
Steina	Rehhalden -Tiengen	1,80	39	36	0,12	30	112	181	0,24	3448744	5279115
Steina	Unter Mettingen	4,71	48	41	0,20	27	104	192	0,28	3451003	5285153
Steinach	Heiligkreuzsteinach	1,23	45	34	0,41	33	82	287	0,45	3485150	5482600
Steinach	Hilsenheim	0,44	39	22	0,27	25	53	164	0,41	3484200	5485900
Steinach	Lindenbach	4,91	1810	56	0,80	40	191	347	0,40	3486100	5475770
Steinbach	Löchgau	0,08	37	70	0,36	42	57	320	0,47	3509933	5428726
Steinbächle	Steinbach	0,80	34	24	0,12	62	20	158	0,33	3521034	5490058
Steinenbach	Brombach	0,39	47	38	0,12	35	68	156	0,20	3403291	5279141
Steinenbach	Steinen	0,19	49	22	0,19	32	66	121	0,21	3405708	5280540
Stelzenbach	Inzigkofen	0,23	25	21	0,05	31	20	110	0,19	3513607	5325301
Stille Musel	Ankenbach	0,19	44	42	0,15	37	34	223	0,31	3463580	5318073
Stille Musel	Donaueschingen	0,83	21	34	0,18	30	43	204	0,25	3464066	5313206
Stoffelbach	Pfeilhalden	0,82	56	58	0,22	27	55	165	0,31	3559849	5406023
Stoffelbach	Pfeilhalden	0,17	37	93	2,06	21	38	95	0,19	3559849	5406023
Störenbach	Magenbuch	0,22	53	39	0,18	35	38	127	0,32	3524603	5314802
Strudelbach	Enzweihingen	0,30	40	47	0,26	36	57	217	0,31	3498615	5419065
Strudelbach	Heimerdingen	0,43	31	75	0,58	43	55	297	0,40	3497134	5412542
Strütbach/Reichenbach	Salach/Baierhof	0,09	44	14	0,05	22	20	64	0,22	3558379	5395054
Strütbach/Reichenbach	Wißgoldingen	0,09	53	19	0,10	27	17	78	0,27	3558839	5399858
Stubental	Dudelhof	4,79	117	152	0,80	73	122	808	0,25	3574010	5392972
Stubental	Heidenheim	2,76	59	170	1,14	51	95	821	0,24	3580713	5394022
Stubental	Sontheim	3,89	92	165	0,80	61	115	926			

Gewässer	Ort	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	P ₂ O ₅	RW	HW
		[mg/kg]	[%]								
Stunzach	Groul Hospach	0,26	35	35	0,10	46	30	140	0,31	3485231	5356892
Stunzach	Heiligenzimmer	0,10	33	40	0,22	44	25	162	0,32	3480010	5353738
Stunzach	Rosenfeld	0,18	36	29	0,23	44	41	140	0,27	3480315	5349871
Sulzbach	Heitersheim	3,45	41	96	0,31	42	875	548	0,32	3398660	5305501
Sulzbach	Heitersheim/Brühl	3,02	61	91	3,51	42	954	571	0,30	3397239	5306171
Sulzbach	Lahr	1,84	51	95	0,37	57	91	371	0,38	3415400	5355743
Sulzbach	Sulz	1,05	47	112	0,54	51	80	332	0,38	3416253	5352538
Sulzbach	Sulzbach	1,93	54	63	0,38	34	491	336	0,31	3402786	5301935
Sulzbach	Wallburg-Wald	0,72	90	43	0,21	65	56	149	0,27	3417179	5348478
Talbach	Amtenhausen	0,30	78	13	0,05	42	20	104	0,21	3474526	5313557
Talbach	Öfingen	0,02	114	23	0,10	54	33	160	0,41	3473065	5316837
Tannbach	Bästenhart	0,27	42	32	0,08	65	30	158	0,31	3502200	5363106
Teinach	Bad Teinach	0,71	35	137	1,19	44	173	320	0,57	3479199	5393338
Teinach	Lautenbachhof	1,80	25	44	0,41	32	55	180	0,29	3475309	5392823
Teinach	Neuweiler	2,43	27	65	0,83	36	74	241	0,37	3470423	5390959
Tiefenbach (M.R.)	Moosbacher Wald	0,19	50	24	0,05	46	29	134	0,22	3531090	5383587
Tiefenbach (M.R.)	Nürtingen	0,37	45	41	0,24	53	50	261	0,41	3525589	5387889
Tiefenbach/Dobach	Neckarmühlbach	0,32	49	30	0,15	39	39	191	0,28	3509791	5460947
Tiefenbach/Dobach	Siegelbach	0,60	44	29	0,15	37	39	149	0,26	3506241	5458383
Tränkebach	Bachheim	1,50	86	55	8,19	33	75	304	0,35	3455912	5302512
Tränkebach	Seppenhofen	1,08	67	46	13,20	36	95	299	0,29	3451447	5304073
Treschklingerbach	Biberach	0,16	16	23	0,08	26	23	73	0,21	3510146	5451492
Treschklingerbach	Bonfeld	0,14	15	15	0,05	19	18	57	0,15	3506822	5452696
Treschklingerbach	Treschklingen	0,26	60	35	0,07	31	41	149	0,20	3503762	5454069
Trienzbach	Dallau/Mariental	0,78	43	66	0,24	52	61	352	0,45	3513050	5472000
Trienzbach	Robern/Krumbach	1,98	39	33	0,15	67	47	261	0,36	3512670	5479500
Trienzbach	Sattbach/Muckental	0,66	38	25	0,16	56	34	181	0,30	3513350	5475800
Umlach	Awenger Brücke	0,35	71	36	0,28	41	43	196	0,49	3562434	5320462
Umlach	Hummertsried Brücke	0,37	49	28	0,13	41	31	148	0,31	3563552	5315082
Umlach	Kappel	0,32	48	27	0,16	41	21	133	0,35	3561563	5316993
Umlach	Ummendorf	0,32	54	32	0,15	45	34	134	0,30	3561573	5326097
Umpfer	Königeshofen	0,32	33	35	0,39	33	42	173	0,25	3552369	5489723
Umpfer	Uffingen	0,22	34	31	0,26	39	73	152	0,23	3543735	5484658
Umpfer	Unter Schüpf	0,35	38	31	0,19	35	35	145	0,26	3550166	5486532
Umpfer	Wölchingen-Boxberg	0,33	43	34	0,22	42	47	151	0,28	3546615	5483267
Unditz	Allmannsweiler	2,66	71	83	0,39	37	60	355	0,32	3411262	5359817
Unditz	Kürzell-Schutterzell	1,65	84	108	0,39	39	71	519	0,37	3413582	5362632
Unditz	Ottenweiler	0,98	61	65	0,35	38	75	313			
Unditz	Wittenweiler	1,10	56	35	0,21	43	127	208	0,23	3408822	5355809
Unt. Argen	Hilperthofen	0,18	17	12	0,05	14	7	46	0,17	3567050	5289238
Unt. Argen	Meratzhofen	0,77	29	35	0,17	35	32	141	0,22	3571081	5290503
Unt. Argen	Oberau	0,54	30	31	0,10	17	32	109	0,22	3563414	5286902
Unt. Argen	Oberau/Nieratzer	0,27	26	26	0,12	28	24	102	0,18	3559605	5286733
Unt. Argen	Obere Harprechts	0,17	16	9	0,03	12	9	34	0,11	3574143	5286682
Unt. Argen	Pflegel	0,45	34	29	1,40	29	26	105	0,19	3555684	5280262
Unt. Argen	Ratzenhofen	0,30	23	28	0,18	30	38	113	0,16	3579850	5285950
Unt. Rottum+Western	1 km Stetten Brücke	0,46	38	34	0,29	41	28	169	0,37	3566039	5350182
Unt. Rottum+Western	Bellamont	0,47	60	29	0,11	42	35	162	0,51	3567114	5318809
Unt. Rottum+Western	Dellmansingen	0,54	43	42	0,29	48	40	243	0,48	3566094	5352722
Unt. Rottum+Western	Hürbel Sägemühle	0,68	42	51	0,26	47	50	256	0,49	3570578	5332607
Unt. Rottum+Western	Lampenheim	0,55	47	38	0,28	44	37	229	0,45	3564560	5345442
Unt. Rottum+Western	Lampenheim	0,76	43	44	0,34	38	51	266	0,42	3565714	5342577
Unt. Rottum+Western	Mietingen	0,54	47	37	0,26	44	34	204	0,53	3567459	5338452
Unt. Rottum+Western	Ochsenhausen	0,48	63	53	0,31	40	48	245	0,43	3570836	5326532
Unt. Rottum+Western	Rottum	0,08	64	31	0,14	47	33	122	0,37	3568899	5322228
Untere Bära	Egesheim	1,20	62	55	0,17	47	42	232	0,37	3489544	5331072
Untere Bära	Wehingen	0,61	83	63	0,22	52	34	253	0,39	3485949	5333827
Urach	Hammereisenbach	1,11	53	39	0,22	24	52	150	0,33	3448510	5317613
Urach	Urach	0,95	59	42	0,24	25	69	166	0,42	3444189	5318787
Urbach	Roßberg	0,66	47	30	0,26	30	19	151	0,35	3558517	5303472

Gewässer	Ort	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	P ₂ O ₅	RW	HW
		[mg/kg]	[%]								
Urbach	Tannweiler	0,65	38	75	0,40	32	52	394	0,79	3551272	5309818
Urbach	Unter Urbach	0,35	51	30	0,17	48	31	144	0,32	3557359	5307557
Volkenbach	Hinterberg	0,36	39	22	0,10	34	21	88	0,19	3465465	5277852
Volkenbach	Jestetten	0,31	41	29	0,11	30	16	66	0,14	3469549	5278385
Vorbach	Laudenbach										
Vorbach	Niederstetten										
Vorbach	Oberstetten										
Vorbach	Weikersheim	0,40	38	45	0,57	45	29	179	0,39	3565625	5483000
Wachbach	Neukirchen	0,28	34	29	0,14	39	36	127	0,23	3555869	5482407
Wachbach	Wachbach	0,30	26	20	0,13	25	22	81			
Wachbach	Wachbach	0,20	13	23	0,09	22	19	74			
Wagbach	Hambrücken	1,43	55	262	1,12	56	230	1037			
Wagbach	Rheinhausen/Neulußheim	1,71	61	142	0,69	35	93	407			
Wagbach	Waghäusel	1,28	65	134	1,23	45	179	756			
Wagbach	Wiesental	1,06	81	86	0,67	50	83	309			
Wagensteigbach	Buchenbach	1,01	404	53	0,40	217	63	206	0,40	3426389	5314303
Wagensteigbach	Wagensteig	1,27	63	48	0,19	36	59	208	0,33	3428788	5316611
Wagensteigbach	Wieseneck	0,85	103	57	0,24	80	68	232	0,38	3424753	5315368
Waldach	Beihingen	0,28	27	47	0,26	22	70	226	0,31	3473403	5378178
Waldach	Tumlingen	0,88	27	60	0,56	31	90	418	0,27	3468542	5371187
Waldach	Unterschwandorf	0,68	34	59	0,35	28	65	216	0,37	3477664	5378123
Waldach	Unterswaldach	0,57	27	55	0,28	30	57	219	0,39	3469313	5375334
Waldangelbach	Angelbachtal	0,77	47	40	0,10	39	23	168	0,33	3483300	5455740
Waldangelbach	Waldangelbach / Michelfeld	1,00	42	42	0,11	37	24	178	0,32	3485080	5453650
Waldangelbach	Waldangelloch / Eichelberg	0,51	46	32	0,11	37	22	95	0,22	3486630	5451200
Walzbach	Weingarten	0,51	42	43	0,19	34	56	150			
Weihung	Beuren	0,47	50	38	1,64	43	36	217	0,53	3574581	5347973
Weihung	Essendorf	0,24	67	37	0,56	41	44	174	0,61	3574435	5353258
Weihung	Unterkirchberg	0,44	48	41	0,49	35	33	195	0,48	3574500	5356243
Weihung	Wain	0,55	48	35	0,21	39	32	168	0,55	3575924	5338978
Weihung	Weihungszell	0,47	58	40	0,92	39	16	221	0,53	3575980	5343708
Weislauf	unterh. Ebnisee	0,46	21	16	0,10	32	51	84	0,19	3544801	5420195
Weißbach	Sachs. weiler	0,26	41	35	0,07	39	36	126	0,28	3533363	5422976
Welchensteinnachbach	Klettner	0,68	46	53	0,20	22	64	215	0,29	3426390	5348547
Welchensteinnachbach	Steinach/Schwenden	1,44	59	46	0,18	33	64	220	0,29	3429400	5351292
Welzbach	Kembach	0,25	39	37	0,15	35	33	159	0,27	3547210	5513948
Wessenbach	Immendingen	0,29	31	15	0,11	20	23	93	0,25	3479936	5311606
Wiesaz	Bronnweiler	0,45	24	43	0,38	31	39	175	0,28	3509926	5368313
Wiesaz	Gönningen	0,39	7	21	0,10	16	14	101	0,21	3513027	5365693
Wiesaz	Wiesatz-Sägmühle	0,24	24	37	0,26	40	33	166	0,30	3505436	5369278
Wieslauf	Asperglen Brücke	0,39	38	35	0,28	37	57	196	0,25	3539055	5413820
Wieslauf	Heubersbronn	0,08	45	27	0,09	35	37	47	0,17	3540361	5409541
Wieslauf	Oberndorf	0,25	34	29	0,15	37	50	138	0,18	3540325	5417295
Wildbach	Boxtal-Sägmühle	0,36	38	47	0,14	35	36	166	0,29	3528837	5512493
Wilde Gutach	Altglashütte/Wildgutach	1,64	73	76	0,26	43	79	238	0,39	3435453	5319728
Wilde Gutach	Bleibach/Ottensteg	1,34	65	92	0,30	40	99	234	0,35	3425692	5331732
Wilde Gutach	Simonswald-Beim Engel	1,53	46	101	0,34	29	86	168	0,31	3433023	5325677
Wilde Gutach	Simonswald-Unterhof	0,81	43	77	0,41	28	71	185	0,32	3432988	5325562
Wittigbach	Grünfeld	0,39	46	34	0,17	52	33	160	0,40	3554707	5496718
Wittigbach	Wittighausen	0,27	46	32	0,14	43	35	146	0,32	3560343	5497317
Wolfach	Schapbach/Untertal	0,34	42	70	0,21	17	161	98	0,24	3446851	5359233
Wolfach	Vor Dollenbach	0,58	34	84	0,25	21	190	138	0,30	3449807	5363687
Wolfach	Walke	0,53	44	95	0,29	19	190	128	0,25	3442561	5356248
Wolfach	Wolf	2,46	41	50	0,25	27	87	239	0,37	3447351	5368942
Wolfach	Wolf	0,75	50	78	0,22	22	227	230	0,30	3447351	5368942
Wolfach	Herzogenweiler	2,30	37	19	0,32	28	61	52	0,28	3452974	5321961
Wolfach	Rietheim	1,40	38	35	0,27	35	58	128	0,35	3459570	5321077
Wolfegger Ach	Altann Höll	0,68	51	33	0,19	40	40	134	0,32	3558901	5300237
Wolfegger Ach	Baierfurt	0,43	46	41	0,36	51	112	512	0,23	3546800	5398890
Wolfegger Ach	Bolanden	0,23	40	26	0,15	49	18	91	0,19	3554351	5301258

