

Abschlussbericht

Phosphorpotenziale im Land Berlin

Christian Kabbe, Daphne Bäger, Raoul Mancke
Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH



Die Mittel zur Ausarbeitung dieses Berichtes wurden durch das Berliner Umweltentlastungsprogramm II (Projektnummer 11400 UEPII/2) zur Verfügung gestellt.



Dieses Vorhaben wird vom
Land Berlin und von der
Europäischen Union
kofinanziert.

(Europäischer Fonds für
regionale Entwicklung)

Investition in Ihre Zukunft!



...eine Chance durch Europa!

Senatsverwaltung
für Stadtentwicklung
und Umwelt



Berlin, Germany

2014

Important Legal Notice

Disclaimer: The information in this publication was considered technically sound by the consensus of persons engaged in the development and approval of the document at the time it was developed. KWB disclaims liability to the full extent for any personal injury, property, or other damages of any nature whatsoever, whether special, indirect, consequential, or compensatory, directly or indirectly resulting from the publication, use of application, or reliance on this document. KWB disclaims and makes no guaranty or warranty, expressed or implied, as to the accuracy or completeness of any information published herein. It is expressly pointed out that the information and results given in this publication may be out of date due to subsequent modifications. In addition, KWB disclaims and makes no warranty that the information in this document will fulfill any of your particular purposes or needs. The disclaimer on hand neither seeks to restrict nor to exclude KWB's liability against all relevant national statutory provisions.

Wichtiger rechtlicher Hinweis

Haftungsausschluss: Die in dieser Publikation bereitgestellte Information wurde zum Zeitpunkt der Erstellung im Konsens mit den bei Entwicklung und Anfertigung des Dokumentes beteiligten Personen als technisch einwandfrei befunden. KWB schließt vollumfänglich die Haftung für jegliche Personen-, Sach- oder sonstige Schäden aus, ungeachtet ob diese speziell, indirekt, nachfolgend oder kompensatorisch, mittelbar oder unmittelbar sind oder direkt oder indirekt von dieser Publikation, einer Anwendung oder dem Vertrauen in dieses Dokument herrühren. KWB übernimmt keine Garantie und macht keine Zusicherungen ausdrücklicher oder stillschweigender Art bezüglich der Richtigkeit oder Vollständigkeit jeglicher Information hierin. Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die in der Publikation gegebenen Informationen und Ergebnisse aufgrund nachfolgender Änderungen nicht mehr aktuell sein können. Weiterhin lehnt KWB die Haftung ab und übernimmt keine Garantie, dass die in diesem Dokument enthaltenen Informationen der Erfüllung Ihrer besonderen Zwecke oder Ansprüche dienlich sind. Mit der vorliegenden Haftungsausschlussklausel wird weder bezweckt, die Haftung der KWB entgegen den einschlägigen nationalen Rechtsvorschriften einzuschränken noch sie in Fällen auszuschließen, in denen ein Ausschluss nach diesen Rechtsvorschriften nicht möglich ist.

Impressum

Dieser Bericht wurde nach den Vorgaben des Qualitätsmanagements gemäß DIN EN ISO 9001:2008 erarbeitet.

Titel

Abschlussbericht Phosphorpotenziale im Land Berlin

Projekt Akronym

P-POT

Laufzeit

01.03.2013 bis 31.01.2014

Autoren

Dr. Christian Kabbe

Daphne Bäger

Raoul Mancke

Qualitätssicherung

Dr. Christian Kabbe, Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH

Sabine Dornbusch, B.&S.U. Beratungs- und Service-Gesellschaft Umwelt mbH

Endfassung

Datum: 25.03.2014

Danksagung

An dieser Stelle möchten wir all jenen danken, die uns bei der Durchführung dieses Vorhabens unterstützt haben.

Besonderer Dank gilt all jenen, die sich die Mühe gemacht haben, unseren Fragebogen auszufüllen und uns beim Sortieren und Bilanzieren mit Rat und Tat zur Seite standen.

Der Berliner Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt möchten wir danken für die fachliche Begutachtung und Unterstützung des Projektes, sowie auch für ihr Interesse am Projektverlauf und dessen Ergebnissen.

Bei Frau Dornbusch und Frau Eisenhuth von B.&S.U. danken wir für die kompetente und angenehme Zusammenarbeit in allen administrativen und finanziellen Fragen zu den Fördermitteln aus dem Umweltentlastungsprogramm.

Inhaltsverzeichnis

Veranlassung	7
Die Ressource Phosphor.....	7
Berlin als urbane Region.....	7
Darstellung der Vorgehensweise	9
Identifizierung der relevanten Stoffströme.....	9
Datenerhebung.....	9
Phosphorinput Berlin	10
Mineraldünger.....	10
Phosphorhaltige Erzeugnisse.....	10
Konsum.....	11
Phosphoroutput Berlin	15
Abwasserpfad	15
Organikabfälle	17
Wirtschaftsdünger	20
Tierische Nebenprodukte	20
Holzasche.....	21
Sonstige Abfälle.....	21
Potenzialanalyse und Bewertung	23
Qualitäten des Phosphors in den relevanten Stoffströmen.....	26
Synergien beim P-Recycling.....	27
Darstellung von passenden P-Recycling-Optionen	28
Handlungsempfehlungen	32
Zusammenfassung und Ausblick	34
Literaturverzeichnis	36
Anhang	38

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prozentuale Aufteilung der Flächennutzung des Landes Berlin, Stand 31.12.2012	8
Abbildung 2: Prozentuale Aufteilung der Flächennutzung Deutschlands, Stand 31.12.2012.....	8
Abbildung 3: Phosphorfracht in den Klärwerken der Berliner Wasserbetriebe, 2012	14
Abbildung 4: Darstellung der Klärschlamm-trockenmassen und deren Entsorgungswege, Berlin 2012/15	
Abbildung 5: Phosphorfrachten in den Klärschlamm-trockenmassen und im Ablauf, Berlin 2012	16
Abbildung 6: Darstellung der Restabfallmengen und deren Entsorgungswege, Berlin 2012	18
Abbildung 7: Darstellung der Organikabfallmengen und deren Entsorgungswege, Berlin 2010/2012	19
Abbildung 8: Darstellung der relevanten Phosphorströme in Berlin	23
Abbildung 9: Gegenüberstellung des In- und Outputs von Phosphor im Land Berlin	25
Abbildung 10: Ansatzpunkte für Phosphorrückgewinnung während bzw. nach der Abwasserbehandlung	28
Abbildung 11: AirPrex [®] -Anlage im Klärwerk Waßmannsdorf, Kabbe [®]	29
Abbildung 12: Klärschlamm-Monoverbrennungsanlage Ruhleben, Donat [®]	31
Abbildung 13: Gesamtes P-Recyclingpotenzial im Land Berlin	35

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Absatzmengen phosphorhaltiger Mineraldünger in Berlin im Wirtschaftsjahr 2012/13.....	10
Tabelle 2: Ein- und Ausfuhr phosphorhaltiger Erzeugnisse der Industrie in Berlin 2012.....	10
Tabelle 3: Durchschnittliche Verzehrsmengen in g/d nach Altersgruppen und Phosphorgehalte der verschiedenen Lebensmittel	12
Tabelle 4: Verbrauchsmenge von Phosphor durch Detergenzien, 2010.....	13
Tabelle 5: Zusammenfassung der Phosphorpotenziale im Klärschlamm.....	17
Tabelle 6: Zusammenfassung der Phosphorpotenziale in Organikabfällen	19
Tabelle 7: Zusammenfassung der Phosphorpotenziale im Wirtschaftsdünger	20
Tabelle 8: Zusammenfassung der Phosphorpotenziale in Holzaschen	21
Tabelle 9: Zusammenfassung des gesamten Phosphorpotenzials in Berlin.....	26
Tabelle 10: Gesamtes P-Recyclingpotenzial im Land Berlin	35
Tabelle 11: Liste der kontaktierten Unternehmen.....	40

Verzeichnis der Abkürzungen

AbfKlärV	Klärschlammverordnung (Entwurf BMUB)
AbfPhosV	Phosphatrückgewinnungsverordnung (Entwurf BMUB)
BHKW	Biomasseheizkraftwerk
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
EW	Einwohnerwert
HHKW	Holzheizkraftwerk
KW	Kraftwerk
MA	Mechanische Aufbereitungsanlage
MAP	Magnesium-Ammonium-Phosphat (mineralogisch: Struvit)
Mg	Megagramm (= 10^6 g) = 1 metrische Tonne
MHKW	Müllheizkraftwerk
MPS	Mechanisch-Physikalische Stabilisierungsanlage
P	Phosphor
P ₂ O ₅	Di-Phosphorpentoxid
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals
TM	Trockenmasse
TR	Trockenrückstand
ZW	Zementwerk

Veranlassung

Die Ressource Phosphor

“Life can multiply until all the phosphorus is gone, and then there is an inexorable halt which nothing can prevent. We may be able to substitute nuclear power for coal, and plastics for wood, and yeast for meat, and friendliness for isolation—but for phosphorus there is neither substitute nor replacement.” Schon Isaac Asimov erklärte die Bedeutung der Ressource Phosphor und bezeichnete sie als „life’s bottleneck“ in seinem gleichnamigen Essay von 1959.

Phosphor gehört zu den wichtigsten Nährstoffen des Ökosystems Erde. Er ist ein unersetzlicher Baustein für alles Leben und stellt einen limitierenden Faktor für das Biomassepotential des Planeten Erde dar.

Industriell werden Phosphaterze in Lagerstätten abgebaut, welche endlich und, sofern sedimentären Ursprungs, zunehmend mit toxischen Metallen wie Cadmium und Uran belastet sind. Durch das stetige Wachstum der Erdbevölkerung, wachsenden Wohlstand und dem damit einhergehendem steigenden Fleischkonsum, sowie den vermehrten Anbau von Pflanzen zur Energieproduktion steigt der Phosphorbedarf. Übersteigt der Phosphorbedarf die Abbau-, Aufbereitungs- bzw. Lieferkapazitäten, kommt es zu Engpässen, die unter anderem Auswirkungen auf die Ernährungssicherheit der importabhängigen Länder haben können. Da Deutschland keine natürlichen Phosphatvorkommen besitzt, muss jährlich eine enorme Menge an mineralisch gebundenen Phosphor importiert werden. In Form von phosphathaltigen mineralischen Düngemitteln wurden im Wirtschaftsjahr 2012/2013 rund 124.000 Mg P in der Landwirtschaft in Deutschland verwendet. Diese Menge müsste noch deutlich höher sein, wenn nicht bereits ein noch größerer Teil des Phosphatbedarfs der landwirtschaftlichen Nutzflächen mit Wirtschaftsdüngern und anderen organischen Reststoffen gedeckt würde.

Um langfristig die Phosphatversorgung und damit die Ernährungssicherheit Deutschlands sicherzustellen, sollten neben Einsparpotenzialen bei der Verwendung auch Recyclingpotenziale nicht nur identifiziert und diskutiert, sondern auch ausgeschöpft werden. Seit mehreren Jahren gibt es umfangreiche Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet. Das Projekt Phosphorpotenziale im Land Berlin soll nun Aufschluss über die Phosphorströme in Berlin und deren Potenzial zur Rückgewinnung geben.

Berlin als urbane Region

Im Beschluss des Bundesrates vom 20. September 2013 wird die Bundesregierung gebeten eine Vorreiterrolle zu übernehmen und auf nationaler Ebene erforderliche Maßnahmen für eine nachhaltige Verwendung von Phosphor zu ergreifen und Maßnahmen zu seiner Rückgewinnung voranzutreiben.

Für das System Deutschland wurden bereits verschiedene Studien und Potenzialanalysen für Phosphorströme durchgeführt. Aufgrund der verschiedenen Gegebenheiten, unterscheiden sich die Potenziale für ländliche und urbane Regionen.

Berlin besitzt eine Gesamtfläche von 89.176 ha, von denen rund 57 % Siedlungs- und Verkehrsfläche sind. Rund 14 % der Fläche Berlins sind öffentliche Grünfläche und nur 4 % unterliegen einer landwirtschaftlichen Nutzung [SenStadtUm 2013].

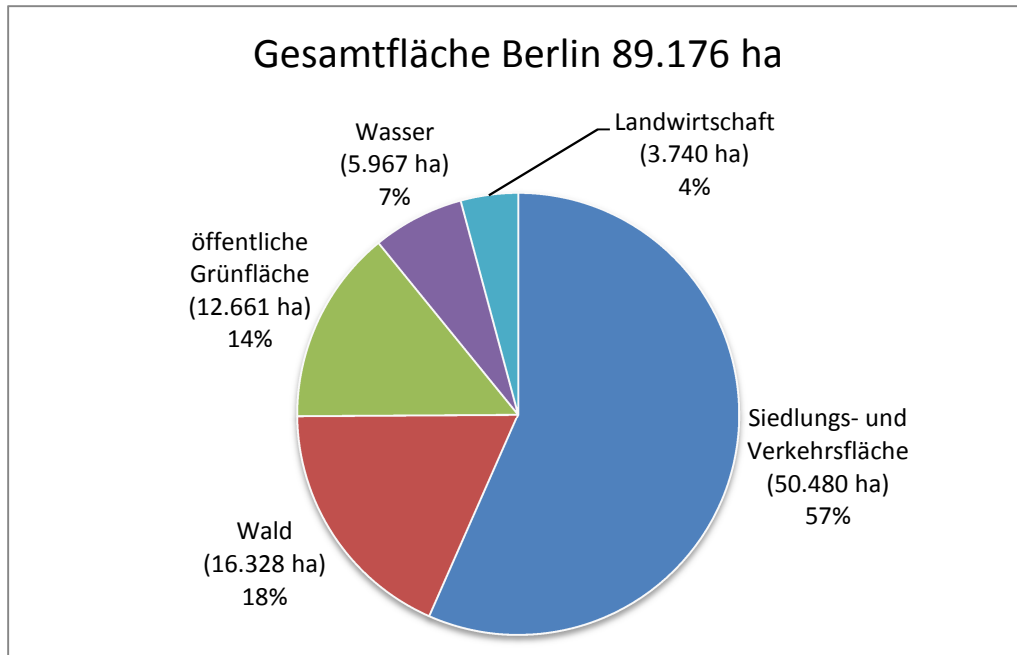


Abbildung 1: Prozentuale Aufteilung der Flächennutzung des Landes Berlin, Stand 31.12.2012

Vergleicht man die Flächennutzung mit der gesamten in Deutschland vorherrschenden Aufteilung, wird der urbane Charakter Berlins deutlich. In ganz Deutschland werden mehr als 50 % des gesamten Territoriums von 357.169 km² landwirtschaftlich genutzt [Destatis 2013a].

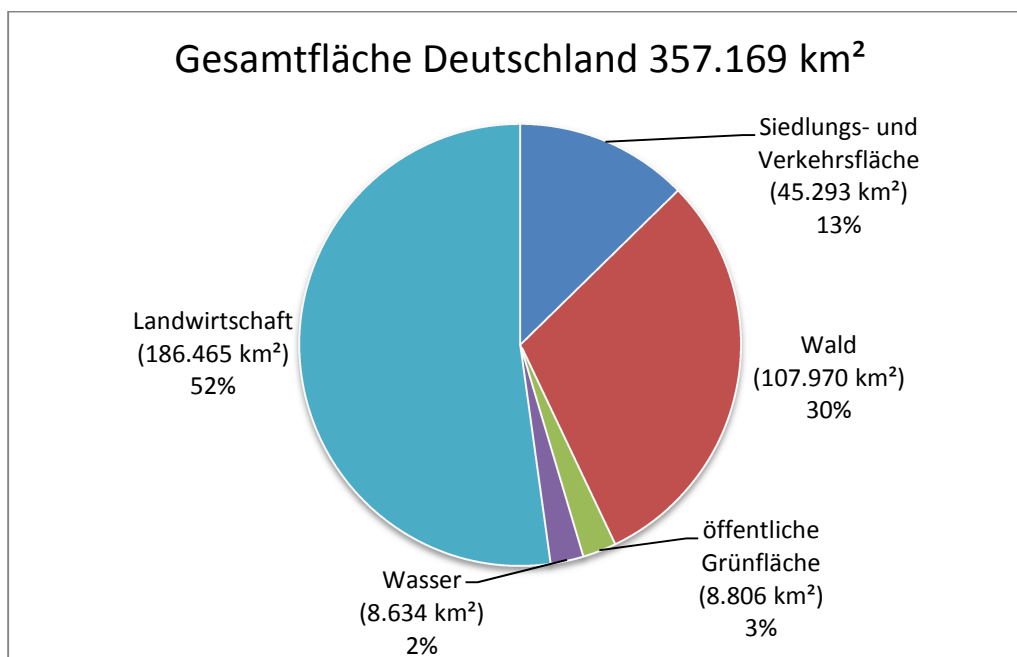


Abbildung 2: Prozentuale Aufteilung der Flächennutzung Deutschlands, Stand 31.12.2012

Durch den geringen Anteil der landwirtschaftlich genutzten Fläche und die hohe Bevölkerungsdichte ergeben sich relevante Phosphorströme, die sich von denen aus ländlichen Regionen stark unterscheiden können. Im Folgenden werden Ansatzpunkte für Berlin identifiziert und analysiert, um Empfehlungen zur Phosphorrückgewinnung im Sinne einer Kreislaufwirtschaft für urbane Regionen, wie das Land Berlin, geben zu können.

