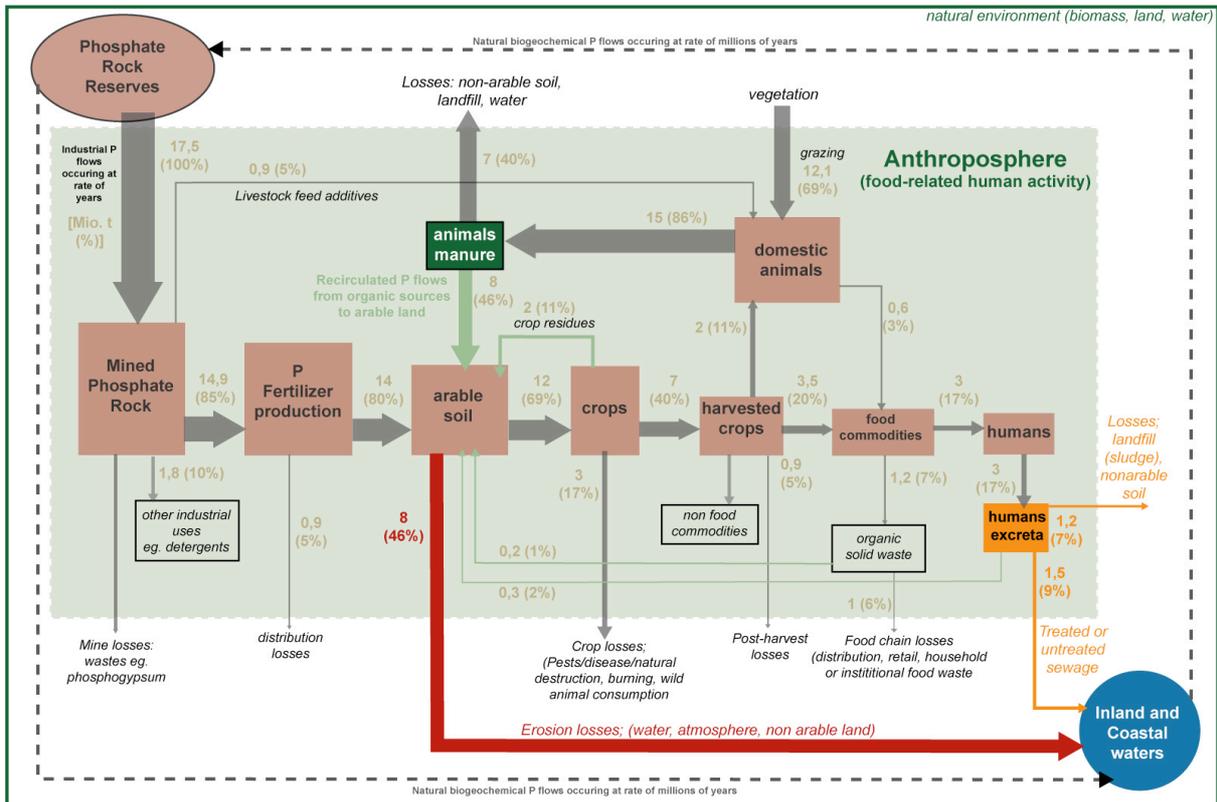


## Working paper as a basis for a workshop

„Phosphorus - as important as air, as scarce as oil?“  
“Phosphor – so wichtig wie Luft, so knapp wie Erdöl?“



(Global P-flow, changed after Cordell, Drangert and White 2008, submitted, <http://phosphorusfutures.net>)

Dr. Jörg Lange, Freiburg  
(e-mail: [post@regiowasser.de](mailto:post@regiowasser.de))

**Report in German, with English summary  
on behalf of GTZ Ecosan Programm**

Freiburg, 23.01.2009

## Inhaltsübersicht

I. Summary .....	3
II. Zusammenfassung .....	5
III. Grundlagen .....	7
1 Mineralischer Phosphor .....	7
1.1 Bedeutung und Geschichte .....	7
1.2 Phosphor – Produktion, Verbrauch, Verwendung .....	7
1.3 Zusammenhang zwischen Nutzung der Kernenergie, Urangewinnung und dem Abbau von Phosphor .....	8
1.4 Phosphorpreise .....	8
1.5 Die Ressource Phosphor ist endlich – aber wann wird sie knapp? .....	9
1.6 Pflanzenverfügbarkeit und Anreicherung von Phosphorverbindungen im Boden .....	10
1.7 Phosphorus flows - Phosphor verschwindet nicht – aber wo bleibt er? .....	10
1.8 Eutrophierung .....	11
1.9 Belastung der mineralischen Phosphordünger mit Schwermetallen .....	12
2 Fäkalien, Klärschlamm, und tierische Abfälle als Phosphorquelle .....	14
2.1 Fäkalien, Klärschlämme und Wirtschaftsdünger .....	14
2.2 Mikroverunreinigungen in biosolids .....	14
2.3 Verbrennung von Klärschlamm und organischen Rückständen aus der Tierproduktion (Tiermehle) .....	14
3 Vom Stoffstrom zum Stoffkreislauf am Beispiel Phosphor .....	15
3.1 Forschungsinitiativen zum P-Recycling .....	15
3.2 Verminderung des Phosphorverlustes durch Erosion .....	18
3.3 Effizienzsteigerungen .....	18
4 Schlussfolgerungen / Strategie eines workshops / Ausblick .....	20
4.1 Thesen .....	20
5 Ausgewählte Quellen: .....	22
IV. Ausgewählte Dokumente zum Thema Phosphor .....	24

## I. Summary

The element phosphorus is an irreplaceable energy source for the living cell and a vital component of the genetic substance. Phosphorus is limited as a mineral source, however for now and at least in the foreseeable future, supply shortages are not to be expected.

The time range of the currently known commercially exploitable deposits is estimated at 115 years.

90% of the crude phosphate are being used for fertilizer production. The usage of mineral phosphorus-containing fertilizer varies significantly from one country to the next.

Several African countries and China are among the main exporters of phosphorus. The market price of phosphorus depends on numerous factors, the most important of which are export tariffs (China), transportation costs (various oil price factors), speculations in the commodities markets as well as the general state of the economy.

The usage of mineral phosphorous fertilizers is changing constantly and significantly. Countries such as Germany and Japan have managed through soil enrichment to have huge excess of phosphorus in their soils. The soil in most central European countries doesn't react anymore to fertilization with phosphorus (no crop increase). The usage of phosphorus in these countries has receded significantly.

In spite of this considerable decline (of about 95%,) there is still, even in these countries, a clear excessive phosphorus footprint due to its presence in animal feed, food products and sewage sludge discharge. Other countries, especially in Africa, had until now very little possibility to get any noteworthy quantities of mineral phosphorus due to cost factors, and typically suffer from undernourished soils (deficit of phosphorus, humus and other nutrients).

Depending on origin and processing, the mineral phosphate fertilizers contain varying quantities of heavy metals, especially uranium and cadmium.

In addition, many mineral deposit areas show an up to 50 times higher than normal content of uranium-238 and radium-226. They are slowly and continuously accumulating in nutrient-rich soils (because plant metabolism absorbs less U-238 in such soils).

Scientists can't seem to agree on the timeframe and the extent of which the accumulation of heavy metals and radioactive isotopes caused by soil enrichment with mineral phosphate fertilizers becomes a serious problem.

The phosphorus cutback is closely linked to the issue of uranium production. The dismantling of nuclear weapons after the end of the cold war has brought substantial quantities of uranium surpluses into the world markets, which led to a temporary drop in uranium prices. This caused the extraction of uranium from mineral phosphates to become temporarily unprofitable and so to higher contents heavy metals in mineral phosphates. Uranium deposits in mineral phosphates represent the largest economically useful uranium source presently known to us. Countries with abundant phosphorus reserves such as China are banking on the development of nuclear energy.

Justus von Liebig (1803-1878) has ascertained as early as in 1840, that phosphorus acts not only as a limiting factor on the agricultural crops but also on the algae production in our water bodies. Since industrialization, the insertion of phosphorus and nitrogen via the direct communal sewage discharge into many lakes and rivers has put them under great stress and led to serious signs of eutrophication.

By now, more and more coastal regions are being affected by eutrophication in spite of the construction of sewage purification plants, mainly due to the "scattered" insertions arriving from the agricultural sector. Over 400 "dead zones" worldwide have been identified so far. The oxygen consuming bacterial degeneration process of nutrient-rich growing algae leads largely to an oxygen content of under 2 mg/l. Higher organisms such as fish cannot survive under these conditions. The coastal region of the Mississippi delta and large areas of the Baltic Sea are examples of such "dead zones".

The natural earthly cycle of phosphorus without human intervention takes millions of years. Phosphoric compounds erode and dissolve away from the mineral deposits and the soil only very slowly. They become concentrated again via the sedimentation process which takes place in lakes and seas, and turn into phosphorous rock again over geological time spans.

At present, mankind is adding about 18 million tons of phosphorus every year into the circulation, through the mining phosphoric rocks. The largest part of it is the practice of soil

enrichment. About 8 million tons annually land through erosion in rivers, lakes and coastal region of the seas. In addition, there are about 1.5 million tons which originate in human feces and end up in the water bodies. Once the phosphorus reaches our rivers and coastal waters, a cost-effective recovery is no longer possible.

No matter how one looks at our conduct regarding phosphorus, the goal of any action or future policy must be a more frugal, efficient usage and preferably a far-reaching phosphorus recycling method.

The recently published UN-Habitat Atlas (2008) for recycling of feces, sewage sludge and bio solids (or simply bio solids) states that the ways different countries deal with bio solids as far as discharge, heavy metal limitations etc., vary greatly. While some countries see in bio solids the only possibility to fertilize and re-circulate nutrients and humus soil substances due to costs, other countries such as Japan and Germany increasingly choose the sludge incineration method.

Numerous research projects in these countries deal with phosphor recovery out of sewage sludge. Thermal separation from sludge and MBM (meat and bone meal) ashes, seems to be the more viable method for industrial countries to recover nutrients such as phosphor with little pollution.

They choose this method not only because bio solids are contaminated with heavy metals, but also because of the increasing number of organic substances (micro pollutants) especially in such rich industrial societies. These substances are incalculable in number and effect and spreading them in the fields wouldn't be advisable. This method requires also dense canalization and sewage purification installations of the highest standards, which are not presently available even in many industrial countries.

However, in many of the newly industrialized countries (such as China), we are witnessing nowadays the type of water-bodies pollution known to us in Europe at its worst, such as the pollution of the Rhine river in the 1970s. This is the area of tension where the debate is taking place. The "western" model of combined communal and industrial sewage discharge is being copied by many newly industrialized countries.

For development cooperation purposes this should be indisputable: the phosphor problem is one more reason for developing and implementing concepts which would tackle erosion and restore nutrients in a low-polluting fashion into the food production cycle. Another possibly indisputable point: the meat consumption, especially in industrial countries, as well as animal feed import should be important parameters for the using resources of all types, including phosphorus, sparingly.

Countries such as Denmark demonstrate the positive influence a proper guidance of farmers could have in achieving, at least in the fields, a balanced nutrient footprint, particularly in the case of phosphorus.

The question with which researchers in Germany are confronted, is whether sewage sludge and animal carcasses ought to remain the main phosphorus recovery sources, or whether in the future the use of bio solids may become a possibility for nutrient recovery, in order to contribute more intensively towards development cooperation (like through the use of urine, etc.).

For the same cause, the separation of communal and industrial sewage as well as rain water systems should be considered, especially in densely populated areas in order to collect communal sewage in its most concentrated form, which would enable its intensive use in an anaerobic pre-stage and the recovery of nutrients without accumulating pollutants in the soils.

## II. Zusammenfassung

Das Element Phosphor ist als Energielieferant der lebenden Zelle und als Bestandteil der Erbsubstanz nicht ersetzbar. Die Ressource Phosphor ist begrenzt, aber derzeit sind Versorgungsengpässe zumindest in naher Zukunft nicht zu erwarten. Die statistische Reichweite der aktuell bekannten wirtschaftlich förderungswürdigen Vorkommen wird mit 115 Jahren angegeben.

90% der Rohphosphate werden zur Herstellung von Düngemittel verwendet. Die Verwendung mineralischer phosphorhaltiger Dünger ist von Land zu Land sehr unterschiedlich. Zu den Hauptexporteuren von Phosphor gehören einige afrikanische Länder und China. Die Entwicklung des Phosphorpreises unterliegt zahlreichen Faktoren. Zu den wichtigsten zählen u.a. Ausfuhrzölle (China), Transportkosten (unterschiedliche Abhängigkeiten vom Ölpreis), Spekulationen am Rohstoffmarkt sowie die allgemeine Wirtschaftslage.

Der Umgang mit mineralischen Phosphordüngern unterliegt einem ständigen und starken Wandel. Länder wie Deutschland oder Japan haben durch entsprechende Düngung in wenigen Jahrzehnten enorme Überschüsse an Phosphor in ihren Böden angereichert. Die meisten mitteleuropäischen Böden zeigen heute keine Reaktion (Ertragssteigerung) mehr auf Düngung mit Phosphor. In diesen Ländern ist die Einfuhr von Phosphor enorm zurückgegangen.

