

Phosphor- und Metallpotenziale in Altdeponien

Matthias Franke, Mario Mocker, Ingrid Löh, Fabian Stenzel, Andreas Hornung

Zusammenfassung

Die globale Rohstoffsituation hat sich mit dem teilweise rasanten Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum in den letzten Jahren deutlich verändert. Die Industrienation Deutschland ist als rohstoffarmes Land besonders von dieser globalen Entwicklung betroffen. Vor diesem Hintergrund gilt es, Strategien zu entwickeln, um die knapper und teurer werdenden Ressourcen zu substituieren. Einen Baustein dieser Strategie kann die Erschließung anthropogen geschaffener Lagerstätten, wie z. B. Deponien bilden. In diesem Beitrag sollen auf Grundlage der heute bekannten Reichweiten geogener Rohstoffe Knappheiten aufgezeigt und das theoretische Substitutionspotenzial beispielhaft für Metalle und das Element Phosphor ermittelt werden, das sich aus den in den deutschen Deponien und Hüttenhalden lagernden Rohstoffen ergibt.

1 Einleitung

Die globale Rohstoffsituation hat sich mit dem teilweise rasanten Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum in den letzten Jahren deutlich verändert. Während zunächst vorwiegend die Verknappung von Energierohstoffen wie Erdöl und Erdgas im Fokus der Diskussion stand, zeichnen sich in jüngster Zeit auch Knappheiten für andere Ressourcen wie Metalle und Minerale ab. Hatte sich diese Situation im Zeitraum der Wirtschaftskrise 2008/2009 etwas entspannt, so kletterten die Preise in den letzten Monaten fast wieder auf Vorkrisen-Niveau. Die Industrienation Deutschland ist als rohstoffarmes Land besonders von dieser globalen Entwicklung betroffen. So liegen die Importanteile für Mineralöl und Erdgas bei 97 % bzw. 84 % während Metallrohstoffe (Metallerze und -konzentrate) sogar zu 100 % eingeführt werden müssen [Steinbach et al. 2011].

Vor diesem Hintergrund gilt es, Strategien zu entwickeln, um die knapper und teurer werdenden Ressourcen zu substituieren. Einen Baustein dieser Strategie kann die Erschließung anthropogen geschaffener Lagerstätten, wie z. B. Deponien bilden [Faulstich et al. 2010]. Diese wurden bis in die neunziger Jahre hinein mit weitgehend unvorbehandelten Abfallströmen verfüllt, die eine große Bandbreite aus heutiger Sicht wieder wertvoller Ressourcen enthalten. Daher erscheinen vor allem die zahlreichen Altdeponien als mögliche Rohstoffquelle interessant. In diesem Beitrag sollen auf Grundlage der heute bekannten Reichweiten geogener Rohstoffe Knapp-

heiten aufgezeigt und das theoretische Substitutionspotenzial beispielhaft Metalle und das Element Phosphor ermittelt werden, das sich aus den in den deutschen Deponien und Hüttenhalden lagernden Rohstoffen ergibt.

2 Motivation

2.1 Metalle

Nachdem die öffentliche Diskussion über viele Jahre ausschließlich die Verfügbarkeit der Energierohstoffe zum Inhalt hatte, gerieten durch die starke konjunkturelle Belebung und das rasante Wachstum großer Volkswirtschaften in Asien auch viele andere Rohstoffe in den Blickpunkt. Viele Metalle mit Reichweiten von weniger als 50 Jahren finden als Gebrauchsmetalle bzw. als wichtige Legierungsmetalle in der Elektronikindustrie sowie im Maschinen- und Anlagenbau Verwendung [Bardt 2008].

Die weltweiten Kupferreserven werden zum Beispiel auf etwa 680 Mio. Mg geschätzt, was einer Reichweite von lediglich 40 Jahren entspricht [USGS 2013]. Sie liegen hauptsächlich in Chile (30 %). Der durchschnittliche Kupfergehalt des abgebauten Erzes sank in den letzten Jahren auf unter 1 %, wodurch der energetische Aufwand, aber auch die Menge an ökologisch problematischen Abgängen anstieg, da Kupfer zu den zehn umweltintensivsten Stoffen zählt [Lucas et al. 2008].

2.2 Mineralien

Auch bei einigen Industriemineralen zeichnen sich Engpässe ab. So beträgt die statische Reichweite für Baryt nur 29 Jahre und für Flussspat 35 Jahre [USGS 2013]. Für Phosphor werden zwar derzeit Reichweiten von etwa 319 Jahren angegeben [USGS 2013], allerdings sind diese natürlichen Rohstoffe überwiegend in Sedimenten gebunden, die zunehmend mit Cadmium und Uran belastet sind [BAFU 2009]. Leicht zugängliche und schadstoffarme Vorräte könnten deswegen schon in etwa 50 Jahren erschöpft sein [Gilbert 2009]. Neben den Reserven werden die nachgewiesenen, mit hoher Wahrscheinlichkeit zu erschließenden Ressourcen auf 65 Mrd. Tonnen Rohphosphat beziffert, weitere 94 Mrd. Tonnen werden in der Erdkruste vermutet [Wagner 2005]. Am Grund der Ozeane befinden sich schätzungsweise 900 Mrd. Tonnen Rohphosphat [Wagner 2005], die jedoch schwer zu gewinnen sind. Da Phosphor ein essentieller, nicht substituierbarer Rohstoff für tierisches und pflanzliches Leben ist, sollte jedoch trotz der noch vergleichsweise großen Reichweiten bereits frühzeitig mit der Erschließung sekundärer Phosphorquellen begonnen werden.