Darstellung der Vorgehensweise

Identifizierung der relevanten Stoffströme

In der durchzuführenden Potenzialstudie wurden unter Berücksichtigung regionaler Gegebenheiten verschiedene Phosphorströme identifiziert und hinsichtlich ihres Phosphorrückgewinnungspotenzials bewertet. Aufgrund des landwirtschaftlichen Einsatzes als Düngemittel und der Anwendung in der Industrie, wurde der Phosphorbedarf für Berlin differenziert ermittelt.

Das System Berlin setzt sich aus den Untersystemen Konsum, Abwasserbehandlung, Abfallverwertung, Landwirtschaft mit Tierhaltung und Pflanzenproduktion sowie chemische Industrie zusammen.

Datenerhebung

Um möglichst alle relevanten Stoffströme realitätsnah erfassen zu können, wurde ein Fragebogen erstellt, der an die wichtigsten Unternehmen und Institutionen der verschiedenen Wirtschaftszweige versandt wurde. In diesem Fragebogen wurden die Befragten dazu aufgefordert, die Stoff- bzw. Abfallmengen, die sie sammeln oder beziehen sowie vertreiben oder entsorgen, anzugeben. Außerdem wurden weitere Informationen erfragt, wie Phosphorgehalt und Aggregatzustand. Die abgefragten Stoff- bzw. Abfallarten wurden für die jeweiligen Branchen angepasst. Ein Beispiel für einen vollständigen Fragebogen ist Anhang 1 zu entnehmen. Mit großem Aufwand wurden insgesamt 85 Unternehmen als relevant identifiziert und angeschrieben. Eine Liste der kontaktierten Unternehmen befindet sich im Anhang 2. Nach ersten Reaktionen von einzelnen Angeschriebenen wurde der Fragebogen nochmals überarbeitet und ein zweites Mal verschickt. Neben einem erklärenden Anschreiben zum Sinn und Zweck der Abfrage inklusive der Bitte um Unterstützung, wurde die Abfrage durch ein Schreiben der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt unterstützt. Aufgrund des dennoch verhältnismäßig geringen Rücklaufs wurden die Angeschriebenen auch telefonisch kontaktiert und um Unterstützung gebeten. Trotz allem haben nur etwa 15 % der Befragten geantwortet, unter denen sich jedoch die für eine Potenzialstudie wichtigsten Unternehmen Berliner Wasserbetriebe (BWB) und Berliner Stadtreinigung (BSR) befinden. Aufgrund des spärlichen Rücklaufs mussten die noch bestehenden Informationslücken mit Hilfe von Literatur, anderen Studien und Erfahrungswerten geschlossen werden.

Verschiedene statistische Erhebungen dienten ebenfalls als Datengrundlage zur Bestimmung einzelner Phosphorströme. Da nicht in jedem Fall detaillierte Daten zu den Phosphormengen vorliegen, wurden diese im Allgemeinen über das Produkt der gesamten Stoffmenge und dem jeweiligen Phosphorgehalt errechnet.

Phosphorinput Berlin

Mineraldünger

Der weltweit aus Rohphosphat gewonnene Phosphor wird hauptsächlich (82 %) zur Produktion von mineralischen Düngemitteln für den Einsatz in der Landwirtschaft verwendet. Außerdem wird ein Teil als Zusatzstoff in der Futter- und Nahrungsmittelindustrie (10 %) sowie in der chemischen Industrie (8 %) für Produkte wie Reinigungs- und Waschmittel, Pharmazeutika oder Gusslegierungen genutzt [Schröder et al. 2010].

Im Wirtschaftsjahr 2012/2013 wurden in Deutschland phosphathaltige Düngemittel mineralischen Ursprungs für die Land- und Forstwirtschaft sowie für den Gartenbau mit einem Phosphatgehalt von insgesamt 284.168 Mg P₂O₅ (≈124.073 Mg P) abgesetzt, davon 195 Mg P₂O₅ in Berlin [Destatis, 2013b]. Diese Daten können als zuverlässig angesehen werden, da es sich um eine Totalerhebung des statistischen Bundesamtes handelt. Es ist zu beachten, dass die angegebene Menge nicht identisch mit dem tatsächlichen Verbrauch ist. Absatz und Verbrauch können zum Beispiel durch Lagerung voneinander abweichen. Außerdem kann der Absatz in andere Bundesländer erfolgen, indem Absatzorganisationen an Endverbraucher liefern.

	Absatzmenge [Mg P ₂ O ₅]	Absatzmenge [Mg P]
phosphathaltige Mineraldünger	195	85
davon Superphosphat	62	27
PK-Dünger	60	26
NP-Dünger	55	24
NPK-Dünger	18	8

Tabelle 1: Absatzmengen phosphorhaltiger Mineraldünger in Berlin im Wirtschaftsjahr 2012/13

Phosphorhaltige Erzeugnisse

Folgende phosphorhaltigen Erzeugnisse wurden für den Einsatz in der chemischen Industrie sowie in der Futter- und Nahrungsmittelindustrie nach Berlin importiert bzw. von dort exportiert [Destatis 2013c].

	Einfuhr [Mg]	Ausfuhr [Mg]	P-Gehalt ¹ [%]	Einfuhr [Mg P]	Ausfuhr [Mg P]
Phosphorsäure und Polyphosphorsäure (in P₂O₅)	0,266	0,0018	44	0,117	0,0007
Phosphinate und Phosphonate	660,8	-	12-36	79-238	-
Phosphate	11,2	3,6	-	1,5-2,4	0,4-0,5
- Mononatriumdihydrogenphosphat	0	0,8	26	0	0,2
- Kaliumphosphate	10,3	1,3	15-23	1,5-2,4	0,2-0,3
- Calciumhydrogenorthophosphat	-	0	23	-	0
- andere	0,9	1,5	- ²	-	-
Polyphosphate	4,1	0,2	20-25	0,8-1,0	0,04-0,05
Summe	676,4	3,8	-	81,4-241,5	0,4-0,6

Tabelle 2: Ein- und Ausfuhr phosphorhaltiger Erzeugnisse der Industrie in Berlin 2012

¹P-Gehalte der gängigsten Verbindungen

²keine nähere Bestimmung der Schwankungsbreite möglich

Da die Phosphorkonzentrationen der verschiedenen phosphorhaltigen Erzeugnisse starke Unterschiede aufweisen können, wurde die Schwankungsbreite der jeweils gängigsten Verbindungen angegeben. Für die weitere Betrachtung wurde der jeweilige Mittelwert der Ein- und Ausfuhrmengen an Phosphor bestimmt und verwendet. Vereinfacht ergeben sich folglich 161 Mg P für die Einfuhr und 0,5 Mg P für die Ausfuhr von phosphorhaltigen Erzeugnissen. Allerdings muss einschränkend gesagt werden, dass diese Vorgehensweise offenbar zu einer Unterschätzung der importierten P-Mengen in phosphorhaltigen Erzeugnissen führt. Ein Indiz dafür ist der rechnerisch bestimmte Anteil der Indirekteinleiter (356 Mg P) an der P-Gesamtfracht im Abwasser. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Realwert zwischen diesen Werten liegt. Für eine genauere Bestimmung müsste der Parameter Phosphor in die umfassende Indirekteinleiterüberwachung integriert werden.

Konsum

Die Gesellschaften für Ernährung in Deutschland (DGE), Österreich (ÖGE) und Schweiz (SGE/SVE) geben gemeinsam Referenzwerte für die Nährstoffzufuhr durch Nahrungsaufnahme heraus. Diese Empfehlungen werden als D-A-CH-Referenzwerte bezeichnet. Für 19- bis 65-Jährige wird eine tägliche Phosphorzufuhr von 700 mg empfohlen. Schwangere und Kinder bzw. Jugendliche benötigen eine höhere Zufuhr. Phosphor ist in nahezu allen Nahrungsmitteln enthalten, wodurch es sehr selten zu einem Phosphormangel kommt. Lebensmittel mit besonders hohen Phosphorgehalten sind eiweißhaltige Produkte, wie Fleisch, Fisch, Milch sowie Milchprodukte, und auch Brot sowie Getreide.

Basierend auf der 2008 veröffentlichten Nationalen Verzehrstudie konsumieren die Berliner Einwohner Nahrungsmittel einer Menge von durchschnittlich 3.950 g/d mit Getränken und 1.470 g/d ohne Getränke [NVSII 2008]. In dieser Studie ist ebenfalls die Nährstoffzufuhr durch den Lebensmittelverzehr für verschiedene Nährstoffe aufgeschlüsselt. Da jedoch Phosphor nicht explizit aufgeführt wurde, musste der Phosphorkonsum über geschätzte Phosphorgehalte der einzelnen Nahrungsmittel ermittelt werden. Außerdem wurde für Altersgruppen von 14- bis 80-Jährige die Verzehrmenge differenziert aufgeführt. Mithilfe der Bevölkerungszahlen unterteilt nach Altersgruppen [Destatis 2013d] und unter Annahme von einem insgesamt halben Nahrungsmittel- bzw. Phosphorverzehr für 0- bis 14-Jährige und über 80-Jährige ergibt sich eine gesamte Phosphoraufnahme durch die Nahrung von rund 1.833 Mg P/a im Land Berlin. Die genaue Aufschlüsselung der Lebensmittelmengen und die verwendeten Phosphorkonzentrationen sind Tabelle 3 zu entnehmen. Überflüssiger Phosphor wird wieder ausgeschieden und somit über die kommunale Abwasserbehandlung erfasst. Aufgrund der Tatsache, dass über die Berliner Wasserbetriebe ebenfalls Abwasser von rund 535.000 Einwohnern Brandenburgs entsorgt wird, ergibt sich eine zusätzliche Phosphorfracht im Zulauf der Berliner Kläranlagen von 283 Mg P/a als Beitrag der Brandenburger Bevölkerung.

Phosphorpotenziale im Land Berlin

Altersgruppe [Jahre]		14-18	19-24	25-34	35-50	51-64	65-80	P-Gehalt ¹ [%]
Brot	Männer	185	165	179	186	181	172	0,2
	Frauen	145	121	132	135	136	136	
Backwaren	Männer	61	61	54	47	38	35	0,4
	Frauen	39	38	39	34	31	28	
Getreide	Männer	110	117	112	94	66	51	0,3
	Frauen	90	99	96	81	57	44	
Gemüse	Männer	171	190	208	230	243	232	0,1
	Frauen	195	200	228	260	266	234	
Kartoffel	Männer	87	98	83	89	89	105	0,3
	Frauen	67	62	68	68	72	84	
Obst	Männer	175	161	180	217	275	298	0,015
	Frauen	225	212	249	259	330	317	
Fette und Öle	Männer	25	23	28	30	31	30	0,001
	Frauen	17	16	18	20	20	22	
Molkereiprodukte	Männer	353	310	295	261	233	229	0,51
	Frauen	258	267	250	236	240	241	
Eier	Männer	21	26	22	21	19	19	0,18
	Frauen	17	14	17	17	17	16	
Fleisch- und Fischprodukte	Männer	196	235	210	197	173	150	0,2
	Frauen	105	105	111	110	110	96	
Suppen und Eintöpfe	Männer	69	77	85	88	94	117	_2
	Frauen	49	68	72	70	76	95	
Süßwaren	Männer	68	52	63	58	48	44	0,2
	Frauen	61	55	56	50	41	39	
Knabberartikel	Männer	13	11	11	9	6	3	0,4
	Frauen	8	7	7	6	4	2	
Wasser	Männer	1.069	1.271	1.146	1.159	1.082	956	0
	Frauen	963	1.088	1.135	1.180	1.170	1.031	
Kaffee und Tee	Männer	198	374	672	850	835	778	0,01
	Frauen	278	501	771	952	949	847	
Säfte und Limonade	Männer	994	861	739	504	342	193	0,006
	Frauen	667	549	442	328	223	206	
Alkoholische Getränke	Männer	186	352	269	315	348	306	0,03
	Frauen	56	88	66	86	101	70	

Tabelle 3: Durchschnittliche Verzehrsmengen in g Lebensmittel/d nach Altersgruppen und Phosphorgehalte der verschiedenen Lebensmittel

¹Quelle: <http://www.naehrwertrechner.de/naehrstoffe/phosphor.html>

²keine nähere Bestimmung des Phosphorgehaltes möglich

Die maximal zulässigen Phosphorgehalte in Textilwaschmitteln und Maschinengeschirrspülmitteln für Privatverbraucher sind in der Detergenzienverordnung (EG) Nr. 648/2004 vorgegeben. Darin ist ab dem 30. Juni 2013 für Textilwaschmittel ein Grenzwert von <0,5 g Phosphor pro Waschlading im harten Wasser festgelegt. Da seit Mitte der 1980er Jahre Waschmittel in Deutschland für Privatverbraucher praktisch phosphorfrei sind, hat dies keine Auswirkungen auf die Phosphorfracht im Abwasser. Maschinengeschirrspülmittel dürfen ab dem 1. Januar 2017 maximal 0,3 g Phosphor pro Standardspülgang enthalten. Derzeit ist hier Phosphat noch ein bedeutender Inhaltsstoff, so dass die Beschränkung eine gewisse Einsparung an Phosphor bewirkt. Knapp 10 % der Phosphorfracht in

Haushaltsabwässern sind auf den Eintrag durch Maschinengeschirrspülmittel zurückzuführen [IKW, 2013a]. In Tabelle 4 sind die Einsatzmengen von Phosphor in Detergenzien für das Jahr 2010 in Deutschland aufgeführt [IKW 2013b] und für das Land Berlin hochgerechnet.

Inhaltsstoff	Gesamtmenge [Mg]	Phosphormenge [Mg P]	Verbrauch pro Kopf [g P/EW]	Verbrauch in Berlin [Mg P]
Phosphate ¹	30.226	7.639	93	323
Phosphonate	4.115	494-1481 ²	6-18	21-63
Phosphorsäure	326	103	1	4
Summe	34.667	8.236-9.223	100-112	348-390
Mittelwert	34.667	8.730	106	369

Tabelle 4: Verbrauchsmenge von Phosphor durch Detergenzien, 2010

¹als Pentanatriumtriphosphat (ca. 25 % P)

²P-Gehalt der gängigsten Verbindungen 12 – 36 % P

Für die weitere Betrachtung wurde von einem Mittelwert von 369 Mg P, der in Berlin in Form von Detergenzien verbraucht wurde, ausgegangen.

Tourismus ist in Berlin von Bedeutung. Im Jahr 2012 wurden insgesamt 24.896.201 Übernachtungen in Berliner Beherbergungsbetrieben statistisch erfasst [Destatis 2013e]. Unter Annahme eines Einwohnergleichwertes von 1,8 g P/(d·EW) ergibt sich eine zusätzliche Phosphorfracht im Abwasser von rund 45 Mg P/a. Dieser Wert ist allerdings nicht genau zu spezifizieren, da nicht der gesamte Tourismus über die Beherbergungsbetriebe erfasst wird und auch die Berliner Bevölkerung verreist. Unter Annahme einer urlaubsbedingten Abwesenheit von 14 Tagen pro Berliner Erwerbstätigen und Jahr und dem Einwohnergleichwert von 1,8 g P/(d·EW) fehlt im Abwasser jährlich eine Phosphorfracht von 42 Mg P. Da sich diese Werte gegenseitig nahezu kompensieren, werden die zusätzlichen P-Frachten durch Tourismus bzw. die fehlenden durch Reisende nicht weiter betrachtet.