Gewässer	Ort	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	P ₂ O ₅	RW	HW
		[mg/kg]	[%]								
Wolfegger Ach	Furtmühle	0,58	50	34	0,27	27	37	168	0,37	3562739	5292581
Wolfegger Ach	Kißlegg	0,51	69	37	0,29	24	33	147	0,51	3565875	5294990
Wolfegger Ach	Niederbiegen	0,47	28	57	0,39	39	198	389	0,25	3549352	5299080
Wolfegger Ach	Rötenbach	0,37	33	28	1,74	27	21	137	0,35	3560626	5295512
Wolfegger Ach	Waffenried	0,47	29	40	0,21	26	47	187	0,40	3565856	5291538
Wolfegger Ach	Wolfegg	0,43	57	25	0,18	32	37	115	0,31	3559077	5297647
Wollenbach	Helmstadt / Bergen	0,35	42	34	0,09	36	38	102			
Wollenbach	Wollenberg	0,08	40	31	0,09	41	29	98			
Würzach	Fischzuchtanst.	2,25	51	27	0,26	34	69	223	0,49	3470828	5402032
Würzach	Würzbach	3,08	60	41	0,31	47	83	307	0,57	3472543	5398247
Wüstenbach	Fürstenhof	0,40	29	40	0,20	37	36	154	0,25	3527532	5425170
Yachbach	Elzach	1,36	83	73	0,50	40	71	216	0,31	3430717	5336738
Zimmerbach	Rangendingen	0,18	39	31	0,15	50	35	148	0,33	3493276	5359982
Zimmerbach	Zimmern	0,09	37	18	0,08	47	15	93	0,28	3496057	5353713
Zinsbach	Kohlsägmühle	0,43	27	24	0,20	40	48	124	0,31	3468747	5382168
Zinsbach	Waldsägmühle	1,28	27	49	0,30	59	57	208	0,37	3464662	5376679
Zipfelbach	Hauweiler	0,21	50	38	0,07	37	48	130	0,20	3528904	5413035
Zipfelbach	Hochdorf	0,51	78	63	0,31	79	60	302	0,44	3521972	5417641
Zipfelbach	Schwaikheim	0,16	33	30	0,09	48	20	133	0,23	3526703	5415532
Zwiefalter Ach	Zwiefalten	0,19	48	18	0,05	33	27	67	0,23	3536400	5342551





P ₂ O ₅ Konzentrationen [%] in der Korngrößenfraktion < 20 µm, gemittelt über ein Raster von 10 km Kantenlänge																							
HW \ RW	3.390.000	3.400.000	3.410.000	3.420.000	3.430.000	3.440.000	3.450.000	3.460.000	3.470.000	3.480.000	3.490.000	3.500.000	3.510.000	3.520.000	3.530.000	3.540.000	3.550.000	3.560.000	3.570.000	3.580.000	3.590.000	3.600.000	
5.250.000			0,32																				
5.260.000																							
5.270.000	0,35	0,20	0,24	0,56			0,29	0,25	0,20							0,26	0,19						
5.280.000	0,31	0,31	0,30	0,47			0,31	0,25						0,22		0,25	0,25	0,18	0,14				
5.290.000	0,31	0,29	0,32	0,29	0,35	0,30	0,20	0,24	0,33	0,32				0,22		0,25	0,29	0,41	0,19				
5.300.000	0,31	0,28		0,40	0,37	0,45	0,30	0,45	0,36			0,32		0,32		0,27	0,40	0,31	0,30				
5.310.000	0,19	0,30	0,22	0,34	0,39	0,33	0,21	0,32	0,33	0,39	0,27	0,37	0,50	0,34		0,43		0,38	0,32	0,26			
5.320.000	0,31	0,25	0,30	0,29	0,32	0,43	0,29		0,39	0,42	0,38		0,46	0,31	0,49	0,35	0,48	0,36	0,42				
5.330.000	0,27	0,31	0,28	0,35	0,29	0,40	0,34			0,36	0,34				0,26	0,54	0,29	0,38	0,42				
5.340.000			0,32	0,29	0,38	0,33	0,51	0,28	0,28	0,34			0,42		0,23		0,36	0,37	0,42				
5.350.000		0,30	0,32	0,31	0,29	0,25	0,53	0,42	0,27	0,32	0,31	0,43						0,42	0,40				
5.360.000		0,22	0,54		0,27	0,33	0,49	0,27	0,34		0,24	0,28	0,21	1,19	0,59		0,40	0,36	0,34				
5.370.000			0,41	0,25	0,22	0,24		0,34	0,34		0,58	0,33	0,24	0,20	0,24							0,37	
5.380.000			0,43		0,40	0,47	0,43	0,24	0,26	0,32	0,26	0,21	0,22	0,41	0,32	0,28	0,19	0,37		0,94	0,34		
5.390.000			0,43	0,45	0,46	0,19	0,34	0,26	0,38						0,31	0,37	0,21	0,26	0,25	0,24		0,16	
5.400.000					0,39	0,35			0,49	0,33		0,18				0,22	0,21	0,26		0,42	0,25		
5.410.000							0,39	0,38	0,61	0,28	0,39	0,33	0,35	0,29	0,25	0,24	0,27	0,32	0,31				
5.420.000						0,53	0,92	0,28	0,37	0,22	0,41	0,32		0,30	0,28	0,19	0,25	0,23	0,19	0,32	0,54		
5.430.000						0,53			0,29	0,28	0,18	0,25	0,23	0,24	0,21	0,23	0,25	0,22	0,26	0,25			
5.440.000												0,24	0,30		0,26	0,20	0,30	0,28	0,27	0,25			
5.450.000									0,29	0,26	0,20	0,21	0,26	0,37	0,30	0,30	0,30	0,38	0,36				
5.460.000								0,29	0,32	0,28	0,28	0,30	0,36	0,26	0,29	0,30	0,25	0,31					
5.470.000								0,40	0,24		0,32	0,26	0,29	0,30									
5.480.000								0,48	0,36	0,50			0,23	0,36	0,24	0,24	0,35	0,35					
5.490.000												0,45	0,51	0,26	0,30	0,33	0,32	0,24					
5.500.000													0,30	0,20		0,30							
5.510.000													0,29		0,30								

Datenanhang

Teil 2:
Jungferweiher

Konzentrationen in den ungesiebten Proben

Kern 1	NH₄Cl-SRP	BD	NaOH-SRP	HCl-SRP	NRP (ohne BD)	Residual	P₂O₅ [%]
Tiefe [cm]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	
0-1	n nb	342	485	113	577	124	0,38
1-2	n nb	404	482	118	606	n nb	0,37
2-3	n nb	291	498	119	558	191	0,38
3-4	n nb	402	482	121	581	n nb	0,36
4-5	n nb	321	493	146	565	n nb	0,37
5-10	n nb	231	526	125	509	n nb	0,31
10-15	n nb	205	572	122	513	n nb	0,32
15-20	n nb	217	542	133	476	n nb	0,30
20-25	n nb	178	563	138	418	95	0,32
25-30	n nb	243	583	137	450	n nb	0,28
30-35	n nb	128	636	138	327	n nb	0,30
35-40	n nb	170	559	105	314	n nb	0,26
Kern 2	NH₄Cl-SRP	BD	NaOH-SRP	HCl-SRP	NRP (ohne BD)	Residual	P₂O₅ [%]
Tiefe [cm]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	
0-1	n nb	467	355	71	417	144	0,36
1-2	n nb	328	339	80	433	161	0,31
2-3	n nb	402	320	72	458	151	0,35
3-4	n nb	458	299	83	573	167	0,33
4-5	n nb	506	276	68	450	144	0,33
5-10	n nb	485	261	74	480	152	0,31
10-15	n nb	414	303	76	505	156	0,29
15-20	n nb	293	296	66	393	148	0,26
20-25	n nb	258	360	77	406	157	0,25
25-30	n nb	204	375	75	349	144	0,24
30-35	n nb	194	372	70	322	148	0,25
35-40	n nb	102	264	26	427	131	0,19
40-45	n nb	87	187	11	329	111	0,16
45-50	n nb	76	184	7	346		0,15

Datenanhang

Teil 3:
Bodensee

Konzentrationen in den ungesiebten Proben

Tiefe [cm]	NH ₄ Cl-SRP	BD-SRP	NaOH-SRP	HCl-SRP	Summe NRP	Refraktär	P ₂ O ₅ [%]	Wassergehalt
	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]		[%]
0-0,5	105	261	565	305	155	218	0,40	81
0,5-1	70	182	193	276	90	283	0,26	77
1-2	39	275	86	218	111	217	0,25	76
2-3	9	117	220	251	99	209	0,21	77
3-4	2	73	148	389	55	249	0,17	74
4-9	3	145	79	222	129	199	0,18	72
9-14							0,19	78
14-19	4	60	119	190	63	155	0,19	74
19-24							0,16	64
24-29	2	26	62	282	84	240	0,16	57
29-32							0,14	48
32-34	2	14	40	229	53	184	0,16	57