Zu diesem Zweck können beispielsweise Rückstände aus der Abwasserreinigung, wie Klärschlamm und Klärschlammmasche, Wirtschaftsdünger sowie Tier- und Fleischknochenmehl in Betracht gezogen werden. Obwohl insbesondere für Abwas-

ser, Klärschlamm und Aschen aus der Klärschlammmonoverbrennung vielversprechende Verfahren entwickelt wurden, sind die Produkte finanziell gegenüber der Phosphorgewinnung aus Rohphosphat derzeit noch nicht konkurrenzfähig [EUWID 2010]. Dies kann sich jedoch schnell ändern, wenn, wie prognostiziert, der Phosphorverbrauch, vor allem in Asien [Jasinski 2010] und damit die Rohphosphatpreise in den nächsten Jahren wieder deutlich ansteigen werden [Gäth und Nispel 2010].

Menschliche Ausscheidungen, Nahrungsmittel sowie Wasch- und Reinigungsmittel enthalten Phosphor, der zum größten Teil in die Kanalisation gelangt. In früheren Jahren wurden die Abwässer ungeklärt in Flüsse und Seen eingeleitet und führten zur Eutrophierung der Gewässer. In der Folge wurden in den achtziger Jahren die in den Waschmitteln enthaltenen Phosphate durch umweltverträgliche Enthärter ersetzt. Der Rückgang der Phosphatfracht infolge der geänderten Waschmittelzusammensetzung ist in Abbildung 1 erkennbar.

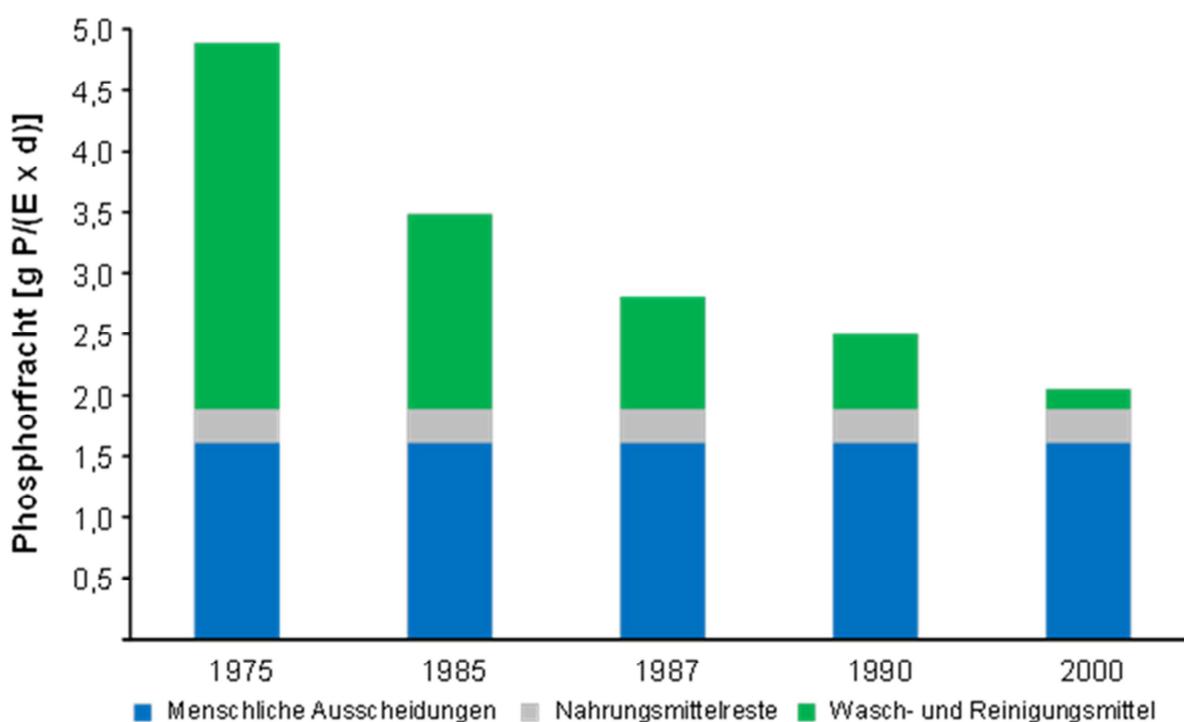


Abb. 1: Änderung der einwohnerspezifischen Phosphatfracht [Montag 2008]

Darüber hinaus wurde durch das Wasserhaushaltsgesetz Anfang 1990 die Einführung der Phosphorelimination auf Kläranlagen > 20.000 EW vorgeschrieben. Diese Maßnahme führte dazu, dass der Großteil der im Abwasserzulauf befindlichen Phosphatfracht heute im Klärprozess abgeschieden und im Klärschlamm akkumuliert wird.

