

28
|
09

> Phosphorflüsse der Schweiz

Stand, Risiken und Handlungsoptionen



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU

28
—
09

> Phosphorflüsse der Schweiz

Stand, Risiken und Handlungsoptionen

Avec résumé en français – With summary in English

Impressum

Herausgeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Autoren

Prof. Dr. Prof. Dr. Claudia R. Binder, Laura de Baan,
Dr. Dominic Wittmer, Abteilung Soziale und Industrielle Ökologie (SIE),
Geographisches Institut, Universität Zürich, 8057 Zürich

Begleitung BAFU

Kaarina Schenk, Abteilung Abfall und Rohstoffe

Zitiervorschlag

Binder Claudia R., de Baan Laura, Wittmer Dominic 2009:
Phosphorflüsse in der Schweiz. Stand, Risiken und Handlungsoptionen.
Abschlussbericht. Umwelt-Wissen Nr. 0928. Bundesamt für Umwelt,
Bern. 161 S.

Gestaltung

Ursula Nöthiger-Koch, Uerkheim

Grafiken

Alfons Schmid, Zürich

Titelfoto

© www.crystalray.ca

Download PDF

www.umwelt-schweiz.ch/uw-0928-d

(eine gedruckte Fassung ist nicht erhältlich)

Code: UW-0928-D

© BAFU 2009

> Inhalt

Abstracts	5
Vorwort	7
Zusammenfassung	8
Résumé	12
Summary	16

1	Einleitung	20
1.1	Ausgangslage	20
1.2	Einblick in den Phosphorhaushalt der Schweiz	20
1.3	Ziele	21
1.4	Vorgehen	22

2	Methode	23
2.1	Die Stoffflussanalyse	23
2.2	Stoffflussanalyse des schweizerischen Phosphorhaushalts	24
2.2.1	Hauptsystem: Systemgrenze und Systemwahl	24
2.2.2	Subsysteme: Systemgrenzen und Systemwahl	27
2.2.3	Datenerhebung	30
2.2.4	Modellierung	30
2.3	Unsicherheitsanalyse	31
2.3.1	Umgang mit den Unsicherheiten der Datenquellen	32
2.3.2	Validierung ausgewählter Modellparameter	34

3	Resultate	35
3.1	Resultate der Stoffflussanalyse	35
3.1.1	Hauptsystem	35
3.1.2	Subsystem Landwirtschaft Tiere	39
3.1.3	Subsystem Landwirtschaft Pflanzen	42
3.1.4	Subsystem Chemische Industrie	45
3.1.5	Subsystem Haushalte & Gewerbe	48
3.1.6	Subsystem Abfallwirtschaft	51
3.1.7	Subsystem Gewässer	54
3.2	Resultate der Unsicherheitsanalyse	57
3.3	Fazit	57

4	Handlungsoptionen für die Optimierung des Phosphorhaushalts der Schweiz	59
4.1	Recycling von Klärschlamm als Dünger	59
4.2	Recycling von tierischen Abfällen	64
4.2.1	Recycling von tierischen Abfällen als Dünger	65
4.2.2	Recycling von tierischen Abfällen als Tierfutter	68
4.3	Konsequentes Recycling von Grüngut und biogenen Abfällen aus Haushalten	72
4.4	Maximales Recyclingpotential durch Kombination der Einzelhandlungsoptionen	77
4.5	Fazit	83

5	Monitoring von Phosphorflüssen	85
5.1	Konzept des Monitorings	85
5.2	Beschreibung des Monitoringtools	85
5.3	Validierung des Monitoringtools	86
5.4	Fazit	91

6	Schlussfolgerungen und Massnahmen	92
----------	--	-----------

7	Ausblick	94
----------	-----------------	-----------

Anhang	96	
A1	Abbildungen der Subsysteme	96
A2	Beschreibung der Prozesse und Flüsse	102
A3	Datenbasis	126
A4	Unsicherheiten der Flüsse	133
A5	Gesetzliche Grundlagen	136
A6	Risikoanalyse	137

Verzeichnisse	156
Abkürzungen	156
Abbildungen	156
Tabellen	157
Literatur	158

> Abstracts

For the analysis of the phosphorus household in Switzerland, the method of substance flow analysis was applied. The phosphorus cycle was set up in agreement with the quantitative and qualitative importance of the individual processes that phosphorus undergoes in Switzerland. Switzerland is a net importer of phosphorus. An annual quantity of 16 555 tonnes of phosphorus is imported, and approx. 4000 tonnes exported. 90% of the imports are used in agriculture (feeds and mineral fertilisers). Overall, the phosphorus cycle is dominated by the agriculture and disposal sectors. On a quantity basis, the greatest unused potential for phosphorus recovery in the disposal sector lies in the treatment of sewage sludge. Based on the present study, the phosphorus cycle in Switzerland can be adequately assessed from a holistic standpoint, in which the potential for raising material efficiency and reducing risks are considered.

Keywords:
Phosphorus
Substance flow analysis
Waste management

Zur Untersuchung des Phosphorhaushaltes der Schweiz wurde die Methode der Stoffflussanalyse angewendet. Die Erarbeitung des Systems erfolgte entsprechend der quantitativen und qualitativen Bedeutung der einzelnen Prozesse, denen Phosphor hierzulande unterliegt. Die Schweiz ist ein Nettoimporteur von Phosphor. Jährlich werden 16 555 Tonnen Phosphor importiert und rund 4000 Tonnen exportiert. Die Importe fließen zu 90 Prozent in die Landwirtschaft (Futter und Mineraldünger). Innerhalb des Gesamtsystems wird der Phosphorhaushalt vor allem durch die Landwirtschaft und die Abfallwirtschaft dominiert. Das mengenmässig grösste noch ungenutzte Phosphorpotenzial in der Abfallwirtschaft liegt in der Bewirtschaftung des Klärschlammes. Mit der vorliegenden Studie kann der schweizerische Phosphorhaushalt hinsichtlich des Potenzials zur Steigerung der Materialeffizienz und zur Senkung der Risiken ganzheitlich und angemessen bewertet werden.

Stichwörter:
Phosphor
Stoffflussanalyse
Abfallwirtschaft

La méthode de l'analyse des flux de substances a été appliquée au bilan de phosphore de la Suisse. Le système a été élaboré en fonction de l'importance quantitative et qualitative des divers processus auxquels le phosphore est soumis dans le pays. La Suisse est une importatrice nette de phosphore. Chaque année, elle importe quelque 16 500 tP et en exporte environ 4000. Les importations sont destinées à 90 % à l'agriculture (fourrage et engrais minéraux). Dans l'ensemble du système, le bilan de phosphore est influencé avant tout par l'agriculture et par la gestion des déchets. En quantité, ce sont les boues d'épuration qui recèlent le plus important potentiel de phosphore encore inexploité dans le domaine de la gestion des déchets. Grâce à la présente étude, il est possible d'évaluer le cycle du phosphore de manière satisfaisante dans la perspective globale de l'amélioration de l'efficacité matérielle et de la réduction des risques.

Mots-clés:
Phosphore
L'analyse des flux de substances
Gestion de déchets

Per l'analisi del bilancio del fosforo in Svizzera è stato utilizzato il metodo dell'analisi dei flussi di sostanze. Il sistema è stato elaborato tenendo conto dell'importanza quantitativa e qualitativa dei singoli processi cui è soggetto il fosforo in Svizzera. La Svizzera è un'importatrice netta di fosforo: ogni anno, le importazioni di fosforo ammontano a 16 555 tonnellate e le esportazioni a circa 4000 tonnellate. Il 90 per cento delle importazioni è destinato all'agricoltura (mangimi e concimi minerali). All'interno del sistema globale il bilancio del fosforo è dominato dall'agricoltura e dalla gestione dei rifiuti. Il maggiore potenziale ancora inutilizzato in quest'ultimo ambito risiede nel settore della gestione dei fanghi di depurazione. Il presente studio consente di valutare in modo sufficiente il bilancio del fosforo in Svizzera considerando il potenziale di aumento dell'efficienza dei materiali e dei rischi da un punto di vista globale.

Parole chiave:

Fosforo

Metodo dell'analisi dei flussi

Gestione dei rifiuti

> Vorwort

Phosphor ist für alle Organismen ein essenzielles Hauptnährelement, das nicht substituiert werden kann. Aus diesem Grund erscheinen Prognosen alarmierend, nach denen die statische Reichweite der gut abbaubaren Rohphosphatlagerstätten nur noch Jahrzehnte bis wenige Jahrhunderte (50 bis 330 Jahre) beträgt. Eine Reichweite von wenigen Jahrhunderten wird jedoch nur erreicht, wenn auch die geringerwertigen Rohphosphatlagerstätten mit Schwermetallbelastung und/oder mit erhöhten Förderkosten erschlossen werden.

Für Länder ohne eigene Phosphatlagerstätten und mit intensiver Flächennutzung (einschliesslich Landwirtschaft) wie beispielsweise die Schweiz besteht ein hohes Interesse an Kenntnissen, wie der Phosphorkreislauf derzeit strukturiert ist und wie er optimiert werden könnte. Trotz zahlreicher Studien zum Einsatz phosphorhaltiger Güter in der Schweiz fehlt bis heute ein Gesamtüberblick aus der Perspektive der Ressourcennutzung, der die Erarbeitung von Handlungsoptionen zur Optimierung des Phosphorhaushaltes erlaubt.

In der vorliegenden Studie werden die schweizerischen Phosphorflüsse inklusive ihrer Fehlerbereiche für das Jahr 2006 in einem Stoffflussanalyse-Modell in neuartiger Auflösung, Datenqualität und Konsistenz quantifiziert.

Aus Ressourcensicht ist das Phosphormanagement der Schweiz nicht optimal gestaltet und bedarf einer Verbesserung. Potenzielle Recyclingwege wie die Verfütterung von tierischen Abfällen oder die Verwendung von Klärschlamm als Dünger wurden in den letzten Jahren wegen Hygiene- respektive Umweltrisiken verboten. Der Phosphorkreislauf könnte auf diese Weise jedoch grossteils geschlossen und der Import von mineralischem Dünger somit reduziert werden. Die Schweiz importiert jährlich rund 16 500 Tonnen Phosphor, zur Hauptsache als Mineraldünger und in Tierfutter und Lebensmitteln. Die Abfallwirtschaft ist hier die grösste Phosphorsenke. Klärschlamm, Tier- und Knochenmehl haben mit rund 10 800 Tonnen Phosphor pro Jahr ein beachtliches Potenzial zur Schliessung des Phosphorkreislaufes.

Mit dieser Studie liegen nun fundierte Grundlagen für die Diskussion des Phosphorrecyclings in der Schweiz vor.

Gérard Poffet
Vizedirektor
Bundesamt für Umwelt (BAFU)

> Zusammenfassung

Einleitung

Phosphor ist für alle Organismen ein essenzielles Hauptnährelement, das nicht substituiert werden kann. Aus diesem Grund erscheinen Prognosen alarmierend, nach denen die statische Reichweite der gut abbaubaren Rohphosphatlagerstätten nur noch Jahrzehnte bis wenige Jahrhunderte (50 bis 330 Jahre) beträgt. Eine Reichweite von wenigen Jahrhunderten wird jedoch nur erreicht, wenn auch die geringerwertigen Rohphosphatlagerstätten mit Schwermetallbelastung und/oder mit erhöhten Förderkosten erschlossen werden. Neben der zunehmenden globalen Rohstoffverknappung wird Phosphor in der schweizerischen umweltpolitischen Diskussion häufig als ein Schadstoff in Oberflächengewässern wahrgenommen, da er in vielen Seen eine bedeutende Rolle bei der Eutrophierung gespielt hat. Zwar konnten die Einträge in die Oberflächengewässer in den vergangenen 20 Jahren wesentlich reduziert werden, doch bestehen lokal nach wie vor Verbesserungspotenziale zur Verminderung der Einträge.

Unter diesen beiden Gesichtspunkten – Verknappung und Eutrophierung – besteht für Länder ohne eigene Phosphatlagerstätten und mit intensiver Flächennutzung (einschliesslich Landwirtschaft) wie beispielsweise die Schweiz ein hohes Interesse an Kenntnissen, wie der Phosphorkreislauf derzeit strukturiert ist und wie er optimiert werden könnte. Trotz zahlreicher Studien zum Einsatz phosphorhaltiger Güter in der Schweiz fehlt bis heute ein Gesamtüberblick aus der Perspektive der Ressourcennutzung, der die Erarbeitung von Handlungsoptionen zur Optimierung des Phosphorhaushaltes erlaubt.

In der vorliegenden Studie werden die Phosphorflüsse der Schweiz inklusive ihrer Fehlerbereiche für das Jahr 2006 in einem Stoffflussanalyse-Modell in neuartiger Auflösung, Datenqualität und Konsistenz quantifiziert. Auf Basis einer Unsicherheitsanalyse wurden mithilfe eines einfachen Konzeptes die relevanten fehlerbehafteten Flüsse gezielt identifiziert und anschliessend vervollständigt und validiert. Aufgrund der erzielten Ergebnisse wird ein erhöhtes Systemverständnis gegenüber früheren Arbeiten erreicht. Die Studie erfüllt erstmalig den Anspruch einer umfänglichen Untersuchung für den gesamten schweizerischen Phosphorhaushalt. Erst damit kann der Phosphorhaushalt hinsichtlich des Potenzials zur Steigerung der Materialeffizienz und zur Senkung der Risiken ganzheitlich und angemessen bewertet werden.

Methode

Zur Untersuchung des Phosphorhaushaltes der Schweiz wurde die Methode der Stoffflussanalyse angewendet. Die Erarbeitung des Systems erfolgte entsprechend der quantitativen und qualitativen Bedeutung der einzelnen Prozesse, denen Phosphor hier unterliegt. Systemgrenze ist die zollrechtliche Landesgrenze. Das System wurde für

das Jahr 2006 quantifiziert. Das Hauptsystem ist in sechs Subsysteme unterteilt, die in Wechselwirkung miteinander stehen:

- a) Unter dem Subsystem Landwirtschaft Tiere fungieren alle Prozesse, die für die Produktion und Bereitstellung von tierischen Nahrungsmitteln notwendig sind;
- b) Zum Subsystem Landwirtschaft Pflanzen gehören einerseits diejenigen Prozesse, die für die Produktion und Bereitstellung von pflanzlichen Nahrungsmitteln notwendig sind. Andererseits sind hier auch die Prozesse der Forstwirtschaft, der Papier-, Energie- und Bauholzherstellung enthalten;
- c) Die Chemische Industrie importiert und verarbeitet phosphorhaltige Reinigungsprodukte sowie Chemikalien zur Produktion;
- d) Haushalte & Gewerbe beinhaltet alle Prozesse, die mit dem Konsum von Nahrungsmitteln, holzhaltigen Produkten und Reinigungsprodukten verbunden sind. Zusätzlich wird hier der private Gartenbau berücksichtigt;
- e) Die Abfallwirtschaft schliesst alle Prozesse ein, die mit der Entsorgung und Aufbereitung von flüssigen und festen Abfällen verbunden sind;
- f) Das Subsystem Gewässer umfasst fließende Oberflächengewässer und Seen, jeweils mit Sedimenten.

Da in der Literatur nur in wenigen Fällen Werte für Phosphorflüsse verfügbar sind, wurden diese im Allgemeinen als Produkt aus Güterflüssen und Phosphorkonzentrationen berechnet, welche durch Datenrecherchen bestimmt wurden. Die Datenquellen umfassen hauptsächlich statistische Erhebungen und wissenschaftliche Publikationen. Wo keine Quellen vorhanden waren, basieren die Daten auf eigenen Erhebungen, Berechnungen mit groben Richtwerten, Verallgemeinerungen, rudimentären Hochrechnungen oder Schätzungen der Parameter. Alle Daten wurden mit einem Unsicherheitsbereich versehen. Anhand der relativen und der absoluten Unsicherheit sowie des realen Werts des Flusses wurden die zu erhebenden Flüsse bestimmt. Bei mehr als 80 Prozent der Flüsse konnte eine Unsicherheit von weniger als 20 Prozent erzielt.

Resultate

Die Schweiz ist ein Nettoimporteur von Phosphor. Jährlich werden rund 16 500 Tonnen Phosphor importiert und etwa 4000 Tonnen exportiert; das heisst, das System Schweiz weist ein Wachstum des gesamten Phosphorlagers von rund 12 500 Tonnen Phosphor pro Jahr auf. Der Import erfolgt zu 90 Prozent über die Landwirtschaft (Futterimporte und Mineraldüngerimporte); der Export findet hauptsächlich als Abfluss ins Ausland durch die Gewässer und den Export von tierischen Abfällen statt. Das höchste Lagerwachstum des Systems ist in den Subsystemen Landwirtschaft Pflanzen mit einer Zunahme von rund 3500 Tonnen Phosphor pro Jahr (tP/a) und Abfallwirtschaft mit einer Zunahme von rund 9000 tP/a zu verzeichnen.

Innerhalb des Gesamtsystems wird der Phosphorhaushalt vor allem durch die *Landwirtschaft* (Hofdünger, Futtermittel) und die *Abfallwirtschaft* dominiert, in geringerem Masse auch durch *Haushalte & Gewerbe*. Die *Chemische Industrie* und die *Gewässer* sind mit Phosphorumsätzen von weniger als 2500 tP/a keine bedeutende Verteilungs- beziehungsweise Sammelprozesse.