Datenanhang

Teil 4: Gewässersedimente im Pantanal, Brasilien

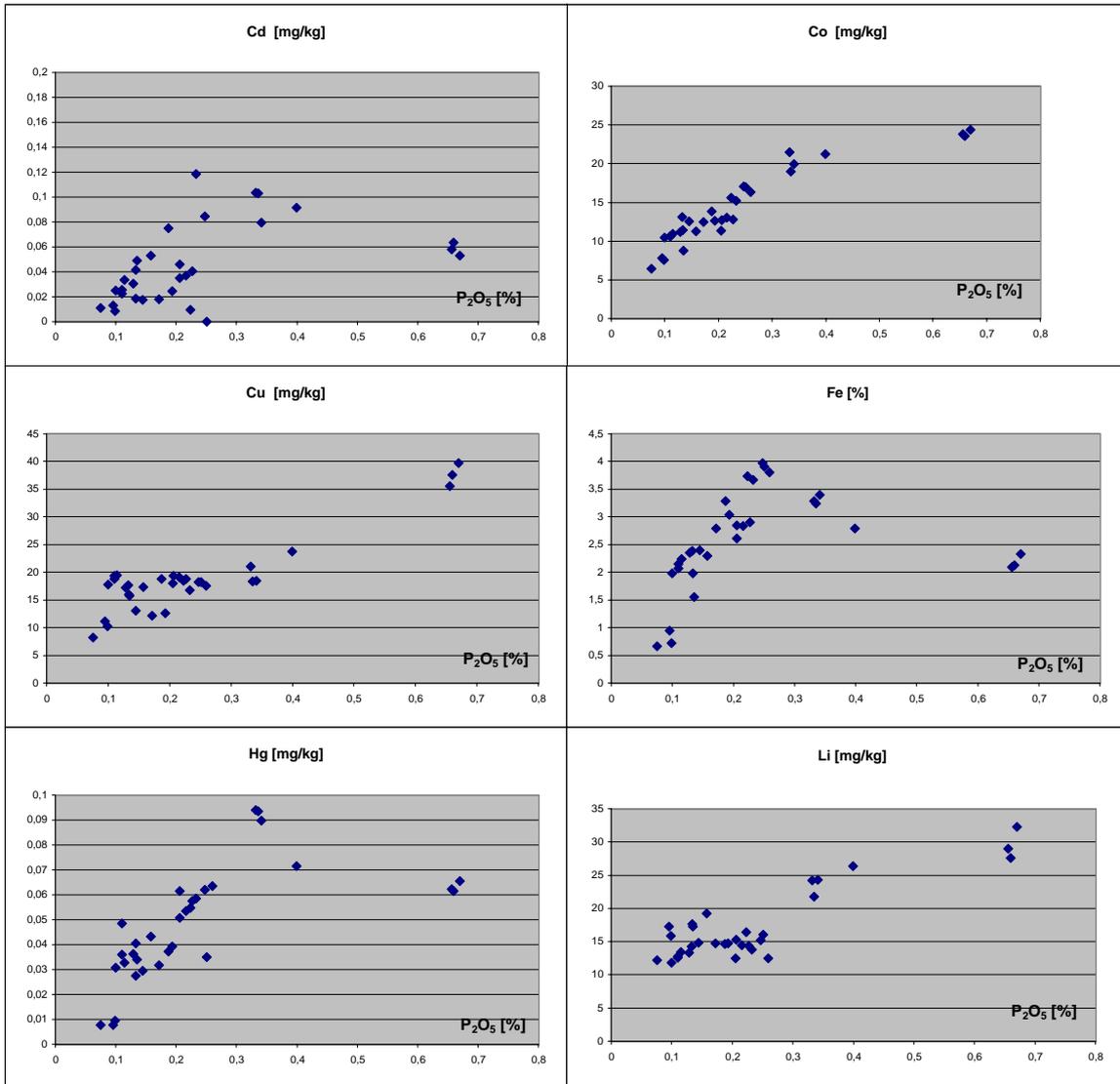
Die Konzentrationen an Cadmium, Cobalt, Kupfer, Eisen, Quecksilber, Lithium, Mangan, Nickel, Blei, Zink und Kohlenstoff in den Gewässersedimenten aus dem Pantanal wurden von Mitarbeitern des Institutes für Umwelt-Geochemie gemessen.

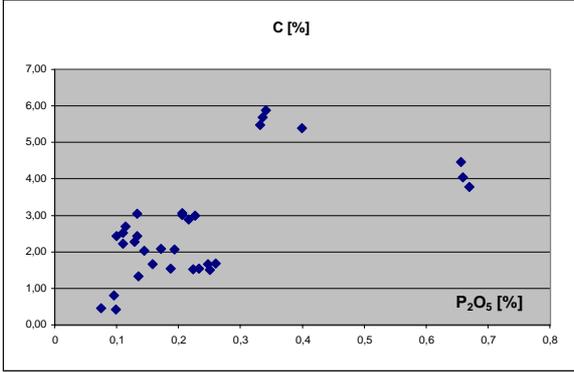
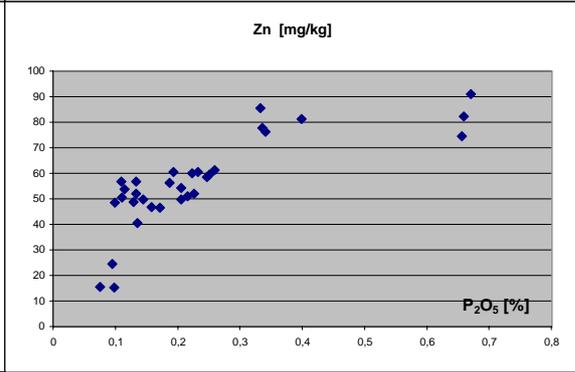
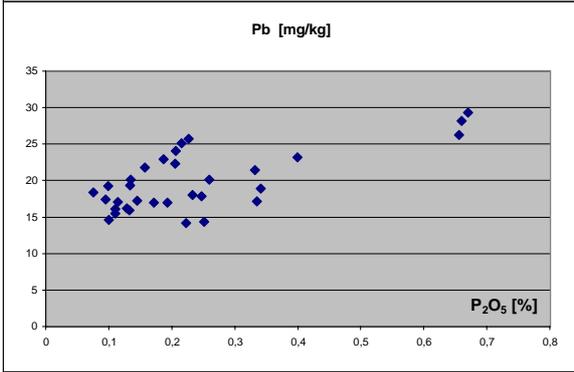
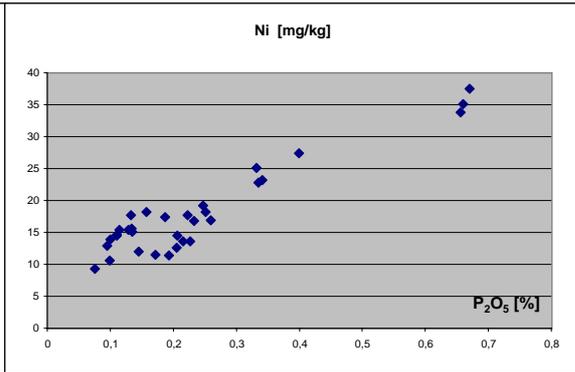
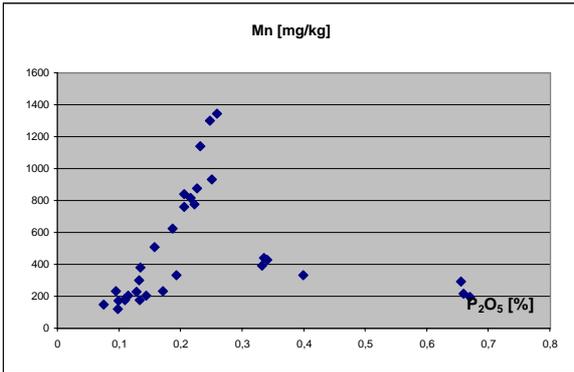
Konzentrationen in den ungesiebten Proben

Kern 1		NH₄Cl-SRP	BD-SRP	NaOH-SRP	HCl-SRP	Summe NRP	Refraktär	P₂O₅ [%]
Tiefe [cm]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	
2 nnb		193	130	9	87	219	0,15	
4 nnb		195	115	8	79	204	0,14	
6 nnb		169	113	7	53	116	0,11	
8 nnb		186	103	8	88	62	0,10	
10 nnb		123	67	10	53	48	0,07	
12 nnb		102	75	12	32	230	0,10	
14							0,06	
16 nnb		13	43	2	21	36	0,03	
21 nnb		1	10	1	8	42	0,01	
30 nnb		0	17	1	5	27	0,01	
40 nnb		5	6	1	10 nnb	nnb		
Kern 2		NH₄Cl-SRP	BD-SRP	NaOH-SRP	HCl-SRP	Summe NRP	Refraktär	P₂O₅ [%]
Tiefe [cm]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	
5 nnb		368	266	29	203	292	0,27	
10 nnb		329	257	31	141	306	0,24	
15 nnb		262	238	28	99	491	0,26	
20 nnb		129	346	21	100	358	0,22	
25 nnb		87	1403	25	391	424	0,53	
30 nnb		97	1553	16	325	355	0,54	
35 nnb		102	1521	16	293	432	0,54	
Kern 3		NH₄Cl-SRP	BD-SRP	NaOH-SRP	HCl-SRP	Summe NRP	Refraktär	P₂O₅ [%]
Tiefe [cm]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	
2 nnb		193	64	21	95	385	0,17	
4 nnb		169	65	20	73	440	0,18	
6 nnb		169	58	21	81	403	0,17	
8 nnb		192	58	19	83	252	0,14	
10 nnb		156	48	15	65	318	0,14	
12 nnb		127	42	14	72	276	0,12	
14 nnb		118	96	14	22	316	0,13	
16 nnb		136	117	13	42	159	0,11	
21 nnb		93	42	12	29	236	0,09	
30 nnb		153	48	12	25	268	0,12	
Kern 4		NH₄Cl-SRP	BD-SRP	NaOH-SRP	HCl-SRP	Summe NRP	Refraktär	P₂O₅ [%]
Tiefe [cm]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	
5 nnb		142	56	9	102	75	0,09	
10 nnb		88	44	9	85	106	0,08	
15 nnb		50	47	9	87	91	0,07	
20 nnb		71	50	9	62	75	0,06	
25 nnb		37	56	9	84	166	0,08	
30 nnb		62	46	9	64	134	0,07	
35 nnb		53	41	7	75	126	0,07	
40 nnb		54	32	6	42	147	0,06	
Kern 5		NH₄Cl-SRP	BD-SRP	NaOH-SRP	HCl-SRP	Summe NRP	Refraktär	P₂O₅ [%]
Tiefe [cm]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	
6 nnb		213	130	14	125	342	0,19	
12 nnb		208	127	15	70	333	0,17	
18 nnb		94	120	13	117	259	0,14	
24 nnb		62	109	23	88	251	0,12	
30 nnb		112	102	17	123	359	0,16	

Elementkonzentrationen in der Korngrößenfraktion < 20 µm

Probe	P ₂ O ₅	Cd	Co	Cu	Fe	Hg	Li	Mn	Ni	Pb	Zn	C
	[%]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[%]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[%]
K I (0-2 cm)	0,26	0,72	16,30	17,57	3,80	0,06	12,50	1343,47	16,91	20,08	61,33	1,67
K I (2-4 cm)	0,23	0,12	15,22	16,79	3,67	0,06	13,76	1139,51	16,82	17,98	60,45	1,54
K I (4-6 cm)	0,25	0,08	17,06	18,26	3,97	0,06	15,17	1298,21	19,16	17,88	58,42	1,66
K I (6-8 cm)	0,25	0,00	16,97	18,24	3,91	0,04	16,04	931,74	18,24	14,32	59,39	1,51
K I (8-10 cm)	0,22	0,01	15,61	18,42	3,73	0,05	16,42	774,36	17,74	14,18	60,02	1,52
K I (10-12 cm)	0,19	0,08	13,83	18,78	3,28	0,04	14,59	623,68	17,43	22,93	56,32	1,54
K I (12-14 cm)	0,16	0,05	11,27	17,37	2,30	0,04	19,25	507,22	18,20	21,80	46,73	1,67
K I (14-16 cm)	0,14	0,05	8,80	15,76	1,55	0,03	17,28	379,11	15,08	20,09	40,52	1,33
K I (16-21 cm)	0,10	0,01	7,84	11,15	0,95	0,01	17,22	231,91	12,87	17,44	24,39	0,81
K I (21-30 cm)	0,08	0,01	6,46	8,22	0,66	0,01	12,24	147,40	9,25	18,36	15,41	0,46
K I (30-40 cm)	0,10	0,01	7,58	10,26	0,73	0,01	15,89	120,49	10,61	19,27	15,21	0,41
K II (0-5 cm)	0,34	0,10	18,99	18,34	3,24	0,09	21,74	439,16	22,78	17,14	77,81	5,68
K II (5-10 cm)	0,34	0,08	19,96	18,45	3,39	0,09	24,26	429,35	23,18	18,94	76,18	5,88
K II (10-15 cm)	0,33	0,10	21,48	21,09	3,28	0,09	24,24	392,36	25,13	21,47	85,40	5,48
K II (15-20 cm)	0,40	0,09	21,20	23,69	2,79	0,07	26,35	332,70	27,42	23,19	81,14	5,40
K II (20-25 cm)	0,66	0,06	23,82	35,54	2,10	0,06	29,00	293,69	33,79	26,27	74,45	4,46
K II (25-30 cm)	0,66	0,06	23,58	37,61	2,13	0,06	27,59	216,33	35,07	28,18	82,20	4,05
K II (30-35 cm)	0,67	0,05	24,40	39,71	2,33	0,07	32,29	197,20	37,47	29,31	90,92	3,79
K III (0-5 cm)	0,21	0,04	11,32	17,96	2,61	0,06	12,44	841,21	12,64	22,34	49,83	3,07
K III (5-10 cm)	0,23	0,04	12,78	18,83	2,90	0,06	14,34	875,59	13,56	25,69	52,12	3,00
K III (10-20 cm)	0,21	0,05	12,73	19,32	2,85	0,05	15,31	758,71	14,50	24,10	54,14	3,02
K III (20-30 cm)	0,22	0,04	13,05	19,15	2,84	0,05	14,45	815,37	13,59	25,12	51,10	2,89
K IV (0-5 cm)	0,13	0,04	13,11	17,61	2,38	0,03	14,24	298,16	17,67	15,92	52,04	2,44
K IV (5-10 cm)	0,13	0,03	11,16	17,24	2,36	0,04	13,34	226,56	15,37	16,19	48,84	2,27
K IV (10-15 cm)	0,11	0,03	10,91	19,45	2,24	0,03	13,41	204,11	15,40	17,02	53,64	2,69
K IV (15-20 cm)	0,11	0,03	10,58	18,82	2,15	0,04	12,81	184,97	14,52	16,08	56,87	2,52
K IV (20-30 cm)	0,11	0,02	10,58	19,35	2,07	0,05	12,57	177,32	14,60	15,45	50,43	2,23
K IV (30-40 cm)	0,10	0,02	10,45	17,79	1,98	0,03	11,85	170,40	13,87	14,65	48,43	2,44
K V (0-5 cm)	0,19	0,02	12,66	12,61	3,04	0,04	14,74	333,67	11,42	16,97	60,39	2,06
K V (5-10 cm)	0,17	0,02	12,46	12,17	2,80	0,03	14,71	232,44	11,49	16,96	46,51	2,08
K V (10-20 cm)	0,14	0,02	12,53	13,05	2,40	0,03	14,80	202,37	11,99	17,21	49,85	2,03
K V (20-30 cm)	0,13	0,02	11,39	15,98	1,98	0,04	17,64	175,69	15,64	19,35	56,79	3,05