Mit den Phosphormengen von 2.711 Mg P im Klärschlamm und 90 Mg P, die durchschnittlich pro Jahr in Oberflächengewässer eingeleitet werden [SenStadtUm 2012], ergibt sich mit der bereits recycelten Menge von 40 Mg P im Klärwerk Waßmannsdorf eine Phosphorfracht von insgesamt rund 2.841 Mg P im Zulauf der sechs BWB-Kläranlagen. Laut Umweltbundesamt liegt der Anteil der menschlichen Ausscheidungen an der gesamten Phosphorfracht im kommunalen Abwasser bei 75 %. Die berechnete Phosphoraufnahme durch Nahrungsmittel von insgesamt 2.116 Mg P/a wird nahezu vollständig ausgeschieden. So ergibt sich ein P-Anteil menschlicher Ausscheidungen an der Gesamtfracht von 74,5 %. Ungefähr 10 % der Phosphorfracht werden durch Detergenzien eingetragen [IKW, 2013a]. Mit der berechneten Menge von 369 Mg P, die durch Detergenzien verbraucht wurde, ergibt sich ein Anteil von 13,0 % an der Gesamtfracht im Abwasser. Die errechneten Werte sind somit als verlässlich und realitätsnah anzusehen. Als restliche Phosphorfracht ergeben sich 356 Mg P/a, die auf den Eintrag von indirekt einleitenden Industriebetrieben zurückzuführen wäre. Im Land Berlin gibt es ca. 7.000 Indirekteinleiter. Hier wird Phosphor allerdings nicht flächendeckend erfasst, da er gemäß der Abwasserverordnung in den Teilen D und E der betreffenden Branchenanhänge kein Überwachungswert ist. Folglich können keine genaueren Angaben zum Beitrag der Indirekteinleitungen an der P-Gesamtfracht gemacht werden.

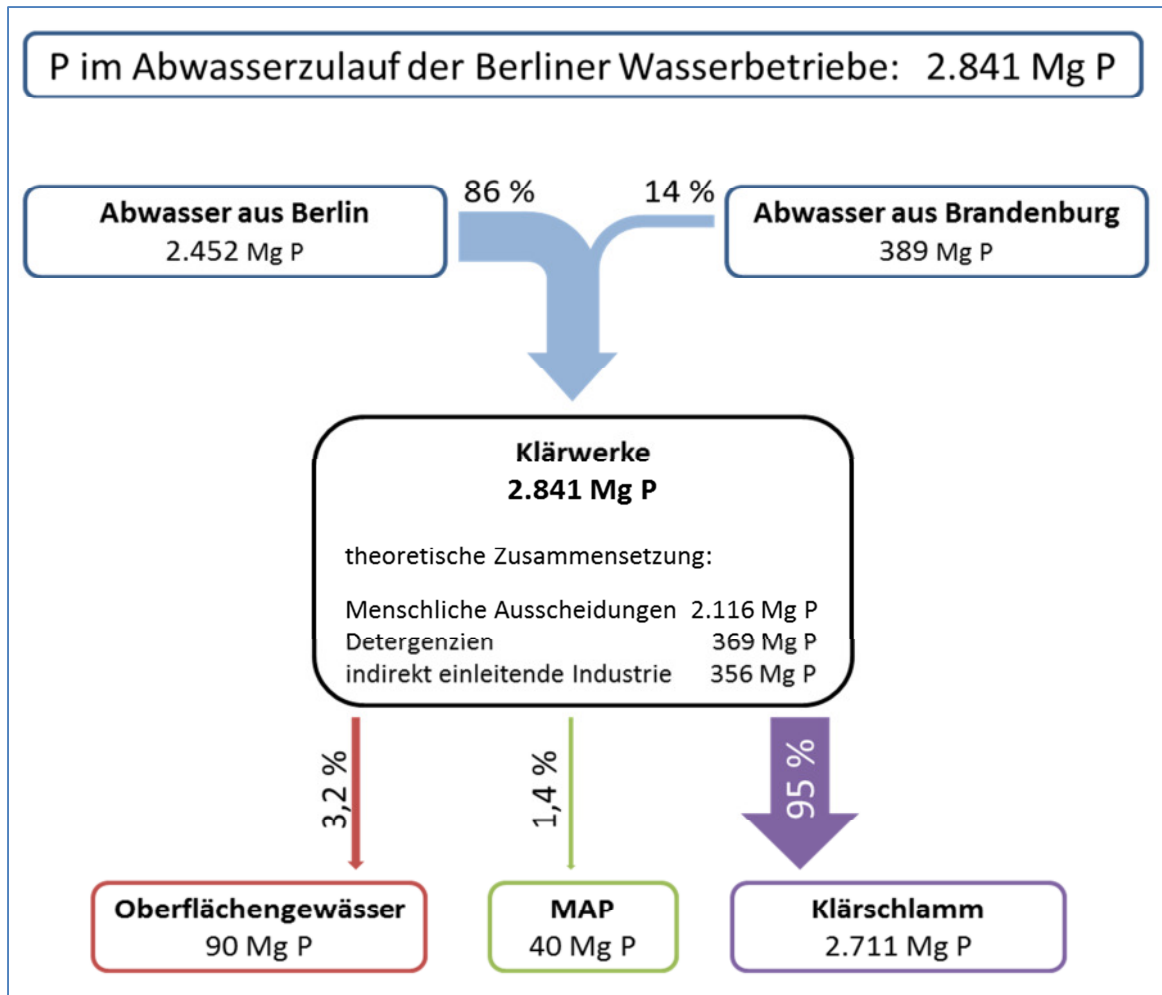


Abbildung 3: Phosphorfracht in den Klärwerken der Berliner Wasserbetriebe, 2012

Es ist zu beachten, dass sich mit der vorliegenden Phosphormenge von 2.841 Mg P/a im Abwasserzulauf der 6 Kläranlagen und der Anzahl angeschlossener Einwohner, die sich aus der Gesamtbevölkerung Berlins von 3.375.222 (Stand: 31.12.2012) [Destatis 2013f] und rund 535.000 Einwohner Brandenburgs zusammensetzt, ein Einwohnerequivalent von 2,0 g P/(d·EW) für Berlin ergibt, der somit höher ist als der üblich angenommene Wert von 1,8 g P/(d·EW). Hieraus wird deutlich, dass eine differenzierte und parameterbezogene Bestimmung des Einwohnerequivalents für die verschiedenen Regionen sinnvoll ist.

Phosphoroutput Berlin

Abwasserpfad

In den sechs von den Berliner Wasserbetrieben betriebenen Kläranlagen wurde im Jahr 2012 eine Gesamtabwassermenge von 231 Mio. m³ gereinigt, wobei eine Klärschlamm-trockenmasse von insgesamt 93.504 Mg anfiel. Der gesamte anfallende Klärschlamm wird thermisch behandelt (verbrannt) und die resultierende Asche anschließend entsorgt. Eine Menge von 55.337 Mg TM (59 %) wird einer Monoverbrennung im Berliner Stadtgebiet (Ruhleben) zugeführt, wobei rund 11.000 Mg Asche anfallen. Die restlichen 38.167 Mg TM (41 %) werden als Ersatzbrennstoff in Kohlekraftwerken und Zementwerken außerhalb Berlins energetisch verwertet. Die Berliner Wasserbetriebe behandeln ebenfalls Abwasser der Brandenburger Bevölkerung im Einzugsgebiet der Kläranlagen. So ist in den angegebenen Mengen der Anteil von rund 535.000 Einwohnern Brandenburgs enthalten. Das entspricht rund 13,7 % der gesamten Anzahl angeschlossener Einwohner.

In der Kläranlage Waßmannsdorf wird bereits ein Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor aus der wässrigen Phase des Klärschlammes angewandt. Unter dem Namen Berliner Pflanze wurden im Jahr 2012 ca. 370 Mg Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP; $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) als Düngesubstrat vermarktet.

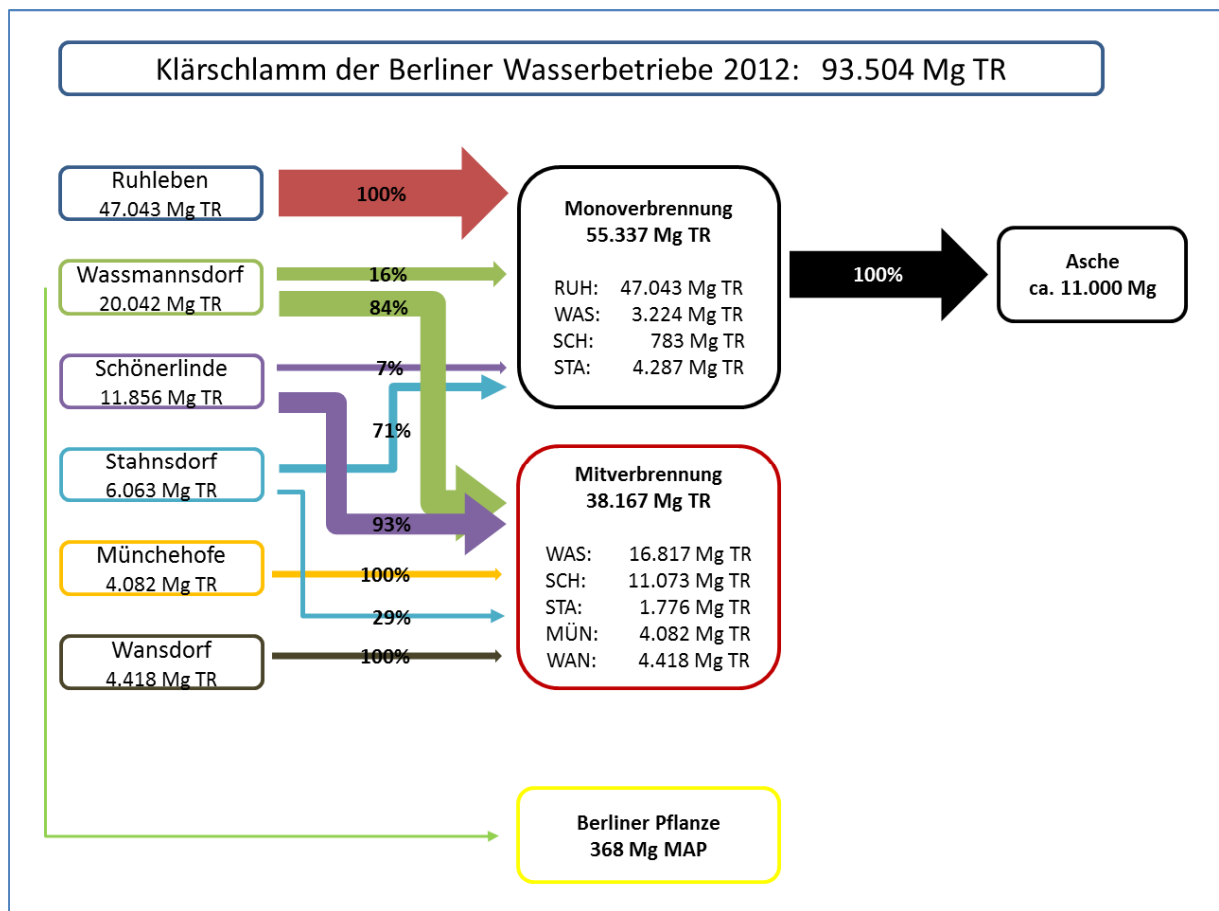


Abbildung 4: Darstellung der Klärschlamm-trockenmassen und deren Entsorgungswege, Berlin 2012

Abbildung 4 zeigt die behandelten Klärschlammengen der einzelnen Kläranlagen und deren Entsorgungswege. Die Daten wurden direkt beim Betreiber der Kläranlagen (Berliner Wasserbetriebe) abgefragt und sind somit als zuverlässig und realitätsnah anzusehen. Außerdem lieferte die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) Daten zu den Phosphorgehalten in der anfallenden Klärschlammmasche, die im Rahmen eines UFOPLAN-Vorhabens (FKZ 3711 33 321) zum deutschlandweiten Klärschlammasschemonitoring ermittelt wurden.

Der Phosphorgehalt der Klärschlamm-trockenmassen in Berlin liegt bei durchschnittlich 3,8 %. Die Kläranlage Ruhleben weist jedoch mit durchschnittlich 2 % eine deutlich geringere Phosphorkonzentration in der Trockenmasse auf, was unter anderem daran liegt, dass der dortige Klärschlamm keiner anaeroben Faulung unterzogen wird. Basierend auf diesen Werten errechnet sich eine gesamte Phosphorfracht im Klärschlamm von insgesamt 2.711 Mg P. In Abbildung 5 sind die Phosphorströme jeder Kläranlage aufgezeigt. Die jährliche Gesamtfracht des Phosphors im Abwasser von 2.841 Mg P unterteilt sich in die im Schlamm verbleibende Menge von 2.711 Mg P, der als MAP (Struvit) zurückgewonnenen Menge von 40 Mg P und den über die Kläranlagenabläufe in die Oberflächengewässer abgeleiteten 90 Mg P.

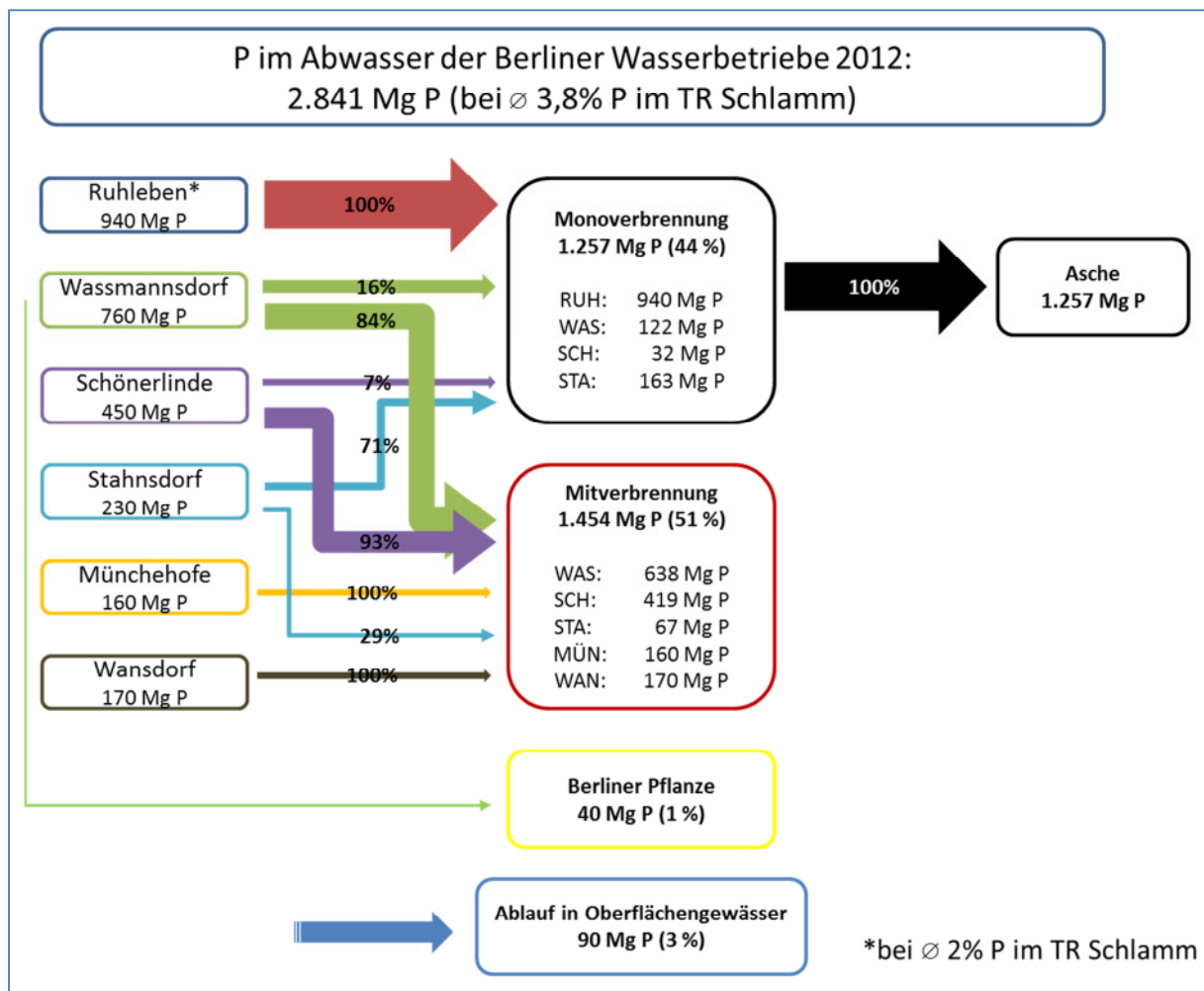


Abbildung 5: Phosphorfrachten in den Klärschlamm-trockenmassen und im Ablauf, Berlin 2012

Die Kombination von Monoverbrennung und gleichzeitiger bzw. nachfolgender Rückgewinnung von Phosphor aus den entstehenden Aschen stellt mit einer Ausbeute > 90 % die effizienteste Möglichkeit von derzeit anwendbaren Verfahren dar. In Berlin fallen etwa 11.000 Mg Klärschlammmasche mit

einem durchschnittlichen P-Gehalt von 12 % und einer daraus resultierenden Phosphorfracht von 1.257 Mg P aus der Monoverbrennung an. Mit einer Ausbeute von 90 % ergibt sich ein Rückgewinnungspotenzial von 1.131 Mg Phosphor.