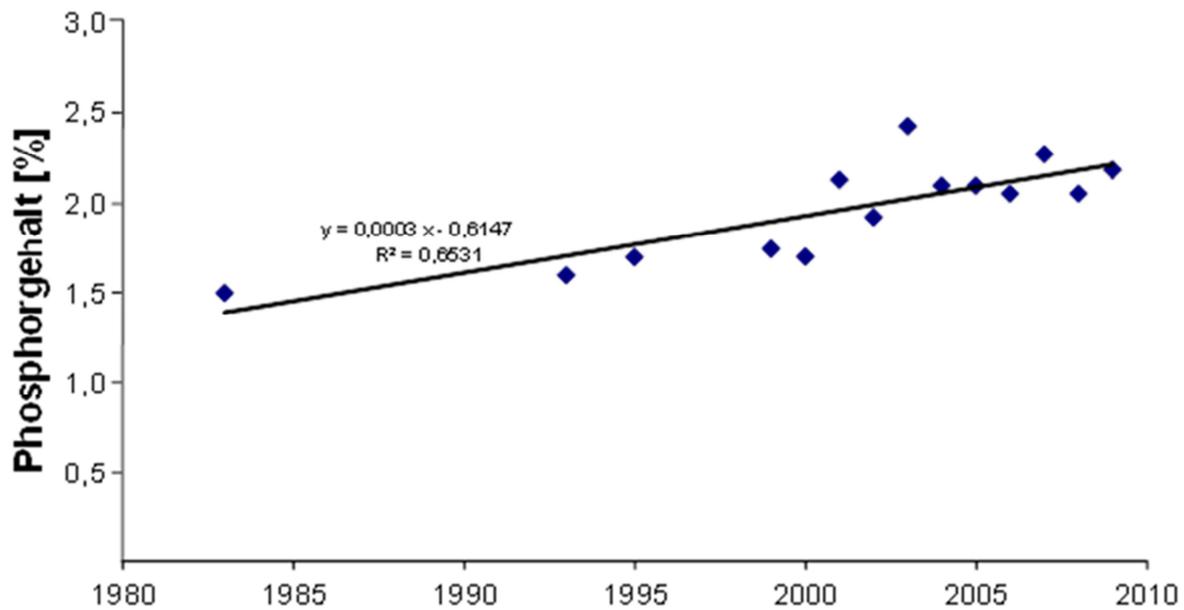


Abb. 2: Änderung des mittleren Phosphorgehalts von Klärschlamm [Thomé-Kozmiensky 1998, Müller 2010]

Aufgrund der zunehmenden Phosphatfällung stieg der mittlere Phosphorgehalt im Klärschlamm in den Jahren von 1980 bis heute jedoch trotz geänderter Waschmittelrezeptur signifikant an (Abbildung 2).

Je nach Art des Klärschlammes (mit und ohne Phosphatfällung, Rohschlamm, Faulschlamm, Schlamm aus biologischer oder chemischer Phosphorelimination) variiert der Phosphorgehalt in den Klärschlämmen. So enthält z. B. Schlamm ohne Phosphatfällung ca. 0,9 % P, Überschussschlamm ca. 3,3 % P, Rohschlamm 2,1 % P und Faulschlamm 3,1 % P (jeweils bezogen auf die Trockenmasse) [Onnen 2001, Jardin 2002, Pinnekamp et al. 2003]. Für Klärschlammmasche wurden Werte zwischen 1,5 % P und 10 % P mit einem Mittelwert von ca. 6,2 % [Wiebusch u. Seyfried 1998] beziehungsweise nach einer anderen Quelle 6,5 % P [Jardin 2002] analysiert.

Für die Nutzung der Phosphorpotenziale in Klärschlamm sind Kontaminationen mit Schadstoffen von erheblicher Bedeutung. Die einschlägigen Regelwerke (z. B. Düngemittelverordnung) geben hier strikte Grenzwerte vor. Dadurch sind die Schwermetallgehalte von Klärschlämmen in den letzten Jahrzehnten teilweise erheblich zurückgegangen [Schmelz u. Reifentuhl 2010]. Gerade in den früher abgelagerten Schlämmen könnten jedoch noch vergleichsweise hohe Schadstoffgehalte zu finden sein, so dass vor einer späteren Verwendung Nachbehandlungsschritte erforderlich werden könnten.

3 Potenziale in Deponien

3.1 Gesamtmengen

In Deutschland gibt es nach Angaben des Umweltbundesamtes ca. 106.000 Altdeponien, wovon die meisten bereits vor 1975 geschlossen wurden [UBA 2009]. Seitdem nahm die Anzahl der bewirtschafteten Deponien kontinuierlich ab. Im Jahr 2008 wurden noch 1.645 Deponien betrieben, wovon 236 der Deponieklasse I und 187 der Deponieklasse II zuzuordnen sind [Stat. BA 2010]. Nach einer ersten Abschätzung auf Basis von Literaturdaten wurden seit 1975 etwa 2,5 Mrd. Mg an Siedlungsabfällen, Bauschutt und gewerblichen Abfällen deponiert [Bilitewski 2000, Görner u. Hübner 2002, UBA 2006]. Auf der Grundlage der ermittelten Zahlenwerte wurde eine überschlägige Mengenermittlung abgelagerter Stoffgruppen vorgenommen. Dazu wurden Abfallanalysen verschiedener Epochen herangezogen und mit Abfallstatistiken des statistischen Bundesamtes der letzten dreißig Jahre abgeglichen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3 dargestellt. Aufgrund der vor 1975 nicht erfassten Abfälle sind die Mengen eher als untere Begrenzung zu verstehen.