Datenanhang

Teil 5:
Seesedimente in Peking

Die Werte für Phosphor in den Extrakten beziehen sich auf das Frischgewicht

	NH₄Cl-SRP	BD-SRP	NaOH-SRP	HCl-SRP	Summe NRP	P₂O₅
	P [mg/kg] WW	P [mg/kg] WW	P [mg/kg] WW	P [mg/kg] WW	P [mg/kg] WW	[%] DW
Kunming 1 (0-5 cm)	1	5	12	85	17	0,08
Yuyuantan 1 (0-5 cm)	1	8	42	128	41	0,16
Yuyuantan 3 (0-5 cm)						0,30
Beihai1 (0-5 cm)	1	11	26	342	41	0,29
Beihai 2 (0-5 cm)	1	6	28	379	52	0,28
Beihai 3 (13-17 cm)	1	6	26	450	33	0,31
Beihai 3 (20-23 cm)	4	15	35	876	34	0,46
Shui Zhui (0-1cm)	2	10	53	224	29	0,20
Shui Zhui (2-3 cm)	2	12	48	216	24	0,17
Shui Zhui (6-7 cm)	1	10	46	248	14	0,21
Shui Zhui (8-9cm)	1	11	59	295	21	0,21
Shui Zhui (11-12 cm)	1	5	88	341	14	0,28

Datenanhang

Teil 6: Gewässersedimente in Rußland

Die Konzentrationen an Blei, Cadmium, Quecksilber, Zink, Kupfer, Nickel, Chrom, Eisen, Mangan, Arsen, Lithium, Silber und Cobalt in den ungesiebten Proben und in der Fraktion $< 20 \mu\text{m}$ wurden von Mitarbeitern des Institutes für Umwelt-Geochemie bestimmt.

Kljasma Städte	Encarta 1999	Grosser Atlas der Welt (1994)	Knaurs Großer Weltatlas 1998	Haak 87	Meyers Grosser Weltatlas 1985 * /sonstige
Pushkino	Pushkino		Pushkino	Puschkino	
Mytischtschi	Mytischtschi	Mytišči	Mytishchi	Mytischtschi	Mytishi
Shchëlkovo	Shchëlkovo	Ščelkovo	Shchelkovo		Schelkovo
Frjasino	Frjasino			Frjasino	Fryazino
Losino-Petrowskij	Losino-Petrowskij				Losino-Petrovskiy
Noginsk	Noginsk	Noginsk	Noginsk	Noginsk	
Elektrostal´	Elektrostal´	Elektrostal´	Elektrostal´	Elektrostal	
Pawlowskij Posad	Pawlowskij Posad		Pavlovskiy Posad		
Orechowo Sujewo	Orechowo Sujewo	Orehovo-Zuevo	Orehovo-Zuyevo	Orechowo Sujewo	Orechowo Sujewo*, Orekhovo- Zuevo
Wladimir	Wladimir	Vladimir	Vladimir	Wladimir	Wladimir*
Alexandrow	Alexandrow		Alexandrow		Aleksandrov
Susdal	Susdal	Suzdal´	Suzdal	Susdal	
Orgtrud*	Orgtrud		Orgtrud	Orgtrud	
Gorbatow	Gorbatow		Gorbatov	Gorbatow	
Kljasma Flüsse					
Ucha					
Utschinsker Reservoir	Utschinsker Reservoir				Uchinskoe Reservoir
Worja	Worja				Vorya
Shalovka					
Sherna	Sherna			Scherna	
Plotnya					
Drezna	Drezna				
Vyrka					
Bol. Dubna					
Kirzhach					
Vol´ga					
Sen´ga					
Bol. Lipnya					
Peksha		Pekša		Pekscha	
Bol. Ushma					
Polya		Polja			
Vorsha					
Koloksha					
Rpen					
Nerl		Nerl´		Nerl	
Kljasma	Kljasma	Klja´zma	Klyaz´ma	Kljasma	Klyazma
Oka/Moskwa Städte+Flüsse					
Orjol	Orjol	Orel	Orël		
Serpuchow	Serpuchow	Serpuhov	Serpukhov	Serpuchow	Serpuchow*, Serpuchov
Pushchino	Pushchino	Puščino			Puschino
Prioksko Terrasny State Nature Reserve					
Kolomna	Kolomna	Kolomna	Kolomna		Kolomna*
Moskau	Moskau	Moskva	Moskva		Moscou Moskwa
Tula	Tula	Tula	Tula		Tula*
Oka	Oka	Oka	Oka		Oka*
Moskwa	Moskwa	Moskva	Moskva		

Wolga Stausee	Encarta 1999	Grosser Atlas der Welt (1994)	Knaurs Großer Weltatlas 1998	Haak 87	Meyers Großer Weltatlas 1985 * /sonstige
Ivankowo Stausee	Iwankowoer Stausee				Ivankovo Stausee
Uglich	Uglich				Uglitsch Stausee
Rybinsk Stausee	Rybinsker Stausee		Rybinskoe Vdkhr	Rybinskoje Wdchr	Rybinsker St.*
Nishnij Novgorod Stausee	Gorkowskoje Osero	.	Gorkovskoye Vdkhr.	Gorkowskoje Wdchr	Gorkier St*/ Gorky-R. Gorki Reservoir Nizhni Novgorod St
Tscheboksary Stausee			Cheboksarskoye Vdkhr		
Samara Stausee	Samaraer Stausee	Kujbyševskoe Vdchr.	Kuybysh'evskoye Vdkhr	Kuibyschewskoye Wdchr	Kuibyschewer St.*/ Dam Kujbyshew
Saratow Stausee	Saratower Stausee		Saratovskoye Vdkhr.	Saratowskoje Wdchr	
Wolgograd Stausee	Wolgograder Stausee	Wolgogradskoe Vdchr.	Wolgogradskoye Vdkhr	Wolgogradskoye Wdchr	
Wolga Flüsse					
Wetluga	Wetluga	Vetluga	Vetluga	Wetluga	
Sura		Sura	Sura	Sura	
Kokshaga		Kokšaga	Kokshaga	Kokschaga	
Ilet		Ilet'	Ilet	Ilet	
Kazanka		Kazanka	Kazanka		
Swijaga	Swijaga	Svijaga	Sviyaga	Swijaga	
Kama	Kama	Kama	Kama		
Tereshka	Tereshka	Tereška	Tereshka	Tereschka	
Wolga Städte					
Nishnij Nowgorod	Nishnij Nowgorod	Nižnij Novgorod	Nizhniy Novgorod	Gorki	Gorki*, **
Tscheboksary	Tscheboksary	Čeboksary	Cheboksary	Tscheboksary	Tscheboxari*
Butyakova					
Lopatinski					
Wolshsk	Wolshsk	Volžsk	Volzhsk	Wolshsk	Wolschsk*/ Volzsk
Kasan	Kasan	Kazan	Kazan'	Kasan	Kasan*
Uljanowsk	Simbirsk (alt)	Simbirsk	Ul'yanowsk	Uljanowsk	
Togliatti	Togliatti	Tol'jatti	Tol'yatti	Togliatti	Toljatti'/Stawropol Togliattigrad Toljatti
Samara	Samara	Samara	Samara	Kuibyschew	Kuibyschew*
Balakowo	Balakowo	Balakovo	Balakovo	Balakowo	Balakowo*
Marks	Marks	Marks		Marx	
Saratow	Saratow	Saratov		Saratow	Saratow*
Kamyschin	Kamyschin	Kamyšin	Kamyshin	Kamyschin	
Wolgograd	Wolgograd	Zarizyn	Wolgograd	Wolgograd	Wolgograd*/ Stalingrad, Tsaritsyn .Wolgograd, Zarizyn

Vdkhr: Vodokhranilishche

St.: Stausee

**Gor'kiy, Gorkey, Gorki, Gorkii, Gorky, Nižnij Nowgorod, Nijni Novgorod, Nijni-Novgorod, Nijnii Novgorod, Nishni-Nowgorod, Nishnii Nowgorod, Nizhni Novgorod, Nizhnii Novgorod, Nizhniy Novgorod, Nishnij Novgorod

	NH ₄ Cl-SRP	BD-SRP	NaOH-SRP	HCl-SRP	Summe NRP	Refraktär	P ₂ O ₅ [%]	P ₂ O ₅ [%]
Probe	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	ungesiebt	< 20 µm
Volga und Nebenflüsse								
W02	1	590	441	214	670			0,60
Oka W11	5	84	85	41	110	nb		0,80
Volga 01	2	29	26	19	7	23	0,02	0,56
Sura 5	1	121	22	339	9	<0	0,09	0,37
Sura 4							0,21	0,42
Sura 3							0,13	0,39
Sura 2							0,11	0,43
Sura 1	4	112	15	83	23	238	0,11	0,44
Vetluga 2	0	1297	259	95	103	<0	0,38	0,50
Vetluga 1	1	1318	228	167	157	363	0,51	0,54
Volga 02	0	525	174	83	62	nb	0,37	0,72
W23	15	358	847	179	1060	nb		0,69
Volga 03	0	93	79	116	65	143	0,11	0,35
Volga 04	3	202	157	207	33	152	0,17	0,29
Kokshaga 1	1	328	44	86	33	15	0,12	0,75
Volga 05	1	115	34	73	268	<0	0,06	0,35
Volga 06	2	984	108	111	29	545	0,41	0,84
Illet 1	0	75	21	43	22	54	0,05	0,38
Lopatinski 1 - Seekanal	1	112	30	94	35	47	0,07	0,39
Lopatinski 2	0	391	150	151	151	6	0,19	0,30
Volga 07	4	27	7	22	12	68	0,03	0,43
Volga 08	2	60	11	32	15	136	0,06	0,59
Volga 09	5	494	131	203	145	103	0,25	0,32
Sviyaga 1	3	250	90	193	51	381	0,22	0,26
Sviyaga 2							0,23	0,29
Sviyaga 3							0,36	0,34
Volga 10	3	735	166	160	173	93	0,30	0,55
Kazanka 1							0,11	0,38
Kazanka 2							0,06	0,34
Kazan 1							0,40	0,55
Volga 11	5	316	547	1998	11	<<0	0,33	0,43
Volga 12	2	709	135	157	81	19	0,25	0,56
Volga 13							0,10	0,26
Volga 14	2	654	152	145	166	70	0,27	0,36
Kama 2	0	218	155	129	113	321	0,21	0,25
Kama 1	1	302	134	199	57	122	0,19	0,26
Kama 3	1	298	102	175	104	233	0,21	0,25
Kama 4	1	65	33	99	34	164	0,09	0,27
Volga 15							0,19	0,23
Volga 16	4	392	118	285	51	186	0,24	0,33
Volga 17	0	61	37	134	25	82	0,08	0,29
Volga 18	0	372	250	216	78	254	0,27	0,29
Volga 19	4	725	172	141	88	291	0,33	0,34
Volga 20	1	420	199	126	110	360	0,28	0,30
Volga 21	1	259	127	186	94	292	0,22	0,25
Volga 22	1	166	69	96	80	142	0,13	0,28
Volga 23	1	209	96	99	112	165	0,16	0,30
Volga 24							0,24	0,32
Volga 25							0,14	0,37
Volga 26	1	250	116	133	110	269	0,20	0,27
Volga 27	0	20	21	89	17	60	0,05	0,40
Volga 28	5	68	41	277	58	4	0,10	0,40
Volga 29							0,35	0,42
WG1	0	170	271	215	35	365	0,25	0,30
WG2							0,29	0,26
WG3							0,13	0,26