Trotz des deutlichen Rückganges (um 95%) besteht auch in diesen Ländern über die Einfuhr von Futtermitteln, Nahrungsmitteln und die Ausbringung von Klärschlamm und Wirtschaftsdünger eine deutlich „positive“ Phosphorbilanz (Überschuss). Andere Länder, insbesondere in Afrika, hatten aus Kostengründen bisher kaum Möglichkeiten an nennenswerte Mengen von mineralischem Phosphor zu kommen und zeichnen sich durch mit Nährstoffen unterversorgte Böden aus (Defizit an Phosphor, aber auch an Humus und anderen Nährstoffen).

Die mineralischen Phosphordünger enthalten je nach Herkunft und Aufbereitung unterschiedliche Mengen an Schwermetallen, insbesondere an Uran und Cadmium. Darüberhinaus zeichnen sich viele Lagerstätten auch durch bis zu 50-fach höhere Gehalte an U-238 und Ra-226 aus. In gut mit Nährstoffen versorgten Böden reichern sie sich heute langsam aber kontinuierlich an (da in diesen Böden Pflanzen relativ weniger U-238 und Ra-226 in ihren Stoffwechsel aufnehmen).

Die Meinungen darüber, in welchem Zeitraum und welchem Umfang die Anreicherung der Böden mit Schwermetallen und radioaktiven Isotopen durch die Zugabe von mineralischen Phosphordüngern zu einem ernsthaften Problem wird, gehen unter den Wissenschaftlern weit auseinander.

Der Phosphorabbau ist eng verknüpft mit der Produktion von Uran. Der Abbau der Nuklearwaffen nach Beendigung des Kalten Krieges hat erhebliche Mengen an überschüssigem Uran auf den Weltmarkt gespült und damit zu zwischenzeitlich sinkenden Uranpreisen geführt. Damit war vorübergehend die Urangewinnung aus Rohphosphaten nicht mehr wirtschaftlich und die Gehalte an Schwermetallen in den Rohphosphaten stiegen. Die Vorkommen an Uran in Rohphosphaten stellen die derzeit größten bekannten wirtschaftlich nutzbaren Vorkommen von Uran dar. Länder wie China mit reichhaltigen Phosphorvorkommen setzen auf einen Ausbau der Kernenergie.

Phosphor ist, wie Justus von Liebig (1803-1878) bereits 1840 feststellte, nicht nur ein limitierender Faktor des landwirtschaftlichen Ertrags, sondern auch der Algenproduktion in unseren Gewässern. Die Einträge an Phosphor und Stickstoff haben seit der Industrialisierung zunächst viele Seen und Flüsse durch direkte Einleitung kommunaler Abwässer belastet und zu starken Eutrophierungserscheinungen geführt.

Inzwischen sind, trotz des Baus von Kläranlagen, vor allem durch die „diffusen“ Einträge aus der Landwirtschaft auch zunehmend die Küstenregionen von Eutrophierung betroffen. Weltweit sind über 400 „Dead Zones“ identifiziert. Hier führt der sauerstoffzehrende bakterielle Abbau der durch die Nährstoffe üppig wachsenden Algen weiträumig zu Sauerstoffgehalten von unter 2 mg/l. Unter diesen Bedingungen können die meisten höheren

Organismen, wie z.B. Fische nicht mehr leben. Zu diesen Dead Zones gehören z.B. die Küstenregionen des Mississippi-Deltas, aber auch weite Bereiche der Ostsee.

Der natürliche Phosphorkreislauf der Erde ohne Einfluss des Menschen findet in Zeiträumen von Millionen Jahren statt. Aus den Lagerstätten und Böden erodieren und lösen sich Phosphorverbindungen nur langsam. Durch Sedimentierung konzentriert sich der Phosphor in Seen und Meeren und wird in geologischen Zeiträumen wieder zu phosphorhaltigen Gesteinen.

Der Mensch bringt derzeit jedes Jahr etwa 18 Millionen Tonnen Phosphor durch den Abbau phosphorhaltiger Gesteine zusätzlich in Umlauf. Der größte Anteil davon reichert unsere Böden mit Phosphor an. Durch Erosion landen inzwischen etwa 8 Millionen Tonnen jedes Jahr in Flüssen, Seen und den Küstenregionen der Meere. Hinzu kommen weltweit noch einmal etwa 1,5 Millionen Tonnen über menschliche Fäkalien in die Gewässer. Ist der Phosphor erst einmal in unsere Flüsse und Küstengewässer gelangt, ist eine wirtschaftliche Rückgewinnung nicht mehr möglich.

Unabhängig davon, von welcher Seite man den menschlichen Umgang mit Phosphor betrachtet, muss ein sparsamer, effizienter Gebrauch und möglichst weitreichende Kreislaufführung des Phosphors das Ziel des Handelns und jeder zukünftigen Politik sein.

Wie aus dem kürzlich herausgegebenen Atlas der UN-Habitat (2008) zur Verwendung von Fäkalien, Klärschlamm und biosolids (oft auch unter biosolids zusammengefasst) hervorgeht, ist der Umgang mit den biosolids in den Ländern bezüglich Ausbringung, Schwermetallgrenzwerten etc. sehr unterschiedlich. Während für einige Länder schon aus Kostengründen biosolids die einzige Möglichkeit der Düngung und der Rückführung der Nährstoffe und organischen Humusstoffe sind, gehen Länder wie z.B. Japan und Deutschland zunehmend den Weg der Klärschlammverbrennung.

Zahlreiche Forschungsprojekte in diesen Ländern beschäftigen sich inzwischen mit der Phosphorrückgewinnung aus dem Klärschlamm. Ein gangbarer Weg für die Industrieländer Nährstoffe, wie den Phosphor schadstoffarm zurückzugewinnen, scheint ihre thermische Abtrennung aus den Aschen der Klärschlämme und Tiermehle zu sein.

Letztere gehen diesen Weg insbesondere deshalb, weil neben der Belastung der biosolids mit Schwermetallen diese in den reichen Industriegesellschaften zunehmend mit einer in Wirkung und Anzahl nicht überschaubaren Vielzahl von organischen Stoffen (Mikroverunreinigungen) belastet sind, deren Ausbringung auf dem Feld nicht ratsam erscheint. Dieser Weg setzt jedoch einen hohen Standard an dichten Kanalisationen und Kläranlagen voraus, der selbst in vielen Industrieländern derzeit nicht zur Verfügung steht.

In vielen der Schwellenländer (z.B. China) erleben wir stattdessen heute eine Verschmutzung der Gewässer, wie sie aus Europa z.B. am Rhein mit dem Höhepunkt in den 1970er Jahren bekannt ist. In diesem Spannungsfeld befindet sich die Diskussion. In vielen Schwellenländern wird das „westliche“ Modell der gemeinsamen Abführung von kommunalen und industriellen Abwässern kopiert.

Unstrittig für die Entwicklungszusammenarbeit dürfte sein, dass die Phosphorproblematik ein Grund mehr ist Konzepte umzusetzen und zu entwickeln, die die Erosion eindämmen und die Nährstoffe auf schadstoffarme Weise in den Kreislauf der Nahrungsmittelproduktion zurückführen. Unstrittig dürfte weiterhin sein, dass der Fleischkonsum insbesondere der Industrieländer und die Einfuhr von Tierfutter eine wesentliche Stellschraube für den sparsameren Umgang mit Ressourcen aller Art, auch dem Phosphor, ist.

Länder wie Dänemark zeigen, welchen positiven Einfluss dabei eine geeignete Beratung der Landwirte haben kann, um zumindest auf dem Feld eine ausgeglichene Nährstoffbilanz, insbesondere beim Phosphor, zu erzielen.

Für die Forschung in Deutschland stellt sich die Frage, ob sie sich weiterhin weitgehend auf den Ansatz der Rückführung des Phosphors aus Klärschlamm und Tierabfällen konzentriert, oder ob sie in Zukunft auch zur Verwendung der biosolids als Möglichkeit der Rückführung von Nährstoffen zur Unterstützung der Entwicklungszusammenarbeit einen stärkeren Beitrag leisten kann (Verwendung von Urin etc.).

Darüberhinaus bleibt für die Entwicklungszusammenarbeit zu prüfen, ob es in Ballungszentren nicht sinnvoller ist kommunale und industrielle Abwasserteilströme sowie Regenwasser getrennt abzuleiten, um die kommunalen Abwässer so konzentriert sammeln zu können, dass eine energetische Nutzung in einer anaeroben Vorstufe und die Rückführung der Nährstoffe ohne Schadstoffanreicherung in den Böden möglich wird.

### III. Grundlagen

#### 1 Mineralischer Phosphor

##### 1.1 Bedeutung und Geschichte

Phosphor ist eines der wichtigsten Elemente im menschlichen Körper. Er ist wichtiger Bestandteil der „Erbsubstanz“ (Desoxyribonukleinsäure, kurz DNA oder DNS) und in Form von ATP (Adenosintriphosphat) notwendig für den Energiestoffwechsel jeder Zelle. Etwa 0,6 bis 0,7 Gramm Phosphor sind die empfohlene Tagesdosis für den Menschen. Diese Menge ist in etwas mehr als einem Pfund Mehl oder einem halben Pfund Fleisch enthalten. Phosphor unterscheidet sich von anderen Nährelementen, wie Stickstoff oder Kalium dadurch, dass seine Verbindungen in der Regel schwer wasserlöslich sind. Im Unterschied zum Stickstoff spielen gasförmige Phosphorverbindungen praktisch keine Rolle, was die Betrachtung der Phosphorströme vereinfacht.

##### Phosphor, Phosphate: Unverzichtbarer Dünger

Justus von Liebig (1803-1878) identifizierte 1840 Phosphor als einen limitierenden Faktor des landwirtschaftlichen Ertrags. Liebig entdeckte, dass man einen hervorragenden Phosphatdünger erhält, wenn man Knochen oder andere phosphathaltige Stoffe mit Schwefelsäure behandelt. Damit begann die Ära der industriellen, rohstoffabhängigen Landwirtschaft.

##### Phosphor –(k)ein neues Thema?

Schon bald nach Liebig begannen sich die ersten wegen dieser unbedingten Abhängigkeit von einer endlichen Quelle Sorgen zu machen. Zu den bekanntesten gehört der US-Präsident Franklin D. Roosevelt (1882-1945), der am 20. Mai 1938, auf dem Höhepunkt der Großen Depression vor dem Amerikanischen Kongress, erklärte:

***I cannot over-emphasize the importance of phosphorus not only to agriculture and soil conservation but also the physical health and economic security of the people of the nation.***

(<http://www.presidency.ucsb.edu/ws/index.php?pid=15643>)

Die Erkenntnis

***“We are fertilising the Earth on a global scale and in a largely uncontrolled experiment”***

(Global Environment Outlook, UNEP, 1999)

ist bereits seit längerer Zeit in der internationalen Politik angekommen.

##### Für Phosphor gibt es keinen Ersatz

Gerne wird der Biochemiker und Science-Fiction-Autor Isaac Asimov (1920-1992) mit dem Satz zitiert: ***„Lebewesen können sich vermehren, bis der Phosphor vollständig verbraucht ist. Unerbittlich kommt dann das Ende, und niemand kann es verhindern.“*** Und: ***„Wir können Kohle durch Kernkraft ersetzen, Holz durch Kunststoffe, Fleisch durch Hefe, Freundlichkeit durch Isolation – aber für Phosphor gibt es keinen Ersatz.“***

##### Ist das Thema Phosphor in den Massenmedien angekommen?

Auch in der fachlichen Diskussion ist das Thema Phosphor keinesfalls neu. Artikel in der „New York Times“, der Wochenzeitung „Zeit“ oder der Zeitschrift „Focus“ belegen, dass das Thema auch längst in den „populärwissenschaftlichen“ Medien angekommen ist.

##### 1.2 Phosphor – Produktion, Verbrauch, Verwendung

Produktion und Verbrauch Phosphor haben sich je nach Region weltweit ganz unterschiedlich entwickelt. Im folgenden einige Zahlen:

##### Weltweit

Der Verbrauch an Düngemittel ist von 1950 von 14 Millionen Tonnen auf heute bis etwa 145 Millionen Tonnen pro Jahre gestiegen. Seit etwa 1990 geht der Verbrauch in den

Industriestaaten zurück. In den Entwicklungsländern (von Ausnahmen der ärmsten Länder abgesehen) steigt er seit 1960 kontinuierlich an. Abbau und Verbrauch an mineralischen Rohphosphaten sind zwischen 1950 bis 1980 ebenfalls kontinuierlich gestiegen und seit dem bei leichten Schwankungen mit rund 130-150 Mio. t etwa gleich geblieben. Nahezu 90% der Rohphosphate werden zu Düngemitteln verarbeitet.