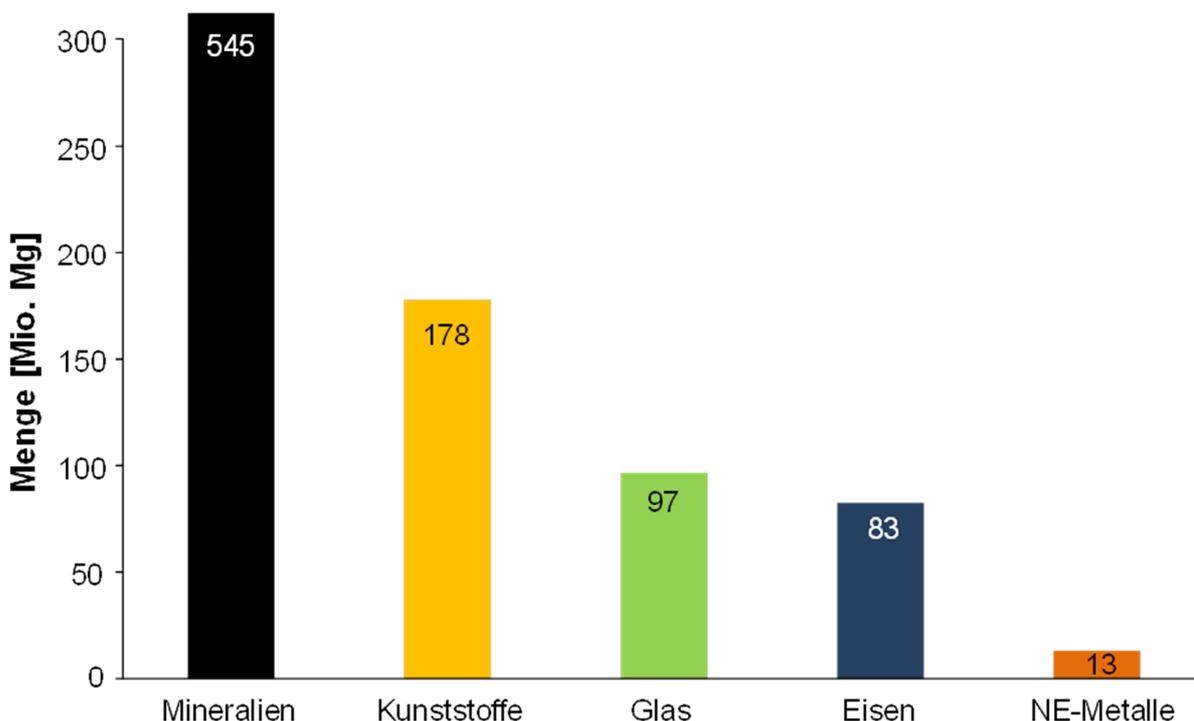


Abb. 3: Mengenabschätzung einzelner Stoffgruppen in deponierten Siedlungsabfällen, Bauschutt und gewerblichen Abfällen in Deutschland seit 1975 [Mocker et al. 2009]

3.2 Metalle

Bei der Herstellung von Eisen, Stahl und Nichteisenmetallen verbleibt ein Teil der Metalle in Form von metallischen Einschlüssen, Agglomeraten diverser Legierungen oder in oxidischer Form in der mineralischen Schlacke. In Deutschland fielen in den letzten Jahren über 10 Mio. Mg metallurgische Schlacke in Form von Hochofenschlacke bzw. Hüttensand (5,45 Mio. Mg), LD-Schlacke (2,41 Mio. Mg), Elektroofenschlacke (1,89 Mio. Mg), Schlacke aus Sonderverfahren (0,61 Mio. Mg), Edelstahlschlacke (1,44 Mio. Mg) und Metallhütten-schlacke (1,44 Mio. Mg) an [Merkel 2010, Weitkämper u. Wotruba 2008]. Die Hochofenschlacken und der Hüttensand werden mittlerweile zu mehr als 100 % verwertet, d. h. auch Altbestände werden wieder aufgearbeitet, während Stahlwerksschlacken derzeit noch zu ca. 8,5 % deponiert werden [Merkel 2010]. Es kann davon ausgegangen werden, dass der deponierte Anteil in früheren Jahrzehnten deutlich höher lag. Somit bieten die alten Hüttenhalden ein interessantes Wertstoffpotenzial. In Tabelle 1 sind typische Zusammensetzungen ausgewählter Eisenhüttenschlacken dargestellt [Arlt 2005, Heindl et al. 2005, Faulstich et al. 2002]. Neben nennenswerten Phosphatgehalten sind insbesondere in den Stahlwerksschlacken (OBM-, LD- und E-Ofenschlacke) noch weitere interessante Legierungselemente wie Chrom und Mangan enthalten. Außerdem findet die Verwertung der Abfälle aus metallurgischen Prozessen zu großen Teilen in der Baustoffindustrie statt, wodurch keine gezielte Rückgewinnung von metallischen Wertstoffen erfolgt.

Tab. 1: Chemische Analyse verschiedener Eisenhüttenschlacken [Arlt 2005, Heindl et al. 2005, Faulstich et al. 2002]

Schlacke	CaO	P ₂ O ₅	MgO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	K ₂ O	Fe	Mn	V	S
Hüttensand	31,8	k.A.	10,4	0,4	k.A.	0,8	0,5	0,15	k.A.	k.A.
OBM-Schlacke	38,3	1,5	1,6	k.A.	1,2	k.A.	18,2	2,0	0,4	0,24
HO-Schlacke	40,3	k.A.	7,8	0,5	k.A.	0,6	0,3	0,3	k.A.	1,2
Gichtgasstaub	4,1	0,2	1,1	0,1	k.A.	0,8	31,3	0,2	k.A.	0,4
Konverterstaub	5,4	0,1	0,2	0,0	k.A.	0,0	64,9	0,3	k.A.	k.A.
HO-Gichtgasschlamm	1,9	0,1	0,7	0,1	k.A.	0,5	28,3	0,15	k.A.	1,1
LD-Schlacke	45,3	1,4	2,6	0,5	k.A.	< 0,1	20,0	2,9	k.A.	k.A.
E-Ofenschlacke	34,3	k.A.	3,4	k.A.	2,2	k.A.	28,4	2,7	k.A.	0,2
Pfannenschlacke	56,8	< 0,1	4,5	k.A.	2,2	k.A.	0,8	0,3	k.A.	1,1

Auch in Hausmülldeponien sind nicht unerhebliche Mengen an Metallen verborgen. Rettenberger [2009] kommt bei einer Abschätzung abgelagerter Mengen an Hausmüll- und hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen auf eine Summe von 26 Mio. Mg Eisenschrott, 850.000 Mg Kupferschrott und 500.000 Mg Aluminiumschrott. Diese

Mengen entsprechen rein rechnerisch den in Abbildung 4 dargestellten Anteilen an den Jahresverbräuchen in Deutschland. Die Abweichungen zu Abbildung 3 erklären sich durch den in der hier zitierten Schätzung nicht berücksichtigten Bauschutt, der früher noch erhebliche Mengen an Metallen enthielt.