Die Klärschlämme, die zur Mitverbrennung in Kraftwerken bzw. Zementwerken genutzt werden, sind aufgrund der Verdünnung durch Vermischung mit phosphatarmen Stoffströmen nicht zur Phosphorrückgewinnung geeignet. Da der Phosphorgehalt dieser Mitverbrennungsaschen sehr gering ist, ist eine rentable Rückgewinnung unter derzeitigen Bedingungen nicht gegeben und somit ein wertvolles Phosphorpotenzial verloren.

Würden die gesamten Klärschlammengen einer Monoverbrennung zugeführt werden, ergäbe sich ein Potenzial von 2440 Mg Phosphor in der resultierenden Asche.

	Gesamtmenge TM [Mg]	Davon derzeit in Mono- verbrennung TM [Mg]
Klärschlammmenge in Berlin	93.504	55.337
Phosphorfracht	2.711	1.257
Rückgewinnungspotenzial P ¹	2.440	1.131

Tabelle 5: Zusammenfassung der Phosphorpotenziale im Klärschlamm

¹unter Annahme der derzeitigen Verwertungs-/Entsorgungspraxis

Organikabfälle

Haus- und Geschäftsmüll wird in Berlin überwiegend durch die BSR erfasst und verwertet bzw. entsorgt. Im Jahr 2012 fielen rund 822.120 Mg Haus- und Geschäftsmüll mit einem Organikanteil von 42 % (≈ 345.300 Mg) an [BSR, 2013a]. Dieser wurde im Jahr 2012 zusammen mit anderen Abfallarten als Restmüll über fünf Abfallbehandlungsanlagen verwertet bzw. entsorgt (MHKW Ruhleben, MPS Pankow, MPS Reinickendorf, MA Grünau, Umladestation Süd). Aus der thermischen Behandlung im Müllheizkraftwerk Ruhleben ergaben sich im Jahr 2012 insgesamt 99.000 Mg Asche mit einem Phosphorgehalt von 0,3 % [BSR, 2013a]. Daraus errechnet sich eine Phosphorfracht von 297 Mg P. Da der P-Gehalt der Aschen jedoch sehr gering ist, ist eine wirtschaftlich rentable Rückgewinnung von Phosphor derartiger Aschen derzeit nicht gegeben. Um ein Recycling wirtschaftlich greifbar zu machen, müsste der Organikanteil getrennt von den phosphorarmen Abfällen erfasst werden, sodass keine Verdünnung stattfinden kann. Hier wäre die Option einer gemeinsamen Behandlung mit Klärschlammaschen zu prüfen.

Die Eigenkompostierung von Bio- und Grünabfällen ist in Berlin ein wichtiger Verwertungspfad für Organikabfälle. Insgesamt wurden im Jahr 2010 100.939 Mg organische Küchen- und Gartenabfälle eigenkompostiert. Bei einem Rotteverlust von 65 % werden so jährlich 35.329 Mg Kompost erzeugt [IFEU 2012]. Unter der Annahme eines Phosphatgehalts von 5,1 kg P₂O₅/Mg für Grün- und Biokompost [LK NRW 2012] liegt eine Phosphatfracht von rund 180 Mg P₂O₅ (≈ 79 Mg P) vor.

Im Jahr 2012 wurden 62.230 Mg Organikabfall (BIOGUT) getrennt gesammelt [BSR 2013a] und vollständig in Einfachkompostierungsanlagen im Land Brandenburg verwertet. Organikabfälle aus Haushalten weisen durchschnittlich einen Phosphatgehalt von 0,9 kg P₂O₅/Mg auf [Leifert 2012]. Daraus ergibt sich eine Phosphatfracht von jährlich 56 Mg P₂O₅ (≈ 24 Mg P). Im Juni 2013 wurde eine neue

Vergärungsanlage am Standort Ruhleben in Betrieb genommen, die die rund 60.000 Mg/a Organikabfall zu Biogas vergärt. Die resultierenden Gärreste werden stofflich verwertet.

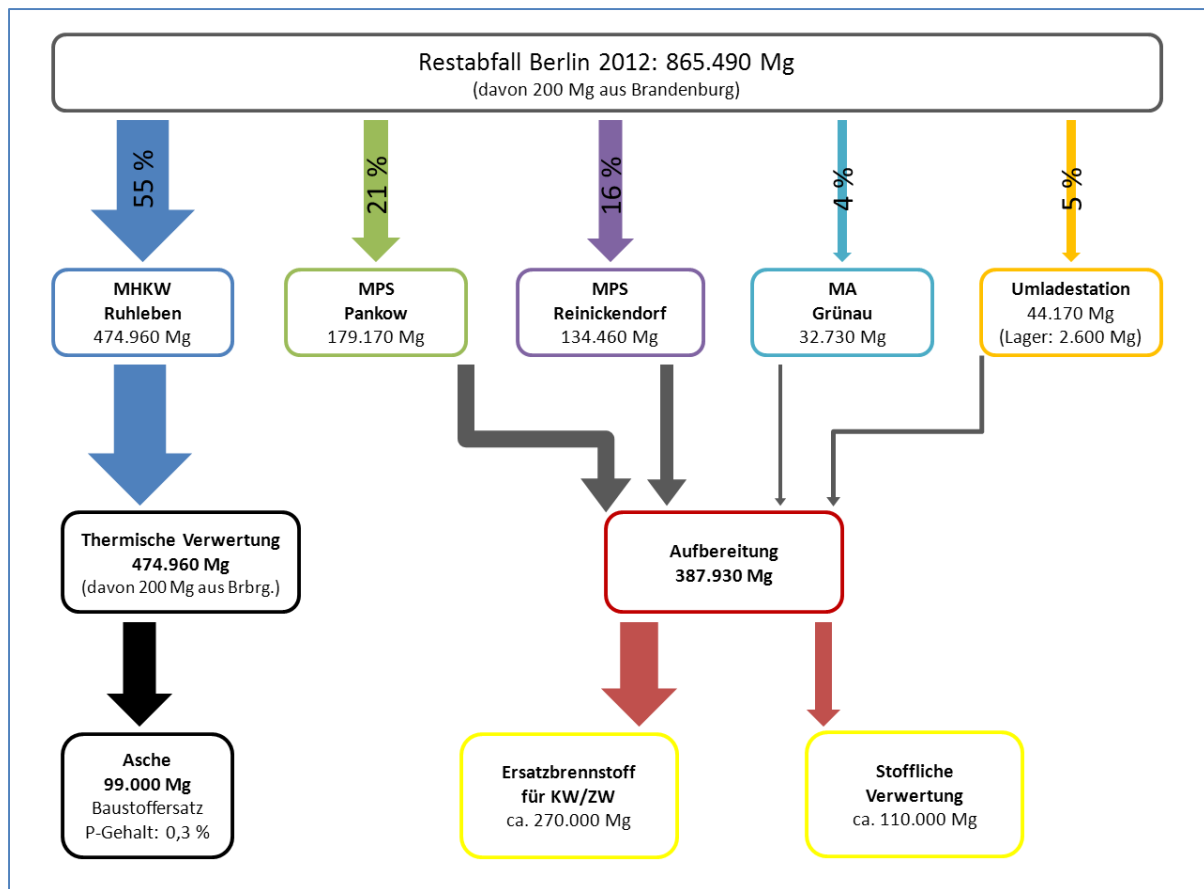


Abbildung 6: Darstellung der Restabfallmengen und deren Entsorgungswege, Berlin 2012

Organikabfälle aus dem Gewerbe betragen im Jahr 2010 insgesamt 74.304 Mg [IFEU 2012]. Dieser setzt sich zusammen aus Speiseresten und Fettabscheiderinhalten, die vor allem in lebensmittelverarbeitenden Betrieben wie Restaurants, Kantinen und ähnlichen anfallen, sowie aus überlagerten Lebensmittelabfällen, die überwiegend aus dem Handel stammen. Der gesamte Organikabfall wird vergoren, wobei die Gärreste in der Landwirtschaft Anwendung finden. Bei einem durchschnittlichen Phosphatgehalt von 1,9 kg P_2O_5 /Mg [Leifert 2012] errechnet sich eine Phosphatfracht von rund 141 Mg P_2O_5 (≈ 62 Mg P).

Straßenlaub und Straßenbegleitgrün werden von der BSR, zusätzliches Laub und Mähgut über die Grünflächenämter der Bezirke und Garten- und Landschaftsbaubetriebe erfasst. Im Jahr 2010 fielen Mengen von 48.357 Mg Grasschnitt und insgesamt 56.395 Mg Laub an [IFEU 2012]. Die gesamte entsorgte Laubmenge und der größte Teil der Grünschnittmengen werden in Einfachkompostierungsanlagen im Land Brandenburg verarbeitet. Eine geringe, stetig sinkende Menge des Grünschnittes wird auf eigenen Kompostplätzen der Bezirke verwertet. Die erzeugte Kompostmenge aus Laub liegt bei ungefähr 38 %, die aus Grünabfall aufgrund des hohen Wasseranteils bei nur 18 %. Unter Annahme eines Phosphatgehaltes im Grünschnittkompost von 3,1 kg P_2O_5 /Mg [LK NRW 2012] lässt sich eine jährliche Phosphatfracht von insgesamt 93 Mg P_2O_5 (≈ 41 Mg P) errechnen.

Phosphorpotenziale im Land Berlin

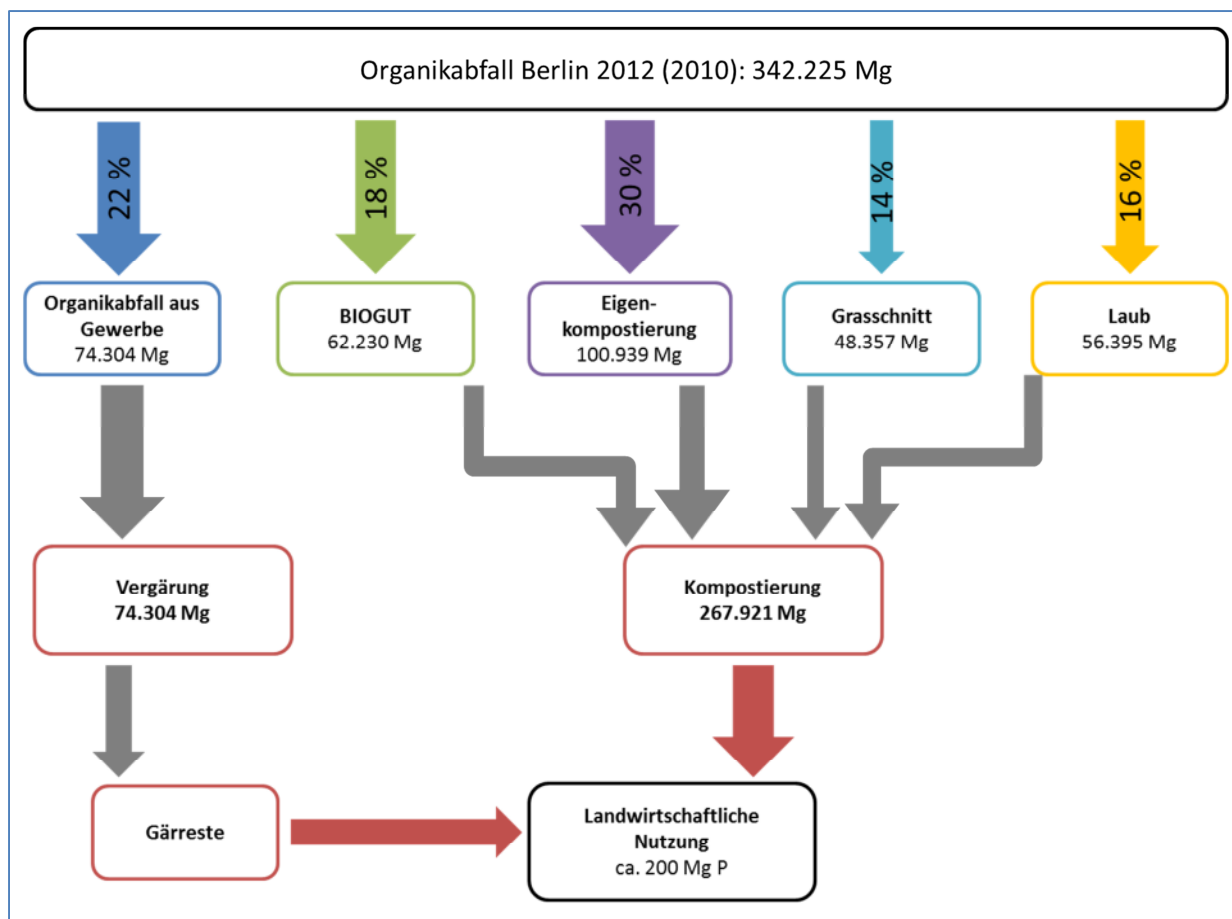


Abbildung 7: Darstellung der Organikabfallmengen und deren Entsorgungswege, Berlin 2010/2012

Da der gesamte, getrennt gesammelte Organikabfall bereits nach der Kompostierung bzw. Vergärung stofflich verwertet wird, ist hier kein zusätzliches Phosphorpotenzial gegeben. Lediglich der Organikanteil im Restmüll weist ein Potenzial auf, welches derzeit nicht stofflich verwertet wird.

	Abfallmenge in Berlin [Mg]	Phosphorfracht [Mg P]	Rückgewinnungspotenzial [Mg P]
Haus- und Geschäftsmüll	822.120	297 ¹	267 ²
		k. A. ³	k. A.
Eigenkompostierung	100.939	79	bereits vollständig recycelt
BIOGUT	62.230	24	
Organikabfall aus Gewerbe	74.304	62	
Grasschnitt	48.357	12	
Laub	56.395	29	

Tabelle 6: Zusammenfassung der Phosphorpotenziale in Organikabfällen

¹Asche aus MHKW Ruhleben

²unter Annahme einer Ausbeute von 90 % bei der Behandlung von Aschen

³Bestimmung des P-Gehaltes des weiteren Restabfalls aufgrund der Heterogenität nicht möglich

Wirtschaftsdünger

Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft sind Festmist, Jauche und Gülle. In Berlin sind organische Rückstände aus der Tierhaltung von geringer Bedeutung. Im Jahr 2012 waren 500 Großvieheinheiten (GV) Rinder erfasst. Schweine- und Schafbestände werden seit 2010 bzw. 2011 in den Stadtstaaten nicht mehr erhoben [Destatis 2013g]. Bei einem Gülleanfall für Rinder von 11,8 Mg/(GV·a) und einem Phosphorgehalt der Rindergülle von 0,8 kg P/m³ errechnet sich eine jährliche Phosphorfracht von rund 4 Mg P [LK NRW 2012], die durch Gülle direkt eingetragen wird. Aufgrund der geringen Anzahl von Rindern und der direkten Ausbringung, kann der Phosphoreintrag durch Rindergülle vernachlässigt werden. Lediglich Pferdemist kommt in größeren Mengen auf. Dieser wird durch Verrottung und einfache offene Kompostierung zu Pferdemist-Kompost verwertet. Bei den Trabrennbahnen Mariendorf und Karlshorst sowie bei diversen Reitställen fielen im Jahr 2010 insgesamt 9.282 Mg Pferdemist bei einem Bestand von rund 1.000 Tieren an [IFEU 2012]. Ein Anteil von rund 70 % des Komposts aus Pferdemist wird in der Landwirtschaft verwertet, die restlichen 30 % gehen zur Erden- und Substratherstellung. Nur ein geringer Teil steht für Kleinabnehmer zur Hausgartendüngung zur Verfügung. Unter Annahme eines durchschnittlichen Phosphatgehaltes von 3,1 kg P₂O₅/Mg [LK NRW 2012] ergibt sich eine Phosphatfracht von jährlich rund 29 Mg P₂O₅ (≈13 Mg P), die bereits einer Kreislaufführung unterliegt.