In der *Landwirtschaft* beinhaltet der fast geschlossene Kreislauf zwischen der Tierproduktion und der pflanzlichen Produktion die bedeutendsten Flüsse innerhalb des Systems Schweiz (Hofdünger und das Futter für die Tiere je ca. 30 000 tP/a). Weiter spielen die Importe von Futtermitteln und Mineraldünger mit 5600 beziehungsweise 5900 tP/a eine wesentliche Rolle für die pflanzliche Produktion. Grüngütdünger aus Kompostierung und Vergärung sind mit zusammen knapp 1100 tP/a von geringer Bedeutung für das Gesamtsystem.

Das Subsystem *Haushalte & Gewerbe* ist ein Durchlaufprozess mit einem Input von etwa 9700 tP/a, bestehend aus rund 78 Prozent Nahrungsmitteln, 10 Prozent Reinigungsmitteln, 9 Prozent Dünger und weniger als 3 Prozent Holz/Papier. Die konsumierten Güter gelangen in Form von unterschiedlichen Abfallstoffen direkt in die Abfallwirtschaft und stellen mehr als 70 Prozent des Inputs in die Abfallwirtschaft dar (Siedlungsabwasser, Kehricht, Grüngut).

In der *Abfallwirtschaft* werden jährlich etwa 13 500 Tonnen Phosphor umgesetzt. Lediglich 13 Prozent (ca. 1700 tP/a) wurden 2006 in der Schweiz aufbereitet und wieder in der Landwirtschaft oder in den Gärten der Haushalte eingesetzt. Ungefähr 1500 tP/a in Form von tierischen Abfällen werden zur Aufbereitung ins Ausland exportiert. Die Phosphorverluste betragen demnach mehr als 10 000 tP/a (ca. 80 %). Dabei sind die mit Abstand bedeutendsten Senken dieses Subsystems die Deponien mit rund 6300 tP/a, gefolgt von den Zementwerken mit etwa 3000 tP/a.

Das mengenmässig grösste noch ungenutzte Phosphorpotenzial in der *Abfallwirtschaft* sind die Wiederaufbereitung und die Wiederverwendung des Abwassers beziehungsweise Klärschlamm (ca. 5800 tP/a). Im Jahr 2006 gelangten die Klärschlämme bereits zu 43 Prozent in die Klärschlamm-Monoverbrennung und von dort in Reaktordeponien. Weitere 25 Prozent wurden in der Kehrichtverbrennungsanlage (KVA) und 22 Prozent in den Zementwerken verbrannt. Die restlichen 10 Prozent gelangten zu diesem Zeitpunkt noch in die Landwirtschaft. Zusätzlich gehen dem System durch Export tierischer Abfälle 1500 tP/a verloren.

Diskussion und Handlungsoptionen

Aus Ressourcensicht ist das Phosphormanagement der Schweiz nicht optimal gestaltet und bedarf einer Verbesserung. Potenzielle Recyclingwege wie die Verfütterung von tierischen Abfällen oder die Verwendung von Klärschlamm als Dünger wurden in den letzten Jahren wegen Hygiene- beziehungsweise Umweltrisiken verboten. Der Phosphorkreislauf könnte auf diese Weise jedoch grossteils geschlossen und der Import von mineralischem Dünger somit reduziert werden. Die vier Handlungsoptionen

1. Klärschlammasche als Dünger;
2. Tiermehl als Dünger;
3. Tiermehl als Tierfutter;
4. Konsequentes Recycling von Grüngut

zeigen das beachtliche Potenzial zur Schliessung des Phosphorkreislaufes in der Schweiz auf. Mit der Handlungsoption Klärschlammasche als Dünger sinkt bei einer reinen Phosphorbilanzierung der Bedarf an Mineraldünger auf 20 Prozent, beim Tiermehl als Dünger auf 50 Prozent, beim konsequenten Recycling von Grüngut auf 87 Prozent. Das Tiermehl als Futter reduziert den Futterimport um 50 Prozent. Diese Resultate zeigen das Phosphoreinsparungspotenzial aus stofflicher Sicht. Werden nun weitere Faktoren wie die Düngeeffizienz und die Realisierbarkeit einbezogen, so ist das Potenzial sowohl bei der Klärschlammasche wie auch beim Tiermehl als Dünger jeweils um 60 Prozent geringer. Beim konsequenten Recycling von Grüngut reduziert es sich um 40 Prozent. Die Kombination der Massnahmen kann jedoch unter Berücksichtigung dieser Faktoren zu einer 50-prozentigen Reduktion des Mineraldüngerimports führen. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass sich die Zunahme des Phosphorlagers im landwirtschaftlichen Boden verdoppeln würde. Es ist noch zu prüfen, welche Konsequenzen dies aus Umweltsicht haben könnte.

Das grösste Potenzial zur Optimierung des Phosphorkreislaufes der Schweiz liegt in der Bewirtschaftung des Klärschlammes. Sie stellt die wirksamste Steuerungsoption für das BAFU dar. Bereits heute bestehen 14 Klärschlamm-Monoverbrennungsanlagen, deren Aschen aber bislang nicht als Dünger eingesetzt werden können. Als erster Schritt bietet sich an, die Aschen der bestehenden Anlagen separat zu deponieren. Dieses Vorgehen würde sicherstellen, dass die Aschen zu einem späteren Zeitpunkt als Düngerrohstoff verwendet werden können, sobald technische Verfahren zur Klärschlammaschen-Düngerherstellung marktreif sind. Zusätzlich könnte eine gezielte finanzielle oder politische Unterstützung die Markteinführung solcher Verfahren in der Schweiz beschleunigen. In einem nächsten Schritt wäre zu prüfen, ob tierische Abfälle im gleichen Aufbereitungsverfahren zu Dünger verwertet werden könnten. Separatsammlungen von Grüngutdünger schweizweit zu forcieren, scheint hingegen wenig effektiv, da das noch vorhandene Potenzial aufgrund der bereits heute in den Gemeinden umgesetzten Separatsammlung von Grüngut vergleichsweise gering ist.

Ausblick

Für eine Optimierung des Phosphorhaushaltes sind neben der Ressourcenperspektive noch weitere Aspekte zu berücksichtigen, die in dieser Studie ansatzweise erläutert werden. Von Relevanz hierbei sind beispielsweise a) ökonomische Tragbarkeit; b) gesellschaftliche und politische Akzeptanz; c) technische und logistische Umsetzung sowie d) ökologische Gesichtspunkte. Anhand zusätzlicher Analysen zu solchen Themen könnte die Frage beantwortet werden, welche Massnahmen auf politischer Ebene notwendig wären, um einen optimierten und vom Ausland unabhängigeren Phosphorhaushalt zu erreichen.

> Résumé

Introduction

Le phosphore est un élément nutritif majeur (macro-élément) indispensable à tous les organismes; il n'a pas de substitut. Il est donc inquiétant que les prévisions fassent seulement état – pour les gisements de phosphate brut bien exploitables – d'une durée de vie statique comprise entre plusieurs décennies et quelques siècles (50 à 330 ans). La durée de vie de plusieurs siècles n'est en outre obtenue que si l'on tient compte des gisements de qualité moindre qui sont pollués aux métaux lourds ou dont l'exploitation coûte plus cher. Parallèlement à la question de la raréfaction mondiale des matières premières, le phosphore est souvent cité dans les débats de politique environnementale en Suisse comme polluant des eaux superficielles, puisqu'il a joué un rôle important dans l'eutrophisation de nombreux lacs. Les apports dans les cours d'eau superficiels ont certes pu être fortement réduits au cours des vingt dernières années; il n'en reste pas moins possible, au plan local, d'améliorer encore la situation.

De ces deux points de vue – raréfaction des ressources et eutrophisation – il est intéressant de savoir comment se structure actuellement le cycle du phosphore et ce qui pourrait être fait pour l'optimiser. C'est particulièrement le cas dans les pays qui, comme la Suisse, ne peuvent pas tirer profit de leurs propres gisements et exploitent intensivement les surfaces dont ils disposent, notamment pour l'agriculture. Malgré de nombreuses études sur l'utilisation des produits contenant du phosphore en Suisse, il n'existait pas jusqu'ici de vue d'ensemble qui permette d'élaborer – dans la perspective de l'utilisation des ressources – des options d'action en vue d'optimiser les bilans de cette substance.

La présente étude quantifie les flux de phosphore en Suisse pour l'année 2006 (en incluant leurs intervalles d'erreur) dans un modèle d'analyse des flux de substances dont la résolution, la qualité des données et la cohérence étaient inédites jusqu'ici. En se fondant sur une analyse d'incertitude, un concept simple a permis d'identifier de manière ciblée les erreurs entachant les principaux flux, qui ont ensuite été complétés et validés. Par rapport aux travaux précédents, les résultats obtenus améliorent la compréhension du système. Le présent travail procède, pour la première fois, à des investigations complètes pour l'ensemble du bilan de phosphore en Suisse. Ce n'est qu'ainsi qu'il est possible d'évaluer le cycle du phosphore de manière satisfaisante dans la perspective globale de l'amélioration de l'efficacité matérielle et de la réduction des risques.

Méthode

La méthode de l'analyse des flux de substances a été appliquée au bilan de phosphore de la Suisse. Le système a été élaboré en fonction de l'importance quantitative et qualitative des divers processus auxquels le phosphore est soumis dans le pays. Les

frontières douanières nationales forment les limites de ce système. La quantification a été établie pour l'année 2006. Le système principal a été divisé en six sous-systèmes qui interagissent les uns avec les autres:

- a) L'*agriculture animale* inclut tous les processus nécessaires à la production et à la préparation de denrées alimentaires animales.
- b) L'*agriculture végétale* recouvre d'une part les processus nécessaires à la production et à la préparation de denrées alimentaires végétales; elle inclut d'autre part les processus de la sylviculture, de la production de papier, de bois-énergie et de bois de construction.
- c) L'*industrie chimique* importe et transforme des produits chimiques destinés à la production et des produits de nettoyage qui contiennent du phosphore.
- d) Les *ménages* et l'*artisanat* regroupent tous les processus liés à la consommation de denrées alimentaires, de produits contenant du bois et de produits de nettoyage. Ils prennent aussi en considération le jardinage privé.
- e) La *gestion des déchets* recouvre tous les processus liés à l'élimination et à la préparation de déchets liquides ou solides.
- f) Les *eaux* comprennent les cours d'eau superficiels et les lacs, ainsi que leurs sédiments.

Comme la littérature disponible ne fournit que rarement des valeurs pour les flux de phosphore, on a généralement calculé ces flux comme le produit des flux de marchandises et de leur concentration en phosphore, que l'on a déterminés à l'aide de recherches dans les données existantes. Les sources consultées sont principalement des relevés statistiques et des publications scientifiques; en outre, lorsqu'aucune donnée n'était disponible, les valeurs se fondent sur des relevés réalisés spécifiquement pour la présente étude, sur des calculs utilisant des valeurs indicatives grossières, sur des généralisations, sur des approximations ou sur l'estimation sommaire de certains paramètres. Une marge d'incertitude a été attribuée à toutes les données. Les incertitudes relative et absolue ainsi que la valeur réelle du flux permettent de déterminer les flux à recenser. Pour plus de 80 % des flux, il a été possible d'obtenir une incertitude inférieure à 20 %.

Résultats

La Suisse est une importatrice nette de phosphore. Chaque année, elle importe quelque 16 500 tP et en exporte environ 4000. Cela signifie que son stock total de phosphore augmente de près de 12 500 tP par an. Les importations se font à 90 % par l'intermédiaire de l'agriculture (importation de fourrage et d'engrais minéraux), alors que les exportations correspondent principalement à l'écoulement des eaux vers l'étranger ainsi qu'au transport de déchets animaux. La plus forte croissance du stock dans l'ensemble du système est mesurée dans les sous-systèmes *agriculture végétale* et *gestion des déchets*, avec des hausses respectives de 3500 et 9000 tP par an.

Dans l'ensemble du système, le bilan de phosphore est influencé avant tout par l'*agriculture* (engrais de ferme, fourrages) et par la *gestion des déchets*, ainsi que – dans une moindre mesure – par les *ménages* et l'*artisanat*. Avec des mouvements de phosphore

inférieurs à 2500 tP par an, l'*industrie chimique* et les *eaux* présentent quant à elles des processus de distribution et de regroupement de moindre importance.

Dans l'*agriculture*, le cycle presque fermé qui réunit la production animale à la production végétale contient les principaux flux à l'intérieur du système Suisse (engrais de ferme et fourrage pour animaux: environ 30 000 tP par an chacun). De plus, les importations de fourrage et d'engrais minéraux jouent un rôle essentiel pour la production végétale, avec respectivement 5600 et 5900 tP par an. Quant aux engrais issus du compostage et de la méthanisation, leur importance est moindre pour l'ensemble du système puisque leurs flux concernent à peine 1100 tP par an.

Le sous-système *ménages & artisanat* correspond à un processus de transit dont les intrants atteignent 9700 tP par an. Ceux-ci se répartissent approximativement ainsi: 78 % de denrées alimentaires, 10 % de produits de nettoyage, 9 % d'engrais et moins de 3 % de bois et de papier. Les biens consommés rejoignent directement la *gestion des déchets* sous la forme de différentes substances: ils représentent plus de 70 % des intrants de ce sous-système (eaux usées urbaines, ordures, déchets verts).

La *gestion des déchets* déplace chaque année environ 13 500 tP. En 2006, seuls 13 % (environ 1700 tP) ont été transformés en Suisse et réutilisés dans l'agriculture ou dans les jardins des ménages. Environ 1500 tP sont exportées chaque année dans les déchets animaux destinés à être traités à l'étranger. Les pertes de phosphore se montent ainsi à plus de 10 000 tP par an (environ 80 %). Les puits les plus importants de ce sous-système sont les décharges (près de 6300 tP par an), suivies des cimenteries (environ 3000 tP par an).

En quantité, le plus important potentiel de phosphore encore inexploité dans la *gestion des déchets* se dissimule dans le traitement et la valorisation des eaux usées et des boues d'épuration (environ 5800 tP par an). En 2006, 43 % des boues d'épuration étaient déjà éliminées par mono-incinération, puis acheminées vers une décharge bioactive; 25 % des boues étaient incinérées en UIOM et 22 % en cimenterie. A cette époque, les 10 % restants étaient encore livrés à l'agriculture. Par ailleurs, le système perd 1500 tP par an à cause de l'exportation de déchets animaux.

Discussion et possibilités d'action

Du point de vue de l'économie des ressources, la gestion du phosphore en Suisse n'est pas optimale et devrait être améliorée. Ces dernières années, des filières de recyclage potentielles ont été interdites en raison des risques qu'elles présentent pour l'hygiène ou pour l'environnement (notamment l'emploi de déchets animaux comme fourrage ou de boues d'épuration comme engrais). Le cycle du phosphore pourrait toutefois être fermé en bonne partie, ce qui permettrait de réduire les importations d'engrais minéraux. Quatre possibilités d'action peuvent maintenant être envisagées:

- a) utiliser les cendres de boues d'épuration comme engrais;
- b) utiliser les farines animales comme engrais;

- c) utiliser les farines animales comme fourrage pour animaux;
- d) recycler les déchets verts de manière systématique.

Ces options montrent qu'il existe un potentiel considérable pour refermer le cycle du phosphore en Suisse. En utilisant les cendres de boues d'épuration comme engrais, les besoins en engrais minéraux diminuent à 20 % si l'on ne considère que le phosphore; ils descendent à 50 % avec les farines animales utilisées comme engrais et à 87 % avec le recyclage systématique des déchets verts. Recourir aux farines animales dans l'élevage réduirait les importations de fourrage de 50 %. Ces résultats illustrent le potentiel d'économie du phosphore en tant que substance. Si l'on tient compte d'autres facteurs comme l'efficacité de l'engrais et la faisabilité, le potentiel des cendres de boues d'épuration et des farines animales comme engrais recule à chaque fois de 60 %; celui du recyclage des déchets verts diminue quant à lui de 40 %. Cependant, en tenant compte de ces facteurs, la combinaison des diverses mesures peut engendrer un recul de moitié des importations d'engrais minéraux. Il faut toutefois tenir compte du fait que la hausse du stock de phosphore dans les sols agricoles doublerait. Il convient d'étudier encore quelles seraient les conséquences environnementales d'une telle évolution.

Le plus gros potentiel d'optimisation du cycle du phosphore en Suisse réside dans la gestion des boues d'épuration. Celle-ci présente l'option de pilotage la plus efficace pour l'OFEV. Il existe déjà 14 installations de mono-incinération des boues d'épuration, dont les cendres n'ont toutefois pas encore pu être utilisées comme engrais. Comme première étape, il conviendrait d'entreposer séparément les cendres des installations existantes. Cette démarche permettrait d'assurer la possibilité de les utiliser comme matière première pour produire de l'engrais dès que les procédés techniques nécessaires seront prêts à être mis sur le marché. En outre, un soutien financier ou politique ciblé pourrait accélérer l'introduction de tels procédés sur le marché en Suisse. Dans une deuxième étape, il conviendrait d'examiner si les déchets animaux peuvent être valorisés sous la forme d'engrais dans le cadre du même procédé de transformation. Imposer la collecte sélective des déchets verts pour en faire de l'engrais à l'échelle de la Suisse semble en revanche peu efficace, puisque le potentiel restant est relativement restreint au vu des systèmes déjà mis en place dans les communes.

Perspectives

Pour optimiser le bilan de phosphore, certains aspects doivent être pris en considération parallèlement aux questions de gestion des ressources. Ils sont abordés de manière sommaire dans la présente étude. On mentionnera les éléments suivants: a) caractère supportable des mesures au plan économique; b) acceptabilité sociale et politique; c) mise en œuvre technique et logistique; d) aspects écologiques. Des analyses supplémentaires sur ces thèmes permettraient de savoir quelles mesures sont nécessaires au plan politique pour parvenir à un bilan de phosphore optimisé et moins dépendant de l'étranger.