Wie aus Abbildung 4 hervorgeht, können durch die in den Deponien abgelagerten Rohstoffe theoretisch 50 % des Jahresbedarfs an Aluminium-Schrott, 124 % des Eisens sowie 142 % des deutschen Jahresbedarfs an Kupfer gedeckt werden.

Bei der Einzelfallbetrachtung einer hessischen Deponie wurden darüber hinaus nicht unerhebliche Ablagerungsmengen komplexer Verbunde ermittelt, die auch Leiterplatten und Elektrokleingeräte enthalten dürften [Gäth u. Nispel 2010a]. Hierin wird ein interessantes Potenzial an Edelmetallen und Seltenen Erden vermutet [Gäth u. Nispel 2010a].

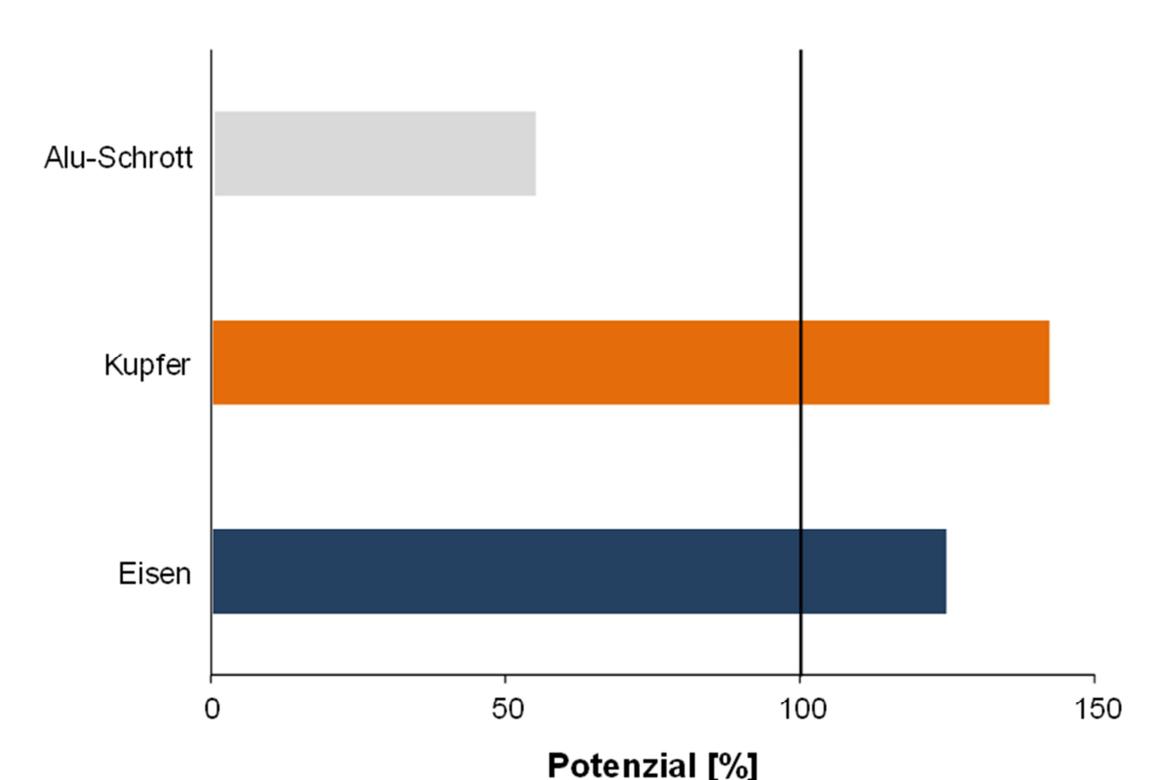
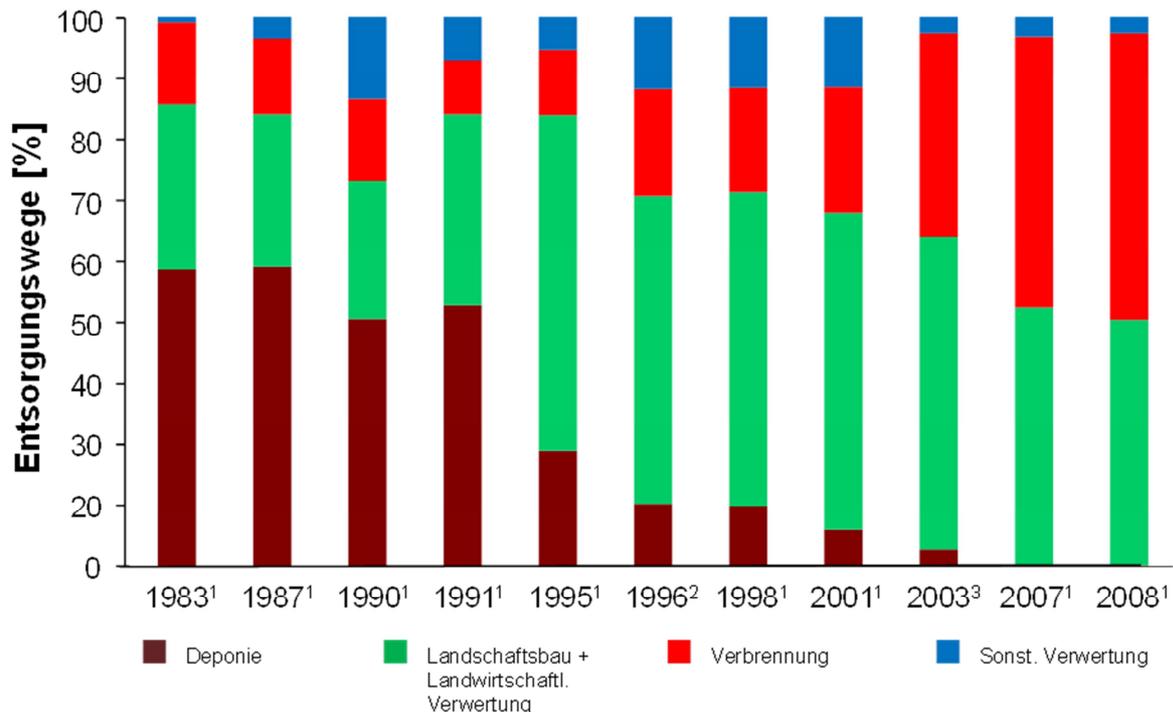