### **China**

Noch bis vor wenigen Jahren waren die meisten bekannten Reserven an Rohphosphaten aus den USA, Marroko und Südafrika bekannt. Inzwischen stammen die Meldungen der größten weltweiten Phosphor-Reserven aus China (bis zu 80%). China nimmt mit seinen Vorkommen erheblichen Einfluss auf den Weltmarkt. In einem für viele überraschenden Schritt erhöhte China am 20. Mai 2008 die Ausfuhrsteuern für Phosphor auf 120%. Der Hauptgrund hierfür dürfte in dem gestiegenen eigenen Bedarf Chinas an Phosphor liegen.

In Liu 2005 wird die Reichweite der statischen chinesischen Reserven (4054 Mio. Tonnen mit einem durchschnittlichen P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Gehalt von 17% - 22%) für China bei anhaltendem Verbrauch mit 64 bis 83 Jahren angegeben.

### **Australien**

Australien hat die phosphorärmsten Böden und ist heute der Kontinent mit dem vergleichsweise höchsten Verbrauch an Rohphosphaten in Düngemitteln (450.000 t bei ca. 21 Mio. Einwohnern)

### **Africa**

Afrika ist heute der bedeutendste Exporteur an Rohphosphaten (begrenzt auf wenige Staaten, v.a. Marokko, Südafrika, Israel).

### **Europa**

Europa ist der Kontinent mit den geringsten aller bekannten Reserven an Rohphosphaten, gleichzeitig aber auch der Kontinent mit den höchsten Gehalten an Phosphor in den Böden.

### **Deutschland**

Deutschland gehörte noch bis Mitte der 1980er Jahre mit jährlich etwa 2 Mio. t zu den größten Importeuren und Verbrauchern an Rohphosphaten. Seitdem ist der Import drastisch bis auf etwa 115.000 t gesunken. Im Jahr 2007 stammten 73,6 % des Imports aus Israel.

## **1.3 Zusammenhang zwischen Nutzung der Kernenergie, Urangewinnung und dem Abbau von Phosphor**

Der Phosphorabbau ist eng verknüpft mit der Produktion von Uran. Der Abbau der Nuklearwaffen nach Beendigung des kalten Krieges hat erhebliche Mengen an überschüssigem Uran auf den Weltmarkt gespült und damit zu zwischenzeitlich sinkenden Uranpreisen geführt. Damit war vorübergehend die Urangewinnung aus Rohphosphaten nicht mehr wirtschaftlich und die Gehalte an Schwermetallen in den Rohphosphaten stieg. Die Vorkommen an Uran in den abgebauten Rohphosphaten stellen die derzeit größten bekannten wirtschaftlich nutzbaren Vorkommen an Uran dar. Länder wie China mit reichhaltigen Phosphorvorkommen setzen auf einen Ausbau der Kernenergie.

Die potentiellen Uranvorkommen im Phosphatgestein werden auf 15-22 Mio. Tonnen Uran geschätzt (WISE, 2000; UIC, 2005). Bei einem derzeitigen weltweiten Verbrauch von 68.000 Tonnen (UIC, 2005) läge die Reichweite bei bis zu 220-324 Jahren. Die konventionellen Uranvorkommen werden dagegen auf 3,5 Mio. Tonnen geschätzt, dass einer statistischen Reichweite von etwa 50 Jahren entsprechen würde (UIC, 2005).

Eine Übersicht über die bisherigen industriellen Kapazitäten, die Uran aus Rohphosphaten gewinnen, bietet: <http://www.wise-uranium.org/pfac.html> ; last updated 20 May 2006

## **1.4 Phosphorpreise**

Die Phosphorpreise sind in den letzten Jahren weltweit stark angestiegen. Bereits in 2007 stieg der Durchschnittspreis von Phosphor aus Marroko, dem größten Exporteur von

„phosphate rock“ von \$40 to \$51 pro Tonne im Januar bis auf \$170 bis \$210 pro Tonne am Ende des Jahres.

Das führte z.B. dazu, dass auch in Deutschland die Kosten für die eingeführten Rohphosphate 2007 (9,7 Mio. EUR) gegenüber 1997 (13,9 Mio. EUR) nur um etwa 30 % niedriger lagen, obwohl im gleichen Zeitraum der Bedarf 2007 gegenüber 1997 von ca. 284.000 t auf 115.000 t gesunken sind, also um über 60% gefallen war.

### **Verbrauchsintensität: Wie „teuer“ ist der Rohstoff Phosphor für wen?**

Wie teuer der Einsatz des Rohstoffs Phosphor für ein Land ist, lässt sich an der Verbrauchsintensität (Verbrauch Phosphat pro 1000 \$ Bruttoinlandsprodukt) erkennen. Den geringsten Phosphatverbrauch haben danach die afrikanischen Länder Tansania, Nigeria und der Senegal mit einem Aufwand von 0,1 bis 0,4 kg Phosphaten pro 1000 \$ Bruttoinlandsprodukt (BIP). Gemessen am Bruttoinlandsprodukt den höchsten finanziellen Aufwand leisten für Phosphate die Länder Sambia, Äthiopien, Kenia und Vietnam mit 1,4 bis 2,2 kg Phosphaten pro 1000 \$ BIP. Im Mittelfeld liegen Länder wie Marokko, Indien, China, die Türkei, Chile mit etwa 1 kg Phosphat pro 1000 \$ BIP. Den relativ geringsten finanziellen Aufwand betreiben Korea, Israel, Japan und Deutschland mit etwa 0,1-0,2 kg Phosphat pro 1000 \$ BIP.

### **Phosphor als Spekulationsgeschäft**

Der Phosphormarkt unterliegt in den letzten Jahren extrem starken Schwankungen. Wichtige Einflussfaktoren sind dabei:

- China als das Land mit den derzeit größten Vorkommen durch z.B. Exportzölle in Zeiten hohen eigenen Bedarfs von China
- Energiepreise, die sich durch unterschiedliche hohe Transportkostenanteile ebenfalls auf die Phosphorpreise auswirken.
- Spekulation an den Rohstoffbörsen

Der Markt für Phosphor ist extrem anfällig. Der Preis reagiert sofort auf Produktionsausfälle oder eine höhere Nachfrage, da er als Nährelement unersetzbar ist. In Deutschland hat der Phosphorpreis noch keinen gravierenden Einfluss auf die Erzeugerpreise, da der Einsatz von Düngemittel „bislang nicht mehr als 10 Prozent der Kosten der Landwirte ausmachen und zudem Phosphat mit einer Düngermenge von unter 20 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> /Hektar/Jahr daran nur einen kleinen Anteil hat“ ((Bundestags-Drucksache 16/10922).

Dass die Düngemittelpreise in den ärmsten Ländern der Welt einen deutlich höheren Anteil der Kosten ausmachen können liegt nicht zuletzt an dem zum Teil wesentlich höheren Bedarf an Düngemittel bei phosphorarmen Böden.

### **1.5 Die Ressource Phosphor ist endlich – aber wann wird sie knapp?**

Der Anteil des Elementes in der Erdkruste beträgt etwa 0,11 Prozent. Man schätzt dass etwa 925.000 Mrd. Tonnen (t) Rohphosphate (phosphate rock) in der Erdkruste vorhanden sind. Davon sind bis heute etwa 68 Mrd. t nachgewiesen und derzeit etwa 18 Mrd. t als abbauwürdig (Kosten < 40\$/t) eingestuft. Bei einem aktuellen Verbrauch (2007) von 156 Mio.t pro Jahr ergibt sich damit eine „statistische Lebensdauer“ (Reichweite) von 115 Jahren (BGR, IFS 2008). „Auf Grund der aktuellen Preisentwicklung (bis zu 400 US-Dollar je Tonne Rohphosphat) könnte man bereits erhebliche Anteile der statischen Reserve hinzuzurechnen. Aktuelle Mengenabschätzungen dazu liegen jedoch nicht vor. Sowohl die geologisch nachweisbaren Phosphat-Mengen als auch ihre Abbauwürdigkeit, sind unter heutigen Bedingungen nicht zu beurteilen“ (Bundestags-Drucksache 16/10922).

### **Peak phosphorus**

Trotz dieser noch rel. langen Reichweite gehen einige Wissenschaftler davon aus, dass der peak phosphorus etwa im Jahre 2034 erreicht sein wird (Cordell, Drangert & White 2008). Die Annahme, dass der peak bereits erreicht sei, wie sich an den zwischendurch fallenden Produktionszahlen und gestiegenen Preisen zeige, ist m.E. inzwischen widerlegt. Im Gegenteil kann man bei einer zunehmend an Bedeutung gewinnenden Diskussion um die Risiken der mineralischen Phosphordüngung davon ausgehen, dass sich der weltweite

Bedarf, insbesondere durch die hohen Phosphorgehalte in den Böden der Industrieländer nicht mehr wesentlich steigern wird.

## 1.6 Pflanzenverfügbarkeit und Anreicherung von Phosphorverbindungen im Boden

Die Untersuchung der Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor im Boden stösst bis heute an methodische Grenzen. Die Phosphorkonzentration normaler lufttrockener Böden beträgt etwa 200-800 ppm. In der Regel ist etwa die Hälfte davon anorganisch und die andere organisch gebunden. Phosphorminerale sind meist zu schlecht löslich um Phosphat pflanzenverfügbar abzugeben. Das pflanzenverfügbare Phosphat-Ion ist meist stark an den Boden gebunden. Dies geschieht als adsorbiertes Anion, aber vor allem auch als unlösliches Eisen- oder Aluminiumphosphat bei niedrigen pH-Werten und als Calciumphosphat bei höheren pH-Werten. Die beste Verfügbarkeit wird bei pH-Wert 6-7 erreicht. Dauerdüngemittelversuche zeigen, dass im Gegensatz zu den Ergebnissen von Laborversuchen im Boden die für wenig pflanzenverfügbar gehaltenen Anteile des Phosphors in Böden mit der Zeit pflanzenverfügbar werden können.

Über die Pflanzenverfügbarkeit von recycelten Phosphordüngern liegen erst wenige Untersuchungen und Erfahrungen vor (Römer 2006). Es zeigt sich aber auch bei recycelten Phosphordüngern dass insbesondere Eisen (Fe-) gebundene Phosphorverbindungen am wenigsten pflanzenverfügbar sind.

## 1.7 Phosphorus flows - Phosphor verschwindet nicht – aber wo bleibt er?

Der natürliche Phosphorkreislauf der Erde ohne Einfluss des Menschen findet in Zeiträumen von Millionen Jahren statt. Aus den Lagerstätten und Böden erodieren und lösen Phosphor sich nur langsam. Durch Sedimentierung konzentrieren sich Elemente wie der Phosphor in Seen und Meeren und werden in geologischen Zeiträumen wieder zu phosphorhaltigen Gesteinen.

### Global

Der Mensch bringt derzeit jedes Jahr etwa 18 Millionen Tonnen Phosphor durch den Abbau phosphorhaltiger Gesteine zusätzlich in Umlauf. Der größte Anteil davon reichert unsere Böden mit Phosphor an. Die Angaben zur Bedeutung der Erosion an den „P-Verlusten“ in die Gewässer gehen sehr stark auseinander. Nach Cordell, Drangert & White 2008 landen durch Erosion zwischen etwa 8 Millionen Tonnen jedes Jahr in Flüssen, Seen und den Küstenregionen der Meere. Hinzu kommen weltweit noch einmal etwa 1,5 Millionen Tonnen die über menschliche Fäkalien in die Flüsse und Küstengewässer. Wenn der Phosphor erst einmal in unsere Gewässer gelangt ist, wird eine wirtschaftliche Rückgewinnung unmöglich. Aus Smil (2002) stammt die folgende Tabelle zu den Veränderungen des globalen P-Flows. Hierin werden die rezenten „P-Verluste“ durch Erosion mit über 30 Mt pro Jahr angegeben.

**Tabelle 1: Human intensification of the global phosphorus cycle (all values are in Mt P year<sup>-1</sup>) (aus Smil 2002)**

	Fluxes Natural	Preindustrial (1800)	Recent (2000)
Natural fluxes intensified by human actions			
Erosion	>10	>15	>30
Wind	<2	<3	>3
Water	>8	>12	>27
River transport	>7	>9	>22
Particulate P	>6	>8	>20
Dissolved P	>1	<2	>2
Biomass combustion	<0.1	<0.2	<0.3
Anthropogenic fluxes			
Crop uptake	–	1	12
Animal wastes	–	>1	>15
Human wastes	–	0.5	3
Organic recycling	–	<0.5	>6
Inorganic Fertilizers	–	–	15

Smil 2002 schätzt, dass sich die „Erosionsverluste“ des Phosphors z.B. durch Abholzung der Wälder und der Umwandlung der Wiesen in Äcker von 0,1-2 t/ha und Jahr auf bis zu 1-20 t/ha und Jahr erhöht haben.

