

# PHOSPHOR

Wege und Verbleib  
in der Bundesrepublik Deutschland

Probleme des Umweltschutzes  
und der Rohstoffversorgung

Herausgegeben  
vom Hauptausschuß »Phosphate und Wasser«  
der Fachgruppe Wasserchemie  
in der Gesellschaft Deutscher Chemiker  
im Auftrag des Bundesministeriums des Innern  
durch den Obmann des Fachausschusses  
Heinz Bernhardt

# Inhalt

	<b>Kurzfassung</b> .....	<b>XVII</b>
<b>A.</b>	<b>Zustandsbeschreibung</b> .....	<b>1</b>
1	<i>Einleitung</i> .....	1
1.1	Land- und Forstwirtschaft .....	1
1.2	Nahrungsmittelindustrie .....	1
1.3	Trink- und Betriebswasserkonditionierung .....	2
1.4	Wasch- und Reinigungsmittel .....	2
1.5	Industrie .....	2
2	<i>Herkunft</i> .....	3
2.1	Import von Rohphosphaten und Phosphorsäure .....	3
2.2	Import aus Eisenerz .....	5
2.3	Import von Fertigprodukten .....	6
2.4	Import als Nahrungs- und Futtermittel .....	6
2.5	Import von Phosphor aus Brennstoffen .....	8
2.6	Böden .....	10
3	<i>Gewinnung und Verarbeitung</i> .....	13
3.1	Herstellungsverfahren .....	13
3.1.1	Phosphor und Phosphorverbindungen (Technologie) .....	13
3.1.2	Düngemittel .....	15
3.1.3	Wasch- und Reinigungsmittel .....	16
4	<i>Verwendung</i> .....	17
4.1	Mengenaufschlüsselung .....	17
4.2	Düngemittel .....	19
4.2.1	Bedeutung der P-Düngung in der intensiven Landwirtschaft .....	19
4.2.2	Verbrauch an Düngemitteln .....	19
4.3	Futtermittel .....	23
4.3.1	Bedeutung der P-Zufuhr für die tierische Produktion .....	23
4.3.2	Aspekte der P-Bedarfsdeckung .....	24
4.3.3	Verbrauch an Futterphosphaten .....	24
4.4	Nahrungsmittelzusätze .....	25
	Milchprodukte .....	25
	Wurst- und Fleischwaren .....	25
	Getränke .....	25
	Sonstige Produkte .....	25
4.5	Korrosionsschutzmittel .....	26
4.5.1	Metallbearbeitung .....	26
4.5.2	Konditionierung von Trink- und Betriebswasser .....	26

4.6	Wasch-, Spül- und Reinigungsmittel .....	26
	Produkte zur Reinigung des menschlichen Körpers .....	27
	Produkte zur Reinigung von Textilien .....	27
	Reinigungsmittel für Gegenstände und Oberflächen im Haushalt .....	27
4.7	Industriechemikalien .....	29
4.8	Phosphorhaltige Zwischen- und Endprodukte .....	29
	Zwischenprodukte .....	29
	Pflanzenschutzmittel .....	30
	Flammschutzmittel .....	30
5	<i>Wege und Verbleib</i> .....	31
5.1	Luft und Niederschlag .....	31
5.2	Boden .....	33
5.2.1	Phosphat-Auswaschung .....	34
5.2.2	Organisch gebundenes Phosphat .....	35
5.2.3	Anorganisches Phosphat .....	35
5.2.4	Verhalten der Düngerphosphate im Boden .....	40
5.2.5	Bemerkungen zur Ausnutzung von Düngerphosphaten .....	40
5.2.6	Erosion von Boden-Phosphaten .....	41
5.2.7	Dränwässer .....	42
5.2.8	P-Bilanz des Teilsystems Boden – Gestein .....	43
5.3	Pflanzen .....	45
5.3.1	Aufnahme und Funktion des Phosphors im pflanzlichen Stoffwechsel .....	45
5.3.2	Bemessung der Phosphatdüngung .....	46
5.3.3	Phosphor-Entzüge durch die Pflanze .....	49
5.3.4	Phosphorhaushalt im Wald .....	52
5.3.5	Phosphor-Entzug durch landwirtschaftliche Produktion für gewerbliche und industrielle Weiterverarbeitung .....	54
	Zuckerfabriken .....	55
	Brennereien .....	55
	Brauereien .....	55
	Stärkefabriken .....	55
5.4	Tier .....	56
5.4.1	Funktion des Phosphors im Tier und im Menschen .....	56
5.4.2	Phosphor in Futtermitteln .....	56
5.4.3	Nahrungsmittel tierischen Ursprungs .....	58
5.4.4	Futtermittel tierischen Ursprungs .....	59
5.4.5	Knochen .....	59
5.4.6	Bilanzierung der Phosphorzufuhr zum Tier und der Ausscheidung .....	61
5.4.7	Abschätzung der Phosphorverluste von tierischen Ausscheidungen an Gewässer und Böden .....	64
5.4.8	Beurteilung der P-Düngewirkung von tierischen Exkrementen .....	66
5.5	Mensch und Haushalt .....	67
5.6	Abwasser .....	70
5.6.1	Abwasser aus dem kommunalen Sektor einschl. Klärschlamm .....	71