> Summary

Introduction

Phosphorus is a principal element in the nutritional chain of all organisms, and cannot be substituted. Owing to this, prognoses according to which the static availability of the easily accessible ground resources of phosphorus amounts only to several decades or several centuries (50–330 years) appear alarming. However, an availability of several centuries is only achieved if the lower- quality resources of phosphorus contaminated with heavy metals and/or subject to higher mining costs are included. In Switzerland, over and above the increasing global scarcity of phosphorus resources, phosphorus is often regarded simply as a pollutant in surface waters, since it has played a major role in the eutrophication of many lakes. Although the inputs to surface waters have been substantially reduced over the past 20 years, a potential still remains for local input reductions.

From these two standpoints – scarcity and eutrophication – countries without their own resources of phosphorus, coupled with intensive use of the land, as in agriculture, as for example in Switzerland, there is intense interest in gaining a knowledge of how the phosphorus cycle is now structured, and how it could be optimised. Despite the numerous studies carried out on the use of goods containing phosphorus in Switzerland, an overall perspective from the standpoint of resource utilisation that could permit the establishment of options for the optimisation of the phosphorus cycle has been lacking.

In the present study, values for phosphorus flows in Switzerland and the associated ranges of uncertainty have been quantified for the year 2006 in an analysis based on a substance flow simulation model having a resolution, data quality and consistency never before achieved. Using an error analysis, a simple scheme was used to identify the relevant flows subject to error and to validate them. Based on the results achieved, a more comprehensive understanding of the flow cycle than achieved in previous work was obtained. The present study fulfils (for the first time) the demand for a comprehensive study of the total phosphorus cycle in Switzerland. This represents an essential step enabling the potential for increasing material efficiency and reducing risks of the phosphorus cycle to be adequately assessed from a holistic standpoint.

Method

For the analysis of the phosphorus household in Switzerland, the method of substance flow analysis was applied. The phosphorus cycle was set up in agreement with the quantitative and qualitative importance of the individual processes that phosphorus undergoes in Switzerland. For this, the system boundary used in customs law was chosen. The system was quantified for the year 2006. The main system is subdivided into the following 6 interdependent subsystems:

- a) *Agriculture animals* includes all processes needed for the production and provision of animal feeds;
- b) *Agriculture plants* includes both the processes required for the production and provision of plant nutrients, and also the processes used in forestry and the manufacture of paper, building timber and energy products;
- c) The *chemical industry* imports and processes cleaning products containing phosphorus, as well as chemicals for production;
- d) *Household & trades* includes all processes in connection with the consumption of foods, products containing wood, and cleaning products. In addition, the private gardening sector is included;
- e) *The waste* sector includes all processes associated with the disposal and the treatment of liquid and solid wastes; and
- f) *Ground and surface waters* includes flowing surface waters, and the lakes, including their sediments.

Since the values for phosphorus flows are rarely available from the literature, these were generally calculated from the products of the substance flows and the phosphorus concentrations obtained from data research. The data sources mainly consist of statistical surveys and scientific publications, and, in cases where no other data were available, of own surveys, generalisations, rough extrapolations, or rough estimates of the parameters. All data were provided with a range of uncertainty. The required flows were determined based on the relative and absolute uncertainty and on the true value of the flow. An uncertainty of < 20 % was achieved for > 80 % of the flows.

Results

Switzerland is a net importer of phosphorus. An annual quantity of approx. 16 500 tonnes of phosphorus is imported, and approx. 4000 tonnes exported. Thus Switzerland is subject to a growth in the total quantity of phosphorus of approx. 12 500 tP/a. Exports arise mainly from agriculture (imports of feeds and mineral fertilisers) through flows abroad via ground and surface waters and the export of animal wastes. The greatest increase in the total quantity takes place in the subsystems *agriculture plants*, with an increase of approx. 3500 tP/a and the *waste* sector, with an increase of approx. 9000 tP/a.

Overall, the phosphorus cycle is dominated by the agriculture (farmyard manure, feeds) and disposal sectors, and, to a lesser extent, by the household and trades sectors. The sectors *chemical industry*, and *ground and surface waters* with < 2500 tP/a represent less significant distribution and accumulation processes.

In *agriculture*, the almost closed cycle between animal production and plant production includes the most significant flows within the Swiss system (farmyard manure and animal feeds, each with approx. 30 000 tP/a). Further, the imports of feeds and mineral fertilisers, with 5600 tP/a and 5900 tP/a respectively, play an important role in plant production. Green fertiliser from compost and fermentation, with a total of just under 1100 tP/a, are less significant for the total system.

The subsystem *household & trades* is a once-through process with an input of approx. 9700 tP/a, consisting of approx. 78 % foods, approx. 10 % cleaning products, approx. 9 % fertilisers, and < 3 % wood/paper. The goods consumed are consigned directly to the waste industry in the form of various waste substances, and represent over 70 % of the input to the waste sector (domestic waste water, refuse, green waste).

In the *waste sector*, an annual quantity of approx. 13 500 tP are processed. In 2006, a mere 13 % (approx. 1700 tP/a) were treated in Switzerland and employed either in agriculture or in private gardens. Approx. 1500 tP/a of animal wastes were exported abroad for reprocessing. Accordingly, phosphorus losses amount to > 10 000 tP/a (approx. 80 %). In this, by far the most important sinks in this subsystem are the landfills, with approx. 6300 tP/a, followed by the cement factories, with approx. 3000 tP/a.

On a quantity basis, the largest as yet unused potential for phosphorus recovery in the *waste sector* lies in the reprocessing and reuse of waste water and sewage sludge (approx. 5800 tP/a). In 2006, 43 % of the sewage sludges were consigned to mono-valent sludge incineration and from there to bioactive landfills. A further 25 % were incinerated in the MWIP and 22 % in cement factories. The remaining 10 % were consigned at this time to agriculture. In addition, the system incurs losses of 1500 tP/a through the export of animal wastes.

Discussion and options for future action

From the point of view of resources, phosphorus management is not optimally organised in Switzerland, and is in need of improvement. Potential recycling paths, such as feeding of animal wastes or the use of sewage sludge as fertiliser, have been prohibited in recent years for reasons of hygiene and risks to the environment. However, it was largely possible to close the phosphorus cycle, enabling the import of mineral fertiliser to be reduced. The following four options for future action

- a) Use of sewage sludge ash as fertiliser;
- b) Use of animal meal as fertiliser;
- c) Use of animal meal as animal feed;
- d) Consequential recycling of green waste.

illustrate the substantial potential for closing the phosphorus cycle in Switzerland. With the option for future action using sewage sludge ash as fertiliser, the need for mineral fertiliser drops to 20 % based purely on a phosphorus balance; using animal meal as fertiliser, to 50 %; using consequential recycling of green waste, to 87 %. Using animal meal as feed reduces the import of feeds by 50 %. These figures indicate the potential for reducing the phosphorus requirement from a substance standpoint. When other factors such as fertiliser efficiency and feasibility are included, the potential using sewage sludge ash as fertiliser and animal meal as fertiliser, is 60 % lower in each case, and using consequential recycling of green waste, 40 % lower. Using a combination of these measures, and taking the above factors into account, a 50 % reduction of the import of mineral fertiliser can be achieved. In this, however, it must be taken into account that the increase in total phosphorus in agricultural soils would be doubled. It

is yet to be ascertained what consequences this would have from an environmental point of view.

The greatest potential for the optimisation of the phosphorus cycle in Switzerland lies in the management of sewage sludge. This sector represents the most effective control option for the BAFU. At present, there are 14 monovalent sewage sludge incineration plants in operation, whose ashes could not till now be employed as fertiliser. As a first step, the ashes of the existing plants could be separately deposited in a landfill site. This procedure would ensure that these could later be used as raw material in fertiliser production, as soon as technical processes for the manufacture of fertiliser from sewage sludge ashes are commercially mature. Furthermore, concerted financial or political support could accelerate the market introduction of these processes in Switzerland. In a further step, it could be ascertained whether animal wastes could be converted to fertilisers in the same treatment process. By contrast, giving priority to the separate collection of green waste in the whole of Switzerland seems less effective, since the remaining potential for this is only slight owing to the separate collections of green waste that have already been introduced by the municipalities.

Future perspectives

In optimising the phosphorus cycle, in addition to resource aspects, further aspects such as those discussed briefly in the present study must be considered. The following aspects are relevant in this connection: a) economical acceptability; b) social and political acceptance; c) technical and logistical implementation, and d) ecological aspects. By analysing these and other aspects, the question as to the measures needed at political level could be answered in order to achieve an optimised phosphorus cycle that would be more independent of foreign countries.

1 > Einleitung

1.1 Ausgangslage

Phosphor ist gemäss Karl (2000) für alle Organismen ein essentielles Hauptnährelement, das nicht substituiert werden kann. Phosphormangel führt beispielsweise in der Landwirtschaft zu niedrigeren Ernteerträgen und damit zu einer geringeren Effizienz. Aus diesem Grund erscheinen Prognosen alarmierend, nach denen die zeitliche Reichweite der gut abbaubaren Rohphosphatlagerstätten nur noch Jahrzehnte bis wenige Jahrhunderte (50–330 Jahre) betragen könnte (Smil 2000). Die obere Grenze der zeitlichen Reichweite wird jedoch nur erreicht, wenn auch die minderen potentiellen Rohphosphatlagerstätten mit Schwermetallbelastung und/oder mit erhöhten Förderkosten erschlossen werden (Lamprecht et al., under revision). Neben der zunehmenden Rohstoffverknappung wird Phosphor in der schweizerischen umweltpolitischen Diskussion häufig als ein Schadstoff in Oberflächengewässern wahrgenommen, da er in vielen Seen eine bedeutende Rolle bei der Eutrophierung gespielt hat.¹ Zwar konnten die Einträge in die Oberflächengewässer in den vergangenen 20 Jahren wesentlich reduziert werden, doch bestehen lokal nach wie vor Verbesserungspotentiale zur Verminderung der Einträge.

Unter diesen beiden Gesichtspunkten – Verknappung und Eutrophierung – besteht für Länder ohne eigene Phosphatlagerstätten und mit intensiver Flächennutzung (einschl. Landwirtschaft) wie beispielsweise die Schweiz ein hohes Interesse an den Kenntnissen, wie der Phosphorkreislauf aktuell strukturiert ist und wie er optimiert werden könnte. Trotz zahlreicher Studien zum Einsatz phosphorhaltiger Güter in der Schweiz fehlt bis heute ein Gesamtüberblick aus der Perspektive der Ressourcennutzung, der die Erarbeitung von Handlungsoptionen zur Optimierung des Phosphorhaushaltes erlaubt.

1.2 Einblick in den Phosphorhaushalt der Schweiz

In der Schweiz entfällt der grösste Teil des heutigen Phosphor-Verbrauchs auf Düngemittel und Futtermittel in der Landwirtschaft, wobei bezogen auf Phosphor der Austausch von Hofdünger und Weidefutter dominiert (Lamprecht 2004). Daneben gibt es chemisch-industrielle Anwendungen wie Reinigungsmittel, die jedoch mengenmässig eine untergeordnete Rolle spielen. Der Mensch nutzt Phosphor mit der Nahrungsaufnahme, aber auch im häuslichen Bereich in Form von Reinigungsmitteln oder als Düngestoff

¹ Überangebot an Phosphor, welcher i.d.R. in natürlichen Ökosystemen limitierender Nährstoff ist, führt zu einem übermässig hohen pflanzlichen Wachstum; in limnischen Systemen führt dies häufig zur übermässigen Ausbreitung von Algen, so dass das ökologische Gleichgewicht nachhaltig gestört wird. Aus diesem Grunde wurde zum Schutz der Gewässer der Eintrag von Schadstoffen und die damit verbundenen technischen Massnahmen durch die Gewässerschutzverordnung (GSchV) geregelt (Schweizerischer Bundesrat 1998).

im Gartenbau. Schliesslich werden phosphorhaltige Abfälle zur Entsorgung in die Abfallwirtschaft gebracht, wo sie bis heute grösstenteils dauerhaft der Nutzung entzogen werden. Auf verschiedene Weise gelangt Phosphor in die Umwelt, wobei vor allem der Eintrag in die stehenden Oberflächengewässer von Relevanz ist.

Der Phosphorhaushalt kann vereinfacht in fünf Hauptprozesse aufgeteilt werden, die ihrerseits Unterprozesse beinhalten: Landwirtschaft, Haushalt & Gewerbe, Produktion, Abfallwirtschaft und Gewässer (Lamprecht 2004, Hügi 2007, Lamprecht et al., under revision). In den genannten Prozessen sind Fehlerbereiche und Unsicherheiten in unterschiedlichen Flüssen zu verzeichnen, wobei sie im Prozess Haushalt & Gewerbe am grössten zu erwarten sind, gefolgt von der Abfallwirtschaft inkl. Abwasserbehandlung, der Produktion, der Landwirtschaft und der Gewässer (Hügi 2007, Lamprecht et al., under revision).

1.3

Ziele

Das Ziel des Forschungsprojektes «Phosphorflüsse in der Schweiz – Stand, Risiken und Handlungsoptionen» ist es, die Phosphorflüsse der Schweiz inklusive ihrer Fehlerbereiche für das Jahr 2006 in einem Stoffflussanalyse-Modell zu quantifizieren und zu validieren, Handlungsoptionen zu erarbeiten sowie ein Monitoringsystem zur Erfassung potentieller Risiken und Messung der Effektivität von Massnahmen zu entwickeln. Auf dieser Grundlage kann ein fundiertes Ressourcenmanagement erfolgen.

Das Projekt wurde in folgenden, aufeinander aufbauenden Modulen bearbeitet; das gestaffelte Vorgehen erlaubt, auf Basis der Ergebnisse eines Moduls die Ziele des folgenden Moduls zu präzisieren und dem erweiterten Kenntnisstand anzupassen:

Modul 1: Status quo, Fehlerbereiche und Messkonzept

- > Quantifizierung der Phosphorflüsse für das Jahr 2006 mit Fokus auf «Haushalte & Gewerbe» und «Abfallwirtschaft»²
- > Bestimmung und Charakterisierung der Unsicherheiten der Flüsse
- > Aufzeigen der Modellunsicherheiten und Vorschläge zu ihrer Verminderung
- > Konzept zu einem Risikomanagement

Modul 2a: Validierung und Managementsystem

- > Erhebungen zum Verringern der Unsicherheiten relevanter Systemgrössen
- > Interne und externe Plausibilitätsprüfung des Modells
- > Bestimmung von Handlungsoptionen

² Der Fokus wurde vom Bundesamt für Umwelt hinsichtlich der Handlungsoptionen gewählt, die von besonderem Interesse sind.

Modul 2b: Erarbeitung eines Instruments zum Management des Phosphorhaushaltes

- > Aktualisierung der Phosphor-Stoffhaushaltsmodells im gewünschten Zeitintervall
- > Bewertung von Handlungsoptionen (bzgl. Quantität P)
- > Monitoring des Phosphorhaushaltes

1.4 Vorgehen

Das Projekt «Phosphorflüsse in der Schweiz – Stand, Risiken und Handlungsoptionen» besteht aus zwei Modulen: In Modul 1 werden die analytischen Grundlagen gelegt und die Prinzipien einer konzeptionellen Risikobewertung vorgestellt, wie sie auf den Phosphorhaushalt angewandt werden kann. In Modul 2 werden die Daten mithilfe einer Unsicherheitsanalyse zielgerichtet validiert, um darauf aufbauend Handlungsoptionen abzuleiten. Schliesslich wird ein im Rahmen des Projektes entwickeltes Monitoring-Tool vorgestellt, das eine vereinfachte Aktualisierung des Phosphormodells ermöglicht.

Der vorliegende Bericht folgt weitgehend dieser Gliederung: Nach einer kompakten Darstellung der Methode (Kap. 2) werden die Ergebnisse ausführlich für das Hauptsystem sowie dessen Subsysteme die Resultate präsentiert und kurz diskutiert, einschliesslich einer Unsicherheitsanalyse der Flüsse (Kap. 3). Aufbauend auf der Stoffflussanalyse werden die Handlungsoptionen für die Optimierung des Phosphorhaushaltes vorgestellt und ausführlich mithilfe von Szenarien diskutiert (Kap. 4). Anschliessend wird das Monitoring-Tool und seine Validierung vorgestellt (Kap. 5); eine technische Anleitung zur Bedienung des Tools erfolgt in einem separaten Dokument (Dokumentation P-Monitoring Tool). Die Ergebnisse der beiden Module werden schliesslich mittels konkreten Massnahmenvorschlägen in den Schlussfolgerungen zusammengefasst (Kap. 6) und Vorschläge für weiterführende Arbeiten als Ausblick präsentiert (Kap. 7). Das Konzept für eine umfassende Risikoanalyse ist im Anhang F dargestellt.

Im Rahmen der Stoffflussanalyse wurde bei der Quantifizierung der Phosphorflüsse zur Steigerung der projektinternen Effizienz soweit als möglich auf bestehende Datensätze aufgebaut. Je nach Relevanz und Aufwand wurden Flüsse gezielt erhoben bzw. aktualisiert.

2 > Methode

2.1 Die Stoffflussanalyse

Zur Erhebung der Phosphorflüsse wird die Methode der Stoffflussanalyse angewendet, wie sie in der Fachliteratur beschrieben wird (Baccini & Brunner 1991; Baccini & Bader 1996; Brunner & Rechberger 2004; Binder 2005).