Zahlreichen Angaben zu den P-Verlusten nach Nutzung und Ländern finden sich bei Liu (2006). Hier zeigt sich, wie enorm unterschiedlich die P-Bilanzen in verschiedenen Ländern ausfallen. Die Gründe hierfür sind vielfältig. Sie liegen in den unterschiedlichen Praktiken der Landnutzung (insbesondere bei der Tierhaltung) und der unterschiedlichen Menge von Düngemitteln mineralischer oder tierischer Herkunft. Mit zum Teil erheblichen Abweichungen lässt sich jedoch feststellen, dass die Böden der Entwicklungsländer in der Regel erhebliche Defizite an Phosphor aufweisen, während in den entwickelten Ländern der Phosphor-Gehalt der Böden mehr als ausreichend ist und meist eine positive Bilanz aufweist. Inzwischen erreichen auch Schwellenländer wie China mit der Anwendung der Kunstdünger seit vielen Jahren positive P-Bilanzen. Im Jahr 2000 lag der nationale Überschuss von Phosphor in den chinesischen Böden im Durchschnitt bei 16 kg P / ha (Liu 2005).

Zum Teil werden aber auch andere Zahlen zum globalen P-Flow angegeben:

(<http://xyvy.wordpress.com/2008/11/20/global-phosphorus-flows-in-the-industrial-economy-from-a-production-perspective/>)

Human activity has quadrupled the mobilization of phosphorus (P), a nonrenewable resource that is not fully recycled biologically or industrially. P is accumulated in both water and solid waste due to fertilizer application and industrial, agricultural, and animal P consumption. This paper characterizes the industrial flows, which, although smaller than the agricultural and animal flows, are an important phosphorus source contributing to the pollution of surface waters. We present the quantification of the network of flows as constrained by mass balances of the global annual metabolism of phosphorus, based on global consumption for 2004, all of which eventually ends up as waste and in the soil and water systems. We find that on a yearly basis, 18.9 million metric tons (MMT) of P is produced, of which close to 75% goes to fertilizer and the rest to industrial and others uses. Phosphoric acid is the precursor for many of the intermediate and end uses of phosphate compounds described in this study and accounts for almost 80% of all P consumed. Eventually, all of the P goes to waste: 18.5 MMT ends up in the soil as solid waste, and 1.32 MMT is emissions to air and water. Besides quantifying P flows through our economy, we also consider some possible measures that could be taken to increase the degree of recovery and optimization of this resource and others that are closely related, such as the recovery of sulfur from gypsum and wastewater (sludge), and fluorine from wet phosphoric acid production.

Im Rahmen des europäischen SuSan Projektes wurden auch für Europa umfangreiche Studien zu den P-Bilanzen an der Uni Wien durchgeführt (Rechenberger 2008), die an dieser Stelle nicht näher ausgeführt werden können.

Für Deutschland liegen unter anderem von Dockhorn (2008) vergleichsweise aktuelle P-Bilanzen vor. Die zeitlichen Veränderungen des P-Flows an einem konkreten Beispiel, der Stadt Linköping zwischen 1870-2000 stellen Schmidt-Neset et al. dar.

Phosphorus is an important substance for agricultural production of food. Being a limited resource, it is of great interest for regional, as well as global food security. At the same time it presents a pollution problem for the aquatic environment in Sweden since it contributes to eutrophication of surface waters and the Baltic Sea. This study analyses the flow of phosphorus based on consumption and production of food for an average inhabitant of a Swedish city, Linköping, from 1870 until 2000. The study shows the changes in flows within the system of production and consumption of food, as well as between the different processes in this system, such as agriculture, food processing, consumption and waste handling, and output flows to the environment. The main changes in this system over time are a) the increasing flow of phosphorus reaching the consumer and hence the waste handling system, b) the increase in the flow of products from animal production, which mainly causes the increase in (a), and most notably c) the increased input of chemical fertilizer.

## 1.8 Eutrophierung

Zu den wichtigsten limitierenden Nährstoffen in Gewässern zählen Stickstoff und Phosphor. Beide spielen als Minunfaktor eine entscheidende Rolle für die Pflanzenproduktion in einem Gewässer. Im Süßwasser überwiegt meist der Phosphor als der limitierende Faktor gegenüber dem Stickstoff. Im Salzwasser ist es eher der Stickstoff. Sind beide im Überschuss vorhanden kommt es zu einer Algenblüte. Der bakterielle Abbau der absterbenden Algen verbraucht enorm viel Sauerstoff. In der Folge sinkt der Sauerstoffgehalt und es kommt im Extremfall zum Massensterben der höheren Organismen, die auf eine ausreichende Sauerstoffversorgung angewiesen sind.

Kurzzeitig erhöhte Phosphateinträge können, so lange noch genug Sauerstoff da ist, relativ lange abgepuffert werden. Der überschüssige Phosphor sedimentiert als unlösliches Eisen(III)phosphat und wird dem biologischen Kreislauf entzogen. Erst mit länger anhaltenden Sauerstoffdefizit kommt es zu gravierenden Veränderungen, die im Einzelfall sogar zur Remobilisierung des bereits sedimentierten und gebunden Phosphors führen können und dadurch trotz starker Reduktion der Einträge noch lange die hohe Algenproduktion und sauerstoffzehrenden Prozesse aufrecht erhalten.

Der anaerobe Abbau vor allem in bodennahen Schichten produziert neben dem klimawirksamen Methan auch toxische Stoffwechselprodukte wie Ammoniak. Die unter den reduzierenden Bedingungen stattfindende Umwandlung von Eisen(III)phosphat zu gut löslichem Eisen(II)phosphat bringt dieses wieder zurück in den biologischen Kreislauf und kurbelt die Biomasseproduktion erneut an.

Der Eintrag von Phosphat aus Wasch- und Reinigungsmitteln (Detergentien) in Gewässer hat weltweit stark abgenommen. Dafür spielen aber immer noch phosphorhaltige Insektizide eine Rolle, über deren gebundene Rückstände man immer noch zu wenig weiss.

### Dead zones

Inzwischen sind trotz Baus von Kläranlagen vor allem durch die „diffusen“ Einträge aus der Landwirtschaft auch zunehmend die Küstenregionen von Eutrophierung betroffen. Inzwischen wurden weltweit über 400 „Dead Zones“ identifiziert.

Zu diesen Dead Zones gehören z.B. die Küstenregionen des Mississippieltas aber auch weite Bereiche der Ostsee. Um die Nährstoffeinträge in die Ostsee zu verringern haben sich die Baltischen Staaten im „Baltic Sea Action Plan“ der Helsinki Comission (HELCOM) auf folgende Reduzierungen bis zum Jahr 2021 verständigt:

**Tabelle 2: Vereinbarte Nährstoffreduktionen der Baltischen Staaten in die Ostsee bis 2021 (HELCOM Baltic Sea Action Plan HELCOM Ministerial Meeting, Krakow, Poland, 15 November 2007)**

	Phosphorus (tonnes)	Nitrogen (tonnes)
Denmark	16	17,210
Estonia	220	900
Finland	150	1,200
Germany	240	5,620
Latvia	300	2,560
Lithuania	880	11,750
Poland	8,760	62,400
Russia	2,500	6,970
Sweden	290	20,780
Transboundary Common pool	1,660	3,780

Zu den dead zones siehe auch:

<http://toxics.usgs.gov/hypoxia/>

<http://www.sierraclub.org/cleanwater/waterquality/deadzone.asp>

### 1.9 Belastung der mineralischen Phosphordünger mit Schwermetallen

Die weltweite Bedeutung phosphorhaltiger Dünger für die Belastung der Böden mit Schwermetallen korreliert mit der Dauer, dem Umfang und den Schwermetallgehalten der eingesetzten Düngstoffe. Die Unterschiede und der Umfang sind drastisch. Im vorliegenden Review müssen sich die nachstehenden Aussagen auf Deutschland beschränken. Die Phosphatdüngung ist in Deutschland spätestens seit 1995 stark zurückgegangen. Aufgrund der starken Gehalte an Phosphor im Boden findet eine gezielte Aufdüngung kaum noch statt. Eine freiwillige Selbstbeschränkung der Mitgliedsfirmen vom Industrieverband Agrar e.V. (IVA) führte seit 1984 zur Senkung des Cadmiumeintrags in Böden. Heute werden in Deutschland weitgehend schwermetallarme Rohphosphate verwendet (BfR-Statusseminar 2005, Pradt in BfR 2007). Umfassende Zahlen zu den Schwermetallgehalten in importierten Phosphatdüngern liegen jedoch nicht vor.

## Beispiel Uran

Insgesamt liegen keine ausreichenden Daten für die Beurteilung der zukünftigen Gefahren einer Belastung der Böden in Deutschland z.B. mit Uran vor. Eine erste Riskobewertung vom Bundesinstitut für Riskobewertung (BfR) vom April 2007 in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) liegt jedoch vor und fasst das Wissen zusammen (BfR 2007). Sie befasst sich jedoch in erster Linie mit der aktuellen Belastungen von Trinkwasser und Lebensmittel mit Uran. Bei anhaltender Aufnahme höherer Urankonzentrationen kann es durch die chemische Giftigkeit der Substanz zu Nierenschäden kommen. Die radioaktiven Zerfallsprodukte von Uran können Krebs auslösen. Für die Bewertung eines möglichen Gesundheitsrisikos von Uran muss daher sowohl die chemische als auch die radiologische Giftigkeit betrachtet werden.

Das BfS und das BfR kommen in ihren Risikobewertungen zu folgenden Ergebnissen:

***Das radiologische Risiko durch Uran, welches über die Nahrung, inklusive Trink- und Mineralwasser aufgenommen wird, ist für Verbraucher in Deutschland sehr gering. Die Strahlenexposition liegt weit unter den Dosisrichtwerten. Vergleichsweise bedeutender ist die chemische Toxizität der in diesen Lebensmitteln gemessenen Urankonzentrationen. Einen Grund zur Sorge sieht das BfR allerdings nicht: Nach dem heutigen wissenschaftlichen Kenntnisstand stellt die chemische Wirkung von Uran, das über die Nahrung aufgenommen wird, kein nennenswertes Gesundheitsrisiko für Verbraucher dar. Untersuchungen haben gezeigt, dass Uran sich innerhalb der Nahrungskette nicht anreichert und Pflanzen dem Boden nur sehr wenig Uran entziehen. Zu einem möglichen Gefährdungspotenzial von uranhaltigen Phosphatdüngern, die auf Ackerboden aufgebracht werden, sind allerdings noch Fragen offen. Es kann auch nicht ausgeschlossen werden, dass Verbraucher über Trink- oder Mineralwasser gesundheitlich bedenkliche Mengen an Uran aufnehmen, wenn dieses aus Regionen mit hohem natürlichen Uranvorkommen stammt. ... Auf europäischer Ebene gibt es bislang keinen einheitlichen Höchstwert für Uran in Lebensmitteln und insbesondere in Trink- und Mineralwasser. Das BfR empfiehlt die gesundheitliche Bewertung von Uran und die Ableitung eines solchen Wertes durch die europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA).***

Die in Deutschland eingeführten Rohphosphate, die vorwiegend aus den USA, Nordafrika und Israel kommen, weisen gegenüber den Böden einen bis zu fünfzigfach erhöhten Gehalt an U-238 und Ra-226 auf. Die spezifischen Aktivitäten der daraus hergestellten mineralischen Phosphatdünger betragen für U-238 280 - 920 Bq/kg (TSP max. 3000 Bq/kg), Radium-226 160 - 520 Bq/kg (TSP max. 1150 Bq/kg), K-40 30 - 6200 Bq/kg (Angaben Bundesamt für Strahlenschutz, Berlin). Messungen ergaben für Lagerarbeiter 2,3 mSv pro Jahr und in der Landwirtschaft bis zu 1 mSv pro Jahr. Gemäß EG-Richtlinie 96/29/EURATOM DES RATES vom 13. Mai 1996 liegt der Grenzwert für die effektive Dosis bei 1 mSv pro Jahr (Brand 2007).

Nach Informationen der FAL gelangen durch eine übliche Phosphor-Düngung in Höhe von 22 kg/ha Phosphor mit mineralischen Phosphor-Düngemitteln jährlich 10-22 g/ha Uran auf den Acker. Dem stehen aber Austräge (Entzüge Ernteprodukte, Erosion, Auswaschung) von kaum mehr als 1 g/ha Uran entgegen. Anreicherungen von Uran im Boden sind somit bei mineralischer Phosphor-Düngung unvermeidbar. Mit Wirtschaftsdüngern gelangen dagegen bei gleicher Höhe der Phosphor-Düngung nur Uran-Mengen in Höhe des Austrages in die Böden. Vor diesem Hintergrund hat die Phosphor-Düngung mit Wirtschaftsdüngern also deutliche Vorzüge gegenüber einer Zufuhr von Phosphor mit Mineräldüngern.

## Beispiel Cadmium

Ein weiteres langfristiges Umwelt-Problem im Zusammenhang mit der Anwendungen von Phosphor-Dünger und Klärschlämmen ist das Vorhandensein von Cadmium in Düngern und Klärschlämmen (Van Kauwenbergh, 1997). Cadmium (Cd) ist ebenso wie Uran ein Bestandteil in den Ausgangsgesteinen der Phosphorgewinnung, im Durchschnitt fast 70-mal höher als z.B. in Schiefer. Die Tagesdosis für einen Erwachsenen sollte unter 50-70 µg Cd liegen. Die Belastung der P-haltigen Dünger liegt im Durchschnitt bereits bei 40µg Cd pro Tag. Daher haben bereits viele Länder (z.B. Australien, Dänemark, Deutschland, Japan und die Niederlande) bereits Cd Grenzwerte für Düngemittel in den letzten Jahren erlassen. Für die ärmeren Länder könnte das bedeuten, dass sie in Zukunft die Düngemittel mit den höheren Cd-Werten bekommen (Smil 2002).