Probe	NH ₄ Cl-SRP	BD-SRP	NaOH-SRP	HCl-SRP	Summe NRP	Refraktär	P ₂ O ₅ [%]	P ₂ O ₅ [%]
	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	ungesiebt	< 20 µm
WG4	1	100	53	270	28	201	0,16	0,26
WG5	0	289	235	172	80	317	0,30	0,33
WG6							0,25	0,27
WG7	0	281	200	203	86	398	0,29	0,28
WG8							0,28	0,31
WG9							0,30	0,32
WG10							0,27	0,28
WG11	0	202	141	168	96	331	0,24	0,27
WG12							0,18	0,37
WG13	3	263	124	165	13	221	0,21	0,38
WG14							0,14	0,33
WG15							0,14	0,28
Tereschka	3	270	93	175	97	501	0,25	0,28
WG17							0,23	0,27
WG18							0,17	0,27
WG19							0,13	0,32
WG20	0	171	93	223	65	377	0,23	0,26
WG26							0,15	0,25
WG21							0,23	0,39
WG25							0,27	0,32
WG22							0,33	0,44
WG23							0,39	0,48
WG24	3	271	502	215	74	200	0,34	0,62
WG27							0,22	0,33
WG28							0,22	0,34
WG29							0,26	0,30
WG30							0,16	0,27
WG31	3	188	55	346	18	311	0,21	0,25
WG32							0,24	0,28
WG33							0,23	0,24
WG34	5	95	41	276	19	388	0,19	0,24
WG35							0,20	0,29
WG50	2	275	151	311	147	383	0,30	0,32
WG36							0,37	0,33
WG37							0,27	0,29
WG38	7	201	48	325	38	359	0,24	0,27
WG39							0,26	0,29
WG40							0,28	0,29
WG41							0,15	0,35
WG42	3	436	136	190	121	391	0,32	0,33
WG43							0,33	0,38
WG44							0,35	0,36
WG45	2	206	70	172	53	293	0,26	0,30
WG46							0,22	0,26
WG47							0,30	0,29
WG48	8	234	459	262	103	505	0,41	0,37
WG49							0,29	0,29

Probe	NH ₄ Cl-SRP	BD-SRP	NaOH-SRP	HCl-SRP	Summe NRP	Refraktär	P ₂ O ₅ [%]	P ₂ O ₅ [%]
	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	ungesiebt	< 20 µm
Klyazma								
OK 1	49	3925	6070	907	767	1727	3,08	2,60
OK 2								3,20
OK 3								2,68
OK 4	27	3253	4374	460	675	0	1,95	2,91
OK 5								3,52
OK 6								0,93
OK 7	2	1305	1391	110	1	199	0,69	0,72
OK 8								2,68
OK 9								3,14
OK 10	3	1310	557	104	0	1179	0,72	0,97
OK 11								2,24
OK 12								3,59
OK 13	11	1887	892	124	123	0	0,64	1,89
OK 14								1,32
OK 15								2,95
OK 16	8	765	1198	141	13	317	0,56	3,85
OK 17								2,81
OK 18								2,41
OK 19								0,95
OK 20								1,84
OK 21								1,93
OK 22								1,50
OK 23	21	2835	3435	288	257	281	1,63	3,30
OK 24								3,40
OK 25								2,32
OK 26								1,86
OK 27	6	775	312	31	69	5	0,27	1,54
OK 28								2,55
OK 29								1,59
OK 30	8	1947	737	54	91	76	0,67	1,89
OK 31								1,94
OK 32								3,22
OK 33								0,41
OK 34	0	396	252	30	77	0	0,16	0,64
OK 35								2,90
OK 36								0,86
OK 37	16	3028	1049	90	322	449	1,14	1,17
OK 38								1,87
OK 39								1,52
OK 40								0,84
OK 41								0,67
OK 42								0,65
OK 43								0,87
OK 44								0,13
OK 45	3	638	184	38	52	224	0,26	1,16
OK 46								1,41
OK 47								0,49
OK 48								1,35
OK 49	1	291	97	109	14	57	0,13	0,70
OK 50								0,62
OK 51								0,62
OK 52								1,00
OK 53								1,03
OK 54								1,25
OK 55								1,21
OK 56								0,76

Moskwa

Probe	NH ₄ Cl-SRP	BD-SRP	NaOH-SRP	HCl-SRP	Summe NRP	Refraktär	P ₂ O ₅ [%]	P ₂ O ₅ [%]
	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	P [mg/kg]	ungesiebt	< 20 µm
M53	8	177	290	209	115	259	0,24	0,42
M50	53	968	2278	2505	169	539	1,49	2,29
M51	38	791	2690	2923	164	42	1,52	2,37
M55	17	334	1265	658	280	359	0,67	0,82
Oka Terrasny State Nature Reserve								
OK 4 St	2	47	123	14	214	159	0,13	0,28
OK 5 W	3	23	72	4	222	84	0,09	0,22
OK 6 Q								0,33
OK 1/1	1	29	118	8	389		0,10	
OK 1/2	1	29	132	10	447		0,14	
OK 1/3	1	41	177	11	684		0,17	
OK 1/4	1	27	139	9	459	8	0,15	
OK 3/1	38	116	142	14	440	157	0,21	
OK 2/11								0,24
OK 2/10								0,20
OK 2/9								0,23
OK 2/8								0,21
OK 2/7								0,22
OK 2/6								0,21
OK 2/5								0,26
OK 2/4								0,21
OK 2/3	2	62	315	14	646	116	0,26	0,21
OK 2/2								0,20
OK 2/1								0,20

Pb, Cd Hg, Zn, Cu, Ni, Cr, Fe, Mn, As, Li, Ag und Co wurden von Mitarbeitern des Institutes für Umwelt-Geochemie bestimmt.

Name	P ₂ O ₅	P ₂ O ₅	Pb	Pb	Cd	Cd	Hg	Hg	Zn	Zn	Cu	Cu	Ni	Ni
	[%]	[%]	mg/kg											
	<20	total	<20	total	<20	total	<20	total	<20	total	<20	total	<20	total
Volga und Nebenflüsse														
W02	0,60		37,3		0,59		0,14		159		49		69	
Oka W11	0,80		21,3		0,77		0,15		94		41		43	
Volga 01	0,56	0,02	13,5	5,9	0,60	0,02	0,55	0,00	140	0	31	0	56	2
Sura 5	0,37	0,09	10,4	2,7	0,44	0,05	0,10	0,00	104	14	28	3	49	10
Sura 4	0,42	0,21	11,6	7,2	0,37	0,12	0,13	0,02	115	26	27	7	49	14
Sura 3	0,39	0,13	10,1	5,3	0,37	0,10	0,15	0,01	91	23	25	7	41	13
Sura 2	0,43	0,11	9,6	4,7	0,42	0,07	0,13	0,00	92	17	26	4	47	7
Sura 1	0,44	0,11	32,2	4,2	0,34	0,05	0,09	0,00	95	11	27	3	44	7
Vetluga 2	0,50	0,38	13,2	16,1	0,24	0,10	0,15	0,10	113	105	33	32	62	53
Vetluga 1	0,54	0,51	14,4	15,3	0,36	0,16	0,18	0,10	132	104	33	28	55	40
Volga 02	0,72	0,37	15,4	5,7	0,33	0,07	0,19	0,02	125	26	26	6	46	11
W23	0,69		25,3		0,58		0,12		100		34		56	
Volga 03	0,35	0,11	19,7	10,4	0,35	0,15	0,17	0,04	117	43	29	9	59	20
Volga 04	0,29	0,17	13,2	15,7	0,32	0,17	0,08	0,02	94	45	35	16	78	53
Kokshaga 1	0,75	0,12	16,4	13,3	0,50	0,09	0,08	0,01	134	22	29	6	55	10
Volga 05	0,35	0,06	15,1	1,7	0,31	0,07	0,17	0,01	129	14	37	3	63	10
Volga 06	0,84	0,41	55,6	37,2	0,83	0,36	0,29	0,14	253	168	50	64	57	42
Illet 1	0,38	0,05	13,4	4,3	0,24	0,04	0,15	0,00	118	10	30	4	62	7
Lopatinski 1 - Seekanal	0,39	0,07	19,1	1,5	0,47	0,06	0,11	0,07	131	21	36	4	61	10
Lopatinski 2	0,30	0,19	17,6	12,1	0,84	0,51	0,19	0,09	162	100	54	35	51	32
Volga 07	0,43	0,03	15,7	4,5	0,38	0,02	0,87	0,00	129	8	31	1	62	4
Volga 08	0,59	0,06	13,1	1,9	0,60	0,06	0,16	0,01	126	17	34	5	57	8
Volga 09	0,32	0,25	13,4	23,3	0,47	0,15	0,83	0,06	112	85	33	24	56	45
Sviyaga 1	0,26	0,22	13,9	14,5	0,19	0,07	0,04	0,02	85	67	33	24	54	44
Sviyaga 2	0,29	0,23	9,0	14,2	0,28	0,04	0,09	0,03	86	68	28	24	52	43
Sviyaga 3	0,34	0,36	11,3	18,0	0,31	0,06	0,08	0,05	88	81	31	31	52	51
Volga 10	0,55	0,30	15,9	12,1	0,48	0,32	0,39	0,07	152	97	37	24	50	38
Kazanka 1	0,38	0,11	26,7	26,9	1,00	0,29	0,64	0,15	134	52	48	16	64	19
Kazanka 2	0,34	0,06	19,0	4,7	1,09	0,08	0,17	0,00	95	14	40	6	46	9
Kazan 1	0,55	0,40	33,4	34,8	0,91	0,15	0,26	0,20	150	123	47	43	61	51
Volga 11	0,43	0,33	17,9	4,4	4,60	0,49	0,30	0,04	173	42	100	17	71	15
Volga 12	0,56	0,25	13,8	8,6	1,11	0,37	0,18	0,08	139	76	36	24	57	33
Volga 13	0,26	0,10	7,8	4,3	0,30	0,08	0,13	0,01	62	29	27	8	44	22
Volga 14	0,36	0,27	15,0	5,5	0,43	0,18	0,06	0,07	99	86	34	27	54	47
Kama 2	0,25	0,21	12,0	15,0	0,37	0,04	0,09	0,05	85	82	45	43	87	85
Kama 1	0,26	0,19	9,6	14,7	0,37	0,09	0,17	0,04	93	63	44	29	77	55
Kama 3	0,25	0,21	11,0	16,6	0,45	0,06	0,10	0,05	86	78	38	36	71	64
Kama 4	0,27	0,09	14,0	7,5	0,55	0,08	0,15	0,03	91	22	42	11	81	23
Volga 15	0,23	0,19	14,8	4,1	0,20	0,11	0,06	0,06	85	73	34	27	56	48
Volga 16	0,33	0,24	13,0	6,8	0,26	0,07	0,07	0,04	98	72	38	27	69	67
Volga 17	0,29	0,08	15,4	0,0	0,30	0,07	0,16	0,01	111	30	38	8	89	25
Volga 18	0,29	0,27	22,6	17,0	4,39	4,61	0,21	0,21	160	174	92	101	44	50
Volga 19	0,34	0,33	19,0	16,3	0,11	0,10	1,51	0,08	136	126	48	44	71	69
Volga 20	0,30	0,28	17,9	18,3	0,16	0,07	0,16	0,09	131	124	44	43	71	66
Volga 21	0,25	0,22	25,8	13,6	0,64	0,14	0,10	0,09	122	103	52	42	70	66
Volga 22	0,28	0,13	31,0	12,1	0,72	0,49	0,13	0,09	148	106	57	33	71	32
Volga 23	0,30	0,16	24,9	12,3	0,80	0,36	0,21	0,10	159	87	54	30	73	41
Volga 24	0,32	0,24	24,7	7,5	0,65	0,25	0,10	0,07	136	80	48	29	74	49
Volga 25	0,37	0,14	34,9	21,7	0,59	0,24	0,11	0,03	128	50	45	15	75	31
Volga 26	0,27	0,20	21,6	14,1	0,59	0,23	0,18	0,20	153	104	49	35	67	57
Volga 27	0,40	0,05	99,5	4,4	0,92	0,07	0,37	0,03	377	33	106	7	82	13
Volga 28	0,40	0,10	26,1	23,6	0,92	0,09	0,10	0,01	122	26	45	7	87	28