Die Stoffflussanalyse ist eine Methode zur «Erfassung, Beschreibung und Interpretation von Stoffwechselprozessen» (Baccini & Bader 1996, S. 44). Es ist eine naturwissenschaftliche Methode, mit der für einen definierten Raum in einer bestimmten Zeitperiode (i.e. Systemgrenzen) der Stoff- und Energieumsatz quantifiziert wird. Es gelten die physikalischen Gesetze der Massen- und Energieerhaltung.

Die Stoffflussanalyse erfolgt in vier Schritten:

1. *Systemdefinition*
Beschrieb des Systems gemäss Fragestellung durch Systemgrenze, Prozesse, Güter und Stoffe
2. *Messung/Datenerfassung*
Erfassung/Erhebung der Güterflüsse, Stoffkonzentrationen
3. *Berechnung*
Berechnung der Stoffflüsse
4. *Interpretation*
Schematische Darstellung, Interpretation der Resultate, Erarbeitung von Handlungsoptionen, Szenarioberechnungen

Die Stoffflussanalyse verläuft nicht linear; es handelt sich um ein iteratives Vorgehen, in dem auf Grund der vorhandenen Daten und Erkenntnisse, das System angepasst werden kann bzw. zusätzliche Güterflüsse berücksichtigt werden müssen.

Definition der wichtigsten Begriffe in der Stoffflussanalyse:

- > *Stoffhaushaltssystem*: Offenes System, bestehend aus Prozessen und Gütern, durch welches Stoffe bzw. Güter fließen
- > *Systemgrenze*: Grenzt Stoffhaushaltssystem ein
- > *Prozesse*: Transport, Transformation oder Lagerung von Stoffen bzw. Gütern
- > *Güter*: Stoffe und Stoffgemische, die vom Menschen bewertete Funktionen erfüllen
- > *Stoffe*: Chemische Elemente und Verbindungen

2.2 Stoffflussanalyse des schweizerischen Phosphorhaushalts

In einem ersten Schritt wurde basierend auf den bestehenden Untersuchungen ein SFA-System erstellt. Hierbei wurde die Systemwahl der zur gleichen Zeit ausgeführten Studie «Biogene Güterflüsse der Schweiz 2006»³ (Baum & Baier 2008) weitestmöglich berücksichtigt, um einerseits Synergie bei der Datenrecherche zu erzielen und um andererseits eine gemeinsame Diskussionsgrundlage zu gewährleisten.

Das System wurde sukzessive verfeinert, so dass zur Wahrung der Übersicht eine Aufteilung in ein Gesamtsystem und 6 Subsysteme vorgenommen wurde (Kap. 2.2.1 und Kap. 2.2.2). Die 6 Subsysteme sind dabei identisch mit den Prozessen des Gesamtsystems.

Gemäss dem Fokus auf Haushalte & Gewerbe sowie der Abfallwirtschaft wurden diese beiden Prozesse um weitere Systemelemente in Absprache mit dem Bafu, Sektion Siedlungs- und Bauabfälle, erweitert. Zusätzlich wurde eine Diplomarbeit «Systemmodellierung und Analyse der Phosphorflüsse in der Schweizer Landwirtschaft» (Bieler 2008) an der Abteilung SIE des Geographischen Instituts der Universität Zürich durchgeführt, die einen wesentlichen Beitrag zur Datenerhebung des Projektes geleistet hat.

2.2.1 Hauptsystem: Systemgrenze und Systemwahl

Das System wurde entsprechend der quantitativen und qualitativen Bedeutung der einzelnen Prozesse ausgewählt, denen Phosphor in der Schweiz unterliegt. Systemgrenze ist die zollrechtliche Landesgrenze der Schweiz.

Das Hauptsystem enthält die folgenden 6 Prozesse, die jeweils ein eigenes Subsystem darstellen (Abb. 1):

- > Landwirtschaft Tiere
- > Landwirtschaft Pflanzen
- > Chemische Industrie
- > Haushalte & Gewerbe
- > Abfallwirtschaft
- > Gewässer

Im Kapitel 3 werden die Modellergebnisse auf Ebene Hauptsystem und Subsysteme dargestellt. Die Subsysteme werden im Anhang A1 abgebildet.

³ Diese Studie stellt Struktur und Mengenverhältnisse von Biomasse auf Grund bestehender statistischer Erhebungen dar.

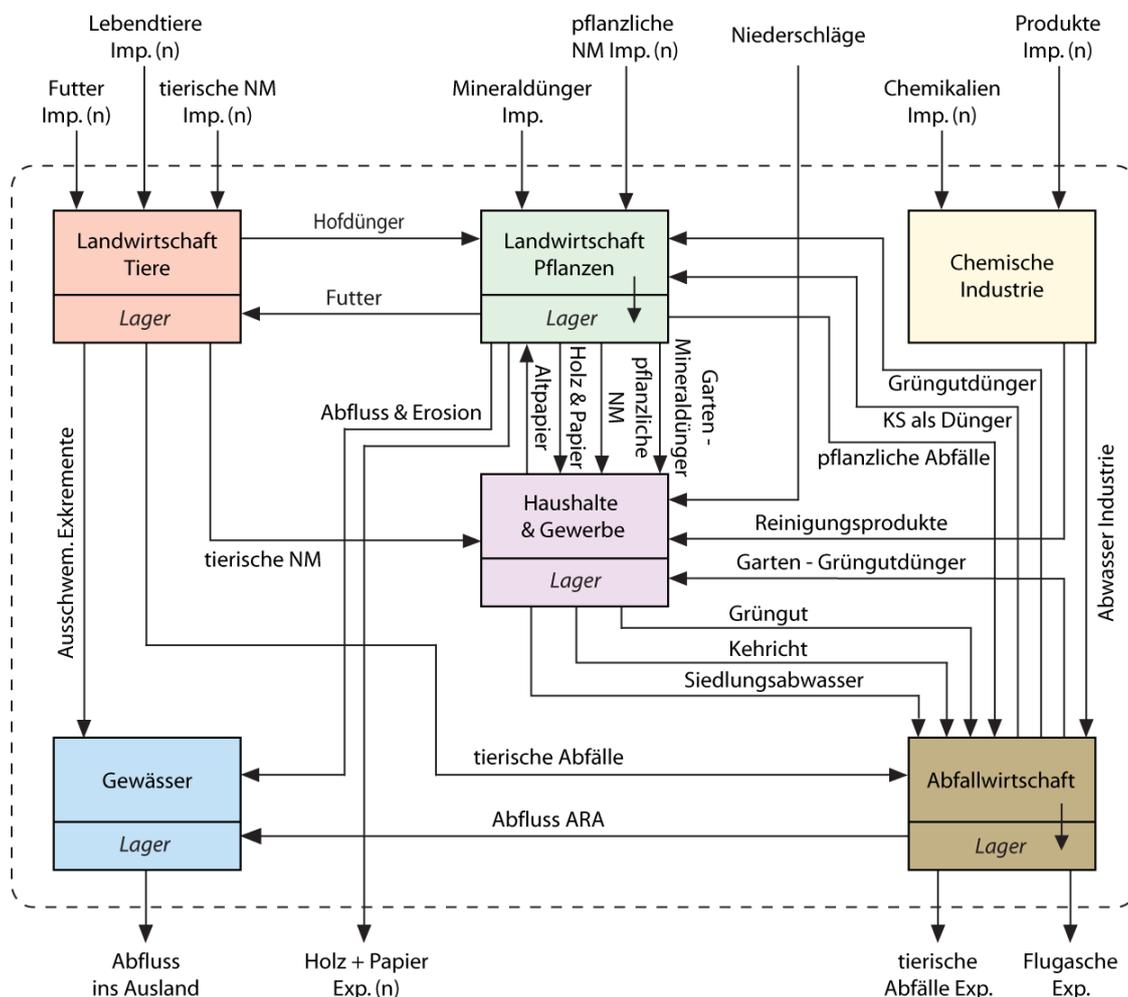
Die Landwirtschaft in der Schweiz umfasst die Tierhaltung zur Gewinnung von Fleisch, Milch und Eiern sowie den Pflanzenbau (Feldfrüchte, Obstbau, Futterbau etc.). Die Landwirtschaft weist hohe Umsätze an Phosphor auf, wobei durch den Hofdünger und das pflanzliche Futter eine bedeutende Kreislaufführung des Phosphors zwischen den beiden Prozessen *Landwirtschaft Tiere* und *Landwirtschaft Pflanzen* auftritt. Ferner nutzt die Landwirtschaft Importe von Phosphor in Form von Futter, Lebewesen sowie von Mineraldünger. Zudem werden tierische und pflanzliche Nahrungsmittel importiert. Zur einfacheren Darstellung laufen diese Importe über die landwirtschaftlichen Prozesse und werden zusammen mit der inländischen Produktion an tierischer und pflanzlicher Nahrung zur Ernährung der Menschen in den Prozess *Haushalte & Gewerbe* geführt. Weitere Produkte aus der Landwirtschaft in den Prozess *Haushalte & Gewerbe* sind Holzgüter, Energieholz, Papier und Mineraldünger für die Gärten. Nach der Nutzung wird das Altpapier zur Papierproduktion zurückgeführt, welche im Prozess *Landwirtschaft Pflanzen* abgebildet wird. Exporte von Lebewesen, tierischen und pflanzlichen Nahrungsmitteln treten in der gewählten Netto-Darstellung des Aussenhandels nicht auf (die Bilanzierung der entsprechenden Im- und Exporte ist zur besseren Übersicht nunmehr im jeweiligen Subsystem dargestellt), einzig bei Holz & Papier tritt Netto-Export auf.

Systembeschreibung

Phosphorhaltige Reinigungsprodukte sowie Chemikalien zur Produktion werden in den Prozess *Chemische Industrie* importiert und dort allenfalls verarbeitet, bevor sie in den *Haushalte & Gewerbe* gelangen. Zur vollständigeren Bilanzierung der Siedlungswasserwirtschaft wird der Niederschlag in den Siedlungen berücksichtigt (hier als Import).

Die Abfälle aus dem Prozess *Haushalte & Gewerbe*, namentlich das Siedlungsabwasser, der Kehricht, das kommunal gesammelte Grüngut (einschliesslich weiterer biogener Abfälle) sowie die pflanzlichen/tierischen Abfälle aus der Landwirtschaft und das Abwasser aus der Industrie werden im Prozess *Abfallwirtschaft* gesammelt und behandelt bzw. deponiert. Als Output der *Abfallwirtschaft* werden Klärschlamm und Grüngutdünger in die *Landwirtschaft Pflanzen* zurückgeführt (letzterer teilweise als Garten-Grüngutdünger in die Gärten), tierische Abfälle und Flugasche zur Entsorgung im Ausland zumindest teilweise exportiert. Ein weiterer Teil bleibt in der *Abfallwirtschaft* (z. B. in Deponien) oder gelangt im Abfluss ARA (gereinigtes Abwasser und Regenüberlauf) in die *Gewässer* (Flüsse und Seen). Weitere Einträge in die *Gewässer* sind der ausgeschwemmte Anteil an Exkrementen aus der *Landwirtschaft Tiere* und Oberflächenabfluss & Erosion aus der *Landwirtschaft Pflanzen*. Im Prozess *Gewässer* wird der Phosphor über die Fliessgewässer ins Ausland und das Meer verlagert, abzüglich des Anteils Phosphor, der in den Gewässersedimenten abgelagert wird.

Abb. 1 > Modell Phosphorhaushalt der Schweiz: Darstellung des Hauptsystems



n = netto

Im Gesamtsystem weisen alle Prozesse ein Lager auf⁴ mit Ausnahme des Prozesses *Chemische Industrie*. Der Prozess *Haushalte & Gewerbe* ist zentral abgebildet; oberhalb davon befinden sich die Versorgungsprozesse der Landwirtschaft, unterteilt in *Landwirtschaft Tiere* und *Landwirtschaft Pflanzen*, sowie die *Chemische Industrie*; unterhalb davon die Entsorgungsprozesse (*Abfallwirtschaft*) und die *Gewässer*. Die Importe zuzüglich dem Niederschlag in Siedlungen treten von oben in das System, die Exporte zuzüglich dem natürlichen Abfluss ins Ausland verlassen das System nach unten. Zur besseren Übersicht werden die Im- und Exporte des Gesamtsystems in der Regel als sogenannte Net-Flüsse bilanziert (dies geschieht in Bilanzierungsprozessen innerhalb der Subsysteme).

Technische Beschreibung des Systemaufbaus

⁴ Das Lager eines Prozesses (Subsystem) des Gesamtsystems ist die Summe aller Lager der in ihm enthaltenen Prozesse. Das bedeutet, dass jeweils mind. einer der Prozesse in den Subsystemen ein Lager hat.

Das Hauptsystem weist 6 Prozesse (Subsysteme), 8 Importflüsse und 4 Exportflüsse auf; die 6 Prozesse werden durch 25 interne Flüsse⁵ verknüpft (Abb. 1). Die Prozesse und Flüsse für das Gesamtsystem und die 6 Subsysteme sind im Anhang A2 beschrieben.

Auf eine mathematische Beschreibung des Modells mit Aufstellung der Systemgleichungen wird in diesem Bericht verzichtet, da dem Bafu das Modell als Datenfile (STAN-Datei) bereitgestellt wird. Das Modell wurde für das Jahr 2006 erstellt. Anhand des erarbeiteten Monitoring Tools kann mit geringem Zeitaufwand das Modell jedes Jahr neu berechnet werden. Durch die Fortführung der folgenden Jahre kann die Dynamik des Systems erfasst werden.

Das Modell wird durch Güterflüsse zwischen den Prozessen beschrieben, die jeweils Stoffe, bzw. Phosphor enthalten (Frachten). Das benötigte Systemverständnis erstreckt sich auf beide Ebenen, daher enthält das Modell Datensätze sowohl auf Güter-, als auch auf Stoffebene⁶. Auf eine Untersuchung und Bilanzierung der Abgase aus den Prozessen wird verzichtet, da Phosphor praktisch nicht gasförmig auftritt.

2.2.2 Subsysteme: Systemgrenzen und Systemwahl

Im Folgenden werden die 6 Subsysteme zusammenfassend beschrieben, wobei vor allem die Eigenheiten des jeweiligen Subsystems erläutert werden. Für Details sei auf die Systemabbildungen und die Beschreibung der Subsysteme im Anhang A1 resp. A2 verwiesen. Subsysteme und Prozesse werden kursiv gekennzeichnet.

Das Subsystem *Landwirtschaft Tiere* besteht aus den beiden Prozessen *Tierproduktion* und *Verarbeitung tierischer Nahrungsmittel*, hinzu kommen zwei Bilanzierungsprozesse⁷ *Handel Lebendtiere* und *Handel tierische Nahrungsmittel*. Der zentrale Prozess ist die *Tierproduktion* (einziges P-Lager im Subsystem), in die die importierten Masttiere sowie das Tierfutter (als Importe und aus der *Landwirtschaft Pflanzen*) gelangen. Die tierischen Produkte, getrennt in die Flüsse *Tiere Schlachtung* und *Milch & Eier*, werden über den Prozess *Verarbeitung tierischer Nahrungsmittel* in den *Handel tierischer Nahrungsmittel* geführt; die dabei anfallenden tierischen Abfälle gelangen in das Subsystem *Abfallwirtschaft* oder auf direktem Weg als Futtersuppe in die *Tierproduktion*. Der Bilanzierungsprozess *Handel tierischer Nahrungsmittel* ermöglicht den Export und Import von Nahrungsmitteln, bevor schliesslich die in der Schweiz verbrauchten Mengen in das Subsystem *Haushalte & Gewerbe* geleitet werden.

Landwirtschaft Tiere

⁵ Zur besseren Übersicht wurden für die Darstellung zusammengefasst: Holzgüter, Energieholz und Papier zu «Holz & Papier», gereinigtes Abwasser und Regenüberlauf zu «Abfluss ARA».

⁶ Güter sind Stoffe und Stoffgemische, die vom Menschen bewertete Funktionen erfüllen; unter Stoffen werden hier chemische Elemente und chemische Verbindungen zusammengefasst (Baccini & Bader 1996).

⁷ «Bilanzierungsprozesse» (Handelsprozesse ohne eigentliche physische Bedeutung) werden in diesem System zur besseren Übersichtlichkeit eingeführt. Sie stehen mit subsysteminternen Prozessen jeweils über die Im- und Exporte im Austausch, mit dem Ausland lediglich mit dem «resultierenden NetImport/-Export». Dadurch wird mit einer Reduktion der Aussenhandelsflüsse die Übersichtlichkeit im Gesamtsystem erhöht; auf Subsystemebene erhält man zusätzliche Informationen über die Handelsstruktur. Im Folgenden gilt dies für alle weiteren Bilanzierungsprozesse.

Überdies tauscht der Prozess *Tierproduktion* die Güter Hofdünger und Futter mit dem Subsystem *Landwirtschaft Pflanzen* aus. Die Ausschwemmungsverluste Exkrememente von den Bauernhöfen werden in das Subsystem *Gewässer* abgeführt.

Das Subsystem *Landwirtschaft Pflanzen* besteht aus den zwei voneinander unabhängigen Produktionssträngen von a) Nahrungsmitteln und b) Holz/Zellstoffen. Es besteht aus den Prozessen *Pflanzenproduktion* und *Forstwirtschaft* (nur hier bestehen Lager), hinzukommen die drei Produktionsprozesse *Verarbeitung pflanzlicher Nahrungsmittel*, *Verarbeitung Holz* und *Produktion Papier* sowie die beiden Bilanzierungsprozesse *Handel pflanzliche Nahrungsmittel* und *Handel Holz & Papier*.