## **2 Fäkalien, Klärschlamm, und tierische Abfälle als Phosphorquelle**

### **2.1 Fäkalien, Klärschlämme und Wirtschaftsdünger**

Wie aus dem Atlas der UN-Habitat (2008) zur Verwendung von Fäkalien, Klärschlamm und Wirtschaftsdünger (meist unter biosolids zusammengefasst) hervorgeht ist der Umgang mit den biosolids in den Ländern bezüglich Ausbringung, Schwermetallgrenzwerten etc. sehr unterschiedlich. Für einige Länder sind aus Kostengründen die „biosolids“ die einzige Möglichkeit der Düngung und der Rückführung der Nährstoffe incl. der organischen Humusstoffe.

Allein in Deutschland fallen jährlich ca. 2,3 Millionen Tonnen Klärschlamm (Trockensubstanz) an. Darin sind neben anderen Nährstoffen ca. 50.000 t Phosphor enthalten, dies entspricht inzwischen fast der Hälfte der jährlichen in Deutschland benötigten Importmenge an Phosphat-Düngemitteln. Darüberhinaus fallen über 600.000 t Abfälle tierischen Ursprungs an. Insbesondere der Verbot der Verfütterung von Tiermehl (Stichwort BSE) hat zu einer vermehrten Einfuhr von Futtermitteln geführt und damit zu einer wenig effizienten Phosphorrückgewinnung bei der Tierproduktion.

### **2.2 Mikroverunreinigungen in biosolids**

Neben hygienischen Bedenken sind Mikroverunreinigungen ein wichtiges und ernst zunehmendes Argument gegen die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung. In den letzten Jahren ist ein breites Spektrum an teilweise wenig erforschten Schadstoffen im Klärschlamm nachgewiesen worden, deren langfristige Auswirkungen auf die Umwelt nicht abschätzbar sind. In der internationalen Diskussion stehen nach wie vor die Schwermetalle und Dioxine/Furane im Vordergrund. Die Gehalte von Düngern mit diesen Schadstoffen konnten vorwiegend in den Industriestaaten deutlich gesenkt werden. Neuere Untersuchungen haben den Fokus inzwischen auf z.B.:

- Substanzen mit endokriner (hormonähnlicher) Wirkung (z.B. Nonylphenol, zinnorganische Verbindungen etc.). Sie führen z.B. zur Vermännlichung von Fisch- oder Schneckenbeständen.
- Arzneimittelrückstände wie Schmerzmittel, Lipidsenker und Antibiotika.

Weitergehende Untersuchungen zur Klärschlammbelastung mit organischen Schadstoffen aus Nordrhein-Westfalen ergaben, dass Rückstände aus Wasch- und Reinigungsmitteln, Desinfektions- und Flammenschutzmitteln sowie hochgiftige Stoffe aus industrieller Produktion in inzwischen verbreitet in Klärschlämmen zu finden sind (Kläranlage D, Quelle: MUNLV-NRW, Fahlenkamp et al. 2006).

Institutionen wie das Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde sprechen sich daher seit Jahren gegen die Verwendung der Klärschlämme und für eine Monoverbrennung der Klärschlämme zur schadstoffarmen Aufbereitung der darin enthaltenen Nährstoffe aus (Kratz & Schnug 2006). Andere sehen bisher in den im Boden gemessenen Gehalten dieser Stoffe noch keinen Grund auf den Einsatz von Sekundärrohstoff- und Wirtschaftsdünger, insbesondere der Klärschlämme zu verzichten (Bundes-Qualitätsgemeinschaft Sero-Dünger e.V.). Das Eckpunktepapier „Neufassung der Klärschlammverordnung Ressourcen nutzen - Böden schonen“ schlägt auf der Klärschlamm-Expertentagung über Ziele und Inhalte einer Novelle der Klärschlammverordnung am 6./7. Dezember 2006 vor: *„Grundsätzliches Festhalten an dem umweltpolitischen Ziel, dass es längerfristig zu keiner (wesentlichen) Schadstoffanreicherung in Böden u.a. durch Düngemaßnahmen, also auch durch Klärschlammdüngung, kommt.“*

(<http://www.erneuerbare-energien.de/inhalt/38103/20294/>)

### **2.3 Verbrennung von Klärschlamm und organischen Rückständen aus der Tierproduktion (Tiermehle)**

Trotz des Nährstoffverlustes gehört die Verbrennung der Klärschlämme und des Tiermehls in vielen Industrieländern zunehmend zur gängigen Praxis. Vor allem in großen, dicht besiedelten und technologisch weit fortgeschrittenen Ländern erreicht die „thermische Verwertung“ inzwischen große Anteile. Japan verbrennt inzwischen mehr als 70% seines

Schlammes, die Niederlande mehr als 58%, Deutschland mehr als 34%. Auch in Kanada (>30%) und den USA (>15%) haben die thermisch verwerteten Klärschlammengen einen nennenswerten Anteil erreicht. Selbst einige osteuropäische Staaten, wie Slowenien verbrennen inzwischen größere Anteile ihres getrockneten Klärschlammes (UN-Habitat 2008). Bei der Mitverbrennung des Klärschlammes als Energieträger in der Zementindustrie kann der Phosphor die Eigenschaften des Zements beeinflussen.

### **3 Vom Stoffstrom zum Stoffkreislauf am Beispiel Phosphor**

Auf die Große Anfrage der Abgeordneten Dr. Uschi Eid, Nicole Maisch, Rainer Steenblock, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/ DIE GRÜNEN – Drucksache 16/9387 – hat die Bundesregierung auf die Frage welche internationalen und deutschen Strategien in Bezug auf den Schutz der Phosphorressourcen existieren folgende Antworten gegeben:

*„Deutsche Strategien:*

***Unterstützung des sachgerechten Einsatzes von Phosphatdüngemitteln (wirkungsvollstes Sparen von Ressourcen).***

***Phosphate enthalten Schwermetalle, daher begrenzen Regelungen für Grenzwerte von Schwermetallen auch die Nutzbarkeit von Phosphatressourcen.***

***Sachgerecht abgewogene Regelungen für Schwermetalle (kurzfristig) und die preiswerte Eliminierung der Schwermetalle aus dem Rohphosphat (langfristig) sind folglich ein wichtiges Teilziel im Rahmen einer Gesamtstrategie.***

***Die Wiederverwertung von bereits im Umlauf befindlicher Phosphatmengen als Ausgangstoff für Düngemittel (siehe Frage 58). Dies wird in Deutschland u.a. durch die entsprechende Ausgestaltung abfallrechtlicher und düngemittelrechtlicher Vorschriften bereits unterstützt. Das Substitutionspotential ist allerdings begrenzt: bezogen auf Klärschlamm und Tiermehle beträgt dieses in Deutschland circa 10 bis 12 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> /Hektar/Jahr. Bei einem angenommenen langfristigen Bedarf für eine nachhaltige Düngung von circa 60 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> /Hektar/Jahr bei allerdings starker Schwankung wären dies maximal 20 Prozent des Bedarfes.***

*Internationale Strategien:*

***Die stoffliche Wiederverwertung von als Düngemittel geeignetem Klärschlamm ist auch das Ziel von Regelungen der EU (Frage 58). Die stoffliche Wiederverwertung von tierischen Nebenprodukten (tierische Fäkalien, Knochenmehl, Fleischmehl u. a.) als Düngemittel wird durch EGRecht ebenfalls unterstützt. Weltweit bestehen Anpassungsstrategien durch preisbedingt verstärkte Nutzung bislang nicht abbaubarer Lager.“***

Die „Schwellenländer“ zeigen am deutlichsten wo die Probleme liegen. Sie gehören heute zu den größten Verbrauchern mineralisch abgebauter Phosphordünger. In Ihnen sind die Austräge an Phosphor in Flüsse und Küstengewässer durch Erosion und kommunale Einleitungen am größten. Durch die zunehmende industrielle Produktion sind dort zumindest regional auch die biosolids am meisten mit Schwermetallen belastet. Viele Flüsse z.B. in China gleichen heute in ihrem Zustand den Verhältnissen des Rheins zum Höhepunkt der Verschmutzungen in den 1970er Jahren. Nach westlichen Standards müsste man unter diesen Umständen dort von der Ausbringung dieser biosolids konsequenterweise abraten.

#### **3.1 Forschungsinitiativen zum P-Recycling**

Es kann im Rahmen der vorliegenden Übersicht keine Analyse der weltweiten Forschungsprojekte erstellt werden. Die Darstellung beschränkt sich daher auf ausgewählte Initiativen im Wesentlichen zur Rückgewinnung von Phosphor.

#### **Gesetzliche Rahmenbedingungen**

Im Rahmen der Föderalismusreform wurde in Deutschland im September 2006 das Recht zur umfassenden Gesetzgebung im Bereich der Abwasserentsorgung auf den Bund überführt. Vor diesem Hintergrund erfolgen derzeit folgende bundespolitische Maßnahmen im Hinblick auf die Abwasserbeseitigung:

- Überprüfung der mehr als 50 Anhänge zur Abwasserverordnung auf Vereinfachungsmöglichkeiten und Anpassungsbedarf an den Stand der Technik,
- Überprüfung der Anforderungen für die Regenwasserbewirtschaftung,

- Festlegung von Mindestmaßnahmen für die Energieeffizienz von Kläranlagen
- Rückgewinnung von Rohstoffen (zum Beispiel Phosphor und Nitrat) aus Abwasser und Klärschlamm (Bundestag-Drucksache 16/10922).

Insofern steht das Thema des Recycling von Phosphor bundespolitisch bereits relativ weit oben auf der Agenda.

### **Tagungen & Symposien**

Seit den 1990er Jahren finden zahlreiche internationale Symposien oder Tagungen zum Thema Phosphorrecycling, wie z.B. auf der IWA-Tagung vom 2.-4. Oktober 2002 in Amsterdam in den Niederlanden. Die Beiträge sind zusammengefasst in Water Science & Technology, IWA Publishing, Volume 48 Number 1 „From Nutrient Removal to Recovery“.

Wie der Einsatz weiter minimiert und Phosphate aus inländischen Sekundärrohstoffquellen rückgewonnen werden können, darüber diskutierten auch in Deutschland bereits im Februar 2003 über 100 Fachleute aus dem In- und Ausland in Berlin. Anlässlich des vom Umweltbundesamt und dem Institut für Siedlungswasserwirtschaft der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen organisierten Symposiums heißt es in einer Pressemitteilung vom 3.3.2003 des Umweltbundesamtes, dass der Phosphateinsatz in Deutschland zwar deutlich reduziert wurde aber der Phosphorüberschuss von etwa zehn Kilogramm Phosphor pro Jahr und Hektar Ackerfläche immer noch zu hoch sei.

(<http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/2003/pd01903.htm>)

Zuletzt haben das Thema in Deutschland Braunschweiger Nährstofftage vom 10-11. November aufgegriffen. Die nächste große internationale Tagung zum Thema wird vom 10.-13. Mai in Vancouver, British Columbia, Canada stattfinden mit dem Titel „International Conference on Nutrient Recovery from Wastewater Streams“. (<http://www.nutrientrecovery2009.com>)

### **Klärschlammausbringung / Klärschlammverbrennung**

Für die Klärschlammverwertung gibt es folgende Möglichkeiten:

- Direkte Aufbringung in der Landwirtschaft
- Mono-Verbrennung und Aschen in die Landwirtschaft
- Mono-Verbrennung und Aschen in Deponie
- Mitverbrennung im Zementdrehrohr
- Mitverbrennung im Kohlekraftwerk
- Mono-Verbrennung und thermo-chemische Behandlung der Aschen (z.B. SUSAN Technologie)
- Nass-chemische Klärschlammbehandlung

Nicht zuletzt die kommunale Abwasser Richtlinie 91/271 der EU hat wirksam dazu beigetragen, dass insbesondere Phosphor in zunehmenden Maße aus kommunalem Abwasser entfernt wird. In ihr ist festgelegt, dass in Kläranlagen mit mehr als 6.000-10.000 Einwohnerwerten, die als Vorfluter ein für die Eutrophierung potentiell anfälliges Gewässer haben, der Phosphor entfernt werden muss.

(<http://www.europa.eu.int/comm/environment/water/water-urbanwaste/report2/report.html>)

Das Potential an Phosphor im Abwasser ist groß. Im Durchschnitt gelangen in Mitteleuropa etwa 1,5 g P pro Einwohner ins Abwasser. In Europa werden im Durchschnitt nur noch 53% des Klärschlammes landwirtschaftlich verwertet (EU COM (98)775). Insbesondere Schweden und Deutschland haben angekündigt Ziele für die Wiedergewinnung von Phosphor festzulegen. Ebenso das Vereinigte Königreich von England hat die Wiedergewinnung von Phosphor in ihre nationale Strategie übernommen.