Abb. 4: Potenzial der in deutschen Siedlungsabfalldeponien enthaltenen Rohstoffe gemessen am bundesdeutschen Jahresbedarf [Rettenberger 2009]

3.3 Phosphor

Ein nicht unerhebliches Phosphorpotenzial, das bislang noch wenig Beachtung findet, lagert in Deponien, auf denen in der Vergangenheit teilweise große Mengen an Klärschlämmen und in jüngerer Zeit auch Klärschlammaschen entsorgt wurden [Mocker et al. 2011].



¹⁾ Statistisches Bundesamt

²⁾ Abwassertechnische Vereinigung (ATV)

³⁾ Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA)

Abb. 5: Verteilung der Klärschlammentsorgungswege in Deutschland von 1983 bis 2008 [nach Schmelz u. Reifenstuhl 2010]

Wie aus Abbildung 5 hervorgeht, wurden Klärschlämme, vor allem aus Ballungsgebieten, bis in die neunziger Jahre hinein zum größten Teil deponiert. Nach Verabschiedung der TA Siedlungsabfall von 1993 wurden aber im Vorgriff auf das 2005 greifende Deponierungsverbot neue Verwertungswege erschlossen. Übergangsweise wurde vermehrt landwirtschaftlich oder landbaulich entsorgt, parallel dazu erfolgte ein Ausbau der Klärschlammverbrennungskapazitäten. Mittlerweile werden über 50 % der in Deutschland anfallenden Klärschlämme thermisch behandelt [Schmelz u. Reifenstuhl 2010]. Somit stellen nunmehr die Aschen, insbesondere aus der Monoverbrennung, ein wertvolles Potenzial zur Phosphorrückgewinnung dar.

Während diese früher zum größten Teil einer bergbaulichen Verwertung als Versatz oder Mörtel zugeführt wurde, wird heute der überwiegende Teil auf Deponien verbracht [Müller 2005]. Diese Verschiebung des Verwertungsweges hin zur oberirdischen Ablagerung ist wegen des hohen Phosphorgehaltes zu begrüßen. So kann auf diese Vorräte bei steigenden Rohstoffpreisen sowie wirtschaftlicher und technischer Umsetzbarkeit von Phosphorrückgewinnungsverfahren zukünftig im Sinne des Urban Mining zurückgegriffen werden.

Um eine grobe Abschätzung dieser deponierten Phosphormengen vornehmen zu können, wurden Literatur- und Statistikdaten für den Zeitraum von 1980 bis 2009 ausgewertet. Wegen der vor 1980 fehlenden Phosphorelimination ist davon auszu-

gehen, dass ältere Ablagerungen nur in geringerem Maße zu den Potenzialen beitragen. Werden die recherchierten Ablagerungsmengen aufsummiert und mit dem damaligen mittleren Phosphoranteil multipliziert, so ergeben sich die in Abbildung 6 dargestellten Mengen. Es errechnet sich ein theoretisches Potenzial von 289.000 Mg Phosphor in deponiertem Klärschlamm und 58.000 Mg Phosphor in deponierter Klärschlammmasche. Verglichen mit der in den letzten Jahren durchschnittlich mit Mineraldüngern aufgebrauchten Phosphormenge von ca.122.000 Mg Phosphor (280.000 Mg P_2O_5), entspräche dies dem Bedarf von ca. drei Jahren [Stat. BA 2009]. Allerdings wurden Klärschlämme häufig nicht in Monodeponien, sondern in Kassettenverfahren oder gemischt mit Siedlungsabfällen deponiert, was eine gezielte Phosphorrückgewinnung dementsprechend erschweren dürfte.