Landwirtschaft Pflanzen

Im Produktionsstrang Nahrungsmittel ist der zentrale Prozess die *Pflanzenproduktion*, in den Mineraldünger (als Import) und Hofdünger, Grüngütdünger und Klärschlamm (aus anderen Subsystemen) gelangen. Die pflanzlichen Produkte werden über den Prozess *Verarbeitung pflanzlicher Nahrungsmittel* als pflanzliche Nahrungsmittel zum Prozess *Haushalte & Gewerbe* geführt, die Abfälle in das Subsystem *Abfallwirtschaft*. Der Prozess *Verarbeitung pflanzlicher Nahrungsmittel* steht über die Im- und Exporte im Austausch mit dem *Handel pflanzlicher Nahrungsmittel*. Den Prozess *Pflanzenproduktion* verlässt neben dem Futter in die Tierhaltung auch der Abfluss & Erosion in die *Gewässer*. Aus Gründen der Übersichtlichkeit und der Datenlage werden die Mineraldünger komplett in die *Pflanzenproduktion* geführt, bevor der in den Gärten eingesetzte Anteil in den Prozess *Haushalte & Gewerbe* weitergeleitet wird.

Im zweiten Produktionsstrang Holz/Zellstoffe wird Nutzholz in der *Forstwirtschaft* produziert. Im anschliessenden Prozess *Verarbeitung Holz* wird das Nutzholz aufbereitet und gelangt a) als Holzgüter oder Energieholz oder b) als Papier über die Zellstoff- und Papierindustrie in den den Prozess *Haushalte & Gewerbe*. Beide Produktgruppen stehen über die Im- und Exporte im Austausch mit dem *Handel Holz & Papier*.

Die Prozesse *Pflanzenproduktion* und *Forstwirtschaft* weisen ein P-Lager auf.

Das Subsystem *Chemische Industrie* führt die nichtlandwirtschaftlichen Güter wie Chemikalien oder Produkte über den Prozess *Produktion chemischer Güter* in den Prozess *Haushalte & Gewerbe*. Dies geschieht einerseits direkt über den Handel, andererseits auch über vorangestellte Produktionsstufen. Chemikalien und Produkte werden als Im- und Exporte über die beiden Bilanzierungsprozesse *Handel Chemikalien* und *Handel Produkte* mit dem Aussenhandel verknüpft. In diesem Subsystem existiert kein Lager.

Chemische Industrie

Das Subsystem *Haushalte & Gewerbe* umfasst die der landwirtschaftlichen und nichtlandwirtschaftlichen Produktion nachfolgenden Prozesse des häuslichen Konsums und weiterer Formen des Konsums. In den zentralen Prozess *Siedlung mit Haushalten* gelangen einerseits zur Nahrungsaufnahme die tierischen und die pflanzlichen Nahrungsmittel, andererseits auch die Holzgüter für das Wohnen (Bauholz, Möbel). Zusätzlich werden über diesen Prozess das Altpapier aus dem separat geführten *Papierkonsum*, Holzaschen aus der *Energiegewinnung* und Gartenabfälle (inkl. Gärtnereien) in Form von Kehrlicht bzw. Grüngut in die *Abfallwirtschaft* überführt. Aufgrund des

Haushalte & Gewerbe

getrennten Entsorgungspfades des Siedlungsabwassers in die *Abfallwirtschaft* wird das häusliche Abwassersystem separat aufgeführt, so dass die Ausscheidungen des Menschen (Fäkalien, Urin), Speisereste in das Abwassersystem, Reinigungsprodukte sowie die «Hintergrundbelastung» in den Niederschlägen hier gesammelt und über den Fluss Siedlungsabwasser in die Abwasserreinigungsanlagen geführt werden.

Der Prozess *Papierkonsum* steht über die Flüsse *Holz & Papier* und *Altpapier* im Austausch mit dem Subsystem *Landwirtschaft Pflanzen*. Energieholz aus dem Subsystem *Landwirtschaft Pflanzen* wird im Prozess *Energiegewinnung* aus Holz genutzt; die Holzasche wird über den Prozess *Siedlung mit Haushalten* in die *Kehrichtverbrennungsanlagen* geführt oder zur Bodenverbesserung in die *Gärten* eingebracht, wie auch ein Anteil des Grüngutdüngers aus dem Subsystem *Abfallwirtschaft*. Grüngut, das nicht direkt in den Gärten eingesetzt wird, gelangt als Gartenabfall über den Prozess *Siedlung mit Haushalten* in die Grüngutsammlung. Im Gegenzug werden an manchen Orten pflanzliche Speisereste per Gartenkompostierung (Hauskompost) in die *Gärten* eingebracht. In diesem Subsystem weisen die beiden Prozesse *Siedlung mit Haushalten* und *Gärten* ein P-Lager auf.

Das Subsystem *Abfallwirtschaft* ist mit 12 Prozessen das umfangreichste Subsystem. Hier werden die wesentlichen Punkte beschrieben; die Beschreibungen der einzelnen Prozesse und Flüsse findet sich im Anhang.

Abfallwirtschaft

Das Subsystem *Abfallwirtschaft* besteht aus zwei weitgehend unverbundenen Teilen: die pflanzlichen Abfälle und die übrigen Abfälle (tierische Abfälle, Kehricht, Zufluss ARA). Das Grüngut und die pflanzlichen Abfälle werden im Sammelprozess *Triage Grüngut* auf die beiden Prozesse *Kompostierung* und *Vergärung* aufgeteilt. Deren Produkte werden anschliessend im Sammelprozess *Vertrieb Kompost & Gärgut* vereinigt, bevor sie als Grüngutdünger in die Subsysteme *Landwirtschaft Pflanzen* und *Haushalte & Gewerbe* (genauer: in die Gärten) eingebracht werden.

Die Abwässer aus dem Prozess *Haushalte & Gewerbe* und aus der *Chemischen Industrie* werden im Sammelprozess *Kanalisation* zum Zufluss ARA vereinigt und anschliessend in die *Abwasserreinigungsanlagen* (ARA) geführt. Das gereinigte Abwasser gelangt über den Abfluss ARA in die *Gewässer*, der Klärschlamm wird teilweise verbrannt⁸ (in *Kehrichtverbrennungsanlagen* (KVA), in der *Klärschlamm-Monoverbrennung* (KS-MV) bzw. in *Zementwerken*). In den beiden ersten Fällen werden die Schlacken und Flugaschen anschliessend deponiert; in letzterem Fall bleibt die Asche im Zement gebunden. Die drei Prozesse *Reaktor-* und *Reststoffdeponie* sowie die *Zementwerke* weisen ein P-Lager in diesem Subsystem auf, wobei die *Zementwerke* symbolisch für den im Zement gebundenen Phosphor in den Gebäuden stehen. Ferner wird ein Teil der tierischen Abfälle in den *Zementwerken* verbrannt oder exportiert.

Das Subsystem *Gewässer* umfasst die fliessenden Oberflächengewässer und die Seen, jeweils mit den Sedimenten. Der Prozess *Fliessgewässer* fungiert als Sammelprozess für die Ausschwemmung tierischer Exkremente aus der *Tierproduktion* (Verluste di-

Gewässer

⁸ Im Jahr 2006 wurde der überwiegende Anteil des Klärschlammes verbrannt.

rekt von den Bauernhöfen), den Abfluss & Erosion aus der *Pflanzenproduktion* sowie den gereinigten und den nur teilweise/nicht-gereinigten Abfluss (Regenüberlauf) aus den *Abwasserreinigungsanlagen* (ARA). Der Prozess *Fliessgewässer* weist ein P-Lager auf (See-Sedimente). Das Wasser verlässt die Systemgrenze als natürlicher Abfluss ins Ausland.

2.2.3 Datenerhebung

Als Stichjahr für die Stoffflussanalyse wurde das Jahr 2006 gewählt. Da in der Literatur nur in wenigen Fällen Werte für Phosphorflüsse verfügbar wurden im Allgemeinen die Phosphorflüsse als Produkt aus den Güterflüssen und den Phosphorkonzentrationen berechnet, welche durch Datenrecherchen bestimmt wurden. Auf eigene Messungen wurde wegen des grossen Aufwandes verzichtet.

Häufig waren zur Ermittlung der Güterflüsse und Phosphorkonzentrationen, ggf. auch der Phosphorflüsse, vorgängige eigene Berechnungen und/oder Annahmen erforderlich. Die Wahl der Datenquelle wurde jeweils der Datenstruktur des Bereiches angepasst: Neben wissenschaftlichen Artikeln, Berichten von Ämtern, Jahresberichten von Branchenverbänden, Manuskripten, Merkblättern waren dies vor allem Expertenbefragungen.

Die erhobenen Daten zu Güterflüssen und Phosphorkonzentrationen bzw. Phosphorflüssen sowie deren Quellen und/oder Annahmen zur eigenen Berechnung sind in der Parameterliste dokumentiert (Anhang A2 und A3).

2.2.4 Modellierung

Die Modellierung des Phosphormodells erfolgte mit der Software STAN1.1.3⁹, welche folgende Eingaben und Berechnungen ermöglicht:

- > Eingabe von Unsicherheiten
- > Berechnung fehlender Werte
- > Fehlerfortpflanzung
- > Ausgleichsrechnung

In dieser Studie wurde eine möglichst vollständige Beschreibung des Systems mit Daten angestrebt, um die Robustheit des Modells zu gewährleisten. Das System wurde demnach absichtlich überbestimmt, d. h. es sind mehr Daten vorhanden, als zur mathematischen Berechnung des Systems nötig wären. Hierbei entstehen im Allgemeinen Abweichungen in den Prozessbilanzen oder Flussberechnungen (z. B. grössere Inputs als Outputs ohne Lageränderung). Diese Abweichungen werden in STAN mittels

⁹ STAN ist eine kostenlose Software (Freeware), welche vom Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft an der TU Wien entwickelt wurde. Sie ermöglicht, Güter- und Stoffflussanalysen gemäß ÖNORM S 2096 (Stoffflussanalyse – Anwendung in der Abfallwirtschaft) durchzuführen. Die grafische Erstellung eines Modells erfolgt mittels vorgefertigter Komponenten (Prozesse, Flüsse, Systemgrenze, Textfelder) (Download unter www.iwa.tuwien.ac.at/iwa226/stan.html).

Ausgleichsrechnung aufgelöst. In einem iterativen Verfahren werden die Flüsse unter Berücksichtigung ihrer Unsicherheit neu berechnet, wobei Werte mit grösseren Unsicherheiten stärker ausgeglichen werden. Die ausgeglichenen Werte werden schliesslich verwendet, um die Werte von unbekanntem Grössen zu berechnen, wobei deren Unsicherheit mittels Fehlerfortpflanzung bestimmt wird (Cencic 2008).

In diesem Projekt erfolgte die Ausgleichsrechnung auf Basis der Unsicherheiten ausschliesslich auf Ebene Phosphor.

Eine Sensitivitätsanalyse¹⁰ kann mit der verwendeten Software STAN nicht durchgeführt werden, da bei Änderung eines Parameters eine neue Ausgleichsrechnung vollzogen wird.

2.3 Unsicherheitsanalyse

Wie alle Messgrössen sind auch hier die – meist berechneten – Modellparameter, das sind Flüsse und Lager, mit Unsicherheiten behaftet. Die Unsicherheiten der Modellparameter führen dazu, dass das Phosphormodell hinsichtlich seiner Interpretation einen gewissen Spielraum aufweist. Unsicherheiten werden bei Stoffflussanalysen jedoch häufig nur am Rande oder nicht behandelt¹¹. Diese Studie bezieht die Unsicherheiten¹² der Modellparameter systematisch ein, um a) relevante Kenntnislücken bzw. Unsicherheiten des Stoffhaushaltsystems kenntlich zu machen, b) eine Priorisierung der Notwendigkeit zur Schliessung der Datenlücken durchführen und schliesslich c) angemessene Interpretationen leisten zu können.

Das Modell wurde zweistufig entwickelt, indem in einem Zwischenschritt für das erste quantifizierte Modell eine Unsicherheitsanalyse durchgeführt (Kapitel 2.3.1) und auf Grundlage davon gezielt Modellparameter validiert wurden (Kapitel 2.3.2). Dies umfasste einmalig die Anwendung der unter Kapitel 2.3.1 genannten Schritte auf der ersten Stufe (Zwischenbericht), um die systematischen Verbesserungen in diesen Abschlussbericht einarbeiten zu können. Hingegen wurde die Unsicherheitsanalyse nicht erneut auf die Endresultate der Stoffflussanalyse angewandt, welche in Kapitel 3.1 dargestellt werden.

Man unterscheidet absolute Unsicherheit und relative Unsicherheit gemäss folgenden Definitionen:

¹⁰ Bei der Sensitivitätsanalyse werden die Auswirkungen einer Abweichung eines Flusses auf einen andern Fluss geprüft. Damit kann ermittelt werden, wie stark einzelne Flüsse das System bestimmen und bei welchen Flüssen auch eine grosse Abweichung keine sensitiven Änderungen des Systems hervorrufen.

¹¹ In diesen Fällen werden üblicherweise die von ihrem Autor eingeschätzten Unsicherheiten verarbeitet, meist intuitiv, selten strukturiert und nur in Ausnahmefällen explizit.

¹² Die Nomenklaturen «Unsicherheit» und «Fehler» werden im deutschen Sprachgebrauch bezogen auf Messgrössen in der Regel synonym verwendet. Zur Vereinheitlichung wird in dieser Arbeit der Begriff «Unsicherheit» verwendet mit Ausnahme von feststehenden Fachbegriffen, z. B. Fehlerfortpflanzung.

- > *Absolute Unsicherheit*: Die (Mess-) Unsicherheit des «Schätzwertes» einer physikalischen Grösse grenzt einen Wertebereich ein, innerhalb dessen der wahre Wert der Messgrösse liegt.¹³ Sie hat die Einheit der Messgrösse.
- > *Relative Unsicherheit*: Die relative Unsicherheit ist der Quotient aus (Mess-) Unsicherheit des «Schätzwertes» einer physikalischen Grösse und dem Schätzwert. Sie ist dimensionslos.

Bewertung der Datenquellen hinsichtlich Unsicherheit

Die Datenquellen sind hinsichtlich der relativen Unsicherheiten der Modellparameter ausgesprochen heterogen. Die Unsicherheiten der Flüsse – ermittelt aus verschiedenartigen Datenquellen – können empirisch eingeschätzt werden, da Datentyp und relative Unsicherheit in der Regel miteinander korrelieren. Es lassen sich damit die eingesetzten Modellparameter in fünf Datentypen unterscheiden:

- > *Statistiken* sind in der Regel standardisierte und (wohl-)definierte Erhebungen von amtlichen Stellen oder Verbänden und werden daher als gute Datenquellen mit Unsicherheiten < 5 % eingestuft.
- > *Eigene Erhebungen* schwanken naturgemäss stark in ihrer Qualität, entsprechend der Herkunft der zur Berechnung verwendeten Basisdaten. Eigene Erhebungen werden aufgrund des Zeitaufwands meistens sorgfältig und gezielt durchgeführt. In der vorliegenden Studie werden die Unsicherheiten im Bereich 5–25 % geschätzt.
- > *Grössere Unsicherheiten* weisen jene Parameter auf, deren Berechnungen auf groben Richtwerten beruhen. Deren Unsicherheit wird auf 20–40 % geschätzt.
- > Die auf zum Teil mehreren *Verallgemeinerungen oder auf groben Hochrechnungen* beruhenden Flüsse sind mit grösseren Unsicherheiten behaftet, welche auf 30–50 % geschätzt werden.
- > Sofern nur wenige Anhaltspunkte bestehen, müssen *direkte grobe Schätzungen* der Parameter durchgeführt werden; dieses Vorgehen weist in der Regel die höchsten Unsicherheiten auf, welche auf > 40 % geschätzt werden.

2.3.1 Umgang mit den Unsicherheiten der Datenquellen

Die Datenstruktur des SFA-Modells sieht für jeden Fluss bzw. jede Phosphorkonzentration die Angabe seiner absoluten Unsicherheit vor. Zu jedem Modellparameter (Phosphorkonzentration, Güter- und Phosphorfluss) wurde nach Möglichkeit in der Parameterliste diese Unsicherheit eingetragen. Mit Ausgleichsrechnung und Fehlerfortpflanzung erhielt man dadurch die berechneten Phosphorflüsse mit ihren absoluten Unsicherheiten.

Da bei den Quellen inklusive Fachliteratur und Statistiken in der Regel Unsicherheiten nicht angegeben waren, wurden diese in dieser Studie durch einen separaten Arbeits-

¹³ Angepasst nach <http://de.wikipedia.org/wiki/Messunsicherheit>.

schrift den Messwerten zugeordnet¹⁴. In einigen Fällen konnte die Unsicherheit der Datenquelle entnommen werden, wo für den Messwert explizit angegeben (gegebenenfalls für die Statistik, der der Messwert entnommen wird). In manchen Fällen ist für den Messwert eine minimale Unsicherheit implizit über die Darstellung der gültigen Ziffern gegeben. Die Unsicherheiten der Messwerte aus den übrigen Datenquellen wurden durch Korrelation mit bereits bekannten Unsicherheiten von Messwerten gleicher oder ähnlicher Datenquelle bestimmt. Im Zweifelsfall wurde «aufgerundet», das bedeutet die Unsicherheit eher grosszügig bestimmt.