(UK Environmental Agency Aquatic Eutrophication Management Strategy, June 2002, page 28 [http://www.dwaf.gov.za/projects/eutrophication/Website%20Survey/United%20Kingdom/first\\_annual\\_review.pdf](http://www.dwaf.gov.za/projects/eutrophication/Website%20Survey/United%20Kingdom/first_annual_review.pdf))

Bereits der schwedische Aktionsplan von 2002 formuliert bis zum Jahr 2015 das Ziel mindestens 60% der Phosphorverbindungen im Abwasser (Klärschlamm) wieder für den Einsatz in der Landwirtschaft nutzbar zu machen. Mindestens die Hälfte davon auf Ackerland. (<http://www.miljomal.nu/english/obj15.php>)

Auch die Europäische Waschmittel-Industrie hat sich zum Ziel gesetzt, dass innerhalb eines Jahrzehnts 25% der Waschmittel-Phosphate aus Recycling-Phosphor stammen sollen.

(<http://www.ceep-phosphates.org/Documents/shwDocument.asp?NID=1&HID=34&SID=75>)

### **Klärschlammfällung / Struvit**

Inzwischen sind weltweit eine ganze Reihe von Pilotanlagen zur Rückgewinnung von Phosphor in Betrieb. Viele davon beschäftigen sich mit der Rückgewinnung aus Struvit (z.B. Calcium oder Kaliumstruvite). Auch ungewollt treten bei der Abwasserreinigung oder der Gülleaufbereitung teilweise so hohe Konzentrationen von Ammonium, Magnesium und Phosphat auf, dass die Sättigungskonzentration von Magnesium-Ammonium-Phosphat (Struvit,  $(\text{NH}_4)\text{Mg}[\text{PO}_4] \times 6 \text{H}_2\text{O}$ ) überschritten wird. Das schwerlösliche Salz, in kristalliner Form als struvit bezeichnet, fällt aus und kann in Klär- oder Gülleaufbereitungsanlagen zu erheblichen Beeinträchtigungen (Inkrustierungen von Leitungen und Pumpen) führen. Mit der Fällung und Nutzung der Struvite beschäftigen sich z.B. Anlagen in Kanada, Großbritannien, Italien und Japan. Ebenso liegen erste Studien zum Wert des Struvits als Dünger vor.

(<http://www.ceep-phosphates.org>, <http://www.phosphorus-recovery.tu-darmstadt.de/>, <http://www.phosphate-forum.org/>, <http://www.cefic.org/>)

Neben den Verfahren zur Rückgewinnung aus Struvit nehmen derzeit breiten Raum die Verfahren zur Rückgewinnung aus Klärschlammaschen ein.

### **P-Recycling aus Klärschlammasche**

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) riefen im Jahr 2004 die gemeinsame Förderinitiative „Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe - insbesondere Phosphor“ ins Leben. Betreut werden die BMBF-Projekte durch den Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe, Bereich Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE).

Derzeit werden drei technische und zwei begleitende Projekte gefördert:

#### **Begleitprojekte**

- PhoBe: Phosphorrecycling - Ökologische und wirtschaftliche Bewertung verschiedener Verfahren und Entwicklung eines strategischen Verwertungskonzeptes für Deutschland
- „Phosphorrecycling - Charakterisierung der Düngewirkung recycelter Phosphatdünger in Feld- und Gefäßversuchen“ des Department für Nutzpflanzenwissenschaften der Georg-August-Universität Göttingen

#### **Technische Projekte:**

- Verbundprojekt PASCH: Rückgewinnung von Pflanzennährstoffen, insbesondere Phosphor aus der Asche von Klärschlamm sowie Tier- und Knochenmehl
- Verbundprojekt PHOXNAN: Optimierte Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlämmen durch ein Hybridverfahren aus Niederdruck-Nassoxidation und Nanofiltration
- Verbundprojekt PROPHOS: Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser, Klärschlamm und Rückständen thermischer Klärschlammbehandlung

(<http://www.phosphorrecycling.de/>)

Unter den europäischen Projekten ist vor allem das SUSAN-Projekt (Sustainable and Safe Re-use of Municipal Sewage Sludge for Nutrient Recovery) zu nennen.

Im Mittelpunkt des EU-Projekts SUSAN steht die Entwicklung und Optimierung einer thermochemischen Behandlung von Klärschlammaschen, mit der die Düngewirkung der Aschen konventioneller Mineraldünger (Thomaskali und Superphosphat SSP) erreicht wird und die Schwermetallkonzentrationen unter den Grenzwerten der Düngemittelverordnungen europäischer Länder liegen. Eine Pilotanlage mit einem Tagesdurchsatz von sieben Tonnen wurde 2008 in Betrieb genommen und die erste großtechnische Anlage befindet sich in der Planungsphase (ASH DEC Umwelt AG). Wissenschaftlich begleitet wird das Projekt von der TU Wien. Im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung wurden auch verschiedene

Stoffstromanalysen (material flow analysis, MFA) und statistische Angaben für Phosphor in Europa erarbeitet.

(<http://www.susan.bam.de/>)

### **Direkte Verwendung von Fäkalien und Urin**

Für die direkte Verwendung von Fäkalien existieren seit 2006 entsprechende Guidelines der WHO. Auf die nähere Erläuterung wird an dieser Stelle verzichtet. Erwähnt werden müssen aber an dieser Stelle die Ansätze, die „flüssigen“ Abfälle des Menschen in Zukunft ähnlich zu behandeln, wie die festen organischen Abfälle (WHO 2006, Schönning, Caroline 2001). Stellvertretend sei hier auf die Bücher von Winblad (1995) oder Jenkins (2005) hingewiesen. Letzterer schlägt auch für die Industrieländer vor in großem Stil die Fäkalien nicht weg zu spülen, wie bisher, sondern die Fäkalien und den Urin ohne Wasser (ggf. getrennt) zu sammeln und wie den Hausmüll ab zu transportieren, zu kompostieren (oder zu trocknen), zu hygienisieren und wieder landwirtschaftlich zu verwerten (vgl. auch Winblad 1995).

### **Phosphorrückgewinnung aus Urin**

Hier zu sind unter anderem aus Schweden, der Schweiz und Australien über Jahrzehnte wertvolle Forschungsarbeiten bekannt (Drangert 1998, Larsen & Gujer 1996, Larsen 2001, vgl. auch <http://www.nowaquatis.ch>, Cordell 2006).

### **Terra Preta**

Terra Preta ist kein neues Konzept. Der Begriff Terra Preta leitet sich aus den schwarzen, huminstoffreichen Böden des Amazonas. Diese Böden sind nicht naturgegeben, sondern haben sich unter dem Einfluss der Ureinwohner gebildet. Durch Verbrennung der Pflanzen bei niedrigen Temperaturen (Pyrolyse) entsteht ein nährstoffreiches Substrat, in dem sich Stickstoff Phosphor und Kohlenstoff stark angereichert haben.

Durch die Pyrolyse (vorzugsweise von landwirtschaftlichen Abfällen) werden z.B. aus längererkettigen Kohlenwasserstoffen wie Cellulose kürzere, einfachere Moleküle, die von Mikroorganismen leichter abgebaut und verwendet werden können. Der Phosphor bleibt dabei fast vollständig im Substrat zurück und geht nicht verloren. Das bei der Pyrolyse entstehende Gas kann energetisch genutzt werden. In wie weit die Pyrolyse / Terra Preta in Zukunft für eine effizientere P-Nutzung in Frage kommen, kann an dieser Stelle nicht beurteilt werden.

## **3.2 Verminderung des Phosphorverlustes durch Erosion**

Die Vermeidung der Erosion ist aus vielerlei Gründen wichtig. Aus den Stoffflussanalysen zum Phosphor wird die immense Bedeutung der Vermeidung von Erosion phosphorhaltiger Böden deutlich. Jahrzehntelang übermässig mit Phosphor gedüngte Böden sind eine langzeitige Quelle für die Mobilisierung von Phosphor durch Erosion in die Gewässer. Hinzu kommen P-Verluste durch direkte Gulleabschwemmung oder biosolids. Das Thema Erosion ist zu umfangreich und auf weitergehende Ausführungen muss daher in der vorliegenden Zusammenstellung verzichtet werden.

## **3.3 Effizienzsteigerungen**

### **Pflanzenbau**

Dreh und Angelpunkt einer effizienten Nutzung des Phosphors ist eine ausgeglichene P-Bilanz (Hoftorbilanz). Sie ist leider noch nicht gängige Praxis, weil es noch diverse methodische Schwierigkeiten bei der Umsetzung gibt. Wie und wie viel Bodenproben müssen wann entnommen werden und welchen Einfluss hat das Wetter, die Bodenbearbeitung etc.. Darüberhinaus kann man den P-Einsatz durch reduzierte Bodenbearbeitung, Fruchtfolgen und dem Recycling von Ernterückstände deutlich verringern.

## **Tierproduktion / Fleischkonsum**

Es gibt zahlreiche Möglichkeiten eines effizienteren Einsatzes des Phosphors. Die effektivste Möglichkeit den Einsatz an Phosphor ohne Kosten zu reduzieren ist die Verringerung des Fleischkonsums in den wohlhabenden Ländern, in denen der Pro-Kopf-Verbrauch über 60 kg pro Jahr liegt (Fleisch- und Milchprodukte über 100 kg/Jahr). Über die Hälfte der weltweiten Getreideproduktion dienen der Fleischproduktion und hierzu werden 2/3 der Phosphatdüngemittel verwendet.

Eine andere Möglichkeit ist die Verbesserung der landwirtschaftlichen Praxis. Eine bessere Bewirtschaftung des Grünlandes (Grassmanagement in den Übergangszeiten, dadurch Verringerung des Einsatzes an Zukauf von Futtermittel, Rückgang der Phosphorkonzentrationen in der Milch)

In Dänemark hat man festgestellt, dass lokale P-Überschüsse eng korreliert mit der tierischen Erzeugung sind. In Gebieten mit intensiver Tierhaltung gibt es einen Überschuss und in denen mit hoher Pflanzenproduktion ein Defizit in der P-Bilanz (Hoftorbilanz).

Eine Lösungsmöglichkeit besteht u.U. darin, eine bessere Verteilung der Dünger tierischer Herkunft zu erreichen, z.B. durch Technologie zur Trennung des Phosphors aus der Gülle? Darüberhinaus wird in Dänemark auf Böden, die der Tierproduktion dienen damit experimentiert huminstoffreiche (säure) Dünger zur Aktivierung des gebundenen Phosphors im Boden zu verwenden (Leif Knudsen: Danish Agricultural Advisory Service Aarhus, Denmark).

## **Landwirtschaftliche Beratung**

Ebenfalls aus Dänemark liegen Erfahrungen vor, wie sinnvoll und wichtig eine umfangreiche Beratung der Landwirte ist (mündliche Mitteilung Schnug). Auf nähere Erläuterungen zu diesem Aspekt muss an dieser Stelle verzichtet werden.

## **4 Schlussfolgerungen / Strategie eines workshops / Ausblick**

Die allgemeinen Ziele einer Phosphorpolitik auch in der Entwicklungszusammenarbeit sollten sein:

- Verminderung der Erosion und damit der P-Verluste
- Kreislaufwirtschaft
- Vermeidung von Schwermetall-Belastungen durch z.B. Cadmium, Uran
- Trennung der Abwasserteilströme wo nötig und möglich
- Ausgeglichene Hoftorbilanzen
- Effizienzsteigerungen (Tierproduktion)
- Verminderung Fleischkonsum

Aufgabe des workshops sollte es sein, die

- P-Verluste darzustellen, insbesondere durch Erosion und durch die Verbrennung von Tiermehl und menschlichen Fäkalien (Unterschiede in den P-Flows)
- Möglichkeiten aufzuzeigen, den Phosphor im Boden zu remobilisieren und damit die Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor zu verbessern
- Effizientere Nutzungsmöglichkeiten von Phosphor sowie die
- Möglichkeiten des wirtschaftlichen P-Recyclings (Vom Stoffstrom zum Stoffkreislauf) aufzeigen und
- Thesen, Ziele und Leitlinien der Entwicklungszusammenarbeit hinsichtlich der Phosphorrückgewinnung formulieren (Anforderungen an biosolids, Klärschlämme, Urin, Fäkalien etc.)

### **P-Verluste**

Je nach Autor liegen die P-Verluste durch Erosion auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen zwischen 8-10,5 Mio. t P pro Jahr. Dieser massive Verlust wird vor allem verursacht durch Abtragungen des Mutterboden durch Regen auf Ackerland, ein kleinerer Teil durch Winderosion. Die Erosion des Bodens gehört also auch beim Thema Phosphor zu den gravierendsten ökologischen Krisenthemen. Schätzungen gehen dahin, dass inzwischen schon 10 Millionen Hektar Ackerland wegen zu starker Bodenerosion aufgegeben werden mussten (Pimentel 2006). Fast 60% der derzeitigen Bodenerosion werden mit zunehmender Tendenz auf menschliche Tätigkeit zurückgeführt (Yang et al. 2003).