	Pferdemist [Mg]
Anfallmenge in Berlin	9.282
Phosphorfracht	13
Rückgewinnungspotenzial P	bereits vollständig recycelt

Tabelle 7: Zusammenfassung der Phosphorpotenziale im Wirtschaftsdünger

Tierische Nebenprodukte

Im Jahr 2012 wurden in Deutschland rund 6,6 Mio. Mg Fleisch erzeugt [Destatis 2013h]. Dabei entstehen bei Schlachtung, Zerlegung und Fleischverarbeitung fast 2,9 Mio. Mg tierische Nebenprodukte, die nicht für den menschlichen Verzehr gedacht sind [UBA 2013]. Sie müssen entsprechend den Hygienevorschriften der Verordnung (EG) Nr. 1069/2009 in drei Kategorien eingeteilt und von Verarbeitungsbetrieben für tierische Nebenprodukte behandelt und verwertet werden. Die so gewonnenen Tiermehle der Kategorie 1 werden ausschließlich über eine thermische Behandlung energetisch verwertet und entsorgt. In Folge von Lebensmittelkrisen, wie die BSE Krise in den 1990er Jahren, umfasst Tiermehl der Kategorie 1 Risikomaterial, welches nicht in die Futtermittelkette zurückgeführt werden darf. Tiermehle der Kategorien 2 und 3 werden als Düngemittel oder Heimtierfutter verwendet. Aufgrund der hohen Phosphorkonzentrationen von Tiermehlen der Kategorie 1 (3,1 % P) und Kategorie 3 (6,1 % P) eignen sich diese grundsätzlich zur Rückgewinnung des Phosphors aus den Aschen. Vor allem Material der Kategorie 1 birgt ein Potenzial, da hier der Phosphor nicht bereits über Düngemittel oder Heimtierfutter im Kreislauf geführt wird. Es sollte ein Recycling auch aus diesen Verbrennungsaschen ermöglicht werden, wenn eine vollständige thermische Mineralisierung gewährleistet werden kann.

Im Bundesgebiet liegen Schlachtbetriebe vermehrt in Gebieten mit Viehzucht. Daher kommt es dazu, dass in urbanen Regionen wie Berlin keine Schlachtungen durchgeführt werden [Destatis 2013h]. So fallen keine Schlachtnebenprodukte an, die zur Tiermehlerzeugung verwendet werden können. Zu den Kategorien 1 und 2 gehören unter anderem Tierkörper oder Tierkörperanteile, die BSE-Erreger oder

Rückstände verbotener Stoffe enthalten sowie Tierkörper von Heimtieren und verendete oder zwecks Tilgung einer Tierseuche getötete Tiere. Für die Entsorgung dieser tierischen Nebenprodukte hat das Land Berlin ausschließlich die Firma SecAnim GmbH, eine Tochtergesellschaft der SARIA-Gruppe, beauftragt [SenJustiz 2013]. Um auch diesen Stoffstrom zu erfassen, wurde die SecAnim GmbH gebeten die hergestellten Tiermehlmengen anzugeben. Da keine Auskunft gegeben wurde, wird dieser ohnehin vermutlich nicht mengenrelevante Stoffstrom vernachlässigt.

Holzasche

In Berlin sind im Jahr 2010 rund 230.000 Mg Holz angefallen, die einer energetischen Verwertung zugeführt wurden. Rund 20.000 Mg Holz wurden stofflich verwertet, z. B. für die Herstellung von Spanplatten. Die energetische Verwertung erfolgt über Holzheizkraftwerke (HHKW), Biomasseheizkraftwerke (BHKW) und Kraftwerke (KW). Die Hauptmenge wird im HHKW Rudow zur Erzeugung von Wärme und elektrischem Strom verwertet [IFEU 2012].

Naturbelassenes Holz besitzt mit 0,05 - 0,8 % P in der Trockenmasse einen geringen Phosphorgehalt [Schicker 2003]. Da es sich bei Holz jedoch um einen aschearmen Brennstoff handelt, erfolgt eine Konzentration des Phosphors durch die Verbrennung. Der Aschegehalt verschiedener Holzarten variiert zwischen 1 und 10 % des Holztrockengewichts. Unter Annahme eines über alle Holzsortimente gemittelten Ascheanfalls von 2 % ergibt sich eine Gesamtmenge von 4.600 Mg Asche. Ein üblicher Phosphorgehalt für Holz-Grobaschen beträgt 1,1 % P [P-Studie Bayern 2012]. Daraus ergibt sich eine gesamte Phosphorfracht von rund 51 Mg P und unter Annahme einer Rückgewinnungsquote von 90 % für Aschen ein theoretisches Potenzial von 46 Mg P.

	energetische Verwertung [Mg]
Holzmenge in Berlin	230.000
Phosphorfracht	51
Rückgewinnungspotenzial P	46

Tabelle 8: Zusammenfassung der Phosphorpotenziale in Holzaschen

Sonstige Abfälle

Altdeponien

Im Land Berlin existiert eine Vielzahl von Altdeponien (45), wovon die BSR zwischen 1948 und 1972 38 als Müllabladeplätze betrieb. Siedlungsabfälle wurden auf 33 Standorten und auf den restlichen 5 Standorten vor allem Bauschutt und Trümmer abgeladen [BSR 2013b]. Klärschlamm wurde außerhalb der Stadt auf Rieselfeldern abgelagert. Die Altdeponien werden heute bis auf zwei Standorte in Lichterfelde (Brachgelände) als Park- oder Grünanlage, land- und forstwirtschaftlich bzw. als Laubengelände genutzt. Da in dem oben genannten Zeitraum Lebensmittel knapper und im Verhältnis teurer waren, ist davon auszugehen, dass kaum Lebensmittel über den Hausmüll entsorgt wurden. Aufgrund der vermutlich phosphorarmen Abfälle und der hauptsächlich phosphorzehrenden Nachnutzung, ist hier keine abbauwürdige Phosphormenge zu erwarten.

Baggergut

Baggergut, das bei Arbeiten am und im Gewässer anfallende Boden- bzw. Sedimentmaterial, ist oft durch den Schiffsverkehr stark belastet. Gewässersedimente fungieren als Schadstoffsенке für alle

möglichen Schadstoffquellen im gesamten Gewässereinzugsgebiet. Baggergut wird in Gewässern umgelagert, an Land verwertet oder auf Deponien beseitigt. Für die Verwertung an Land gelten hohe Anforderungen an die chemische Beschaffenheit. Folglich kommt für diesen Verwertungsweg bundesweit gesehen nur ein geringer Teil überhaupt in Frage. Eine Aufbereitung für ein anschließendes Phosphorrecycling wäre hier sehr aufwändig. Für das Land Berlin stehen nur wenige Daten zur Verfügung. Für ein Bauvorhaben am Teltowkanal wurde Nassbaggeraushub gemäß den technischen Regeln für die Verwertung von Mineralischen Abfällen und Reststoffen aus dem Baubereich analysiert. Dabei wurde für das Eluat der Probe eine ortho-Phosphatkonzentration von 0,44 mg/l ($\approx 0,14$ mg P/l) gemessen [AZBA 2013]. Es zeigt sich, dass dem Baggergut als Phosphorquelle im Land Berlin aufgrund der geringen P-Gehalte keine Bedeutung zukommt. Baggergut fällt vor allem in den Küstenregionen in großen Mengen an.

Potenzialanalyse und Bewertung

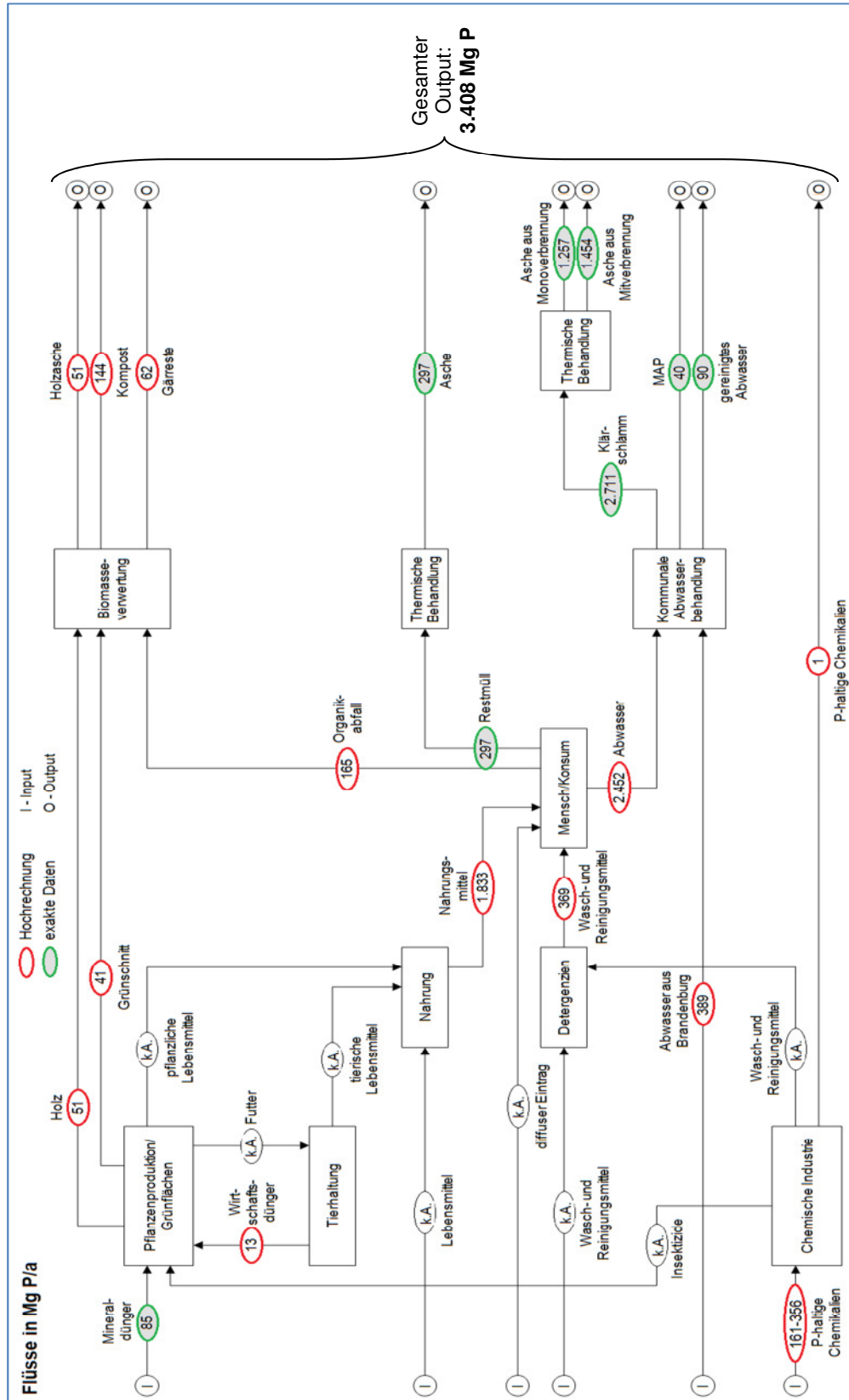


Abbildung 8: Darstellung der relevanten Phosphorströme in Berlin

Die in Abbildung 8 veranschaulichten Phosphorströme stellen eine erste Annäherung dar. Hieraus ist bereits ersichtlich, dass der Abwasserpfad die größten, derzeit ungenutzten Phosphorreserven beinhaltet. Unter dem Aspekt des Phosphorrecyclings bietet die Klärschlammaschenaufbereitung das größte Potenzial, wohingegen der Vorteil der MAP-Gewinnung aus der wässrigen Phase des Klärschlammes eher in den dadurch resultierenden, operativen Vorteilen für die Kläranlagenbetreiber besteht (Vermeidung von Inkrustationen und höherer Entwässerungsgrad). Derzeit wird nur ein geringer Anteil von 1,4 % der gesamten Phosphorfracht im Klärschlamm der sechs Kläranlagen durch das gezielte Ausfällen von MAP recycelt. Im Klärwerk Waßmannsdorf entsprechen die 40 Mg des im MAP enthaltenen Phosphors etwa 5 % der gesamten Phosphorfracht im dortigen Kläranlagenzulauf. Da sich die Anlage noch in der Optimierungsphase (sowohl Partikelgrößen, Abtrennung) befindet, kann davon ausgegangen werden, dass eine Steigerung der Rückgewinnung um mehrere Prozent möglich ist.

Tierhaltung und Fleischproduktion bieten in vielen, meist ländlichen Regionen ein Potenzial. Im Land Berlin kann dieses wegen des geringen Viehbestands und des Fehlens von Schlachtbetrieben vernachlässigt werden. Die Abfallindustrie ist in Berlin dagegen von großer Bedeutung. Hier werden die getrennt gesammelten Organikabfälle jedoch bereits zu Kompost verarbeitet und somit stofflich verwertet. Daher bieten nur die organischen Abfälle im Restmüll, wenn sie getrennt erfasst würden, und Holzaschen ein Rückgewinnungspotenzial. Laut dem Gesetz zur Neuordnung des Kreislaufwirtschafts- und Abfallrechts vom 24. Februar 2012 wird unter anderem die getrennte Sammlung von Bioabfällen ab dem 1. Januar 2015 zur Pflicht. Folglich könnte der derzeitige Organikanteil im Restmüll weitestgehend gesenkt werden und separat einem anschließendem P-Recycling zur Verfügung gestellt werden.

Für die chemische Industrie kann nur eine Spanne der importierten P-Menge angegeben werden, da es hierfür keine genauen Angaben gibt. Die importierten P-Verbindungen werden in Gruppen zusammengefasst, sodass aufgrund der verschiedenen P-Gehalte der einzelnen Verbindungen eine exakte Bestimmung der P-Menge nicht möglich ist. Die Spanne bildet sich aus dem Import von phosphorhaltigen Erzeugnissen basierend auf den Angaben des Statistischen Bundesamtes [Destatis 2013c] und dem berechneten Anteil der Indirekteinleiter an der P-Fracht im Abwasser.

Für eine genauere Aufschlüsselung der Phosphorströme muss zusätzlich die Lebensmittelindustrie in Betracht gezogen werden. Durch Import und Export von Nahrungsmitteln wird ebenfalls Phosphor in das System Berlin hinein bzw. daraus heraus getragen. Für die Ernährungswirtschaft wurden im Jahr 2012 in Berlin Waren im Wert von 1.246.319 Euro eingeführt und im Wert von 1.924.351 € ausgeführt [Destatis 2013i]. Aufgrund der nicht vorhandenen statistischen Daten zu den exakten Mengen, wurde hierauf nicht detailliert eingegangen. Außerdem sind die darin enthaltenen und für ein Recycling relevanten Phosphorfrachten bereits über die Bereiche der Abwasserbehandlung und der Abfallverwertung erfasst, sodass die Mengen der Lebensmittelindustrie für eine Potenzialstudie nicht zwingend einzeln aufgeführt werden müssen.

In Abbildung 9 ist der In- und Output des Landes Berlin dargestellt. Mengen zur Produktion von Nahrungsmitteln werden nicht berücksichtigt, da namhafte Produzenten nicht bereit sind die marktsensiblen Daten zu veröffentlichen. Für die Bestimmung der Phosphorpotenziale sind diese Mengen ohnehin irrelevant. Die Inputmengen indirekt einleitende Industrie und Nahrungsmittelreste bilden den Bilanzausgleich. Der Phosphor im Mineraldünger und der chemischen Industrie verlässt das System wieder über den Organikabfall, der wiederum verbrannt, vergoren bzw. kompostiert wird. In

Phosphorpotenziale im Land Berlin

dieser Abbildung wird sehr deutlich, dass im Land Berlin in den Klärschlämmen das größte Phosphor-Potenzial vorliegt und wovon derzeit nur ein geringer Anteil als MAP in den Nährstoffkreislauf zurückgeführt wird. Jedoch existieren weitere nicht zu vernachlässigende Potenziale im Organikabfall, der zurzeit zusammen mit Restmüll verbrannt wird, sowie in der Aufbereitung von Holzaschen.