Name	P ₂ O ₅	P ₂ O ₅	Pb	Pb	Cd	Cd	Hg	Hg	Zn	Zn	Cu	Cu	Ni	Ni
	[%]	[%]	mg/kg											
	<20	total	<20	total	<20	total	<20	total	<20	total	<20	total	<20	total
Volga 29	0,42	0,35	55,2	66,3	1,22	0,35	0,59	0,10	186	165	66	67	93	74
WG1	0,30	0,25	12,9	7,6	0,33	0,09	0,09	0,04	113	77	40	27	39	28
WG2	0,26	0,29	11,4	7,7	0,15	0,07	0,10	0,02	106	80	37	31	39	35
WG3	0,26	0,13	6,4	5,3	0,19	0,03	0,06	0,02	77	29	35	14	45	22
WG4	0,26	0,16	13,2	8,1	0,16	0,03	0,08	0,00	90	38	39	19	55	35
WG5	0,33	0,30	10,9	22,9	0,39	0,31	0,14	0,03	148	86	46	35	41	43
WG6	0,27	0,25	17,4	20,7	0,35	0,29	0,08	0,04	120	95	43	37	48	50
WG7	0,28	0,29	16,3	18,0	0,25	0,29	0,08	0,04	119	93	43	36	49	42
WG8	0,31	0,28	18,5	18,4	0,28	0,24	0,06	0,06	114	92	43	35	51	45
WG9	0,32	0,30	18,7	19,3	0,98	0,29	0,05	0,04	117	93	43	35	116	43
WG10	0,28	0,27	18,2	19,8	0,27	0,25	0,06	0,05	126	92	43	36	54	47
WG11	0,27	0,24	20,6	21,2	0,32	0,29	0,09	0,07	116	89	41	36	50	47
WG12	0,37	0,18	15,2	7,0	0,17	0,12	0,07	0,01	73	48	42	21	53	30
WG13	0,38	0,21	11,3	5,0	0,16	0,07	0,06	0,01	66	47	34	15	57	32
WG14	0,33	0,14	19,3	6,8	0,29	0,09	0,07	0,01	75	31	37	16	58	27
WG15	0,28	0,14	14,2	4,0	0,25	0,09	0,07	0,03	71	51	36	16	55	34
Tereschka	0,28	0,25	9,6	15,6	0,20	0,30	0,03	0,02	49	71	23	24	29	35
WG17	0,27	0,23	13,1	10,1	0,21	0,21	0,03	0,03	49	64	27	23	35	35
WG18	0,27	0,17	16,1	5,9	0,28	0,18	0,05	0,03	65	55	32	19	39	36
WG19	0,32	0,13	15,3	3,9	0,28	0,11	0,08	0,02	72	43	36	14	50	33
WG20	0,26	0,23	14,6	22,8	0,22	0,24	0,04	0,03	71	88	34	33	42	48
WG26	0,25	0,15	10,4	5,4	0,15	0,10	0,08	0,02	87	46	34	12	57	29
WG21	0,39	0,23	59,4	52,4	0,51	0,95	0,23	0,24	224	242	60	42	48	33
WG25	0,32	0,27	20,8	22,3	0,33	0,37	0,07	0,05	109	111	43	39	56	59
WG22	0,44	0,33	96,2	102,2	2,68	1,99	0,30	0,38	225	255	104	141	44	38
WG23	0,48	0,39	108,1	92,8	9,60	8,81	0,34	0,27	318	255	106	97	56	54
WG24	0,62	0,34	58,6	32,7	6,17	2,38	0,65	0,42	171	88	140	81	71	54
WG27	0,33	0,22	26,1	6,6	0,92	0,23	0,15	0,01	113	42	42	7	40	9
WG28	0,34	0,22	27,5	9,7	0,62	0,24	0,11	0,02	105	50	44	12	32	15
WG29	0,30	0,26	4,8	8,8	0,19	0,17	0,02	0,05	64	61	20	15	26	24
WG30	0,27	0,16	15,2	9,6	0,26	0,09	0,03	0,01	77	44	34	17	46	33
WG31	0,25	0,21	10,8	10,6	0,12	0,08	0,02	0,02	73	77	32	29	39	46
WG32	0,28	0,24	10,9	9,7	0,13	0,04	0,02	0,02	65	55	16	12	19	21
WG33	0,24	0,23	9,8	16,0	0,18	0,17	0,03	0,02	73	71	31	29	38	46
WG34	0,24	0,19	10,1	16,8	0,31	0,05	0,03	0,00	90	71	40	31	60	47
WG35	0,29	0,20	10,3	14,8	0,13	0,09	0,05	0,02	71	56	33	18	41	33
WG50	0,32	0,30	53,6	62,5	0,59	0,99	0,18	0,16	174	183	54	52	36	35
WG36	0,33	0,37	18,5	25,7	0,26	0,37	0,09	0,05	104	111	36	31	37	38
WG37	0,29	0,27	12,9	9,0	0,07	0,06	0,11	0,05	81	87	39	29	43	36
WG38	0,27	0,24	11,9	9,8	0,07	0,15	0,06	0,02	80	83	38	32	45	43
WG39	0,29	0,26	11,0	8,9	0,11	0,13	0,08	0,03	78	75	41	28	46	41
WG40	0,29	0,28	20,1	25,1	0,13	0,06	0,14	0,08	113	84	49	33	46	41
WG41	0,35	0,15	10,9	3,3	0,19	0,03	0,06	0,02	88	44	33	11	45	17
WG42	0,33	0,32	15,7	18,9	0,36	0,35	0,08	0,04	99	72	42	29	51	44
WG43	0,38	0,33	15,2	19,2	0,35	0,41	0,09	0,04	93	87	41	32	51	47
WG44	0,36	0,35	18,1	23,0	0,43	0,61	0,08	0,08	116	103	72	39	55	62
WG45	0,30	0,26	21,3	19,3	0,36	0,54	0,07	0,05	126	79	46	32	60	53
WG46	0,26	0,22	18,1	18,9	0,41	0,52	0,07	0,05	111	72	48	30	58	47
WG47	0,29	0,30	17,1	25,8	0,37	0,67	0,08	0,06	107	109	47	46	54	71
WG48	0,37	0,41	15,9	22,0	0,31	0,51	0,05	0,04	104	101	43	42	54	62
WG49	0,29	0,29	15,4	9,0	0,15	0,26	0,07	0,02	95	88	43	38	51	51
Kljasma														
OK 1	2,60	3,08	199,7		50,47		1,79		2685					
OK 2	3,20		191,0		58,40		1,59		2760					
OK 3	2,68		137,1		40,12		1,34		1635					

Name	P ₂ O ₅	P ₂ O ₅	Pb	Pb	Cd	Cd	Hg	Hg	Zn	Zn	Cu	Cu	Ni	Ni
	[%]	[%]	mg/kg											
	<20	total	<20	total	<20	total	<20	total	<20	total	<20	total	<20	total
OK 4	2,91	1,95	130,1		29,86		1,52		1689					
OK 5	3,52		176,6		14,30		1,45		1174					
OK 6	0,93		37,4		1,40		0,46		249					
OK 7	0,72	0,69	68,1		1,89		2,65		549					
OK 8	2,68		98,1		15,33		2,08		1064					
OK 9	3,14		69,0		9,28		1,74		840					
OK 10	0,97	0,72	74,4		1,10		0,92		242					
OK 11	2,24		53,4		7,78		1,13		1004					
OK 12	3,59		50,7		6,15		1,30		533					
OK 13	1,89	0,64	44,5		3,90		1,04		437					
OK 14	1,32		38,8		1,55		0,68		293					
OK 15	2,95		53,8		4,05		1,27		467					
OK 16	3,85	0,56	323,8		9,06		1,52		840					
OK 17	2,81		45,8		6,14		1,07		462					
OK 18	2,41		28,8		0,70		0,97		233					
OK 19	0,95		42,9		1,00		0,98		219					
OK 20	1,84		22,2		0,00		0,38		171					
OK 21	1,93		24,9		0,55		0,38		166					
OK 22	1,50		25,5		0,55		0,70		213					
OK 23	3,30	1,63	132,9		46,35		1,77		882					
OK 24	3,40		58,1		6,55		1,03		386					
OK 25	2,32		53,8		5,30		1,03		361					
OK 26	1,86		57,1		4,94		0,84		331					
OK 27	1,54	0,27	113,2		2,30		1,14		376					
OK 28	2,55		38,1		3,30		1,88		320					
OK 29	1,59		37,8		2,60		1,31		268					
OK 30	1,89	0,67	41,4		3,60		0,82		316					
OK 31	1,94		45,1		4,60		1,00		361					
OK 32	3,22		57,6		13,19		1,01		400					
OK 33	0,41		18,6		0,15		0,53		193					
OK 34	0,64	0,16	28,2		1,05		0,88		226					
OK 35	2,90		40,4		5,00		1,05		375					
OK 36	0,86		28,9		2,30		0,48		252					
OK 37	1,17	1,14	27,4		1,57		0,99		225					
OK 38	1,87		17,7		1,45		0,47		292					
OK 39	1,52		25,7		1,55		0,15		425					
OK 40	0,84		20,2		0,55		0,40		156					
OK 41	0,67		16,5		0,40		0,36		153					
OK 42	0,65		18,5		0,40		0,13		154					
OK 43	0,87		15,0		0,15		0,29		235					
OK 44	0,13		15,4		0,15		0,14		117					
OK 45	1,16	0,26	25,6		2,10		1,12		271					
OK 46	1,41		26,2		2,00		0,45		255					
OK 47	0,49		12,1		0,00		0,31		137					
OK 48	1,35		65,5		0,50		0,27		454					
OK 49	0,70	0,13	20,6		0,85		0,69		231					
OK 50	0,62		45,4		0,90		0,76		656					
OK 51	0,62		284,5		0,55		0,28		300					
OK 52	1,00		57,9		3,40		0,72		370					
OK 53	1,03		105,9		2,30		0,63		497					
OK 54	1,25		40,6		1,35		0,52		312					
OK 55	1,21		94,2		3,30		0,81		578					
OK 56	0,76		111,6		1,45		0,31		668					
Moskwa/Oka														
M53	0,42	0,24	27,3		1,22		0,22		158		42		42	

Name	P ₂ O ₅	P ₂ O ₅	Pb	Pb	Cd	Cd	Hg	Hg	Zn	Zn	Cu	Cu	Ni	Ni
	[%]	[%]	mg/kg											
	<20	total	<20	total	<20	total	<20	total	<20	total	<20	total	<20	total
M50	2,29	1,49	81,2		3,40		0,53		461		108		59	
M51	2,37	1,52	71,5		2,82		0,71		431		98		57	
M55	0,82	0,67	38,1		1,52		0,18		216		56		42	
Oka Terrasny State Nature Reserve														
OK 4 St	0,28	0,13	21,2		0,29		0,30		103		25		33	
OK 5 W	0,22	0,09	30,8		0,08		0,24		61		8		4	
OK 6 Q	0,33		12,3		0,55				80		25		18	
OK 1/1		0,10												
OK 1/2		0,14												
OK 1/3		0,17												
OK 1/4		0,15												
OK 3/1		0,21												
OK 2/11	0,24		22,1		1,32		0,59		67		45		37	
OK 2/10	0,20		16,5		1,30		0,43		71		43		37	
OK 2/9	0,23		21,9		1,42		0,33		76		48		39	
OK 2/8	0,21		17,1		1,44		0,32		69		43		39	
OK 2/7	0,22		15,9		1,38		0,40		68		45		39	
OK 2/6	0,21		15,3		1,51		0,42		67		46		39	
OK 2/5	0,26		17,3		1,55		0,65		73		51		42	
OK 2/4	0,21		17,7		1,66		0,37		77		56		43	
OK 2/3	0,21	0,26	20,9		1,69		0,31		60		51		38	
OK 2/2	0,20		16,1		1,55		0,34		59		43		37	
OK 2/1	0,20		17,8		1,54		0,44		55		42		38	