Wie der globale P-Flow (Cordell, Drangert and White 2008) zeigt und regionale Phosphorbilanzen bestätigen, entstehen erhebliche P-Verluste auch bei der Behandlung von Fäkalien und Urin (global 3 Mio. t P pro Jahr) bzw. dem kommunalem Abwasser und der Entsorgung von Tiermehl etc. (in Deutschland ca. 56.000 t P pro Jahr).

### **Möglichkeiten zur Verbesserung der Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor**

Viele Jahrzehnte wurden die Böden vor allem in den Industrienationen mit hohen P-Überschüssen gedüngt, in der Annahme, dass ein Großteil des Phosphors im Boden nicht oder nur schwer löslich und damit nicht pflanzenverfügbar sind. Langzeitversuche lassen aber erkennen, dass im Laborversuch nicht verfügbare P-Anteile über längere Zeiträume doch pflanzenverfügbar werden. Ein besseres Wissen über die P-Aufnahme der Pflanzen könnte in Zukunft ebenfalls ein Beitrag dazu sein, die Re-Mobilisierung von Phosphor im Boden zu verbessern und damit die Düngemittelgaben weiter reduzieren zu können.

## **4.1 Thesen**

### **These 1: P-Recycling in den hochentwickelnden Industriestaaten?**

Kläranlagenabläufe mit 0,5 mg P pro Liter oder weniger sind in den entwickelten Industriestaaten mehr oder minder flächendeckend umsetzbar.

Im Gegensatz zu China, Indien oder Afrika wurden die Einträge an Phosphor in vielen, vor allem den großen Seen und Flüssen Europas, Nordamerikas und Japans gestoppt oder zumindest deutlich verringert. Industriestaaten wie Deutschland und Japan mit hohen

Anschlussgraden an ein vergleichsweise dichtes Kanalisationsnetz und hohen P-Eliminationsraten in den Kläranlagen werden voraussichtlich zunehmend auf die Verbrennung der P-haltigen Klärschlämme setzen.

Inzwischen sind eine Vielzahl von technischen Verfahren des P-Recycling aus Klärschlämmen oder Klärschlammaschen verfügbar oder zumindest in einem fortgeschrittenen Stadium der Forschung (z.B. zur Gewinnung von Magnesium-Ammonium-Phosphaten oder Calcium-Phosphaten). Der höhere Preis, wie auch die höheren Anforderungen an schadstoffarme Phosphordünger (z.B. Grenzwerte für Cadmium und Uran) werden voraussichtlich schon bald dazu führen, dass es für die reicheren Staaten wirtschaftlich wird den Phosphor aus dem Klärschlamm oder der Klärschlammasche zurück zu gewinnen. Voraussetzungen für ein effizientes P-Recycling sind dabei dichte Kanalisationen und ein hoher Grad der Phosphorelimination in den Kläranlagen.

### **These 2: Trennung der Abwasserteilströme in den sich entwickelnden Ländern?**

Sofern sich die entwickelnden Staaten für eine Abwasserbehandlung nach westlichem Vorbild entscheiden, sollten kommunale und industrielle Abwässer getrennt abgeleitet und behandelt werden. Sofern möglich sollten dabei Fäkalien und Urin mit möglichst wenig Wasser abgeleitet und in einer anaeroben Vorstufe energetisch genutzt und die Gärückstände nach entsprechender Hygienisierung landwirtschaftlich genutzt werden.

### **These 3: Erforschung der getrennten Ableitung von Abwasserteilströmen und der Behandlung von Fäkalien und Urin auch in Industriestaaten wie Deutschland**

Um auf dem Gebiet des effizienten Einsatzes von Phosphor und des P-Recyclings in der Entwicklungszusammenarbeit erfolgreich zu sein, bedarf es nicht nur der Erforschung der hiesigen Strategien des P-Recyclings aus den Klärschlammaschen („end of pipe“), sondern auch der Erforschung des effizienten Einsatzes von Phosphordüngern sowie der Rückgewinnung von Nährstoffen an der Quelle (Getrennte Ableitung und Behandlung von Abwasserteilströmen, Urin, Fäkalien etc.)

## 5 Ausgewählte Quellen:

- Brunner, P. H. & Rechberger, H. (2004) Practical Handbook of Material Flow Analysis, Lewis Publishers, Boca Raton, FL, 2003, 332 pages, ISBN 1-5667-0604-1.
- BQSD e.V. (2006): Stellungnahme der BQSD e.V. (Bundes-Qualitätsgemeinschaft Sero-Dünger e.V.) zum Eckpunktepapier zur Novelle der AbfklärV.
- CEEP (2008) SCOPE Newsletter, Number 70, February 2008.
- Chen, M.; J. Chen & F. Sun (2008): Agricultural phosphorus flow and its environmental impacts in China.- Science of The Total Environment, Volume 405, Issues 1-3, 1 November 2008, Pages 140-152
- Cordell, D. (2001) Improving Carrying Capacity Determination: Material Flux Analysis of Phosphorus through Sustainable Aboriginal Communities, BE (Env) Thesis, University of New South Wales (UNSW) Sydney.
- Cordell, D. (2006) Urine Diversion and Reuse in Australia: A homeless paradigm or sustainable solution for the future? Linköping, February 2006, Masters Thesis, Masters of Water Resources & Livelihood Security, Department of Water & Environmental Studies, Linköping University.
- Cordell, D. (2007) More Nutrition per Dropping: From Global Food Security to National 'Phosphorus Sovereignty', poster presented at workshop 'International Targets and National Implementation', World Water Week 2007, August 2007, Stockholm.  
[http://www.worldwaterweek.org/stockholmwatersymposium/bestposteraward\\_07.asp](http://www.worldwaterweek.org/stockholmwatersymposium/bestposteraward_07.asp).
- Cordell, D., Drangert, J.-O. & White, S. (submitted) The Story of Phosphorus: Food security and food for thought. Institute for Sustainable Futures, University of Technology, Sydney, Australia, and Department of Water and Environmental Studies, Linköping University, Sweden.
- Cordell, D. & White, S. (forthcoming) The Australian Story of Phosphorus: implications of global phosphate scarcity for a nation built on the sheep's back, Institute for Sustainable Futures, University of Technology, Sydney (UTS) Sydney. <http://www.phosphorusfutures.net>
- Dery, P. & Anderson, B. (2007) Peak phosphorus. Energy Bulletin.
- Dockhorn, Thomas (2008): Über die Relevanz der Nährstoffe Stickstoff und Phosphat im Abwasser – eine Bilanz für Deutschland.- Müll & Abfall 9: 444-449.
- Dockhorn, Thomas (2007): Stoffstrommanagement und Ressourcenökonomie in der kommunalen Abwasserwirtschaft.- (Habilschrift) Institut für Siedlungswasserwirtschaft TU Braunschweig, Heft 74, 126 S.
- Drangert, J.-O. (1998) Fighting the urine blindness to provide more sanitation options. Water SA, 24.
- Esrey, S., Andersson, I., Hillers, A. & Sawyer, R. (2001) Closing the Loop: Ecological sanitation for food security, UNDP & SIDA Mexico.
- European Fertilizer Manufacturers Association (2000) Phosphorus: Essential Element for Food Production, European Fertilizer Manufacturers Association (EFMA) Brussels.
- Fahlenkamp, H.; Nöthe, T.; Nowotny, N.; Ries, T.; Hannich, C. B.; Peulen, C.; Kuhn-Joeressen, S.; von Sonntag, C.; Pehl, C.; Poppe, A.; Kraft, A.; Obenaus, F.; Jagemann, P.; Reupert, R.; Sielex, K.; Stock, H.-D.; Spittler, M.; Zühlke, S.; Ligon, A.; Düputell, D.; Grotehans, J. & Jantzen, E. (2006): Untersuchungen zum Eintrag und zur Elimination von gefährlichen Stoffen in kommunalen Kläranlagen, Teil 2.- MUNLV – NRW 1.16.100.1.
- FAO (2005) ASSESSMENT OF THE WORLD FOOD SECURITY SITUATION, Food and Agricultural Organisation of the United Nations, COMMITTEE ON WORLD FOOD SECURITY, 23-26 May 2005  
<http://www.fao.org/docrep/meeting/009/j4968e/j4968e00.htm> Rome.
- FAO (2006) Plant nutrition for food security: A guide for integrated nutrient management, FAO FERTILIZER AND PLANT NUTRITION BULLETIN 16, FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS Rome.
- FAO (2007a) Current world fertilizer trends and outlook to 2010/11, Food and Agriculture Organisation of the United Nations Rome.
- FAO (2007b) Food for the Cities homepage. Rome, Food and Agriculture Organisation of the United Nations.
- GPRI (2008) Sustainable Phosphorus Futures website, Global Phosphorus Research Initiative, [www.phosphorusfutures.net](http://www.phosphorusfutures.net).
- Heffer, P. & Prud'homme, M. (2007) Medium-Term Outlook for Global Fertilizer Demand, Supply and Trade 2007 – 2011 Summary Report, International Fertilizer Industry Association, 75th IFA Annual Conference, 21-23 May 2007, Istanbul, Turkey.
- IFA (2006) Production and International Trade Statistics, International Fertilizer Industry Association Paris, available: [http://www.fertilizer.org/ifa/statistics/pit\\_public/pit\\_public\\_statistics.asp](http://www.fertilizer.org/ifa/statistics/pit_public/pit_public_statistics.asp) (accessed 20/8/07).

- IFA (2008) Feeding the Earth: Fertilizers and Global Food Security, Market Drivers and Fertilizer Economics International Fertilizer Industry Association Paris.
- Jasinski, S. M. (2008) Phosphate Rock, Mineral Commodity Summaries, January 2008 [minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate\\_rock/](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate_rock/)
- Jenkins, Joseph (2005): the humanure handbook – a guide to composting human manure.- (3rd edition); Chelsea Green Publishing: 225 pages. (<http://joseph-jenkins.com>)
- Larsen, T. A., and W. Gujer. 1996. Separate management of anthropogenic nutrient solutions (human urine). *Water Science and Technology* 34 (3-4): 87-94.
- Larsen, T. A., I. Peters, A. Alder, et al. 2001. Re-engineering the toilet for sustainable wastewater management. *Environmental Science & Technology* 35 (9): 192A-197A.
- Liu, Y., Villalba, G., Ayres, R. U. & Schroder, H. (2008) Environmental Impacts from a Consumption Perspective. *Journal of Industrial Ecology*, 12.
- Otterpohl, R., A. Albold, and M. Oldenburg. 1999. Source control in urban sanitation and waste management: Ten systems with reuse of resources. *Water Science and Technology* 39 (5): 153-160.
- Pimentel, D. 2006. Soil erosion: a food and environmental threat. *Environment, Development and Sustainability* (8): 119-137.
- Runge-Metzger, A. (1995) Closing The Cycle: Obstacles To Efficient P Management For Improved Global Food Security. in SCOPE 54 -Phosphorus in the Global Environment - Transfers, Cycles and Management.
- Römer, Wilhelm (2006): Vergleichende Untersuchungen zur Pflanzenverfügbarkeit von Phosphat aus verschiedenen P-Recycling-Produkten im Keimpflanzenversuch.- *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* Volume 169 Issue 6, Pages 826 – 832.
- Schmid-Neset, T., Bader, H., Scheidegger, R. & Lohm, U. (2005) The Flow of Phosphorus in Food Production and Consumption, Linköping, Sweden, 1870-2000, Department of Water and Environmental Studies, Linköping University and EAWAG Department S&E Dübendorf.
- Schmid-Neset, T.; H.P. Bader; R. Scheidegger & U. Lohm (2008), The Flow of Phosphorus in Food Production and -Consumption 1870-2000. *Science of the Total Environment*. Vol. 396:1-2. p.111-120.
- Schramm, Engelbert (2008): Düngerrückgewinnung aus Abwasser: Technologien für die Zukunft. (unter Mitarbeit von Jana von Horn).- ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 32: 35 S. <http://www.wasser2050.de/ftp/dp32.pdf> (pdf-file, 645 kb)
- Smaling, E., Toure, M., Ridder, N. d., Sanginga, N. & Breman, H. (2006) Fertilizer Use and the Environment in Africa: Friends or Foes?, Background Paper Prepared for the African Fertilizer Summit, June 9-13, 2006, Abuja, Nigeria.
- Smil, V. (2000a) Feeding the World: A Challenge for the 21st Century, The MIT Press, Cambridge.
- Smil, V. (2000b) Phosphorus in the Environment: Natural Flows and Human Interferences *Annual Review of Energy and the Environment*, 25, 53-88.
- Smil, V. (2002) Phosphorus: Global Transfers. IN DOUGLAS, P. I. (Ed.) *Encyclopedia of Global Environmental Change*. Chichester, John Wiley & Sons.
- Stewart, W., Hammond, L. & Kauwenbergh, S. J. V. (2005) Phosphorus as a Natural Resource. *Phosphorus: Agriculture and the Environment*, Agronomy Monograph No.46. Madison, American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America.
- USGS (1999) Fertilizers—Sustaining Global Food Supplies, USGS Fact Sheet FS–155–99, US Geological Survey Reston, available: [http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate\\_rock/](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate_rock/).
- WHO (2006) Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater, Volume 4: Excreta and greywater use in agriculture, World Health Organisation.
- Winblad, U and Kilama, W (1985): Sanitation without water. Macmillan, London. 161 pages.
- Wissa, A. E. Z. (2003) Phosphogypsum Disposal and The Environment Ardaman & Associates, Inc. Florida, available: [http://www.fipr.state.fl.us/pondwatercd/phosphogypsum\\_disposal.htm](http://www.fipr.state.fl.us/pondwatercd/phosphogypsum_disposal.htm)
- World Bank (2008) Phosphate Rock, Commodity forecast nominal prices, Prospects for the Global Economy, World Bank, <http://go.worldbank.org/9VQJ4ACJZ0>
- World Resources Institute (2008) Agriculture and "Dead Zones" <http://www.wri.org/publication/content/7780>.
- Yang, D., S. Kanae, T. Oki, et al. 2003. Global potential soil erosion with reference to land use and climate changes. *Hydrological Processes* 17 (14): 2913-2928.