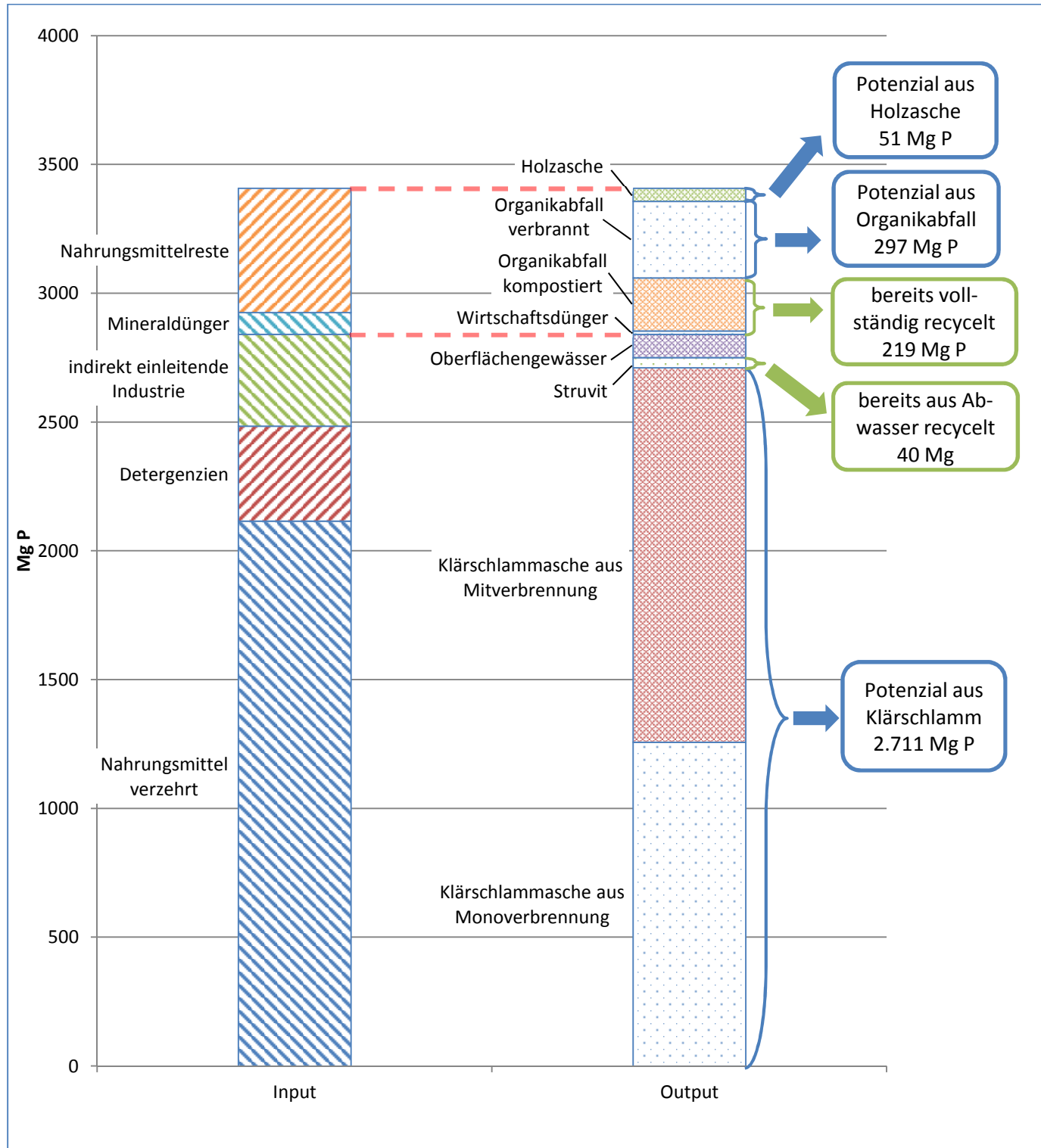


Abbildung 9: Gegenüberstellung des In- und Outputs von Phosphor im Land Berlin

In Tabelle 9 wird deutlich, dass die theoretisch rückgewinnbare Menge von insgesamt 2.753 Mg Phosphor den Bedarf von 195 Mg P_2O_5 Mineraldünger im Land Berlin bei Weitem übersteigt. Da Ber-

lin kaum landwirtschaftlich genutzte Fläche aufweist, ist die benötigte Menge an Düngemitteln vergleichsweise gering. Der zurückgewonnene Phosphor kann jedoch in anderen Regionen, z. B. im Land Brandenburg, landwirtschaftlich genutzt werden. In Brandenburg wurden im Wirtschaftsjahr 2012/2013 phosphathaltige mineralische Düngemittel mit einem Phosphatgehalt von 8.597 Mg P₂O₅ (≈ 3.754 Mg P) abgesetzt [Destatis 2013b]. Der in Berlin recycelbare Phosphor könnte so theoretisch rund 70 % des mineralischen Phosphorbedarfs im Land Brandenburg decken.

Stoffstrom	Phosphorfracht [Mg P/a]	Rückgewinnungspotenzial ¹ [Mg P/a]
Abwasser		
Klärschlammaschen insgesamt	2.711	2.440
Klärschlammaschen aus Monoverbrennung	1.257	1.131
Organikabfälle		
Organik aus Restmüll	297	267
Eigenkompostierung	79	bereits vollständig recycelt
BIOGUT	24	
Organik aus Gewerbe	62	
Grasschnitt und Laub	41	
Wirtschaftsdünger		
Pferdemist	13	bereits vollständig recycelt
Holzasche	51	46
Gesamtes Phosphorpotenzial	-	2.753²

Tabelle 9: Zusammenfassung des gesamten Phosphorpotenzials in Berlin

¹unter Annahme einer Rückgewinnung aus den Aschen mit einer Ausbeute von 90 %

²in der Summe ist der Fall berücksichtigt, dass der gesamte Klärschlamm monoverbrannt wird

Qualitäten des Phosphors in den relevanten Stoffströmen

Neben den Mengen ist ebenfalls die Qualität des Phosphors in den relevanten Stoffströmen eine wichtige Größe zur Einschätzung des Rückgewinnungspotenzials. Jedoch ist Phosphor in den meisten Stoffströmen kein Überwachungswert, so dass eine genauere Aussage schwierig ist. Oft ist nicht bekannt in welcher chemischen Bindungsform der Phosphor vorliegt oder welchen saisonalen Schwankungen sein Aufkommen unterliegt. Meistens ist nur eine Aussage über den Aggregatzustand möglich, ob der Phosphor in der Festphase vorliegt oder sich in Lösung befindet. Ein möglichst bundesweites Monitoring der relevanten Stoffströme hinsichtlich ihres Phosphorgehaltes und der vorliegenden Bindungsformen könnte noch genauere und vor allem realitätsnahe Daten liefern. Wie sich immer wieder zeigt, sind stoffstrombezogene Durchschnittswerte auf nationaler Ebene nur bedingt aussagekräftig und können unter Umständen zu Fehlschlüssen führen. Als Beispiel sei hier der Phosphorgehalt im Klärschlamm genannt, der sehr stark von der Funktionsweise der Kläranlagen abhängt. So ist der P-Gehalt/ Mg TS im Klärschlamm der Kläranlage Ruhleben gerade mal halb so hoch wie in den Schlämmen der restlichen BWB-Kläranlagen, was vor allem durch den Umstand begründet ist, dass der Schlamm in Ruhleben keiner Faulung unterzogen wird, der organische Anteil des Feststoffgehalts des Schlamms also nicht durch biologischen Abbau reduziert wird. Phosphor bleibt im System, wird durch den biologischen Abbau der Organik allenfalls in eine andere Bindungsform überführt.

Grundlage einer effektiven Strategie zur nachhaltigen Nutzung der Ressource Phosphor ist die genaue Kenntnis der Phosphormengen in den verschiedenen Stoff- und Abfallströmen. Als gutes Beispiel sei hier das von der BAM durchgeführte Klärschlammaschemonitoring (UFOPLAN FKZ 3711 33 321) genannt, welches erstmalig Aufschluss über das reale Wertstoffpotential in Klärschlammaschen nach der Monoverbrennung gibt.

Synergien beim P-Recycling

Um eine möglichst effiziente Phosphorrückgewinnung zu gewährleisten, ist es sinnvoll verschiedene Stoffströme zu verknüpfen und so Synergien herzustellen. Allerdings muss dabei darauf geachtet werden, dass der Phosphor in den verschiedenen Stoffströmen in unterschiedlichen Konzentrationen vorliegt oder der Stoffstrom mit Schadstoffen belastet sein kann. So kann ein Recycling bei einer Vermischung zweier relevanter Stoffströme weniger wirtschaftlich bzw. ökologisch weniger sinnvoll werden.

Der Stoffstrom Klärschlamm enthält eine Vielzahl an Schadstoffen, da er als Schadstoffsенke dient. Daher ist eine Verwertung zusammen mit Bioabfällen, zum Beispiel die Beimischung von Klärschlammaschen bei der Kompostierung, nicht sinnvoll, würden doch auf diese Weise in den Aschen konzentrierte Schadstoffe auf landwirtschaftlich genutzte Flächen aufgebracht werden.

Derzeit fallen durch die Klärschlammmonoverbrennung jährlich etwa 11.000 Mg Klärschlammasche an. Die jährliche Abfallmenge an Holzasche liegt bei 4.600 Mg. Da ein eigenständiges P-Recycling der Holzaschen die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen nicht erfüllt, ist das P-Recycling zusammen mit Klärschlammaschen eine theoretisch denkbare Alternative. Die bei der Monoverbrennung in Ruhleben anfallende Klärschlammasche hat einen Phosphorgehalt von etwa 12 %, wohingegen Holzaschen nur 1,1 % P aufweisen. Eine Vermischung beider Stoffströme führt zur Verdünnung. Bei vollständiger Vermischung liegt der P-Gehalt der vermengten Aschen bei ungefähr 8,4 %, was einem Verdünnungsgrad von 30 % entspricht. Die Wirtschaftlichkeit eines solchen P-Recyclings wird damit reduziert. Da die in der Holzasche vorliegende P-Menge nur grob abgeschätzt werden konnte, ist die Beimischung von Holzaschen bei Vorhandensein einer Ascheaufbereitungsanlage für den konkreten Fall zu prüfen.

Tritt jedoch die angedachte Phosphat-Rückgewinnungsverordnung (Vorschlag BMUB) mit dem derzeit diskutierten Verdünnungsverbot ab einem P-Gehalt von 1,2 % in Kraft, ist die oben skizzierte gemeinsame Behandlung von Klärschlamm- und Holzaschen ausgeschlossen. Da die Marke von 1,2 % von verschiedenen Akteuren als zu niedrig angesehen wird, ist davon auszugehen, dass bei Implementierung des Verdünnungsverbotes dieser Wert nicht unterschritten wird.

Darstellung von passenden P-Recycling-Optionen

Die Ermittlung der Phosphorpotenziale in relevanten Abfallströmen im Land Berlin hat offenbart, dass das größte bislang ungenutzte Rückgewinnungspotenzial im Abwasserpfad, genauer im Klärschlamm bzw. in der Klärschlammasche vorliegt.

In kommunalen, wie auch industriellen Kläranlagen kann Phosphor aus der flüssigen Phase, aus Klärschlamm oder nach der thermischen Behandlung aus Klärschlammaschen zurückgewonnen werden [Kabbe 2013]. Die folgende Abbildung 10 veranschaulicht die verschiedenen Hauptpfade und deren Rückgewinnungswirkungsgrade während bzw. nach der Abwasserbehandlung.

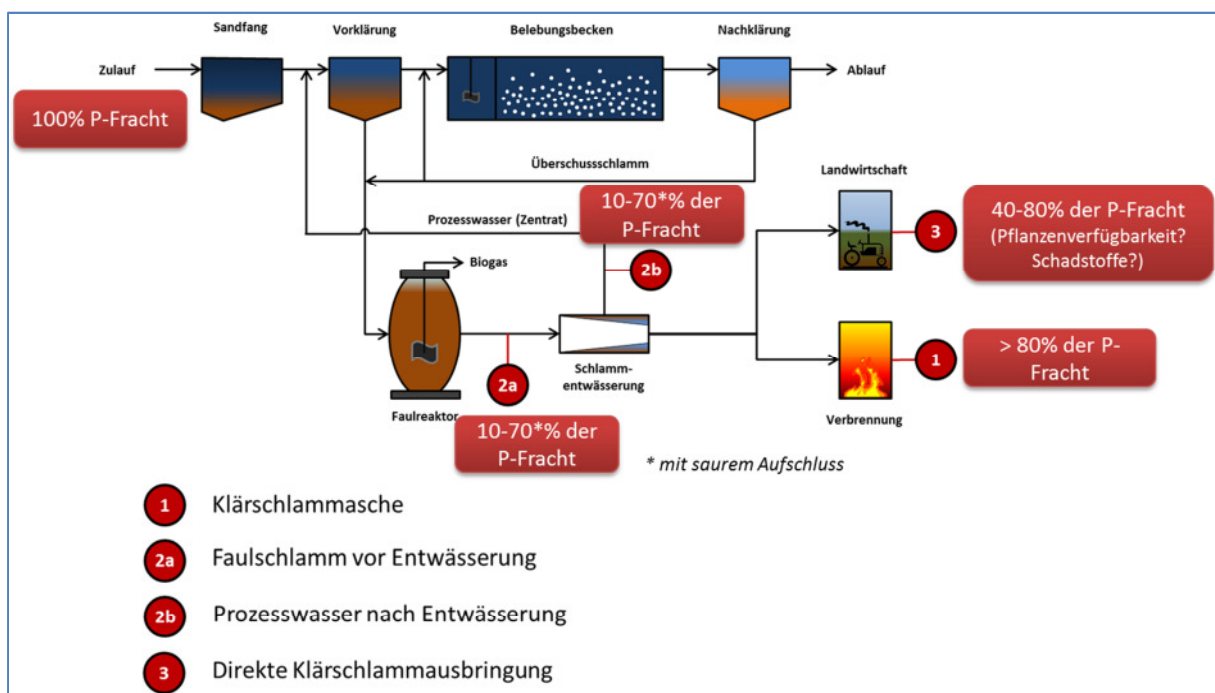


Abbildung 10: Ansatzpunkte für Phosphorrückgewinnung während bzw. nach der Abwasserbehandlung

Bei der Abwasserbehandlung, wie sie schematisch in Abbildung 10 dargestellt ist, erfolgt nicht nur ein Konzentrieren des Nährstoffes Phosphor, sondern auch von Schadstoffen in Teilströmen. Liegt der Phosphor in gelöster Form als Phosphat im Kläranlagenzulauf in eher geringen Konzentrationen vor (8 mg/l), so erhöht sich seine Konzentration während der Abwasserreinigung (Phosphorelimination) durch Akkumulation im Klärschlamm auf ein Vielfaches, sei es durch chemische Fällung bzw. biologische Akkumulation in der organischen Feststoffphase. Wird dieser Schlamm dann einer Faulung unterzogen, bei der der organische Anteil des Schlammes abgebaut wird, erhöht sich die Phosphorkonzentration im Schlamm nochmals. In welcher Phase und damit auch Bindungsform sich der Phosphor anschließend befindet, wird maßgeblich vom zuvor angewandten Eliminationsverfahren bestimmt. Bei der chemischen Fällung als schwerlösliches Eisen- oder Aluminiumphosphat wird der Phosphor als Metallsalz in der Festphase des Schlammes fixiert, während bei der biologischen P-Elimination eine Einbindung in die organische Feststoffphase erfolgt, die während der Faulung abgebaut wird und so der Phosphor zum Teil, je nach Abbaugrad, wieder als gelöstes ortho-Phosphat in

die wässrige Schlammphase transferiert wird. In diesem Fall hat man die Möglichkeit, den als ortho-P gelösten Phosphor in Form des mineralischen Struvits (MAP, $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) durch Kristallisation abzuscheiden. Um diese Kristallisation zu ermöglichen bzw. zu begünstigen, müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- ortho-P-Konzentration > 50 mg/l (je höher, desto besser)
- Gegenwart von ausreichend Mg^{2+} und NH_4^+ Ionen
- pH-Wert > 7,8

Für diese sogenannte MAP-Fällung wurden verschiedene verfahrenstechnische Ansätze entwickelt und bereits teilweise im Großmaßstab, wie zum Beispiel auf der Kläranlage Waßmannsdorf umgesetzt. Die MAP-Fällung kann sowohl direkt nach der Faulung und vor der Entwässerung des Klärschlammes oder nach der Entwässerung im separierten Schlammwasser (Prozesswasser, Zentrat) erfolgen.