Pb, Cd Hg, Zn, Cu,

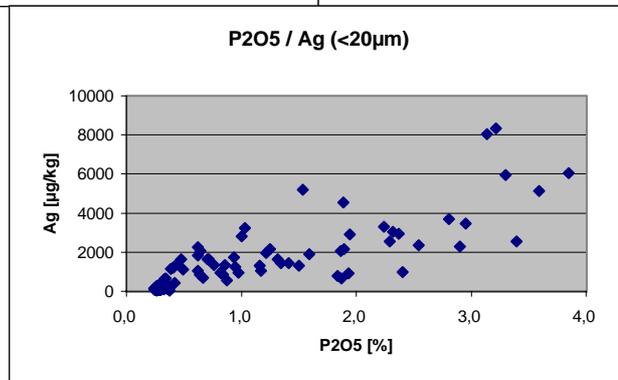
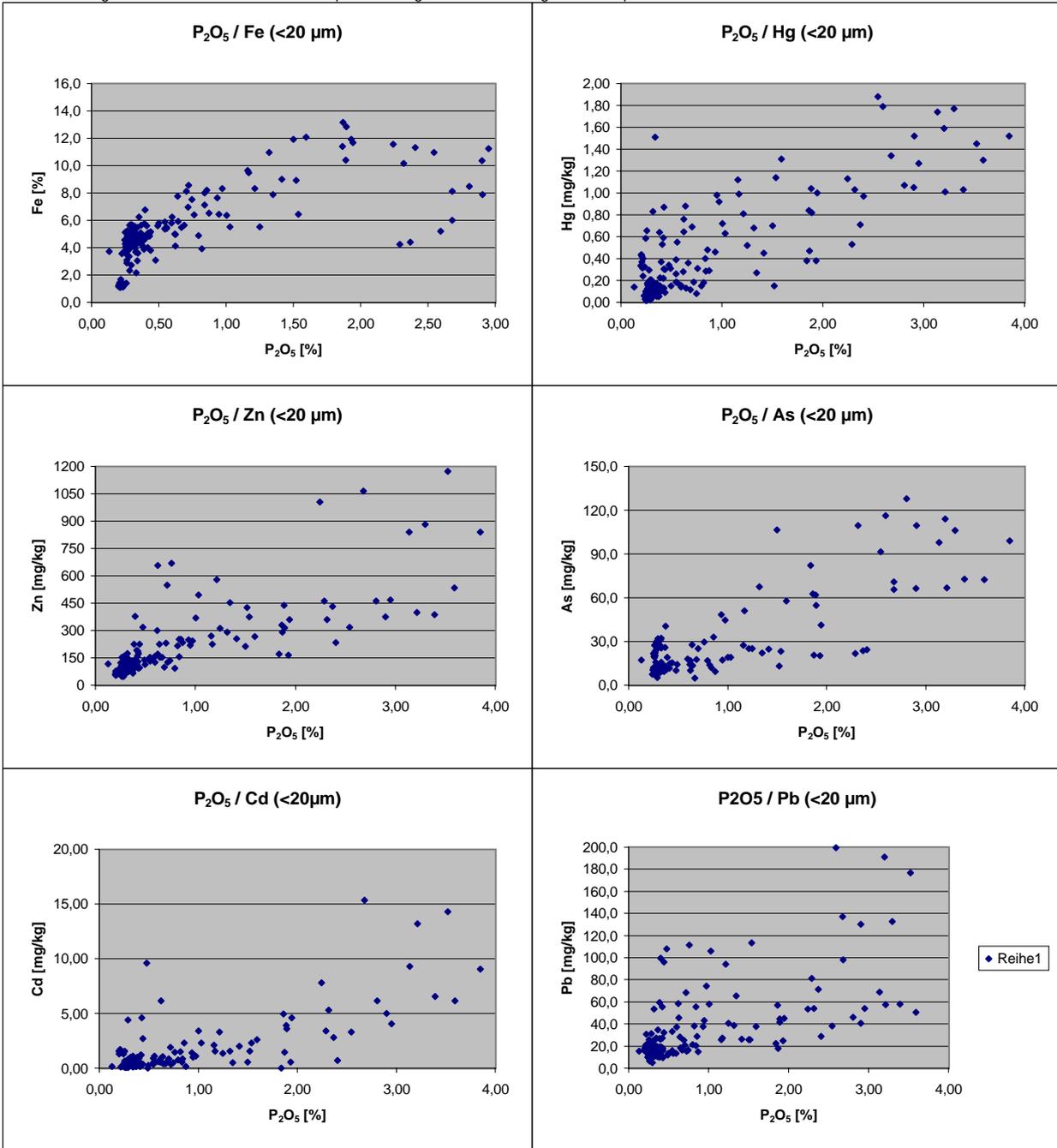
Name	Cr	Cr	Fe	Fe	Mn	Mn	As	As	Li	Li	Ag	Ag	Co	Co
	mg/kg <20	mg/kg total	% <20	% total	mg/kg <20	mg/kg total	mg/kg <20	mg/kg total	mg/kg <20	mg/kg total	µg/kg <20	µg/kg total	mg/kg <20	mg/kg total
Volga und I														
W02	70		6,3		4012		17,9		20,5					
Oka W11	62		4,9		2051		16,7		13,5					
Volga 01	64	2	5,4		5209									
Sura 5	74	23	5,1		1348									
Sura 4	68	28	5,0		1867									
Sura 3	57	26	4,5		1220									
Sura 2	66	15	4,8		1868									
Sura 1	69	11	5,1		1272									
Vetluga 2	60	67	5,8		1086									
Vetluga 1	84	66	5,9		1413									
Volga 02	61	15	8,6		1433									
W23	66		5,6		3934		17,6		15,5					
Volga 03	69	23	6,2		1134									
Volga 04	70	45	4,7		1133									
Kokshaga 1	81	15	7,5		1625									
Volga 05	82	12	4,8		1256									
Volga 06	72	63	7,1		1628									
Illet 1	53	10	4,9		2123									
Lopatinski 1 - Seekanal	76	16	5,8		917									
Lopatinski 2	82	60	4,4		878									
Volga 07	78	8	4,9		5937									
Volga 08	79	9	5,8		1957									
Volga 09	68	40	4,1		1122									
Sviyaga 1	59	46	3,9		746									
Sviyaga 2	62	50	4,1		1083									
Sviyaga 3	59	58	4,4		651									
Volga 10	82	48	5,3		889									
Kazanka 1	63	23	4,1		1702									
Kazanka 2	52	10	3,0		1037									
Kazan 1	72	64	5,4		1522									
Volga 11	255	55	5,0		1428									
Volga 12	125	71	5,5		909									
Volga 13	43	15	2,9		1220									
Volga 14	70	63	4,6		1161									
Kama 2	79	80	5,1		1327									
Kama 1	71	59	4,5		1533									
Kama 3	70	65	4,3		1535									
Kama 4	82	25	4,8		2661									
Volga 15	56	43	3,6		858									
Volga 16	66	53	4,2		2135									
Volga 17	92	30	5,7		1413									
Volga 18	145	142	4,6		543									
Volga 19	87	85	5,5		2793									
Volga 20	88	82	5,3		1974									
Volga 21	90	83	5,1		1103									
Volga 22	80	40	5,6		1582									
Volga 23	89	52	5,7		1378									
Volga 24	88	56	5,5		3083									
Volga 25	83	33	5,6		5344									
Volga 26	79	66	5,2		1793									
Volga 27	94	14	6,8		1135									
Volga 28	88	33	4,6		4831						71	36	18	16

Name	Cr	Cr	Fe	Fe	Mn	Mn	As	As	Li	Li	Ag	Ag	Co	Co
	mg/kg <20	mg/kg total	% <20	% total	mg/kg <20	mg/kg total	mg/kg <20	mg/kg total	mg/kg <20	mg/kg total	µg/kg <20	µg/kg total	mg/kg <20	mg/kg total
Volga 29	98	72	5,1		1026						46	17	17	25
WG1	56	47	4,7	4,3	1228	1092	31,8	19,1	33,7	26,1	153	4	12	8
WG2	57	50	4,5	4,6	1044	1335	27,4	22,8	36,9	27,1	132	15	20	12
WG3	51	22	3,1	1,5	751	371	11,0	2,1	16,7	6,3	236	37	17	17
WG4	61	31	4,1	2,2	1175	640	19,9	5,0	25,2	9,8	273	58	19	16
WG5	58	50	5,0	4,7	1107	939	32,1	21,1	31,4	24,0	171	74	20	17
WG6	61	55	4,7	4,5	778	707	27,7	18,1	28,3	24,1	207	52	21	16
WG7	61	56	4,9	4,9	815	726	24,7	22,0	32,0	27,3	349	63	21	17
WG8	64	58	4,9	4,7	936	796	27,5	30,0	30,4	27,2	125	49	22	18
WG9	73	56	4,8	4,8	1056	936	26,4	24,7	29,8	25,0	258	64	17	18
WG10	63	59	4,7	4,7	922	789	24,3	27,0	30,4	26,8	120	23	15	9
WG11	63	58	4,6	4,4	959	870	23,3	21,3	27,0	26,9	30	24	19	14
WG12	64	31	4,2	2,1	1137	598	25,7	4,2	16,8	8,0	172	14	17	9
WG13	67	34	4,8	2,5	1872	1320	40,6	9,6	22,0	9,0	103	22	15	11
WG14	71	33	4,6	2,0	1071	448	25,7	3,6	20,2	7,2	61	34	11	12
WG15	72	38	4,5	2,2	1113	548	29,6	3,0	19,4	7,7	58	30	12	13
Tereschka	65	61	3,4	3,6	604	620	12,6	10,3	12,4	13,6	131	41	14	12
WG17	65	58	3,4	3,1	868	797	20,3	9,2	15,0	13,1	86	22	17	8
WG18	63	47	3,8	2,7	814	553	22,1	4,9	17,1	12,1	118	61	14	16
WG19	70	35	4,4	2,1	1268	470	31,0	2,2	20,5	7,5	127	6	19	8
WG20	63	63	4,0	4,0	678	708	19,0	20,6	18,7	18,9	1128	299	14	10
WG26	61	42	4,3	2,2	766	444	21,7	4,6	18,6	8,2	234	48	18	15
WG21	65	33	3,9	2,2	679	407	19,0	6,6	18,3	8,3	1410	508	14	11
WG25	64	65	4,5	4,3	665	599	27,3	21,3	19,0	17,5	1628	803	14	11
WG22	79	60	3,8	2,9	732	600	15,4	11,3	18,1	12,1	1839	208	17	11
WG23	96	98	3,1	2,6	525	354	10,1	9,0	14,7	8,7	624	45	15	3
WG24	122	65	4,1	2,5	685	392	16,8	8,9	17,5	8,6	644	54	15	7
WG27	68	28	3,7	1,9	736	230	15,9	4,5	18,0	4,7	147	20	8	7
WG28	66	42	3,6	2,8	820	437	13,3	5,6	17,4	6,9	293	31	18	11
WG29	59	54	2,7	2,8	318	279	11,6	8,0	12,6	10,0	147	36	18	13
WG30	62	43	3,8	2,4	1285	708	15,7	5,6	18,1	9,3	104	16	10	7
WG31	56	52	3,7	3,4	699	619	12,1	10,0	20,3	15,3	126	25	14	13
WG32	39	31	2,3	2,5	364	301	6,8	5,7	11,2	10,5	71	17	20	18
WG33	67	71	3,7	3,7	639	626	7,5	12,7	15,0	14,5	80	32	14	9
WG34	69	68	4,6	3,9	699	739	10,7	17,8	25,1	16,4	493	176	15	10
WG35	73	73	4,1	3,0	944	615	9,5	7,4	18,6	9,7	134	32	12	12
WG50	86	83	4,2	3,7	624	597	9,3	13,2	18,6	12,1	113	21	17	11
WG36	75	76	4,0	3,8	482	533	9,0	16,1	15,5	12,8	268	22	19	18
WG37	60	56	4,0	3,4	667	589	5,3	8,4	21,1	13,9	72	16	14	15
WG38	66	59	4,4	4,0	795	743	7,3	12,3	22,3	17,7	143	34	18	13
WG39	62	50	4,1	3,6	641	625	9,5	14,8	20,7	14,0	209	2	20	9
WG40	66	66	4,3	4,1	788	674	8,0	11,3	20,1	14,1	151	28	21	17
WG41	76	66	4,5	2,7	1480	515	10,9	5,5	17,3	4,9	197	37	19	15
WG42	79	81	5,1	4,5	2435	1973	10,5	13,6	24,0	13,3	137	63	18	18
WG43	75	81	4,9	4,5	1762	1680	10,5	14,4	18,4	14,1	191	63	22	10
WG44	74	80	4,7	4,8	4683	4129	9,2	17,7	20,1	18,1	159	46	22	13
WG45	74	62	4,9	3,9	2895	2163	12,6	14,2	21,8	16,0	212	68	22	26
WG46	74	56	4,9	3,5	1251	899	10,2	10,5	21,7	13,5	260	68	23	19
WG47	74	84	4,8	5,2	1369	1521	13,2	36,6	22,0	23,2	80	32	24	19
WG48	70	81	4,9	5,2	3607	3983	13,0	52,7	21,5	22,7				
WG49	69	72	4,8	4,7	2159	2121	8,5	28,2	26,9	21,6				
Kljasma											45300			
OK 1			5,2		1481		116,3				39756			
OK 2			6,5		1697		113,9				29142			
OK 3			6,0		1349		65,8				17995			

Name	Cr mg/kg <20	Cr mg/kg total	Fe % <20	Fe % total	Mn mg/kg <20	Mn mg/kg total	As mg/kg <20	As mg/kg total	Li mg/kg <20	Li mg/kg total	Ag µg/kg <20	Ag µg/kg total	Co mg/kg <20	Co mg/kg total
OK 4			7,9		1922		109,4				12275			
OK 5			9,5		1343						1743			
OK 6			7,7		1180		48,5				1645			
OK 7			7,0		425		209,5				10939			
OK 8			8,1		1735		70,7				8026			
OK 9			10,8		2738		97,7				949			
OK 10			8,3		1365		44,5				3290			
OK 11			11,6		1331		158,3				5140			
OK 12			11,7		1871		72,5				4545			
OK 13			10,4		2591		62,0				1650			
OK 14			11,0		2180		67,4				3450			
OK 15			11,3		2048		186,0				6044			
OK 16			10,1		2675		98,9				3696			
OK 17			8,5		2517		127,9				995			
OK 18			11,3		2026		24,3				1249			
OK 19			6,4		1342		17,2				800			
OK 20			17,7		2196		82,0				899			
OK 21			11,9		1642		20,3				1297			
OK 22			11,9		2025		106,5				5944			
OK 23			13,0		2293		106,3				2547			
OK 24			13,3		1279		72,8				3050			
OK 25			10,2		1850		109,5				2046			
OK 26			11,4		2325		62,8				5195			
OK 27			6,4		1126		23,3				2350			
OK 28			11,0		2644		91,4				1898			
OK 29			12,1		2437		57,7				2148			
OK 30			12,8		2361		54,7				2900			
OK 31			11,7		1384		41,2				8342			
OK 32			13,5		2678		66,9				1199			
OK 33			5,6		710		11,7				849			
OK 34			7,8		942		27,8				2300			
OK 35			10,4		2107		66,3				1347			
OK 36			8,2		2608		33,1				1049			
OK 37			9,5		3761		51,0				649			
OK 38			13,2		1056		20,6							
OK 39			8,9		1256		13,1				849			
OK 40			8,0		867		11,9				699			
OK 41			5,5		548		4,8				2050			
OK 42			5,9		497		13,4				549			
OK 43			6,5		1118		9,2							
OK 44			3,7		184		17,1				1297			
OK 45			9,6		2152		27,4				1449			
OK 46			9,0		2294		24,8				1099			
OK 47			5,6				14,2				1450			
OK 48			7,9		2008		22,0				1648			
OK 49			8,1		1597		25,3				2250			
OK 50			5,0		458		10,2				1050			
OK 51			5,0		1216		14,1				2797			
OK 52			6,4		1611		19,3				3250			
OK 53			5,5		2868		19,3				2148			
OK 54			5,5		2868		25,1				1950			
OK 55			8,3		7007		25,0				1349			
OK 56			6,4		2062		29,5							
Moskwa/Ok														
M53	61		4,0		945		14,9				420		17	