5.6.1.1	Abwasser, das nicht über Kanalisation abgeleitet wird .....	71
5.6.1.2	In Vorfluter über Kanalisation abgeleitetes kommunales Abwasser einschl. Klärschlammabeseitigung .....	72
5.6.2	Abwasser von Industrie- und Gewerbebetrieben einschl. Abfallschlamm ....	75
5.7	Grundwasser .....	77
5.8	Oberflächengewässer und Sediment .....	78
5.8.1	Oberflächengewässer .....	79
	Auswaschung .....	79
	Erosion .....	80
	Abschwemmung .....	81
	Diffuse Belastungen aus Siedlungen .....	82
	Streu .....	83
	Fischereiliche Bewirtschaftung .....	84
	Eintrag von Stoffen durch Badebetrieb .....	85
	Flächenbezogene Phosphoraustragswerte .....	85
	✓ Verhalten des Phosphors im Flußlauf .....	86
	Austrag aus der Bundesrepublik Deutschland .....	90
5.8.2	Sediment .....	95
	Der Austausch des Phosphors zwischen Sediment und anstehendem Wasser	95
	Fixierung von Phosphaten am Sediment durch Fällung .....	96
	Fixierung gelösten Phosphats am Sediment durch Sorption .....	97
	Der Einfluß des Redoxpotentials auf die Phosphatfixierung .....	98
	Die Verfügbarkeit des Phosphors in Sedimenten für Organismen .....	102
	Phosphor-Retention in stehenden Gewässern .....	102
5.9	Deponie und sonstige Senken .....	103
	Müllmengen .....	103
	Phosphormenge im Hausmüll .....	103
	Phosphormenge in hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen .....	104
	Verbleib des Phosphors aus Müll .....	104
5.10	Export .....	105
5.10.1	Wasch-, Spül- und Reinigungsmittel .....	105
5.10.2	Zwischen- und Endprodukte .....	106
5.10.3	Dünge-, Nahrungs- und Futtermittel .....	106
6	<i>Zusammenfassende Betrachtung der Wege und des Verbleibs von Phosphor anhand von Modellen</i> .....	109
6.1	Diskussion verschiedener hierauf anwendbarer Modelle .....	109
6.2	Gesamt-Modell „Wege des Phosphors“ .....	110
	Industrielle P-Verbindungen .....	111
	Teilsystem „Boden“ .....	111
	Aufgliederung der P-Zufuhr zu Boden/Gestein .....	112
	Niederschläge .....	112
	Teilsystem „Tier“ .....	112
	Teilsystem „Mensch und Haushalt“ .....	113
	Teilsystem „Gewässer“ .....	113