In beiden Fällen lassen sich so ungewollte Inkrustationen in den nachfolgenden Aggregaten der Schlammbehandlung verhindern und die Rückbelastung für die Kläranlage, die die Rückführung des separierten Schlammwassers mit sich bringt, minimieren. Erfolgt die MAP-Fällung vor der Schlammmentwässerung ergeben sich weitere Vorteile für den Betreiber in der Form, dass die Entwässerung des Schlammes verbessert wird (höherer TR des entwässerten Schlammes) und dadurch die zu entsorgende Schlammmenge reduziert wird (geringere Entsorgungskosten). Diese Vorteile können bei großen Kläranlagen wie Waßmannsdorf oder Mönchengladbach-Neuwerk bis zu mehreren hunderttausend Euro Kostenreduktion pro Jahr erwirtschaften und die Energieeffizienz der Kläranlagen steigern.



Abbildung 11: AirPrex®-Anlage im Klärwerk Waßmannsdorf, Kabbe®

Jedoch muss klar sein, dass diese Form der Rückgewinnung nur ein begrenztes Rückgewinnungspotential aufweist und nur für bestimmte Kläranlagen (biologische P-Elimination und Faulung) geeignet ist. Es wird nur der in der wässrigen Phase des Schlammes gelöste Phosphor erfasst und als MAP gefällt.

Zielt man jedoch auf deutlich höhere Phosphorrückgewinnungsraten ab, kommt man nicht umhin, den in der Festphase auch chemisch gebundenen Phosphor zu erfassen. Dies kann zum Beispiel durch Aufschluss mit Mineralsäuren erfolgen, die den Phosphor wieder in Lösung bringen, wo er dann u.a. auch als MAP gefällt werden kann (Stuttgarter Verfahren). Hierbei ist die Rückgewinnungsausbeute direkt vom Säureeinsatz abhängig. Je mehr Säure, desto mehr P kann rückgelöst werden. Problematisch neben dem hohen Chemikalienverbrauch für die Rücklösung ist die Remobilisierung von Schadstoffen, wie z. B. Schwermetallen. Zudem ist nicht zu vernachlässigen, dass selbst entwässerter Schlamm noch ca. 70% Wasser enthält, welches zum einen das zu behandelnde Volumen vergrößert und zum Anderen einen Großteil des Chemikalienverbrauchs für die pH-Werteinstellung (Säure für die Absenkung und Natronlauge für die Anhebung für die MAP-Fällung) verursacht. Angesichts dieser Aspekte und der Tatsache, dass in Klärschlammaschen aus der Monoverbrennung die höchsten im Abwasserpfad erreichbaren Phosphorkonzentrationen (~10%) vorliegen, erscheint es ökonomisch und ökologisch sinnvoller, Säureaufschlüsse an Klärschlammaschen vorzunehmen.

Eine vielversprechende Alternative zu den Mineralsäuren verbrauchenden Aufschlussverfahren stellt das von der Chemischen Fabrik Budenheim entwickelte Kohlensäureaufschlussverfahren dar, bei dem der Phosphor aus dem Klärschlamm mit CO₂ und unter Druck rückgelöst wird. Im Technikumsmaßstab konnten mit dem Budenheimer Kohlensäureaufschlussverfahren bereits 50% des in der Feststoffphase des Schlammes fixierten Phosphors rückgelöst und nach fest-flüssig-Trennung als Dicalciumphosphat gefällt werden [Schnee u. Stössel 2014].

Allerdings gibt es auch Alternativen zu den Aufschlussverfahren, die neben dem P-Recycling die Möglichkeit bieten, Energiekreisläufe auf Kläranlagen sinnvoll zu schließen. Als Beispiele seien hier das metallurgische MEPHREC-Verfahren (ingitec GmbH) und das thermochemische AshDec Verfahren (Outotec GmbH) genannt. Beide liefern von Schwermetallen abgereicherte, düngefähige P-Recyclate (Wirksamkeit: Pflanzenverfügbarkeit des P, Unschädlichkeit: Einhaltung der Grenzwerte für Schadstoffe).

Sofern der in der Asche gebundene Phosphor pflanzenverfügbar gemacht werden kann und Schadstoffe (Schwermetalle) abgereichert sind, günstige geografische Gegebenheiten und Wirtschaftsstrukturen in einer Region zusammentreffen, ist auch die Verwendung von Monoverbrennungsschen als Substitut für Rohphosphate in der konventionellen Düng- oder Futtermittelherstellung als Verwertungsoption in Erwägung zu ziehen. Dieser Verwertungspfad böte außerdem den Vorteil, dass nicht in eine komplett neue Rückgewinnungsinfrastruktur und ein neues Vertriebsnetz investiert werden muss. Für das Land Berlin stellt dies allerdings keine Option dar, da in der Region keine konventionelle, Rohphosphat verarbeitende Düngemittelproduktion existiert.

Angesichts der derzeitigen Infrastruktur und Entsorgungssituation für den Klärschlamm der BWB mit 100% Verbrennung (59% Monoverbrennung, 41% Mitverbrennung) erscheinen folgende Optionen für die P-Rückgewinnung aus der Klärschlammasche erwägbar:

A: Installation einer P-Rückgewinnungsanlage im Umland von Berlin, um zumindest das Potential der jetzt schon verfügbaren Asche aus der Monoverbrennung zu heben. Bei der Kapazität sollte natürlich

perspektivisch in Erwägung gezogen werden, dass die Monoverbrennungskapazität erhöht wird. Die Auslastung könnte in dem Fall durch Akquise von geeigneten Aschen aus anderen Regionen angestrebt werden. Jedoch birgt diese Variante ein hohes Risiko hinsichtlich der Auslastungssicherheit, da die Entsorgung von Aschen ausgeschlossen wird.

B: Unter den Aspekten der Entsorgungssicherheit und Kostenkontrolle (auch Gebührenstabilität) ist es denkbar, dass die Monoverbrennungskapazität durch Neubau von Monoverbrennungsanlagen erhöht wird. Möglich wären eine Zwei-Standortlösung bzw. eine Ein-Standortlösung. In beiden Fällen ist anzustreben, das Phosphorpotenzial mit einem geeigneten P-Rückgewinnungsverfahren für die Gesamtmenge der anfallenden Klärschlammaschen an einem Standort zu erschließen.



Abbildung 12: Klärschlamm-Monoverbrennungsanlage Ruhleben, Donat[©]

Bei der alternativen Mitverbrennung in Kohlekraftwerken, Müllverbrennungsanlagen oder Zementwerken wird der enthaltene Phosphor soweit verdünnt, dass eine Rückgewinnung aus den Reststoffen derzeit praktisch nicht sinnvoll ist.

Da sich die MAP-Fällung, wie sie auf der Kläranlage Waßmannsdorf praktiziert wird, und P-Rückgewinnung aus Klärschlammasche ergänzen, ist zu prüfen, inwieweit z. B. das unter dem Namen AirPrex[®] von der Firma PCS vermarktete Berliner Verfahren Vorteile für den Betrieb der einen oder anderen Kläranlage, wie z. B. in Wansdorf mit sich bringt. Als positiver Nebeneffekt ließe sich so kurz- bis mittelfristig noch etwas mehr Phosphor in Form von Struvit unter der Marke Berliner Pflanze in den regionalen Nährstoffkreislauf zurückführen.

Handlungsempfehlungen

Die nachfolgend dargelegten Handlungsempfehlungen sind auf die regionalspezifischen Rahmenbedingungen des Landes Berlin zugeschnitten. Es ist allerdings auch nicht ausgeschlossen, dass diese teilweise für überregionale Betrachtungen [In-depth report 2013] ebenfalls zielführend sind.

Bei der Erhebung der Daten im Rahmen dieser Studie zeigte sich, dass es nicht zu allen betrachteten und relevanten Stoffströmen harte Daten gibt, d. h. keine Messdaten vorliegen. Zwar unterliegen Abfallströme einem Schadstoffmonitoring, jedoch nicht einem **Wertstoffmonitoring**. Für die Erarbeitung und Umsetzung von Nachhaltigkeitsstrategien ist es jedoch unerlässlich, diese so realitätsnah wie möglich auszurichten. Verallgemeinerungen von statistischen Durchschnittswerten können unter Umständen zu Fehlsteuerungen führen, die gut gemeinte Investitionen ins Leere laufen lassen. Wie im Falle der Phosphorkonzentration im Klärschlamm, kann nicht ein bundesdeutscher Durchschnittswert für eine Rückgewinnungsstrategie herangezogen werden. In anderen Abfallströmen wird der Parameter Phosphor entweder gar nicht bzw. nur als Phosphor gesamt erfasst. Es macht Sinn, in den für eine Phosphorrückgewinnung als relevant identifizierten Abfallströmen den Parameter Phosphor zu überwachen und nach Möglichkeit auch hinsichtlich der vorliegenden Bindungsformen hin zu untersuchen. Als kurzfristig umsetzbare Option ist die durchgehend **getrennte Erfassung von Bioabfällen** und die dadurch mögliche vollständige energetisch-stoffliche Verwertung zu sehen. Die ab 2015 in Kraft tretende Getrennterfassungspflicht schafft den dafür notwendigen gesetzlichen Rahmen, so dass dahingehend kein weiterer Regulierungsbedarf besteht. Der in Erwägung gezogene Bau einer zweiten Bioabfallvergärungsanlage für die zusätzlich getrennt gesammelten Bioabfälle durch die BSR ist somit ein wichtiger Schritt in die richtige Richtung. Es muss nur sichergestellt werden, dass die resultierenden Gärreste einer nährstofflichen Verwertung zugeführt werden.

Anders sieht es hingegen für den Abwasserstrom aus. Die gegenwärtige Gesetzeslage dringt nicht auf eine Kreislaufführung des Nährstoffes Phosphor, was sich nicht zuletzt auch in der niedrigen Recyclingquote für diese Ressource im Land Berlin widerspiegelt. Gerade einmal 1,4 % des im Abwasser enthaltenen Phosphors werden derzeit in Form des Minerals Struvit in den Nährstoffkreislauf zurückgeführt. Die restliche Phosphorfracht endet hauptsächlich als Füllstoff in den Aschen bzw. im Zement oder wird zu einem geringen Teil über die Kläranlagenabläufe in die Oberflächengewässer geleitet.

Die begrüßenswerte Initiative der Bundesregierung zur Erhöhung der Ressourceneffizienz im Fall Phosphor bietet die Möglichkeit, durch Anreize bzw. verbindliche Forderungen den aus dem Abwasserpfad zurückzugewinnenden Phosphoranteil zu erhöhen. Das angedachte Verdünnungsverbot für phosphorreiche Abfallströme ist ein guter Ansatz (Entwürfe der AbfKlärV und AbfPhosV). Für das Land Berlin kann das zur Folge haben, dass die Klärschlämme nicht mehr in Kohlekraft- und Zementwerken mitverbrannt werden dürfen, sofern sie einen noch verbindlich festzulegenden Phosphorgehalt überschreiten. Derzeit wird ein P-Gehalt von 12 g P/kg TM (=1,2 %) diskutiert. Bleibt es bei diesem Wert, entfällt die Mitverbrennungsoption für Berliner Klärschlämme komplett. In dem Fall bliebe nur der Weg, den Schlamm komplett einer Monoverbrennung zuzuführen, um eine nachhaltige Entsorgungs- und Verwertungssicherheit zu gewährleisten. Dazu wäre die **Kapazität der Monoverbrennung** entsprechend **auszubauen**. Im Zuge einer eventuellen Modernisierung bzw. des Aus- oder Neubaus der Monoverbrennung wäre ein geeignetes **P-Rückgewinnungsverfahren zu imple-**

mentieren. Da dies jedoch nicht kurzfristig umgesetzt werden wird, sollten die zurzeit **bereits anfallenden Monoverbrennungsaschen separat und rückholbar abgelagert werden.**

Auch wenn mit dem **AirPrex®-Verfahren** nur ein geringer Teil des Phosphors aus dem Abwasserpfad zurückgewonnen werden kann, ist dieses aufgrund seiner operativen Vorteile schon heute ein kurzfristig umsetzbarer Weg und ein Anfang auf dem Weg zu substanziellem Phosphorrecycling aus dem Abwasserpfad. Insofern sollte seitens der Berliner Wasserbetriebe geprüft werden, auf welcher ihrer Kläranlagen die **Implementierung** sowohl ökologisch, als auch ökonomisch Sinn macht.

Aber, wenn Phosphor wirklich substanziell recycelt werden soll, wird man um staatliche Eingriffe nicht umhin kommen. Eine lang angelegte Strategie zur graduellen Verringerung der Importabhängigkeit kann einen substanziellen Beitrag leisten und Investoren und Betreibern die nötige Planungssicherheit geben. So können Risiken durch unsichere Marktprognosen und häufigen Prioritätenwechsel in der Politik gemindert werden. Auf Bundesebene werden sowohl die Novelle der Klärschlammverordnung, als auch ein Inkrafttreten der vorgeschlagenen Phosphatrückgewinnungsverordnung erste Weichen stellen. Für das Land Berlin wird die Umsetzung des Abfallwirtschaftskonzeptes in Form des Abfallwirtschaftsplanes den rechtlichen Rahmen mit Bezug auf die regionalen Belange und Gegebenheiten für eine nachhaltige Phosphornutzung vorgeben.

Zusammenfassung und Ausblick

Aufgrund des steigenden Bedarfs und der begrenzten Verfügbarkeit von Phosphor sowie der Tatsache, dass Phosphor nicht substituierbar ist, ist ein nachhaltiger Umgang mit der Ressource Phosphor und deren Rückgewinnung aus Abfallströmen erforderlich. Um eine den lokalen Gegebenheiten angepasste Kreislaufwirtschaft zu ermöglichen, ist es notwendig, die Phosphorströme für das Land Berlin landesscharf zu identifizieren und zu analysieren.

Im Land Berlin werden die getrennt erfassten organischen Abfälle in Form von Kompost und als Gärreste stofflich verwertet. Folglich wird der in diesen Abfällen enthaltene Phosphor bereits im Kreislauf geführt. Der Restabfall in Berlin weist mit rund 42 % einen hohen Anteil an organischen Abfällen auf. Hier ist es notwendig, dass dieser Anteil ebenfalls getrennt erfasst wird, um ihn einem sinnvollen Phosphor-Recycling zur Verfügung zu stellen. Da ab dem 1. Januar 2015 eine Pflicht zur getrennten Erfassung von Bioabfällen gilt, ist bereits ein wichtiger Schritt für die nachhaltige Abfallverwertung absehbar. Im Falle des Auftretens größerer zusätzlich getrennt erfasster Bioabfallmengen (> 40.000 Mg/a) ab dem Jahr 2015 ist geplant, diese in einer neu zu errichtenden Biogasanlage der BSR zu vergären. Dafür existiert bereits ein zweiter genehmigungsfähiger Standort. Die daraus resultierenden Gärreste stehen dann ebenfalls zur direkten stofflichen Verwertung zur Verfügung. Damit wäre das Potenzial der Bioabfälle aus Haushalten vollständig genutzt.

Derzeit werden im Land Berlin durch die Verwertung von Bioabfällen und Grünschnitt sowie durch die Herstellung von Wirtschaftsdünger bereits 219 Mg Phosphor im Kreislauf geführt.

Im Abwasser liegen der größte Phosphorstrom und zugleich das größte Recyclingpotenzial Berlins vor. Zurzeit werden durch die MAP-Fällung in der Kläranlage Waßmannsdorf rund 40 Mg Phosphor zurückgewonnen und als Dünger unter dem Namen *Berliner Pflanze* wieder in den Nährstoffkreislauf gebracht. Durch dieses Verfahren ist jedoch nur ein geringer Teil der gesamten Phosphorfracht im Abwasserpfad recycelbar. Die Rückgewinnung des Phosphors aus Monoverbrennungaschen des Klärschlamm birgt das größte Potenzial. Dieses ließe sich komplett ausschöpfen, wenn der gesamte, anfallende Klärschlamm einer Monoverbrennung und die resultierende Asche einer Phosphorrückgewinnungsanlage zugeführt würden.