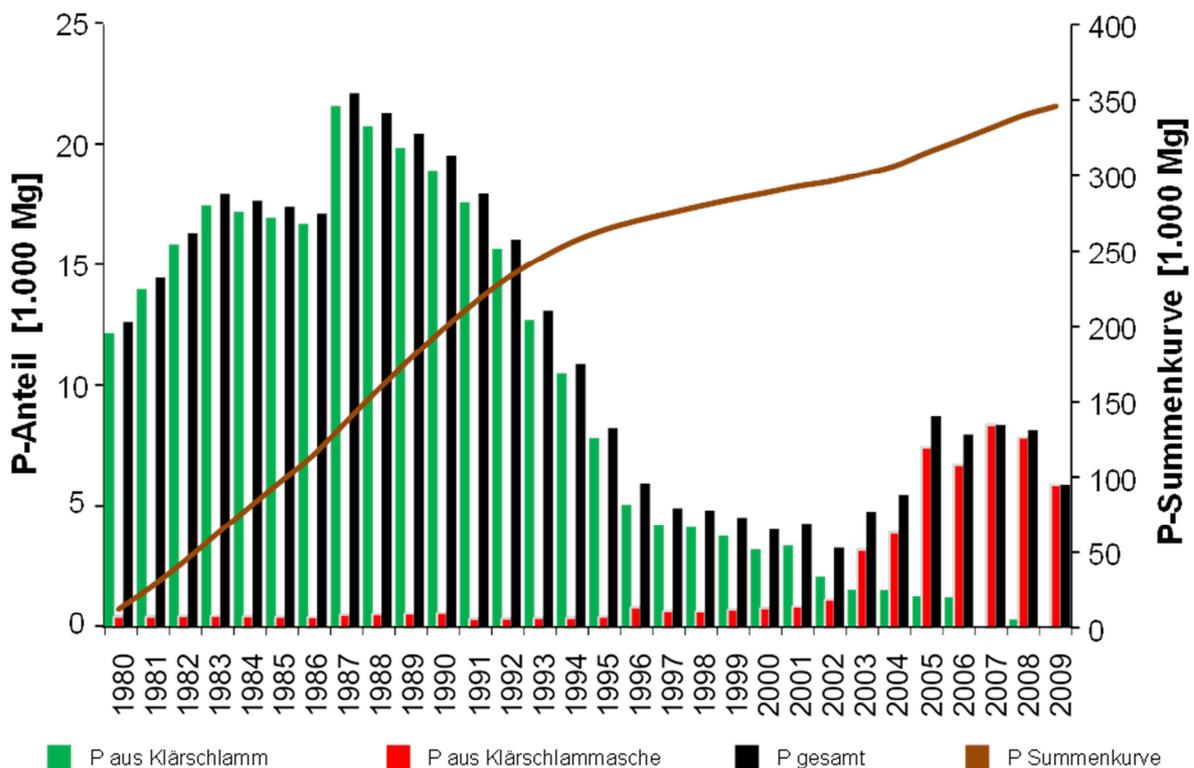


Abb. 6: Abschätzung der seit 1980 deponierten Phosphormengen

4 Literatur

- Arlt, K.-J. (2005): Aufkommen mineralischer Stoffe in der Stahlindustrie am Beispiel der AG der Dillinger Hüttenwerke, in: Fachtagung „Abfallverwertung bei der Rekultivierung von Deponien, Altlasten und Bergbaufolgelandschaften“, Hamburg, 31. März - 1. April 2005
- Bundesamt für Umwelt (BAFU) (2009): Rückgewinnung von Phosphor aus der Abwasserreinigung, Eine Bestandsaufnahme, Bern, 2009, <http://www.bafu.admin.ch/-publikationen/publikation/01517/index.html?lang=de>
- Bardt, H. (2008): Sichere Energie- und Rohstoffversorgung: Herausforderung für Politik und Wirtschaft?, in: IW-Positionen 36, Beiträge zur Ordnungspolitik aus dem Institut der deutschen Wirtschaft Köln, Köln, 2008
- Bilitewski, B. (2000): Abfallwirtschaft: Handbuch für Praxis und Lehre, Springer-Verlag, Berlin, 2000
- EUWID Report Klärschlamm (2010): Sonderpublikation des EUWID Wasser und Abwasser
- Faulstich, M., Günther, C., Halsch, E., Mocker, M., Nikitin, I., Schmid, A., van Tran, C. (2002): E84 – Entwicklung eines innovativen Verfahrens zur nachhaltigen Verwertung kohlenstoffreicher Abfallfraktionen, Studie zu Möglichkeiten der nachhaltigen Abfallverwertung mit dem Verfahren des Eisenbadreaktors, Bericht des ATZ Entwicklungs-zentrums, im Auftrag des StMLU, November 2002
- Faulstich, M., Franke, M., Löh, I., Mocker, M. (2010): Urban Mining Wertstoffgewinnung aus Abfalldeponien, Tagungs-unterlagen Bayerische Abfall- und Deponietage 2010, Augsburg, 17. - 18. März 2010, 2010
- Gäth, S., Nispel, J. (2010): Wertstoffdepot Deponie, in: Umweltmagazin, Jg. 40, 2010,10/11, S. 44-46
- Gäth, S., Nispel, J. (2010a): „Ressourcenpotenzial von ausgewählten Hausmülldeponien in Deutschland“ in: Lorber, Adam, Aldrian, Arnberger, Bezama, Kreindl, Müller, Sager, Sarc, Wruss (Hrsg.) Depotech 2010, Abfallwirtschaft, Abfalltechnik, Deponietechnik und Altlasten, Eigenverlag Institut für nachhaltige Abfallwirtschaft und Entsorgungstechnik iae, Leoben 2010, S. 375-380
- Gilbert, N. (2009): The Disappearing Nutrient, in: Nature, Vol. 461 (2009), S. 716-718
- Görner, K., Hübner K. (Hrsg.) (2002): Abfallwirtschaft und Bodenschutz, Springer-Verlag, Berlin
- Heindl, A., et al. (2005): EU 9 „Entwicklung von nachhaltigen Entscheidungs-kriterien zur sicheren Ablagerung und Verwertung von Eisenhütten-schlacken“,

Schlussbericht des Forschungs- und Entwicklungs-zentrums für Sonder-techno-logien, Rednitzhembach, April 2005