6.3	Integrales Modell für die Bundesrepublik Deutschland einschl. Berlin (West)	116
7	<i>Bilanz im Hinblick auf die Gewässerbelastung</i>	119
	Auswaschung	119
	Erosion	119
	Abschwemmungen tierischer Ausscheidungen	120
	Abschwemmung von befestigten Flächen über Regenwasserabläufe	120
	Niederschläge auf die Seeoberfläche	120
	Futter- und Düngemittel für fischereiliche Zwecke, Wassergeflügel	120
	Eintrag von Stoffen durch Badebetrieb	121
7.1	Abgrenzung nach Einzugsgebieten (Einzelbeispiele)	121
7.1.1	Möhnetsperre (Beispiel für vorwiegend durch kommunale Abwässer belastete Talsperre)	121
7.1.2	Hopfensee (Allgäu, Bayern) (Beispiel für einen vorwiegend durch Abschwemmungen aus der Weidewirtschaft belasteten See)	123
7.1.3	Wahnachtalsperre (Beispiel für vorwiegend aus diffusen P-Quellen (Landwirtschaft und Streusiedlungen) belastete Talsperre)	127
7.1.4	Bodensee als Beispiel für zivilisationsbedingte Eutrophierung	140
8	Gewässerschädigung durch Eutrophierung	149
8.1	Eutrophierung	149
8.2	Unterschiedliche Eutrophierungsgefährdung der Gewässer	152
8.3	Grenzbelastungen	153
9	<i>Maßnahmen zur Abwehr von Schädigungen</i>	159
9.1	Punktförmiger Anfall	159
9.1.1	Fällungsverfahren	159
	Grundlagen der Fällungsreinigung	159
	Praktische Ergebnisse der Fällungsreinigung	161
	Eingesetzte Fällmittel	161
	Kosten	163
	Technische Probleme	165
	Schlammverwertung	166
9.1.2	Abwasserfernhaltung durch überörtliche Kanalisationssysteme (Ringleitungen)	168
9.2	Diffuse Quellen	174
	Düngemittelrestriktionen und Kanalisationsmaßnahmen	174
	Die Versickerung kleiner nährstoffreicher Zuläufe über Hanggräben	175
	Die Phosphoreliminierung in Vorsperren	177
	Die Eliminierung des Phosphors aus dem Zufluß durch chemische Verfahren	179
	Belüftung stehender Gewässer	181
	Abzug hypolimnischen Wassers	183
	Chemische Fällung im See	184
	Durchflußerhöhung	185
	Bodenabdeckung	185
	Sediment-Entnahme (Ausbaggerung)	186
9.3	Ersatzstoffe	186

9.4	Gesetzgeberische und administrative Maßnahmen .....	187
9.4.1	Zwischenstaatliche Vereinbarungen und regionale praktische Maßnahmen ..	187
9.4.2	Zwischenstaatliche Vereinbarungen und regionale praktische Maßnahmen am Beispiel des Bodensees .....	194
<b>B.</b>	<b>Aufgabenkonzepte .....</b>	<b>199</b>
10	<i>Rohstoffversorgung und Recycling .....</i>	199
10.1	Aspekte der Rohstoffversorgung .....	199
10.2	Entwicklung von Technologien zur Verarbeitung minderwertiger Rohphosphate	202
10.3	Technische und wirtschaftliche Aspekte der Mehrfachnutzung (Recycling) ..	205
10.3.1	Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung von Klärschlämmen und Müllklär- schlammkomposten in Land- und Forstwirtschaft .....	206
	Zusammensetzung der Schlämme .....	206
	Phosphorgehalte der Schlämme und Phosphorzufuhr durch Klär- schlämme zum Boden .....	207
	Schwermetallgehalte in Klärschlämmen .....	208
	Bemessung der Klärschlammgaben .....	209
	Einsatz von Müllkomposten bzw. Müllklärschlammkomposten in Land- und Forstwirtschaft .....	210
	Einsatz von Wohnsiedlungsabfällen in der Forstwirtschaft .....	211
10.3.2	Gezielte Rückführung tierischer Exkrememente .....	212
	Verringerung der Phosphorverluste .....	212
	Gezieltes Recycling durch Verteilung von Mistüberschüssen .....	213
10.3.3	Verwendung phosphorhaltiger Abfallprodukte in der Industrie .....	214
10.4	Möglichkeiten zur besseren Ausnutzung des Phosphors in Böden und Dünge- mitteln .....	214
	Bindung im Boden .....	214
	Kalkung .....	215
	Zufuhr von Silikat .....	215
	Organische Düngung .....	215
	Erosion .....	216
	Auswaschung .....	216
	Applikationsweise von P-Düngern .....	216
11	<i>Technische und wirtschaftliche Aspekte des Einsatzes von Ersatzstoffen ...</i>	217
11.1	Wasch- und Reinigungsmittel .....	217
11.2	Sonstiges (z. B. Korrosionsverhütung, Industrieprodukte, Nahrungsmittelher- stellung) .....	219
12	<i>Aspekte des Umweltschutzes .....</i>	221
12.1	Auswirkungen einer Mehrfachnutzung .....	221
	Verwertung von Klärschlämmen, Müll, Klärschlammkomposten und Müll- komposten in Land- und Forstwirtschaft .....	221
	Verminderung der Verluste und Intensivierung der Wiederverwertung tierischer Exkrememente .....	222