Aus praktischen Gründen ist diese Korrelation häufig einfacher für «relative Unsicherheiten» durchzuführen als für «absolute Unsicherheiten»; die obengenannte Korrelation erfolgte daher in der Regel über die relative Unsicherheit, mit Hilfe derer die absolute Unsicherheit der Modellparameter errechnet wurde. Bei Parametern, die vorgängig durch eigene Berechnungen ermittelt wurden, wurde das oben beschriebene Vorgehen analog für die Unsicherheiten der einzelnen Faktoren angewandt und anschliessend mittels Fehlerfortpflanzung auf die Modellparameter übertragen.

Die Durchführung der Unsicherheitsanalyse umfasst folgende Arbeitsschritte:

- a) Bestimmung der absoluten Unsicherheit für jeden Messwert des Modells und Eintrag in die Parameterliste (vgl. Kapitel 2.3.1);
- b) Durchführung der Berechnung fehlender Phosphorflüsse und Ausgleichsrechnung mit STAN;
- c) Export der Modellresultate von STAN in Excel: Messwert und absolute Unsicherheit der Phosphorflüsse;
- d) Berechnung der relativen Unsicherheiten der Phosphorflüsse;
- e) Darstellung der Resultate in der Relevanzmatrix zur Visualisierung der Relevanz der Unsicherheiten.

Die Relevanz der Unsicherheit der Modellparameter – und damit auch die Notwendigkeit, diese Unsicherheit zu verringern – ist parameterspezifisch und hängt von den Eigenschaften der Flüsse sowie von der Fragestellung und den Zielen der Untersuchung ab.

Für die Bewertung dieser Relevanz gibt es bisher kein standardisiertes Vorgehen. Ein Hilfsmittel hierfür ist die Relevanzmatrix, bei der die berechneten Phosphorflüsse nach ihrer absoluten Grösse und nach ihrer relativen Unsicherheit klassiert werden (Abb. 23). Das Produkt der absoluten Grösse und der relativen Unsicherheit ist gleich dem absoluten Fehler.

¹⁴ Aus Gründen der Transparenz wurden bis auf wenige Ausnahmen die relativen Fehler der Güter- und Phosphorflüsse klassifizierend bestimmt, also beispielsweise 10 % oder 50 % des Flusswertes; bei den Konzentrationen wurde die Unsicherheit als absoluter Wert bestimmt, beispielsweise 0.1 g P/kg.

Abb. 2 > Relevanzmatrix

Relevanz der Unsicherheit in Abhängigkeit der Grösse des Flusses und seiner relativen Unsicherheit. Weitere Erläuterungen im Text.

	grosse relative Unsicherheit	kleine relative Unsicherheit
grosse Flüsse	relevant	je nach strategischer Bedeutung des Flusses
kleine Flüsse	je nach strategischer Bedeutung des Flusses	irrelevant

Quelle: eigene Darstellung

2.3.2 Validierung ausgewählter Modellparameter

Das gewählte zweistufige Verfahren erlaubte die gezielte Validierung ausgewählter Modellparameter. Auf Basis der Ergebnisse der Unsicherheitsanalyse wurde ein Set von relevanten Flüssen und Lagern bestimmt, für welche die Eingangsdaten des Modells der ersten Stufe (zum Zeitpunkt des Zwischenberichts) überprüft und weitere Quellen hinzugezogen wurden. Dabei wurden alle Flüsse und Lager der Modellergebnisse überprüft, welche bislang eine grosse Unsicherheit (absolut oder relativ) aufgewiesen hatten. Flüsse und Lager, die entweder eine grosse absolute oder eine grosse relative Unsicherheit aufgewiesen hatten oder aufgrund vorhandener Systemkenntnisse als unplausibel eingestuft wurden, wurden mittels folgender Kriterien für eine Validierung ausgewählt:

- > Bedeutung des Flusses hinsichtlich der Ableitung von Handlungsoptionen;
- > Bedeutung des Flusses für das Monitoring des Modells;
- > Verfügbarkeit von Daten.

Bei Flüssen und Lagern, zu denen in der ersten Stufe noch keine Daten vorgelegen hatten, wurden weitere Recherchen angestellt, sofern folgende Kriterien erfüllt waren:

- > Vermutung einer relevanten Grösse des Flusses/Lagers;
- > Einschätzung des Flusses/Lagers als bedeutend hinsichtlich der Ableitung von Handlungsoptionen;
- > Einschätzung des Flusses/Lagers als bedeutend für des Monitoring des Modells;
- > Verfügbarkeit von Daten.

Die Sensitivität der Flüsse konnte mit der verwendeten Software STAN nicht ermittelt werden, weshalb dieses Kriterium bei der Auswahl zur Validierung von Flüssen und Lagern nicht einbezogen wurde.

Im Rahmen der Validierung der ausgewählten Modellparameter wurden die Werte von 15 Güterflüssen, 11 Phosphorkonzentrationen, 5 Phosphorflüssen und 2 Phosphorlageränderungen angepasst.

3 > Resultate

3.1 Resultate der Stoffflussanalyse

Die Ergebnisse der Stoffflussanalyse werden als Stoffflusssysteme dargestellt, bei denen – bezogen auf das jeweilige Subsystem – die Pfeilbreite proportional zur Flussgrösse ist. Alle Darstellungen in diesem Bericht beziehen sich auf Phosphor. Die Rechtecke innerhalb der Prozesse zeigen die Lager und darunter die jährlichen Lageränderungen an (alle Werte der Flüsse und Lager nach erfolgter Ausgleichsrechnung). Die Abbildungen zeigen die Grössenordnungen anhand von Sankey Diagrammen; die nachfolgenden Tabellen enthalten die exakten Daten. Zur Wahrung der Übersichtlichkeit wird in diesem Kapitel auf eine Darstellung der Unsicherheiten verzichtet; diese werden in Kap. 3.2 besprochen.

Die Resultate werden jeweils pro System erläutert, also für das Hauptsystem und die 6 Subsysteme, und die Besonderheiten aus Ressourcensichtweise diskutiert.

3.1.1 Hauptsystem

In der Schweiz wird der Phosphorhaushalt vor allem durch die Landwirtschaft und die Abfallwirtschaft dominiert, in vermindertem Masse auch durch den Konsum (Haushalte & Gewerbe). Die Prozesse Chemische Industrie und Gewässer sind mit P-Umsätzen <2500 tP/a weniger bedeutende Verteil- bzw. Sammelprozesse. Die Schweiz importiert jährlich ca. 17 000 tP und exportiert ca. 3 900 tP d. h. das System Schweiz weist einen Wachstum des gesamten Phosphorlagers von ca. 13 000 tP pro Jahr auf.

- > Weitere Aspekte:
- > Die grössten Flüsse innerhalb des Gesamtsystems sind der Hofdünger und das Futter (ca. 30 000 tP/a), die zwischen den beiden landwirtschaftlichen Prozessen *Landwirtschaft Tiere* und *Landwirtschaft Pflanzen* einen zu >95 % geschlossenen Kreislauf bilden.
- > Die beiden landwirtschaftlichen Prozesse, *Landwirtschaft Tiere* und *Landwirtschaft Pflanzen* weisen den höchsten P-Input und Output innerhalb des Systems auf. Sie decken Ihre P-Nachfrage – abgesehen von dem vorgenannten Kreislauf – im Wesentlichen durch die Importe von Mineraldünger, Tierfutter und pflanzliche Nahrungsmitteln. Damit sind sie auch die P-Hauptimporteure des Systems.
- > Während im Prozess *Landwirtschaft Pflanzen* von den Pflanzen nicht aufgenommenes Phosphor im Boden gelagert wird, gelangt bei der *Landwirtschaft Tiere* mit 3000 tP/a ein beträchtlicher Teil direkt und ungenutzt in die *Abfallwirtschaft*.
- > Der Prozess *Haushalte & Gewerbe* ist ein Durchlaufprozess, da >95 % der P-Inputs direkt nach der Nutzung als P-Output in die *Abfallwirtschaft* gelangen.

Die **Schweiz** ist ein **Netto-Importeur** von Phosphor in der Grössenordnung von ca. 16 500 tP/a, der zu ca. 77 % in der *Abfallwirtschaft* und in den Böden im Prozess *Landwirtschaft Pflanzen* akkumuliert wird. Knapp 90 % der Importe werden in die Landwirtschaft geführt, ca. 10 % der Importe gehen in den Prozess *Chemische Industrie*.

Fazit 1

Die beiden **landwirtschaftlichen Prozesse** bilden durch den Hofdünger und das Futter einen nahezu **geschlossenen Kreislauf**; aus dem Bereich *Landwirtschaft Tiere* gehen ca. 3000 tP/a an die *Abfallwirtschaft* verloren.

Fazit 2

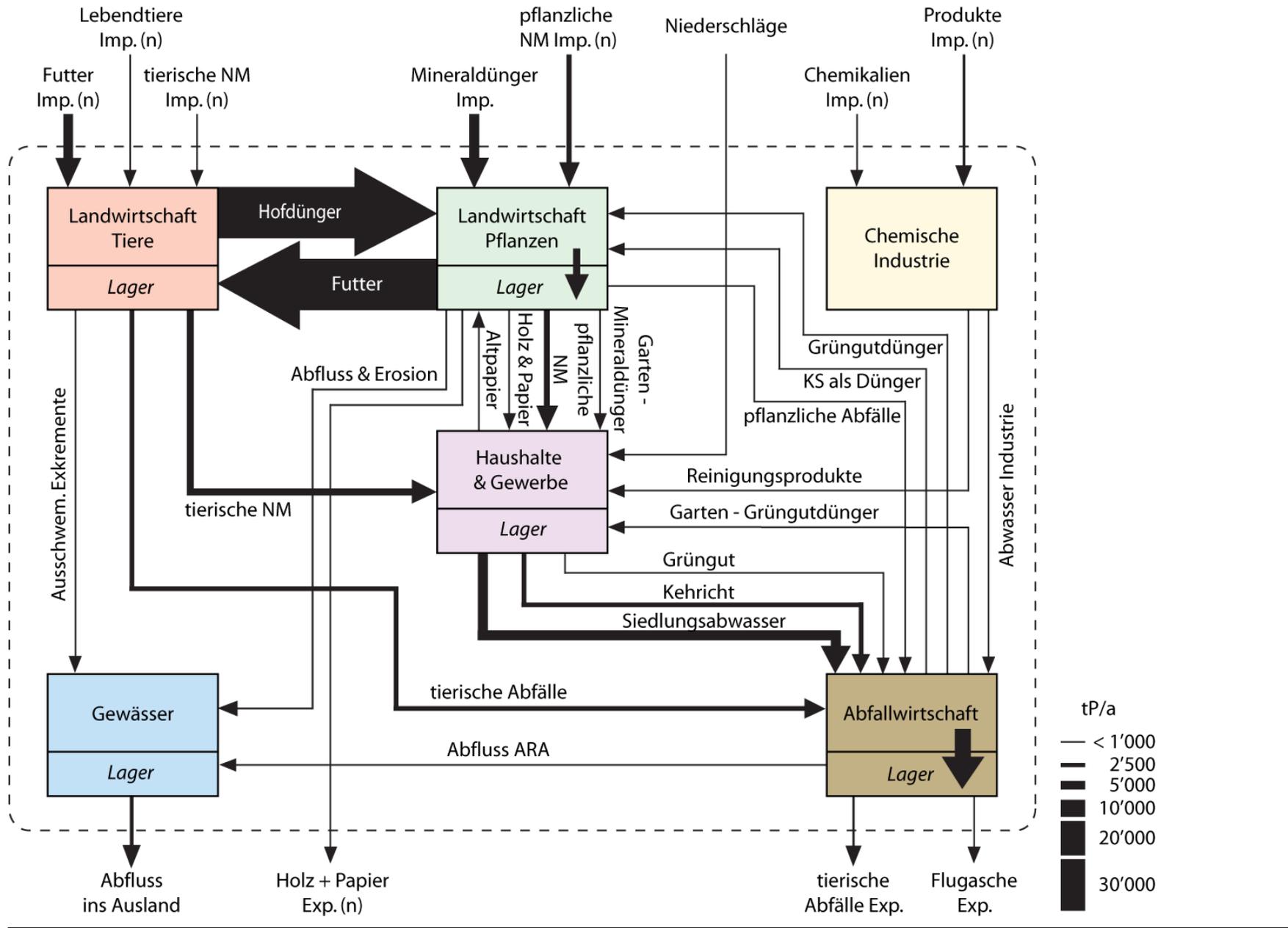
Das höchste **Lagerwachstum** des Systems ist in den Prozessen *Landwirtschaft Pflanzen* mit einer Zunahme von ca. 3500 tP/a und *Abfallwirtschaft* mit einer Zunahme von ca. 9000 tP/a zu verzeichnen.

Fazit 3

In der *Abfallwirtschaft* werden ca. **13 500 tP/a** umgesetzt. In der Schweiz werden davon ca. **13 % wiederverwertet** (Grüngut, geringer Anteil des Klärschlammes, tierische Abfälle); Der **Rest** sind **Verluste und Export** (Abfluss Abwasser, Rest Klärschlamm, tierische Abfälle).

Fazit 4

Abb. 3 > Phosphorhaushalt der Schweiz (2006): Modellergebnisse für das Hauptsystem



Tab. 1 > Phosphorhaushalt der Schweiz (2006): Modellergebnisse für das Gesamtsystem

Prozess Output	Prozess Input	Flussname	Güterfluss (1000 t/a)		P-Konz. (g/kg)			P-Fluss (tP/a)		
Input										
	Landw. Tiere	Futter Imp. (n)	1'180	+/- 59	4.76	+/- 0.48	5'615	+/- 628		
		Lebendtiere Imp. (n)	5	+/- 0	7.06	+/- 0.63	33	+/- 4		
		tierische NM Imp. (n)	167	+/- 2	4.12	+/- 1.03	688	+/- 172		
	Landw. Pflanzen	Mineraldünger Imp.	282	+/- 3	20.86	+/- 0.30	5'886	+/- 59		
		pflanzliche NM Imp. (n)	2'449	+/- 24	1.00	+/- 0.10	2'447	+/- 238		
	Chem. Industrie	Chemikalien Imp. (n)					360	+/- 0		
		Produkte Imp. (n)					1'456	+/- 338		
	Haushalte & Gewerbe	Niederschläge	573'000	+/- 286'500	0.00	+/- 0.00	23	+/- 8		
Output										
Landw. Pflanzen		Holz & Papier Exp. (n)	1'104	+/- 107	0.06	+/- 0.01	66	+/- 9		
Abfallwirtschaft		Flugasche Exp.	29	+/- 1	6.48	+/- 6.48	185	+/- 185		
		tierische Abfälle Exp.	71	+/- 4	21.12	+/- 3.39	1'505	+/- 248		
Gewässer		Abfluss ins Ausland					2'160	+/- 106		
Systeminterne Flüsse										
Landw. Tiere	Landw. Pflanzen	Hofdünger					29'385	+/- 1'401		
	Haushalte & Gewerbe	tierische NM	1'674	+/- 83	2.08	+/- 0.20	3'488	+/- 295		
	Abfallwirtschaft	tierische Abfälle	100	+/- 67	30.27	+/- 20.00	3015	+/- 298		
	Gewässer	Ausschwem. Exkremente					20	+/- 10		
Landw. Pflanzen	Landw. Tiere	Futter	9'563	+/- 465	3.09	+/- 0.21	29'572	+/- 1'556		
	Haushalte & Gewerbe	Garten-Mineraldünger	180	+/- 30	1.00	+/- 0.10	180	+/- 24		
	Haushalte & Gewerbe	pflanzliche NM	3'957	+/- 175	1.01	+/- 0.06	4'016	+/- 253		
	Haushalte & Gewerbe	Holz & Papier	5'450	+/- 595	0.06	+/- 0.01	337	+/- 53		
	Abfallwirtschaft	pflanzliche Abfälle	105	+/- 10	0.87	+/- 0.09	91	+/- 13		
	Gewässer	Abfluss & Erosion					1'071	+/- 238		
Chem. Industrie	Haushalte & Gewerbe	Reinigungsprodukte					1'031	+/- 33		
	Abfallwirtschaft	Abwasser Industrie					786	+/- 338		
Haushalte & Gewerbe	Landw. Pflanzen	Altpapier	1'214	+/- 12	0.06	+/- 0.01	69	+/- 7		
	Abfallwirtschaft	Siedlungsabwasser	1'219'331	+/- 248'164	0.01	+/- 0.00	6'097	+/- 230		
	Abfallwirtschaft	Kehricht	2'754	+/- 127	0.91	+/- 0.08	2'503	+/- 240		
	Abfallwirtschaft	Grüngut	883	+/- 74	1.13	+/- 0.09	998	+/- 92		
Abfallwirtschaft	Landw. Pflanzen	KS als Dünger	22	+/- 1	27.22	+/- 4.94	594	+/- 112		
	Landw. Pflanzen	Grüngutdünger					498	+/- 165		
	Haushalte & Gewerbe	Garten-Grüngutdünger					592	+/- 140		
	Gewässer	Abfluss ARA	1'618'187	+/- 324'536	0.00	+/- 0.00	1'069	+/- 324		
P-Lageränderungen (Prozesse)							Lageränderung (t)			
Landw. Tiere							0	+/- 0		
Landw. Pflanzen							3'546	+/- 801		
Haushalte & Gewerbe							0	+/- 0		
Abfallwirtschaft							9'046	+/- 522		
Gewässer							0	+/- 0		
Totale Lageränderung							12'592	+/- 956		

3.1.2 Subsystem Landwirtschaft Tiere

Zentrale Prozesse im Subsystem *Landwirtschaft Tiere* sind die *Tierproduktion* und die *Verarbeitung tierischer Nahrungsmittel*. Dominant in diesem Subsystem ist der P-Austausch mit nahezu ausgeglichener P-Bilanz zwischen den Subsystemen *Landwirtschaft Tiere* und *Landwirtschaft Pflanzen* durch die Flüsse Hofdünger und Futter. Aufgrund der Importrestriktionen tierischer Nahrungsmittel führen vor allem Produkte aus der schweizerischen Tierproduktion den Phosphor zur schweizerischen Nahrungsmittelversorgung.