- Jardin, N. (2002): Phosphorbilanz bei der Abwasser- und Klärschlammbehandlung, in: Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm und Klärschlamma-sche, Schriftenreihe WAR 147, Hrsg.: Verein zur Förderung des Instituts WAR – Wasserversorgung und Grundwasserschutz . Abwassertechnik . Abfalltechnik . Industrielle Stoffkreisläufe . Umwelt und Raumplanung der TU Darmstadt e.V., WAR, 66. Darmstädter Seminar Abwassertechnik, 7.11.2002, Darmstadt, ISBN 3-932518-43-8, S.:17-32
- Jasinski, S. (2010): 2008 Minerals Yearbook: Phosphate Rock [Advanced Release], U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, March 2010
- Lucas, R., Bleischwitz, R., Krause, M., Stürmer, M. (2008): Kupfereffizienz – uner-schlossene Potenziale, neue Perspek-tiven, in: Wuppertal Institut für Kli-ma, Umwelt, Energie GmbH (Hrsg.): Ergebnisse des „Zukunftsdialogs Rohstoff-produktivität und Ressourcenschonung“, Wuppertal
- Merkel, Th. (2010): Das Wirtschaftsjahr 2009 – Produktion und Einsatz von Hoch-ofen- und Stahlwerksschlacken, in: Report des FEhS-Instituts 17 (2010), Nr. 1, S. 14
- Mocker, M., Franke, M., Stenzel, F., Faulstich, M. (2009): Von der Abfallwirtschaft zur Ressourcenwirtschaft, in: Flamme, Gallenkemper, Gellenbeck, Bidling-maier, Kranert, Nelles, Stegmann (Hrsg.): Tagungsband der 11. Münster-aner Abfallwirtschaftstage, Münster, 10. - 11. Februar 2009, S. 27-33
- Mocker, M., Löh, I., Franke, M. (2011): Phosphorpotenziale in AbfalldPONen, in: Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp (Hrsg.): Gewässerschutz – Wasser – Abwas-ser Band 223, 44. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft vom 23. bis 25. März 2011, (ISBN 978-3-938996-29-4), Gesellschaft zur Förde-rung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen e. V., Aachen 2011, S. 47/1-47/8
- Montag, D. M. (2008): Phosphorrückgewinnung bei der Abwasser-reinigung – Ent-wicklung eines Verfahrens zur Integration in kommunale Kläranlagen, Dis-sertation. RWTH Aachen, 2008
- Müller, C. (2005): Dissertation, Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, 2005.
- Müller, R. (2010): LfU Bayern, persönliche Mitteilung
- Onnen, O. (2001): Umweltschonende Verwertung von Klärschlamm in der Landwirt-schaft – P-Wirkung des Klärschlammes in Abhängigkeit von der P-Fällung und vom Substrat, Dissertation, Universität-Gesamthochschule Pader-born, 2001
- Pinnekamp, J., et. al. (2003): Phosphorrückgewinnung, in: KA Abwasser, Ab-fall,2003, (50), Nr. 6, S. 805-814

-
- Rettenberger, G. (2009): Zukünftige Nutzung der Deponie als Ressourcenquelle, in: Flamme, S., Gallenkemper, B., Gellenbeck, K., Bidlingmaier, W., Kranert, M., Nelles, M., Stegmann, R. (Hrsg.), Tagungsband der 11. Münsteraner Abfallwirtschaftstage, Münster, 10.–11. Februar 2009, S. 101-109, 2009.
- Schmelz, K.-G., Reifenstuhl, R. (2010): Aufkommen, Qualität und Entsorgung kommunaler Klärschlämme in Deutschland und Europa, DWA-Seminar 15.-16. Mai 2010, Marburg
- Stat BA 2009 Statistisches Bundesamt: Produzierendes Gewerbe, Düngemittelversorgung Wirtschaftsjahr 2008/2009, Fachserie 4, Reihe 8.2, Wiesbaden 2008
- Statistisches Bundesamt (2010): Abfallentsorgung Fachserie 19, Reihe 1
- Steinbach, V., Wilken, H., Altfelder, S. (2011): Sicherung von Rohstoffen als gesellschaftliche Herausforderung – Ein Beitrag der Deutschen Rohstoffagentur (DERA), in: Wiemer, K., Kern, M. (Hrsg.): Bio- und Sekundärrohstoffverwertung VI - stofflich - energetisch, ISBN 3-928673-58-0, Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, Witzenhausen, 2010, S. 79-86
- Thomé-Kozmiensky, K. J. (1998): Klärschlamm Entsorgung, TK-Verlag, Neuruppin, 1998, ISBN 3-924511-87-X
- Umweltbundesamt (2006): Abfallaufkommen und Abfallentsorgung in Deutschland 1996 bis 2004, 2006
- Umweltbundesamt (2009): Persönliche Mitteilung vom 17. März 2009
- U.S. Geological Survey (2013): Mineral commodity summaries 2013, U.S. Geological Survey, 198 S., <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2013/mcs2013.pdf>,
- Wagner, M. (2005): Rohphosphat – Verfügbarkeit und Verbrauch, in: 38. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft, 11.03.2005, Aachen, Sektion „Nährstoffrückgewinnung und Versorgung der Böden“, Ref. 71
- Weitkämper, L., Wotruba, H. (2008): Rückgewinnung von Metallen aus metallurgischen Schlacken, in: Recycling und Rohstoffe, Band 1, Karl J. Thomé-Kozmiensky (Hrsg.), TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 2008, S. 133-141
- Wiebusch, B., Seyfried, C. (1998): Klärschlammaschen als Produkt der Abwasserreinigung, in: BMBF Status-seminar „Stoffliche Verwertung von Klärschlammaschen und Aschen aus der Klärschlamm-verbrennung als Baustoff“, Veröffentlichungen des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität Hannover, 1998, Heft 107, ISBN 3-921421-36-5

Kontakt Daten für die Veröffentlichung im Autorenverzeichnis:

Name, Vorname, Titel: Franke, Matthias, Dr.-Ing.

Mocker, Mario, Prof. Dr.

Löh, Ingrid, Dipl.-Ing.

Stenzel, Fabian, Dipl.-Wi.-Ing.

Hornung, Andreas, Prof. Dr.

Firma/Institution: Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT,
Institutsteil Sulzbach-Rosenberg

Straße, Hausnr.: An der Maxhütte 1

PLZ, Ort: 92237 Sulzbach-Rosenberg

E-Mail: matthias.franke@umsicht.fraunhofer.de