12.2	Einsatz von Ersatzstoffen .....	223
12.3	Weitergehende Abwasserreinigungsverfahren .....	224
12.3.1	Sorptionsverfahren .....	225
	Ionenaustausch .....	226
	Chemisorption an anorganischen Sorbentien .....	227
12.3.2	Extraktionsverfahren .....	228
12.3.3	Reversible Bioakkumulation in Belebtschlammorganismen .....	228
12.3.4	Behandlung der Konzentrate .....	230
13	<i>Zusammenstellung von Forschungsvorhaben</i> .....	231
	Land- und Forstwirtschaft .....	231
	Phosphat-Technologie .....	233
	Gewässerkunde und Wasserwirtschaft .....	233
14	<i>Folgerungen und Prioritäten für optimale Rohstoffnutzung</i> .....	235
14.1	Phosphatdüngemittel .....	235
14.2	Mineralfutter-Phosphate .....	237
14.3	Waschmittel .....	238
14.4	Sonstige P-Verbindungen .....	238
15	<i>Zusammenfassung</i> .....	241
A.	<i>Einleitung</i> .....	241
1	Inhalt der Studie .....	241
1.1	Bestandsaufnahme .....	241
1.2	Aufgabenkonzepte .....	242
2	Limitierende Bemerkungen .....	242
3	Definitionen .....	242
3.1	Eintrag (Input) .....	242
3.2	Austrag (Output) .....	242
3.3	Senkenflux/Quellflux .....	243
4	Wertung der Daten .....	243
5	Generelle Bemerkungen .....	244
5.1	Technische und volkswirtschaftliche Relevanz .....	244
5.2	Interdisziplinäre Zusammenarbeit .....	244
B.	<i>Ergebnisse</i> .....	245
1	Phosphorbilanz für die Bundesrepublik Deutschland einschl. Berlin (West) .	245
2	Modelle zur Beschreibung der Wege und des Verbleibs des Phosphors im System Bundesrepublik Deutschland einschl. Berlin (West) .....	246
2.1	Teilsystem „Boden und Gestein“ .....	247
2.2	Teilsystem „Mensch und Haushalt“ .....	248
2.3	Teilsystem „Kläranlage“ .....	249
2.4	Teilsystem „Gewässer“ .....	249
2.5	Generelle Aussagen des Gesamt-Modells und der Teilsysteme .....	250
3	Gewässerschutz .....	250

---

4	Rohstoff-Sicherung .....	250
5	Maßnahmen zur Verminderung des Phosphor-Verbrauchs .....	251
5.1	Verfahren zur Ausnutzung minderwertiger Rohphosphatvorkommen .....	252
5.2	Recycling .....	252
5.3	Verbesserung der Ausnutzung des Düngemittelphosphors in den Böden .....	253
5.4	Herabsetzung von Erosionsprozessen .....	253
6	Maßnahmen zur Verminderung des Phosphoreintrages in die Gewässer .....	254
6.1	Punktförmige Quellen .....	254
	Weitergehende Abwasserreinigungsverfahren .....	254
	Einsatz von Phosphat-Ersatzstoffen .....	254
6.2	Diffuse Nährstoffquellen .....	255
C.	<i>Ausblick</i> .....	257
	<i>Literatur</i> .....	259
	<i>Summary</i> .....	271