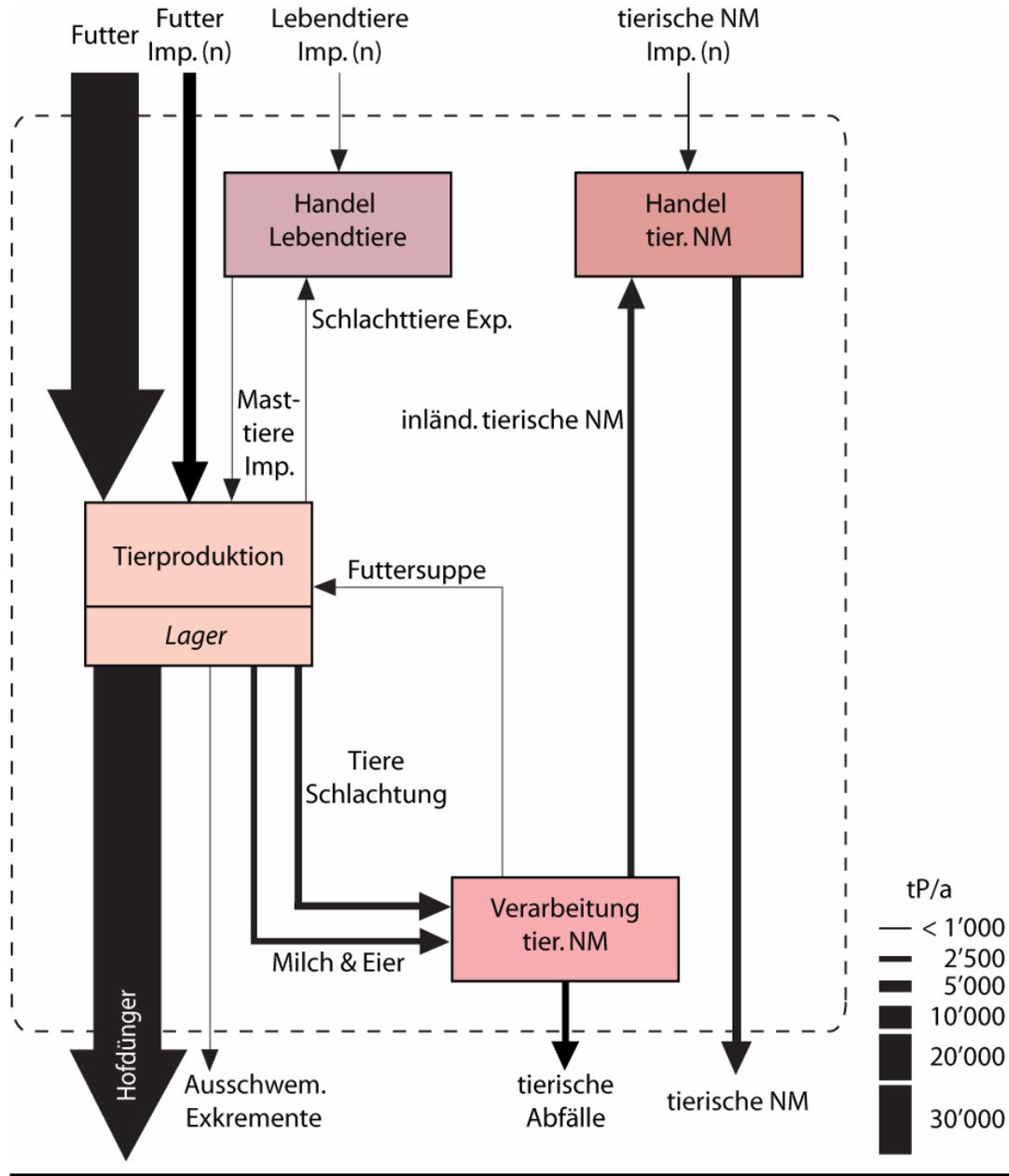
Weitere Aspekte:

- > Die *Tierproduktion* erhält mehr als 80 % ihres P-Inputs durch Futter aus dem Prozess *Landwirtschaft Pflanzen*, den Rest im Wesentlichen durch Futterimporte.
- > Abgesehen vom Hofdünger verlassen das Subsystem ca. 6500 tP/a, davon ca. 54 % in tierischen Nahrungsmitteln und 46 % in tierischen Abfällen.
- > Die Phosphorflüsse durch den Im- und Export lebender Tiere ist vernachlässigbar.

Trotz der grossen Menge Futters aus der schweizerischen *Pflanzenproduktion* sind die Importmengen an Futter mit ca. 5600 tP/a bedeutend hinsichtlich der Phosphorfracht. Bezogen auf den **gesamten Phosphor-Input** in die *Tierhaltung* tragen die importierten Futtermengen ca. **16 %** bei.

Fazit

Abb. 4 > Phosphorhaushalt der Schweiz (2006): Modellergebnisse für das Subsystem Landwirtschaft Tiere



Tab. 2 > Phosphorhaushalt der Schweiz (2006): Modellergebnisse für das Subsystem Landwirtschaft Tiere

Prozess Output	Prozess Input	Flussname	Güterfluss (1000 t/a)			P-Konz. (g/kg)			P-Fluss (tP/a)		
Input											
	Tierproduktion	Futter Imp. (n)	1'180	+/-	59	4.76	+/-	0.48	5'615	+/-	628
	Handel Lebendtiere	Lebendtiere Imp. (n)	5	+/-	0	7.06	+/-	0.63	33	+/-	4
	Handel tier. NM	tierische NM Imp. (n)	167	+/-	2	4.12	+/-	1.03	688	+/-	172
Landw. Pflanzen	Tierproduktion	Futter	9'563	+/-	465	3.09	+/-	0.21	29'572	+/-	1556
Output											
Tierproduktion	Landw. Tiere	Hofdünger							29'385	+/-	1401
Handel tier. NM	Haushalte & Gewerbe	tierische NM	1'674	+/-	83	2.08	+/-	0.20	3'488	+/-	295
Verarbeitung tier. NM	Abfallwirtschaft	tierische Abfälle	100	+/-	67	30.2	+/-	20.00	3'015	+/-	298
Tierproduktion	Gewässer	Ausschwem. Exkrememente							20	+/-	10
Subsysteminterne Flüsse											
Tierproduktion	Handel Lebendtiere	Schlachttiere Exp.	3	+/-	0	7.39	+/-	0.37	20	+/-	1
Tierproduktion	Verarbeitung tier. NM	Tiere Schlachtung	656	+/-	33	4.75	+/-	0.66	3'114	+/-	430
Tierproduktion	Verarbeitung tier. NM	Milch & Eier	3'270	+/-	165	0.85	+/-	0.09	2'766	+/-	310
Handel Lebendtiere	Tierproduktion	Masttiere Imp.	7	+/-	0	7.16	+/-	0.49	54	+/-	4
Verarbeitung tier. NM	Tierproduktion	Futtersuppe	23	+/-	1	2.87	+/-	1.00	65	+/-	23
Verarbeitung tier. NM	Handel tier. NM	inländ. tierische NM	1'422	+/-	130	1.97	+/-	0.18	2'800	+/-	289
Lageränderungen (Prozesse)									Lageränderung (t)		
Tierproduktion									0	+/-	0

3.1.3 Subsystem Landwirtschaft Pflanzen

Das Subsystem *Landwirtschaft Pflanzen* ist in den Produktionsstrang Nahrungsmittel und den Produktionsstrang Holz/Zellstoff strukturiert. Zentraler Prozess des Produktionsstrangs Nahrungsmittel ist die *Pflanzenproduktion*. Dominant in diesem Subsystem (wie auch im Subsystem *Landwirtschaft Tiere*) ist der P-Austausch mit nahezu ausgeglichener P-Bilanz zwischen den Subsystemen *Landwirtschaft Pflanzen* und *Landwirtschaft Tiere* durch die Flüsse Futter und Hofdünger. Dabei deckt der Hofdünger ca. 82 % des Phosphorinputs in die *Pflanzenproduktion* ab. Bei den pflanzlichen Nahrungsmitteln tragen die importierten Nahrungsmittel ca. 60 % des Phosphors zur schweizerischen Nahrungsmittelversorgung bei, die Produkte aus der schweizerischen Pflanzenproduktion¹⁵ hingegen lediglich ca. 40 %. Der Produktionsstrang Holz/Zellulose spielt aus P-Sicht eine untergeordnete Rolle.

Weitere Aspekte:

- > Abgesehen von Futter verlassen ca. 5700 tP/a das Subsystem, davon ca. 70 % in Form von pflanzlichen Nahrungsmittel zur schweizerischen Nahrungsmittelversorgung. Der Fluss Abfluss & Erosion ist weiter mit fast 20 % von Bedeutung. Die Produkte aus der *Forstwirtschaft* (6 %) sowie die pflanzlichen Abfälle aus der *Verarbeitung pflanzlicher Nahrungsmittel* (ca. 2 %) sind untergeordnet.
- > Der P- Austausch zwischen den Subsystemen *Landwirtschaft Pflanzen* und *Landwirtschaft Tiere* ist eine Grössenordnung höher als die P-Flüsse im Produktionsstrang Nahrungsmittel und diese wiederum eine Grössenordnung höher als der P-Fluss im Produktionsstrang Holz/Zellstoffe.

Trotz der grossen Menge an Hofdünger aus der schweizerischen *Tierproduktion* werden bedeutende Mengen Phosphor (knapp **6000 tP/a**) **als Mineraldünger importiert**, was ca. 20 % des gesamten Phosphor-Inputs in die *Pflanzenproduktion* ausmacht.

Fazit 1

Die *Abfallwirtschaft* trägt mit Grüngütdünger und KS als Dünger lediglich ca. **3 %** zu dem totalen **P-Input** in die *Landwirtschaft Pflanzen* bei. Die Flüsse aus der *Forstwirtschaft* spielen eine untergeordnete Rolle.

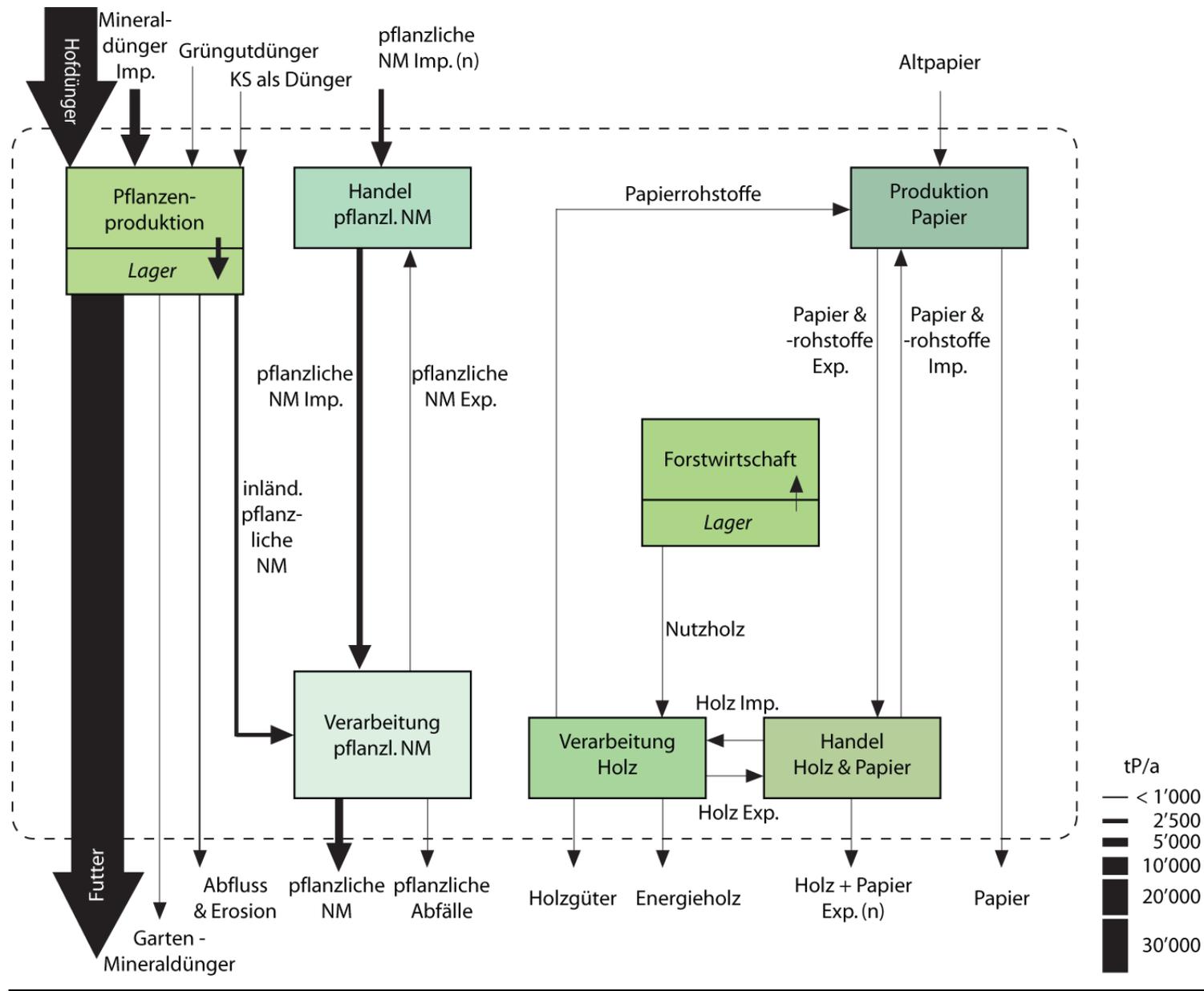
Fazit 2

Das Subsystem *Landwirtschaft Pflanzen* verzeichnete im Jahr 2006 ein Lagerwachstum von fast 3500 tP/a.

Fazit 3

¹⁵ Die Angaben beziehen sich auf die inländische Verarbeitung pflanzlicher Nahrungsmittel, da der Anteil der Reexporte an den Exporten pflanzlicher Nahrungsmittel unbekannt ist.

Abb. 5 > Phosphorhaushalt der Schweiz (2006): Modellergebnisse für das Subsystem Landwirtschaft Pflanzen



Tab. 3 > Phosphorhaushalt der Schweiz (2006): Modellergebnisse für das Subsystem Landwirtschaft Pflanzen

Prozess Output	Prozess Input	Flussname	Güterfluss (1000 t/a)			P-Konz. (g/kg)			P-Fluss (tP/a)		
Input											
	Pflanzenproduktion	Mineraldünger Imp.	282	+/-	3	20.86	+/-	0.30	5'886	+/-	59
	Handel pflanzl. NM	pflanzliche NM Imp. (n)	2'449	+/-	24	1.00	+/-	0.10	2'447	+/-	238
Landw. Tiere	Pflanzenproduktion	Hofdünger							29'385	+/-	1'401
Haushalte & Gewerbe	Produktion Papier	Altpapier	1'214	+/-	12	0.06	+/-	0.01	69	+/-	7
Abfallwirtschaft	Pflanzenproduktion	KS als Dünger	22	+/-	1	27.22	+/-	4.94	594	+/-	112
Abfallwirtschaft	Pflanzenproduktion	Grüngutdünger							498	+/-	165
Output											
Handel Holz & Papier		Holz & Papier Exp. (n)	1'104	+/-	107	0.06	+/-	0.01	66	+/-	9
Pflanzenproduktion	Landw. Tiere	Futter	9'563	+/-	465	3.09	+/-	0.21	29'572	+/-	1'556
Pflanzenproduktion	Haushalte & Gewerbe	Garten-Mineraldünger	180	+/-	30	1.00	+/-	0.10	180	+/-	24
Verarb. pflanzl. NM	Haushalte & Gewerbe	pflanzliche NM	3'957	+/-	175	1.01	+/-	0.06	4'016	+/-	253
Verarbeitung Holz	Haushalte & Gewerbe	Holzgüter	1'192	+/-	450	0.06	+/-	0.01	71	+/-	27
Verarbeitung Holz	Haushalte & Gewerbe	Energieholz	2'601	+/-	128	0.06	+/-	0.01	158	+/-	17
Produktion Papier	Haushalte & Gewerbe	Papier	1'657	+/-	17	0.06	+/-	0.01	107	+/-	9
Verarb. pflanzl. NM	Abfallwirtschaft	pflanzliche Abfälle	105	+/-	10	0.87	+/-	0.09	91	+/-	13
Pflanzenproduktion	Gewässer	Abfluss & Erosion							1'071	+/-	238
Subsysteminterne Flüsse											
Pflanzenproduktion	Handel pflanzl. NM	inländ. pflanzliche NM	2'190	+/-	263	0.76	+/-	0.09	1'660	+/-	250
Handel pflanzl. NM	Verarb. pflanzl. NM	pflanzliche NM Imp.	2'472	+/-	215	1.18	+/-	0.10	2'923	+/-	240
Verarb. pflanzl. NM	Handel pflanzl. NM	pflanzliche NM Exp.	368	+/-	16	1.29	+/-	0.13	476	+/-	51
Forstwirtschaft	Verarbeitung Holz	Nutzholz	5'497	+/-	461	0.06	+/-	0.01	334	+/-	30
Handel Holz & Papier	Verarbeitung Holz	Holz Imp.	1'353	+/-	126	0.08	+/-	0.01	114	+/-	14
Verarbeitung Holz	Produktion Papier	Papier & -rohstoffe Imp.	1'751	+/-	87	0.05	+/-	0.01	96	+/-	10
Verarbeitung Holz	Handel Holz & Papier	Holz Exp.	2'528	+/-	216	0.06	+/-	0.01	162	+/-	16
Verarbeitung Holz	Produktion Papier	inländ. Papierrohstoffe	992	+/-	50	0.06	+/-	0.01	57	+/-	6
Produktion Papier	Handel Holz & Papier	Papier & -rohstoffe Exp.	1'752	+/-	82	0.07	+/-	0.01	114	+/-	10
Lageränderungen (Prozesse)									Lageränderung (t)		
Pflanzenproduktion									3'880	+/-	801
Verarb. pflanzl. NM									0	+/-	0
Forstwirtschaft									- 334	+/-	30
Totale Lageränderung									3'546	+/-	802

3.1.4 Subsystem Chemische Industrie

Das Subsystem *Chemische Industrie* ist ein Durchlaufprozess mit P-Umsätzen in der Grössenordnung von 1500 tP/a. Gemessen am Import des Hauptsystems machen die Importe in die *Chemische Industrie* ca. 11 % aus, die übrigen P-Importe werden durch die Landwirtschaft dominiert. Die Hauptanwendungen, bei denen Phosphor als Wirkstoff genutzt wird, sind Reinigungsmittel.