## IV. Ausgewählte Dokumente zum Thema Phosphor

- 01 Odenwald, Michael (2008): Bedeutet die Verknappung von Phosphor das Ende der Menschheit? Focus vom 9.5.2008.
- 02 Kratz & Schnug (2008) Vortrag auf den Braunschweiger Nährstofftagen zum Urangehalt in Böden.
- 03 Hu, Z. Y. et al. (2008): Combining energy and fertilizer production – vision for China's future.
- 04 Schuh, Hans (2005): Ohne Phosphat läuft.- Die ZEIT 23 (2005).
- 05 The Market – Fertilizer news and analysis, 17. July 2008.
- 06 The Market – Fertilizer news and analysis, 23. Oktober 2008.
- 07 Bundesarbeitskreis Düngung, BAD (2007): Rohstoffverfügbarkeit für Mineraldünger - Perspektiven unter hohen Energiekosten und begrenzten Ressourcen.
- 08 Newsletter\_de\_2005-12\_susan: Kurzinformationen zum Susan-Projekt.
- 09 Call for Nutrient Recovery from Wastewater Streams May 10-13, 2009 - Vancouver, British Columbia, Canada.
- 10 Newsletter\_susan 08-01.
- 11 U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2007, PHOSPHATE ROCK
- 12 Vortrag 1 Hermann, ASHDEC, Susan-Projekt.
- 13 Vortrag 2 Hermann, ASHDEC, Susan-Projekt.
- 14 Links of selected Proceedings of the IWA Conference "From Nutrient Removal to Recovery", held at Aquatech 2002, Amsterdam, The Netherlands, 2-4 October 2002.
- 15 CEEP P-recovery information 7-2007.
- 16 UNEP (2007): The State of the Marine Environment - Trends and processes.
- 17 Änderung Düngemittelverordnung,- Drucksache 579/04 v. 2.8.04.
- 18 Düngemittelverordnung Drucksache 575/08 vom 07.08.08.
- 19 Syers, Johnston & Curtin (2008) Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use, FAO Fertilizer and plant nutrition bulletin 18, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.
- 20 Huber, Irene (2008): Forschungs- und Entwicklungs Aktivitäten beim Phosphor-Recycling
- 21 Wasser + Abfall 2008, 1,2: 11-13.
- 22 EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG (EP 1 669 467 A1): Verfahren zur Abtrennung von Schwermetallen aus Klärschlammasche.
- 23 Fuchs & Schwarz (2007): Ableitung naturraumtypischer Anreicherungs-faktoren zur Bestimmung des Phosphor- und Schwermetalleintrages in Oberflächengewässer durch Erosion.- Forschungsbericht FZKA-BWPLUS (BWR 24017).
- 24 Maier & Scheffknecht (2007): Systematische Untersuchungen zur Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlammaschen unter besonderer Berücksichtigung von Feuerungsparametern.- Forschungsbericht FZKA-BWPLUS (BWT 24004).
- 25 Tabelle 2: FuE-Aktivitäten zur P-Rückgewinnung.- <http://www.phosphorus-recovery.tu-darmstadt.de>.
- 26 Patent DE 103 57 544 B4 zum Phosphatrückgewinnung aus Abwässern durch Kristallisation, 2006.
- 27 Mönicke, Ralf (Klärschlamm – ein dringend benötigter preisgünstiger Ergänzungsdünger.- KA – Abwasser, Abfall 2005 (52) Nr. 10: 1108-1113.
- 28 U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2008, PHOSPHATE ROCK
- 29 Schuh, Hans (2005): Wie giftiges Uran in die Kartoffeln kommt Phosphatlagerstätten binden Natururan. Das Schwermetall verbleibt im Dünger und landet auf dem Teller.- Die ZEIT 23 (2.6.2005).
- 30 Perlman, David (2008): Scientists alarmed by ocean dead-zone growth, San Francisco Chronicle Science Editor, Friday, August 15, 2008.
- 31 Brunner Paul H. (2008): Vortrag auf der WASA: Urban Mining, u.a. Phosphorflüsse durch den privaten Haushalt.
- 32 Fuhs, Michael (2006): Neuland ohne Pflug - Neue Techniken für nachhaltigen Ackerbau (URL: <http://www.dradio.de/dlf/sendungen/wib/531710/>).
- 33 Kutzbach Cajo (2007): Phosphor aus Klärschlamm Rückgewinnung zwecks landwirtschaftlicher Nutzung (<http://www.dradio.de/dlf/sendungen/forschak/696988/>), 15.11.2007.
- 34 Pollmer, Udo (2006): Ökolandbau und Phosphat-Dünger.- 4.11.2006, (<http://www.dradio.de/dkultur/sendungen/mahlzeit/554145/>).
- 35 Helsinki Commission: The Baltic Sea Action Plan.

- 36 HELCOM Baltic Sea Action Plan, Krakow, Poland, 15 November 2007
- 37 Helsinki Commission (2004): The Fourth Baltic Sea Pollution Load Compilation (PLC-4) Baltic Sea Environment Proceedings No. 93: 189 S.
- 38 TOWARDS A BALTIC SEA UNAFFECTED BY EUTROPHICATION HELCOM Overview 2007, Krakow, Poland, 15 November 2007.
- 39 Cordell, Dana & Stuart White (2008): THE AUSTRALIAN STORY OF PHOSPHORUS: Sustainability implications of global fertilizer scarcity for Australia.- Discussion paper prepared for the National Workshop on the Future of Phosphorus, Institute for Sustainable Futures, University of Technology, Sydney 14th November, 2008; Available: <http://www.phosphorusfutures.net>
- 40 Kratz & Schnug (2006): Statement aus FAL-PB zur Diskussion um landwirtschaftliche Klärschlammverwertung und die neue Klärschlammverordnung (Bonn, 07.12.2006).
- 41 Pinnekamp, J. & W. Merkel (2008): Abschlussbericht zu den Forschungsvorhaben: "Senkung des Anteils organischer Spurenstoffe in der Ruhr durch zusätzliche Behandlungsstufen auf kommunalen Kläranlagen - Gütebetrachtungen" und "Senkung des Anteils organischer Spurenstoffe in der Ruhr durch zusätzliche Behandlungsstufen auf kommunalen Kläranlagen - Kostenbetrachtungen", i.A. NRW.
- 42 Böttcher, H., J. Garz & D. Weipert (2000): Auswirkungen unterschiedlicher Düngung auf Ertrag und Verarbeitungsqualität des Roggens bei langjährigem Anbau in Selbstfolge und Fruchtwechsel – Ergebnisse des Dauerversuches „Ewiger Roggenbau“.- Pflanzenbauwissenschaften, 4 (1), S. 1– 8, 2000.
- 43 Dockhorn, Thomas (2008): Vortrag auf den Braunschweiger Nährstofftagen zu ökonomischen Aspekten des Phosphor-Recyclings.
- 44 Rechenberger, Helmut (2008) Vortrag auf den Braunschweiger Nährstofftagen zu Komponenten der gesellschaftlichen P-Bilanz.
- 45 Gemeinsame Stellungnahme Nr. 020/2007 des BfS und des BfR vom 5. April 2007 zum Thema Uran.
- 46 Brand, Richard A. (2008): Vortrag auf den Braunschweiger Nährstofftagen zu „Connections between Phosphate Connections between Phosphate Fertilizer Fertilizer Production and the Production and the Uranium Fuel Cycle Uranium“.
- 47 WHO (2006) Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater, Volume 4: Excreta and greywater use in agriculture, World Health Organisation.
- 48 Schönning, Caroline (2001): Urine diversion - hygienic risks and microbial guidelines for reuse.
- 49 Cordell, D. (2006) Urine Diversion and Reuse in Australia: A homeless paradigm or sustainable solution for the future? Linköping, February 2006, Masters Thesis, Masters of Water Resources & Livelihood Security, Department of Water & Environmental Studies, Linköping University.
- 50 Liu, Yi (2006): The Human Intensified Global Phosphorus Flows and Environmental Impacts.- International Institute for Applied Systems Analysis.
- 51 Sokka, L., Antikainen, R. and Kauppi, P. (2004) 'Flows of nitrogen and phosphorus in municipal waste: a substance flow analysis in Finland', Progress in Industrial Ecology, Vol. 1, Nos. 1/2/3, pp.165–186.
- 52 Wittmer, Binder, Mouron, Bieler (2008): Phosphorus flows in Switzerland: status, Risks and Options for Action.- Vortrag auf ConAccount 2008, Prag.
- 53 Havránek, Miroslav (2008) ANALYSIS AND ASSESSMENT OF THE PHOSPHORUS MANAGEMENT SYSTEM OF SWITZERLAND – abstract.
- 54 Liu, Yi (2005): Liu, Y. 2005. Phosphorus Flows in China: Physical Profiles and Environmental Regulation. PhD Thesis, Environmental Policy Group, Department of Social Sciences, Wageningen University, Wageningen, the Netherlands.
- 55 Smil, V. (2002) Phosphorus: Global Transfers. IN DOUGLAS, P. I. (Ed.) Encyclopedia of Global Environmental Change. Chichester, John Wiley & Sons.
- 56 Adam, Christian (2006): Vortrag zu: „Nachhaltigkeit: Eine saubere Sache - der nachhaltige Phosphorkreislauf, Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Braunschweig, 7. April 2006.
- 57 Liu, Yi (2005): Liu, Y. 2005. Phosphorus use in China: Aggregated physical structure of phosphorus use. [http://www.eoearth.org/article/Phosphorus\\_use\\_in\\_China](http://www.eoearth.org/article/Phosphorus_use_in_China).
- 58 Phosphorus Cycle Readme.
- 59 Stark, K. (2005): PHOSPHORUS RECOVERY – EXPERIENCES FROM EUROPEAN COUNTRIES.- Dep. of Land and Water Resources Engineering; Royal Institute of Technology (KTH), S-100 44 Stockholm, Sweden.
- 60 Rosemarin, Arno; Nelson Ekane, Ian Caldwell, Elisabeth Kvarnström; Jennifer McConville; Cecilia Ruben; Madeleine Fogde (2008) Pathways for Sustainable Sanitation Achieving the Millennium Development Goals, IWA ([www.ecosanres.org](http://www.ecosanres.org)): 58 pages

- 61 Rockström, Johan; Göran Nilsson Axberg; Malin Falkenmark; Mats Lannerstad; Arno Rosemarin; Ian Caldwell; Anders Arvidson & Mattias Nordström (2005): Sustainable Pathways to Attain the Millennium Development Goals: Assessing the Key Role of Water, Energy and Sanitation.- SEI ([www.sei.si](http://www.sei.si)): 114 pages.
- 62 ESR-Factsheet 4: Closing the Loop on Phosphorus
- 63 ESR- Factsheet 5: Guidelines for the Safe Use of Urine and Faeces in Ecological Sanitation Systems
- 64 ESR Factsheet 6: Guidelines on the Use of Urine and Faeces in Crop Production
- 65 ESR-Factsheet 10: A Review of Sanitation Regulatory Frameworks for Sweden, Mexico, South Africa and Uganda
- 66 Dockhorn, Thomas (2008): Über die Relevanz der Nährstoffe Stickstoff und Phosphat im Abwasser – eine Bilanz für Deutschland.- Müll & Abfall 9: 444-449.
- 67 Antwort der Bundesregierung auf die Große Anfrage der Abgeordneten Dr. Uschi Eid, Nicole Maisch, Rainer Steenblock, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/ DIE GRÜNEN – Drucksache 16/9387 – Internationales Jahr für sanitäre Grundversorgung 2008 der Vereinten Nationen – Chancen und Potentiale der Sanitärversorgung.- Deutscher Bundestag Drucksache 16/10922, 13. 11. 2008
- 68 Jenkins, Joseph (2005): the humanure handbook – a guide to composting human manure.- (3rd edition); Chelsea Green Publishing: 225 pages. (<http://joseph-jenkins.com>)
- 69 Schramm, Engelbert (2008): Düngerrückgewinnung aus Abwasser: Technologien für die Zukunft. (unter Mitarbeit von Jana von Horn).- ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 32: 35 S. <http://www.wasser2050.de/ftp/dp32.pdf> (pdf-file, 645 kb)