Derzeit werden rund 60 % der Klärschlämme monoverbrannt. Unter der Annahme einer Recyclingrate von 90 % sind rund 1.131 Mg P zurückzugewinnen. Dabei besitzt der gesamte Klärschlamm im Land Berlin ein Potenzial von 2.440 Mg P. Zur Umsetzung des Abfallwirtschaftskonzeptes des Landes Berlin ist die vielversprechendste Maßnahme für ein nachhaltiges P-Recycling die Steigerung der Monoverbrennungskapazität mit anschließender Rückgewinnung des Phosphors aus den resultierenden Aschen.

Zusammen mit der Aufbereitung von Holzaschen und dem organischen Anteil im Restabfall summiert sich das gesamte Phosphorrückgewinnungspotenzial auf 2.753 Mg P. Folglich könnten rund 90 % des gesamten Phosphoroutputs in Höhe von 3.408 Mg P im Land Berlin recycelt werden.

Phosphorpotenziale im Land Berlin

	Phosphormenge [Mg P/a]	Anteil [%]
gesamter Phosphoroutput	3.408	100
bereits recycelter Phosphor	259	8
Recyclingpotenzial ¹	2.753	81

Tabelle 10: Gesamtes P-Recyclingpotenzial im Land Berlin

¹unter Annahme einer Recyclingquote der ungenutzten Stoffströme von 90 %

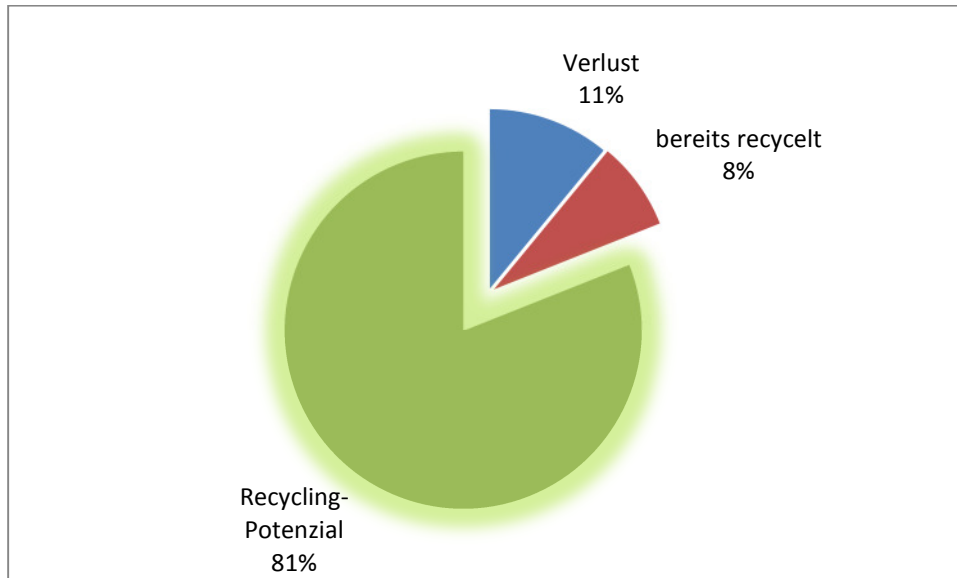


Abbildung 13: Gesamtes P-Recyclingpotenzial im Land Berlin

Da die Menge des rückgewinnbaren Phosphors den Phosphorbedarf Berlins von 195 Mg P₂O₅ (≈ 85 Mg P) übersteigt, kann der Phosphor in andere Regionen, z. B. nach Brandenburg exportiert werden.

Literaturverzeichnis

AZBA 2013	Analytisches Zentrum Berlin-Adlershof GmbH: Prüfbericht: Bauvorhaben - Teltowkanal, Probenbezeichnung - Nassbaggeraushub, Prüfzeitraum 04.07.-10.07.2013, Berlin 2013
BSR 2013a	Berliner Stadtreinigungsbetriebe: schriftliche Auskunft über erstellten Fragebogen, 2013
BSR 2013b	Berliner Stadtreinigungsbetriebe: mündliche Auskunft von Herrn Aughen, 2013
Destatis 2013a	Statistisches Bundesamt: Land- und Forstwirtschaft, Fischerei - Flächennutzung, Wiesbaden 2013
Destatis 2013b	Statistisches Bundesamt: Produzierendes Gewerbe - Düngemittelversorgung, Fachserie 4 Reihe 8.2 – Wirtschaftsjahr 2012/2013, Wiesbaden 2013
Destatis 2013c	Statistisches Bundesamt: schriftliche Auskunft zur Ein- und Ausfuhr phosphorhaltiger Erzeugnissen der chemischen Industrie 2012
Destatis 2013d	Statistisches Bundesamt: Bevölkerung - Bundesländer, Geschlecht, Altersjahre, Wiesbaden 2013
Destatis 2013e	Statistisches Bundesamt: Handel und Instandhaltung, Gastgewerbe, Tourismus - Ankünfte und Übernachtungen in Beherbergungsbetrieben, Wiesbaden 2013
Destatis 2013f	Statistisches Bundesamt: Bevölkerung - Bundesländer, Wiesbaden 2013
Destatis 2013g	Statistisches Bundesamt: Land- und Forstwirtschaft, Fischerei - Viehbestand und tierische Erzeugung, Fachserie 3 Reihe 4 – 2012, Wiesbaden 2013
Destatis 2013h	Statistisches Bundesamt: Land- und Forstwirtschaft, Fischerei - Schlachtungen und Fleischerzeugung, Fachserie 3 Reihe 4.2.1 - 4. Vierteljahr und Jahr 2012, Wiesbaden 2013
Destatis 2013i	Statistisches Bundesamt: Außenhandel - Zusammenfassende Übersichten für den Außenhandel Jahr 2012 (vorläufige Ergebnisse) - Fachserie 7 Reihe 1, Wiesbaden 2013
IFEU 2012	Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH: Maßnahmenplan zur Umsetzung einer vorbildhaften klimafreundlichen Abfallentsorgung im Land Berlin, Endbericht, Heidelberg September 2012
IKW 2013a	Industrieverband Körperpflege- und Waschmittel e.V.: Jahresbericht 2012/2013

Phosphorpotenziale im Land Berlin

IKW 2013b	Industrieverband Körperpflege- und Waschmittel e.V.: Nachhaltigkeit in der Wasch-, Pflege- und Reinigungsmittelbranche in Deutschland 2011/2012, Bericht, 2013
In-depth report 2013	Science for Environment Policy, In-depth report issue 7: Sustainable Phosphorus Use, October 2013 http://ec.europa.eu/environment/integration/research/newsalert/pdf/IR7.pdf
Kabbe 2013	Kabbe, C.: Sustainable sewage sludge management fostering phosphorus recovery, bluefacts 2013, wvgw, 2013
Leifert 2012	Leifert, I.: Potential of P-Recycling by Organic Waste in Germany, RETERRA, 2012
LK NRW 2012	Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen: Hinweise zum Einsatz von Wirtschaftsdüngern, organischen und organisch-mineralischen Düngern, Ratgeber 2012
NVSII 2008	Max Rubner-Institut: Nationale Verzehrsstudie II, Ergebnisbericht, 2008
P-Studie Bayern 2012	Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT: Phosphorstrategie für Bayern - Erarbeitung von Entscheidungsgrundlagen und Empfehlungen, 2012
Schröder et al. 2010	Schröder, J.J. et al.: Sustainable Use of Phosphorus, Report 357, Plant Research International, part of Wageningen UR, Oktober 2010
Schicker 2003	Schicker, C.: Ablagerung von Aschen aus der Biomasseverbrennung, Diplomarbeit, Augsburg 2003
Schnee u. Stössel (2014)	Schnee, R. u. Stössel, E.: Extraktion von Phosphaten mit Kohlendioxid, Workshop Abwasser – Phosphor – Dünger, BAM/UBA, Berlin, 28./29. Januar 2014
SenJustiz 2013	Senatsverwaltung für Justiz und Verbraucherschutz: Tierschutz und Tiergesundheit - Tierkörperbeseitigung und tierische Nebenprodukte, Berlin 2013
SenStadtUm 2012	Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt/Ministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz: Handlungskonzept - Reduzierung der Nährstoffbelastungen von Dahme, Spree und Havel in Berlin sowie der Unteren Havel in Brandenburg
SenStadtUm 2013	Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt: Referat Freiraumplanung und Stadtgrün, Berlin 2013
UBA 2013	Umweltbundesamt: Schlachtbetriebe und Verwertung tierischer Nebenprodukte, 2013

Anhang

Anhang 1: Darstellung des Fragebogens am Beispiel Abfallindustrie:

Fragebogen zur Erfassung der Phosphorpotenziale im Land Berlin

Allgemeine Kontaktdaten

Name des Betriebs		Ansprechpartner:
Adresse		
Telefon / E-Mail		

Welche Stoffe/Abfälle sammelt oder bezieht ihr Unternehmen?

Menge in [(t/a) oder (m³/a)]	2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006	2005	2004	2003
Phosphate (PO ₄ ³⁻ , P ₂ O ₅)										
Polyphosphat										
Bioabfall im Restmüll										
Bioabfall aus Biotonne										
Speiseabfall										
Holzabfälle										
Grünabfälle										
Laub										
Straßenkehricht, Rechengut										
Fette										
Tier-/ Knochenmehl										
Mist (Zoo, Tierpark etc.)										
Gärrückstand										
Klärschlamm										
Gülle										
Sonstige:										

Phosphorpotenziale im Land Berlin

Welche Stoffe/Abfälle vertreibt oder entsorgt ihr Unternehmen?										
Menge in [(t/a) oder (m ³ /a)]	2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006	2005	2004	2003
Bioabfall im Restmüll										
Bioabfall aus Biotonne										
Speiseabfall										
Holzabfälle										
Grünabfälle										
Laub										
Straßenkehricht, Rechengut										
Fette										
Tier-/ Knochenmehl										
Mist (Zoo, Tierpark etc.)										
Gärrückstand										
Klärschlamm										
Gülle										
Asche										
Sonstige:										

Bitte geben Sie (sofern möglich) weitere Informationen zu den o.g. Stoffen.				
Menge in [(t/a) oder (m ³ /a)]	Phosphorgehalt [(g/kg) oder (mg/L)]	Aggregatzustand [x=fest/ y=flüssig]	Nutzungstendenzen [+/-/ =]	Sonstige Anmerkungen
Phosphate (PO ₄ ³⁻ , P ₂ O ₅)				
Polyphosphat				
Bioabfall im Restmüll				
Bioabfall aus Biotonne				
Speiseabfall				
Holzabfälle				
Grünabfälle				
Laub				
Straßenkehricht, Rechengut				
Fette				
Tier-/ Knochenmehl				
Mist (Zoo, Tierpark etc.)				
Gärrückstand				
Klärschlamm				
Gülle				
Asche				
Sonstige:				

Phosphorpotenziale im Land Berlin

Anhang 2: Kontaktierte Unternehmen

Unternehmen	Merkmal
Lebensmittelindustrie	
Getränke	
Coca-Cola Erfrischungsgetränke AG	Import/Vertrieb
Spreequell Mineralbrunnen GmbH	Import/Vertrieb
Mineralquellen Bad Liebenwerda GmbH	Import/Vertrieb
Berliner-Kindl-Schultheiss-Brauerei	Import/Vertrieb
Berliner Bürgerbräu	Import/Vertrieb
Nahrungsmittel	
Carl Kühne KG (GmbH & Co.)	Import/Vertrieb
Werder Feinkost GmbH	Import/Vertrieb
Bahlsen GmbH & Co. KG	Import/Vertrieb
Stollwerck GmbH	Import/Vertrieb
Rausch Schokoladen GmbH	Import/Vertrieb
Moll Marzipan GmbH	Import/Vertrieb
August Storck KG	Import/Vertrieb
Georg Lemke GmbH & Co. KG	Import/Vertrieb
Freiberger Lebensmittel GmbH & Co	Import/Vertrieb
Kraft Foods Deutschland GmbH	Import/Vertrieb
Wilhelm Reuss GmbH & Co.KG	Import/Vertrieb
Dreistern-Konserven GmbH & Co KG	Import/Vertrieb
EWG Eberswalder Wurst GmbH	Import/Vertrieb
Berliner Großmarkt GmbH	Import/Vertrieb
Hofner Fleischgroßhandel GmbH	Import/Vertrieb
Horst Bahlmann GmbH	Import/Vertrieb
Fleischhandelsgesellschaft in Berlin und Brandenburg	Import/Vertrieb
Michalski Fleisch- Wursthandel GmbH	Import/Vertrieb
AFES GmbH	Import/Vertrieb
WVEB Ernährungsindustrie Berlin-Brandenburg	Monitoring
Foodwatch e.V.	Monitoring
Fleischer Innung Berlin	Monitoring
Senat	
Abteilung - Umweltpolitik, Abfallwirtschaft, Immissionsschutz	Monitoring
Bioabfälle	Monitoring
Klärschlamm	Monitoring
Landwirtschaft	Monitoring
Landesforstamt	Monitoring
Pflanzenschutz	Monitoring
Fischereiamt	Monitoring
Grünflächenämter	
Friedrichshain Kreuzberg	Monitoring
Charlottenburg-Wilmersdorf	Monitoring
Steglitz-Zehlendorf	Monitoring
Tempelhof-Schöneberg	Monitoring
Lichtenberg	Monitoring

Phosphorpotenziale im Land Berlin

Marzahn-Hellersdorf	Monitoring
Mitte	Monitoring
Neukölln	Monitoring
Pankow	Monitoring
Spandau	Monitoring
Treptow-Köpenick	Monitoring
Reinickendorf	Monitoring
Landwirtschaft und Düngemittelindustrie	
Brandenburg Düngemittel	Monitoring
Brandenburg Tierzucht	Monitoring
AgroBioTechnische Entwicklung und Produktion	Import/Vertrieb
Agrolandis AG	Import/Vertrieb
Energiewirtschaft	
Industriekraftwerk Rüdersdorf	Entsorgung
Biomasse-Heizkraftwerk Märkisches Viertel	Entsorgung
Kraftwerk Jänschwalde	Entsorgung
Zementwerk Berlin GmbH & Co. KG	Entsorgung
CEMEX OstZement GmbH; Zementwerk Rüdersdorf	Entsorgung
BBE (Bundesverband BioEnergie)	Monitoring
Chemische Industrie	
Verband der Chemischen Industrie, Nordost	Monitoring
Ernol Chemische Fabrikation GmbH	Import/Vertrieb
SEDAC	Import/Vertrieb
Spree GmbH	Import/Vertrieb
Berlin-Chemie AG	Import/Vertrieb
ASCA GmbH - Angewandte Synthesechemie Adlershof	Import/Vertrieb
Hermann Industrielackiererei	Import/Vertrieb
L. Schulte & Co. GmbH	Import/Vertrieb
PTL Pulverbeschichtungstechnik Lichtenberg GmbH	Import/Vertrieb
IFS IDEAL - Feuerschutz - Service GmbH	Import/Vertrieb
Harleb Gebäudetechnik/Feuerschutz	Import/Vertrieb
Abfallwirtschaft	
Berliner Wasserbetriebe AE	Entsorgung
BWB Berliner Pflanze	Entsorgung
Berliner Stadtreinigungsbetriebe	Entsorgung
Remondis AG & Co. KG	Entsorgung
Alba Group plc & Co. KG	Entsorgung
Veolia Entsorgungs- und Abfallmanagement	Entsorgung
Berlin Recycling GmbH	Entsorgung
BRAL Reststoff-Bearbeitungs GmbH	Entsorgung
Ingenieurconsulting Umwelt und Bau	Entsorgung
Berliner-Drecksack	Entsorgung
Turbo Entsorgung	Entsorgung
Landschaftspflegeverband Berlin/Brandenburg	Monitoring
BDE - Bioabfall	Monitoring

Phosphorpotenziale im Land Berlin

Verbände	
CEMEX OstZement GmbH; Zementwerk Rüdersdorf	Entsorgung
IHK	Monitoring
Holzindustrie	
Bauer Holz GmbH & Co	Import/Vertrieb
Holz Possling	Import/Vertrieb
HFM Nordholz Handelsgesellschaft mbH	Import/Vertrieb
Presswood GmbH	Import/Vertrieb

Tabelle 11: Liste der kontaktierten Unternehmen