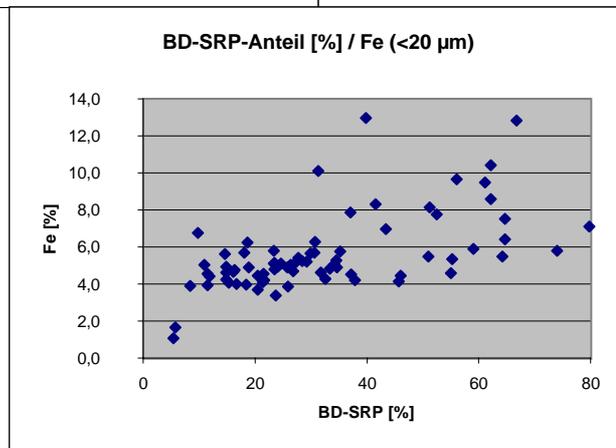
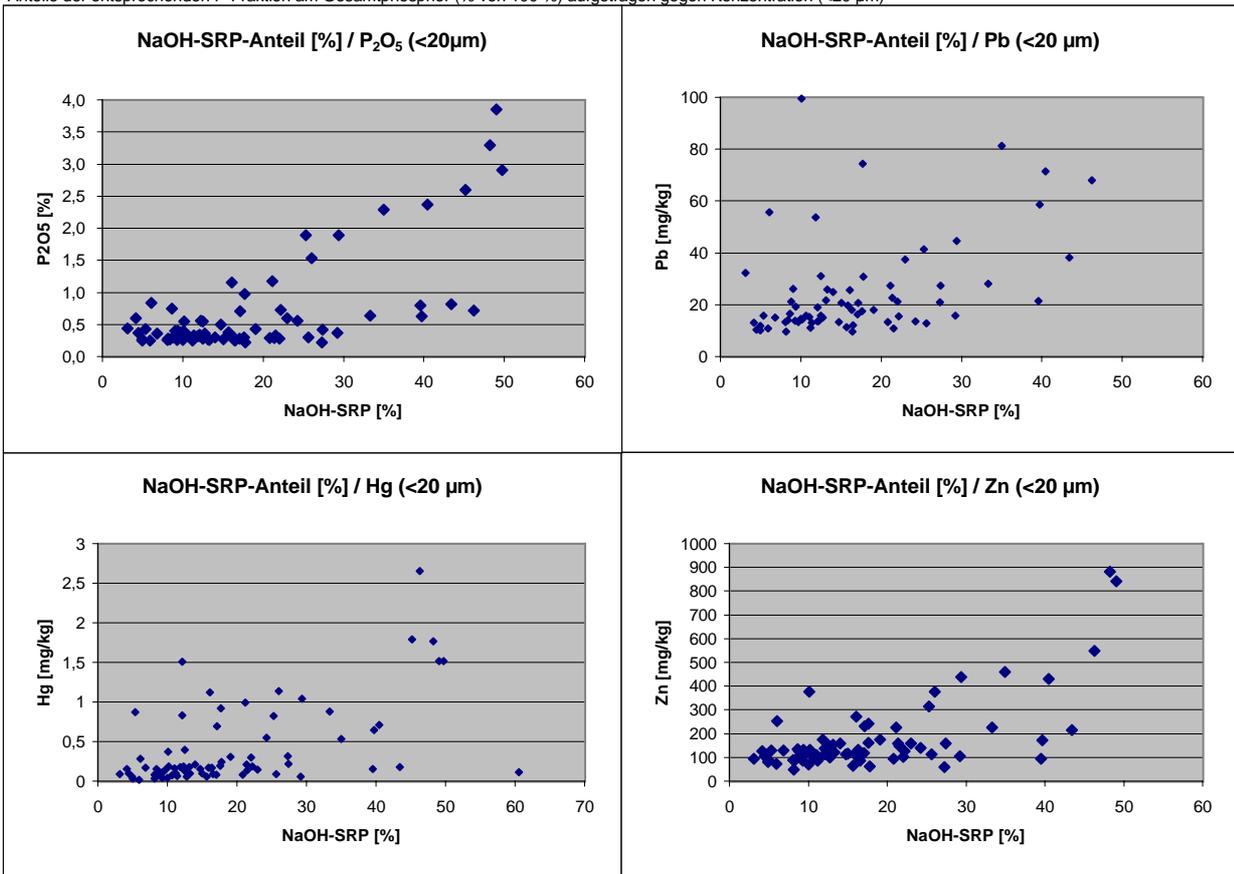
Name	Cr	Cr	Fe	Fe	Mn	Mn	As	As	Li	Li	Ag	Ag	Co	Co
	mg/kg <20	mg/kg total	% <20	% total	mg/kg <20	mg/kg total	mg/kg <20	mg/kg total	mg/kg <20	mg/kg total	µg/kg <20	µg/kg total	mg/kg <20	mg/kg total
M50	119		4,3		1060		21,9				2550		18	
M51	119		4,4		1124		23,5				2950		18	
M55	71		3,9		1117		13,9				960		15	
Oka Terrasse														
OK 4 St	54		3,9		930									
OK 5 W	28		1,7		733									
OK 6 Q	53		2,2											
OK 1/1														
OK 1/2														
OK 1/3														
OK 1/4														
OK 3/1														
OK 2/11	54		1,3		97									
OK 2/10	44		1,3		82									
OK 2/9	55		1,1		97									
OK 2/8	44		1,4		84									
OK 2/7	47		1,5		86									
OK 2/6	47		1,4		85									
OK 2/5	57		1,4		92									
OK 2/4	56		1,2		95									
OK 2/3	39		1,1		82									
OK 2/2	43		1,2		71									
OK 2/1	40		1,2		74									

Korrelationsdiagramme für alle russischen Sedimentproben bezogen auf die Elementgehalte < 20 µm

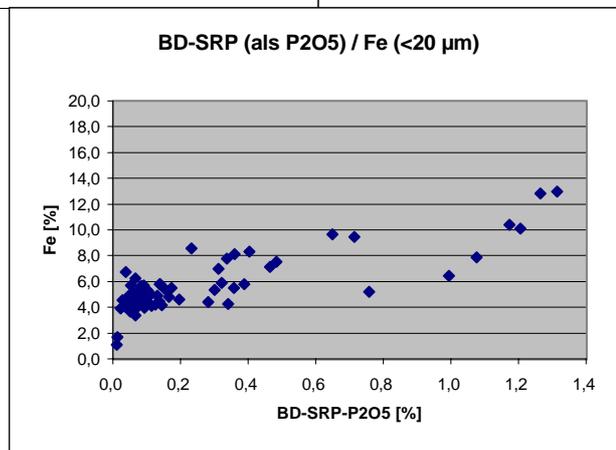
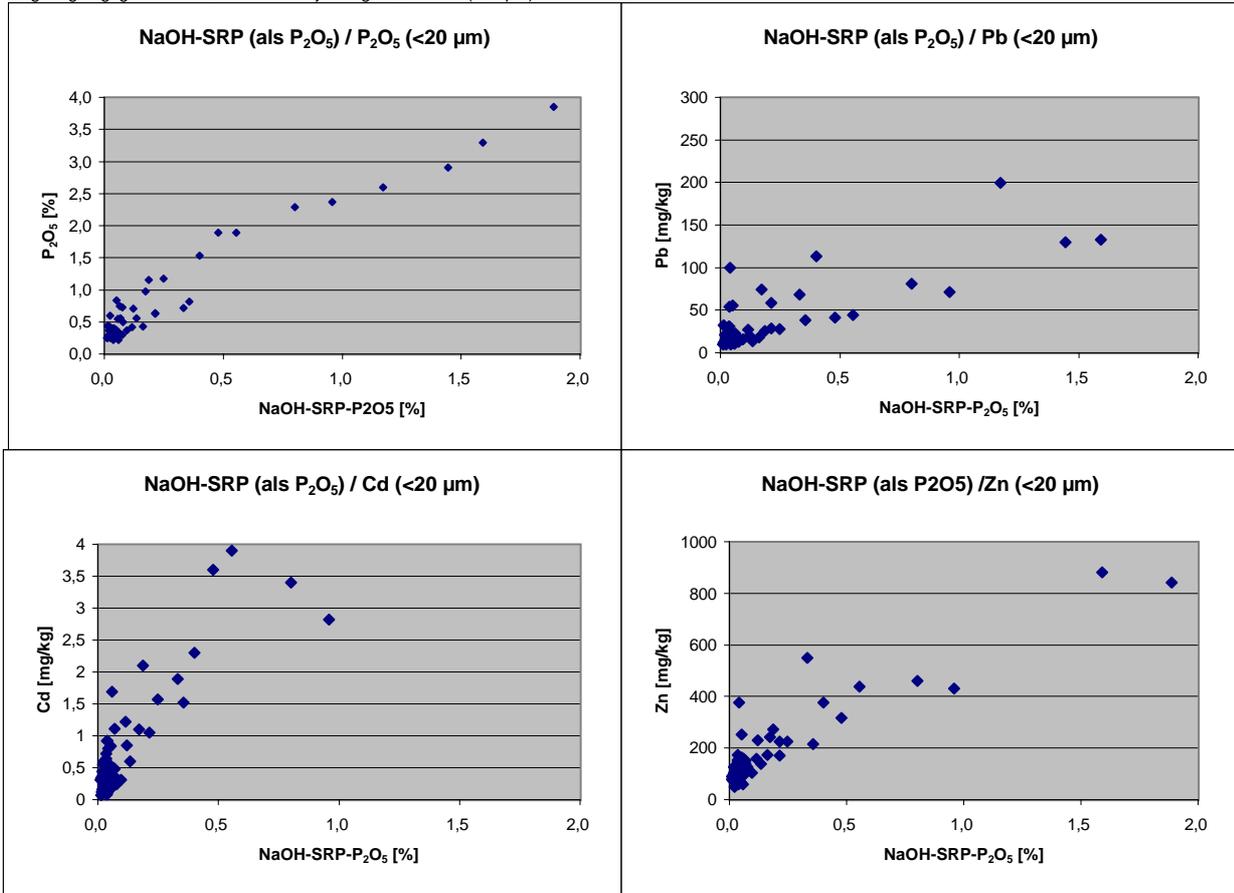


Korrelationsdiagramme für alle russischen Sedimentproben:

Anteile der entsprechenden P-Fraktion am Gesamphosphor (% von 100 %) aufgetragen gegen Konzentration (<20 µm)



Korrelationsdiagramme für alle russischen Sedimentproben:
 P_2O_5 -Konzentrationen der jeweiligen P-Fraktion umgerechnet auf die Korngrößenfraktion < 20 μm ,
 aufgetragen gegen die Konzentration des jeweiligen Elements (<20 μm)



Oberflächensedimente [P₂O₅ in %]

Ort	Fraktion	Mittel	Stdabwn	Min	Max	n
Baden-						
Württemberg	< 20 µm	0,33	0,13	0,09	1,36	809
Jungferweiher	ungesiebt	0,35	0,02	0,33	0,37	2
Bodensee	ungesiebt	0,24				1
Pantanal	< 20 µm	0,22	0,07	0,13	0,34	5
	ungesiebt	0,17	0,06	0,09	0,27	5
Peking	ungesiebt	0,2	0,075	0,08	0,29	4
Kljasma +						
Nebenflüsse	< 20 µm	1,76	0,98	0,13	3,85	56
Kljasma	ungesiebt	0,92	0,82	0,13	3,08	13
Lake						
Protokskoe	< 20 µm	0,22				1
	ungesiebt	0,12				1
Mündungs-						
bereich der						
Moskwa	< 20 µm	2,33	0,04	2,29	2,37	2
	ungesiebt	1,51	0,02	1,52	1,49	2
Wolga und						
Nebenflüsse	< 20 µm	0,36	0,13	0,23	0,84	103
	ungesiebt	0,22	0,1	0,02	0,51	100

Danksagung

Ich danke Herrn Professor Dr. Dr. h.c. mult. G. Müller für die Bereitstellung des interessanten Themas, die Betreuung dieser Arbeit und seine Unterstützung.

Mein Dank gilt auch allen Mitarbeitern des Institutes für Umwelt-Geochemie für die Diskussions- und Hilfsbereitschaft.

Dem Landesamt für Umweltschutz Baden-Württemberg sowie den Mitarbeitern des Arbeitskreises der anorganischen Umwelt-Geochemie danke ich dafür, daß ich einige ihrer Ergebnisse in meine Diskussion mit einbeziehen durfte.

Ich erkläre hiermit an Eides statt, daß ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne unerlaubte Hilfsmittel durchgeführt habe.