Weitere Aspekte:

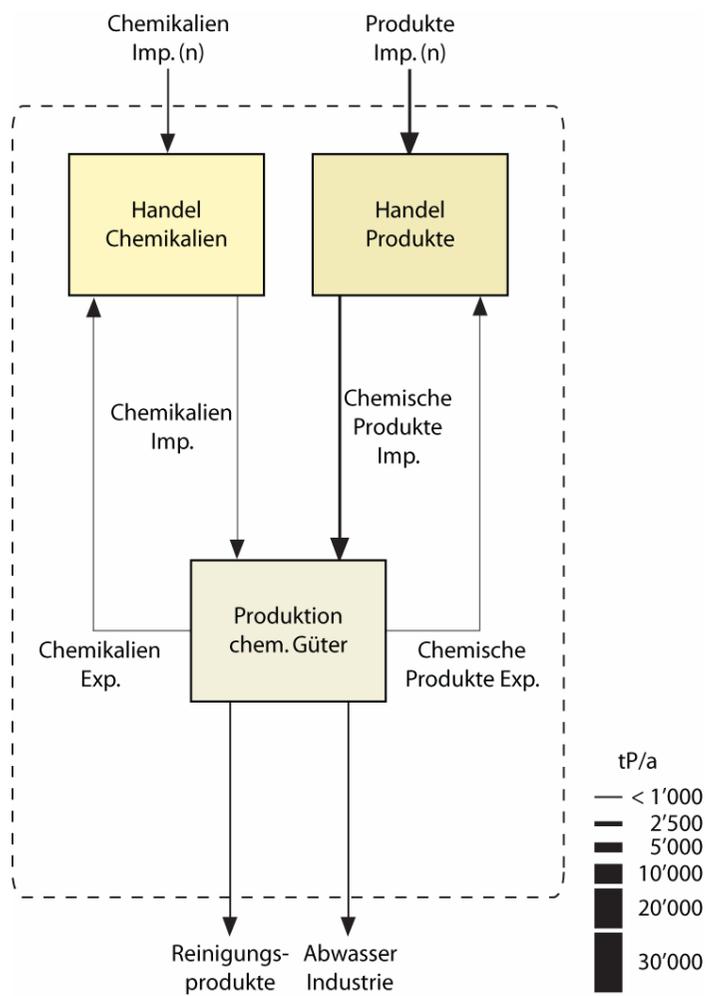
- > Zur Herstellung von Reinigungsmitteln und anderer phosphorhaltiger Produkte werden phosphorhaltige Chemikalien importiert. Mit Ausnahme der Reinigungsmittel-Grundstoffe sind diese bisher für die Schweiz nicht untersucht worden. Gleiches gilt für die Exporte.
- > Neben den Reinigungsmitteln führen andere importierte Produkte Phosphor in Verbindungen als Weichmacher oder Flammschutzmittel, doch wurde der Aussenhandel dieser Produkte bezüglich der Phosphorfrachten bislang nicht untersucht.¹⁶

Bezogen auf den P-Umsatz in der Schweiz ist der Prozess *Chemische Industrie* von untergeordneter Bedeutung.

Fazit

¹⁶ Der Aussenhandel von anderen Gütern als Reinigungsmittel ist bislang hinsichtlich P-Frachten nicht untersucht worden. Die Importe solcher Produkte gelangen i.d.R. nach der Nutzung in die KVA, so dass Bilanzlücken im Zusammenhang mit dem Fluss Kehricht möglicherweise durch eine solche Untersuchung erklärt werden können.

Abb. 6 > Phosphorhaushalt der Schweiz (2006): Modellergebnisse für das Subsystem Chemische Industrie



Tab. 4 > Phosphorhaushalt der Schweiz (2006): Modellergebnisse für das Subsystem Chemische Industrie

Prozess Output	Prozess Input	Flussname	Güterfluss (1000 t/a)	P-Konz. (g/kg)	P-Fluss (tP/a)	
Input						
	Handel Chemikalien	Chemikalien Imp. (n)			360 +/-	0
	Handel Produkte	Produkte Imp. (n)			1'456 +/-	338
Output						
Produktion chem. Güter	Haushalte & Gewerbe	Reinigungsprodukte			1'031 +/-	33
Produktion chem. Güter	Abfallwirtschaft	Abwasser Industrie			786 +/-	338
Subsysteminterne Flüsse						
Produktion chem. Güter	Produktion chem. Güter	Chemikalien Exp.			0 +/-	0
Produktion chem. Güter	Handel Produkte	Chemische Produkte Exp.			100 +/-	
Handel Chemikalien	Produktion chem. Güter	Chemikalien Imp.			360 +/-	
Handel Produkte	Produktion chem. Güter	Chemische Produkte Imp.			1'556 +/-	338
Lageränderungen (Prozesse)					Lageränderung (t)	
Keine						

3.1.5 Subsystem Haushalte & Gewerbe

Im Subsystem *Haushalte & Gewerbe* dominiert der Metabolismus des Menschen den Umsatz von Phosphor mit dem Konsum von tierischen und pflanzlichen Nahrungsmitteln. Auf der Outputseite sind die menschlichen Exkremente mit annähernd ca. 6000 tP/a, sowie die Abfälle aus den *Siedlung mit Haushalten* (Kehricht und Grüngut) mit weiteren 3500 tP/a von Bedeutung.

Weitere Aspekte:

- > Die P-Fracht im Fluss Siedlungsabwasser ist knapp doppelt so gross wie diejenige aus den beiden Flüssen Kehricht und Grüngut zusammen. Er ist damit mit Abstand der grösste Output des Subsystems.
- > Die Herkunft des Phosphors im Siedlungsabwasser lässt sich mit der vorhandenen Datenlage wie folgt erläutern: 80–85 % stammen aus den menschlichen Ausscheidungen, der grössere Teil davon aus dem Urin, 15–20 % stammen von den Reinigungsmitteln.
- > Der P-Umsatz in den Prozessen *Papierkonsum* und *Energiegewinnung aus Holz* beträgt weniger als 5 % von dem des gesamten Subsystems und ist damit von untergeordneter Bedeutung.
- > Über das Grüngut werden ca. 1000 tP/a aus den *Gärten* abgeführt. Als Dünger werden in den *Gärten* ca. 70 % Garten-Grüngutdünger eingesetzt; der kleinere Teil (20 %) ist Garten-Mineraldünger. Aschen der *Energiegewinnung* und kompostierte Küchenabfälle tragen zusammen zu ca. 10 % bei.

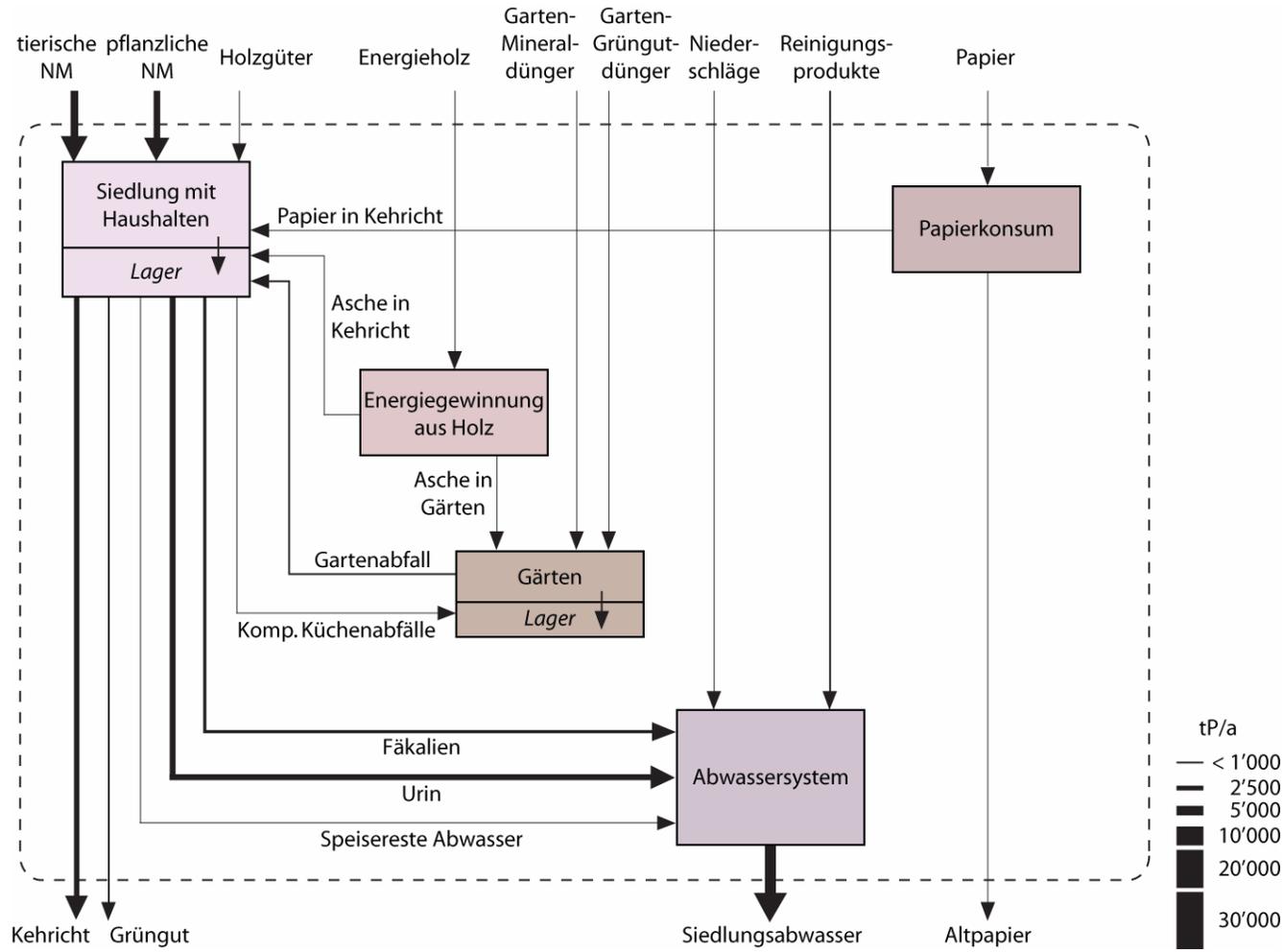
Das Subsystem *Haushalte & Gewerbe* ist ein **Durchlaufprozess** mit einem **Input** ca. **9700 tP/a**, bestehend zu ca. 78 % aus Nahrungsmitteln, ca. 10 % aus Reinigungsmitteln, ca. 9 % aus Dünger und < 3 % aus Holz/Papier. Die konsumierten Güter gelangen in Form von unterschiedlichen Abfallstoffen direkt in den Prozess *Abfallwirtschaft*.

Fazit 1

Für das Subsystem *Haushalte & Gewerbe* sind die Nahrungsmittel bzw. die **Exkremente des Menschen von zentraler Bedeutung**, da mehr als die Hälfte des P-Outputs darin gebunden ist. Weiterhin sind mehr als ein Viertel des P-Outputs des Subsystems im Kehricht gebunden.

Fazit 2

Abb. 7 > Phosphorhaushalt der Schweiz (2006): Modellergebnisse für das Subsystem Haushalte & Gewerbe



Tab. 5 > Phosphorhaushalt der Schweiz (2006): Modellergebnisse für das Subsystem Haushalte & Gewerbe

Prozess Output	Prozess Input	Flussname	Güterfluss (1000 t/a)		P-Konz. (g/kg)			P-Fluss (tP/a)			
Input											
	Abwassersystem	Niederschläge	573'000	+/-	286'500	0.00	+/-	0.00	23	+/-	8
Landw. Tiere	Siedlung & Haushalte	tierische NM	1'674	+/-	83	2.08	+/-	0.20	3'488	+/-	295
Landw. Pflanzen	Gärten	Garten-Mineraldünger	180	+/-	30	1.00	+/-	0.10	180	+/-	24
Landw. Pflanzen	Siedlung & Haushalte	pflanzliche NM	3'957	+/-	175	1.01	+/-	0.06	4'016	+/-	253
Landw. Pflanzen	Siedlung & Haushalte	Holzgüter	1'192	+/-	450	0.06	+/-	0.01	71	+/-	27
Landw. Pflanzen	Energiegewinn. Holz	Energieholz	2'601	+/-	128	0.06	+/-	0.01	158	+/-	17
Landw. Pflanzen	Papierkonsum	Papier	1'657	+/-	17	0.06	+/-	0.01	107	+/-	9
Chem. Industrie	Abwassersystem	Reinigungsprodukte							1'031	+/-	33
Abfallwirtschaft	Gärten	Garten-Grüngutdünger							592	+/-	140
Output											
Papierkonsum	Landw. Pflanzen	Altpapier	1'214	+/-	12	0.06	+/-	0.01	69	+/-	7
Abwassersystem	Abfallwirtschaft	Siedlungsabwasser	1'219'331	+/-	248'164	0.01	+/-	0.00	6'097	+/-	230
Siedlung & Haushalte	Abfallwirtschaft	Kehricht	2'754	+/-	127	0.91	+/-	0.08	2'503	+/-	240
Siedlung & Haushalte	Abfallwirtschaft	Grüngut	883	+/-	74	1.13	+/-	0.09	998	+/-	92
Subsysteminterne Flüsse											
Siedlung & Haushalte	Gärten	Komp. Küchenabfälle							27	+/-	13
Siedlung & Haushalte	Abwassersystem	Fäkalien	338	+/-	34	5.20	+/-	0.64	1'759	+/-	127
Siedlung & Haushalte	Abwassersystem	Urin	4'025	+/-	403	0.81	+/-	0.10	3'257	+/-	207
Siedlung & Haushalte	Abwassersystem	Speisereste Abwasser							27	+/-	13
Papierkonsum	Siedlung & Haushalte	Papier in Kehricht	639	+/-	173	0.06	+/-	0.01	38	+/-	10
Energiegewinn. Holz	Siedlung & Haushalte	Asche in KVA	17	+/-	3	4.00	+/-	3.11	67	+/-	52
Energiegewinn. Holz	Gärten	Asche in Garten	12	+/-	3	7.54	+/-	4.14	91	+/-	52
Gärten	Siedlung & Haushalte	Gartenabfall	833	+/-	87	1.07	+/-	0.11	890	+/-	128
Lageränderungen (Prozesse)								Lageränderung (t)			
Gärten								0	+/-	0	
Siedlung & Haushalte								0	+/-	0	

3.1.6 Subsystem Abfallwirtschaft

Das Subsystem *Abfallwirtschaft* ist mit einem Bilanzüberschuss von ca. 9000 tP/a die grösste Senke für Phosphor im System Schweiz (Input ca. 13 500 tP/a, Output ca. 4000 tP/a). Mehr als 70 % des Inputs stammen aus dem Prozess *Haushalte & Gewerbe* (Flüsse Siedlungsabwasser, Kehricht, Grüngut), ca. 20 % des Inputs sind in den tierischen Abfällen enthalten.

Weitere Aspekte:

- > Die mit Abstand bedeutendste Senke dieses Subsystems sind die Deponien mit ca. 6300 tP/a (*Reaktor-* und ca. eine Grössenordnung kleiner *Reststoffdeponien*). Auch die *Zementwerke* sind eine bedeutende Senke mit ca. 3000 tP/a.
- > Grüngütdünger aus *Kompostierung* und *Vergärung* sind mit zusammen knapp 1100 tP/a nahezu doppelt so bedeutend für die direkte Rückführung in die Böden wie der Klärschlamm mit ca. 600 tP/a (beachte: dieser Fluss wird in der Zukunft 0 tP/a betragen). Das gesamte P-Potential im Klärschlamm beträgt ca. 5800 tP/a.
- > Die P-Verluste in die *Oberflächengewässer* betragen ca. 1000 t/a. Dies ist neben dem P-Verbot in Waschmitteln auf die zunehmende Steigerung der Effizienz bei der P-Elimination in ARA zurückzuführen.

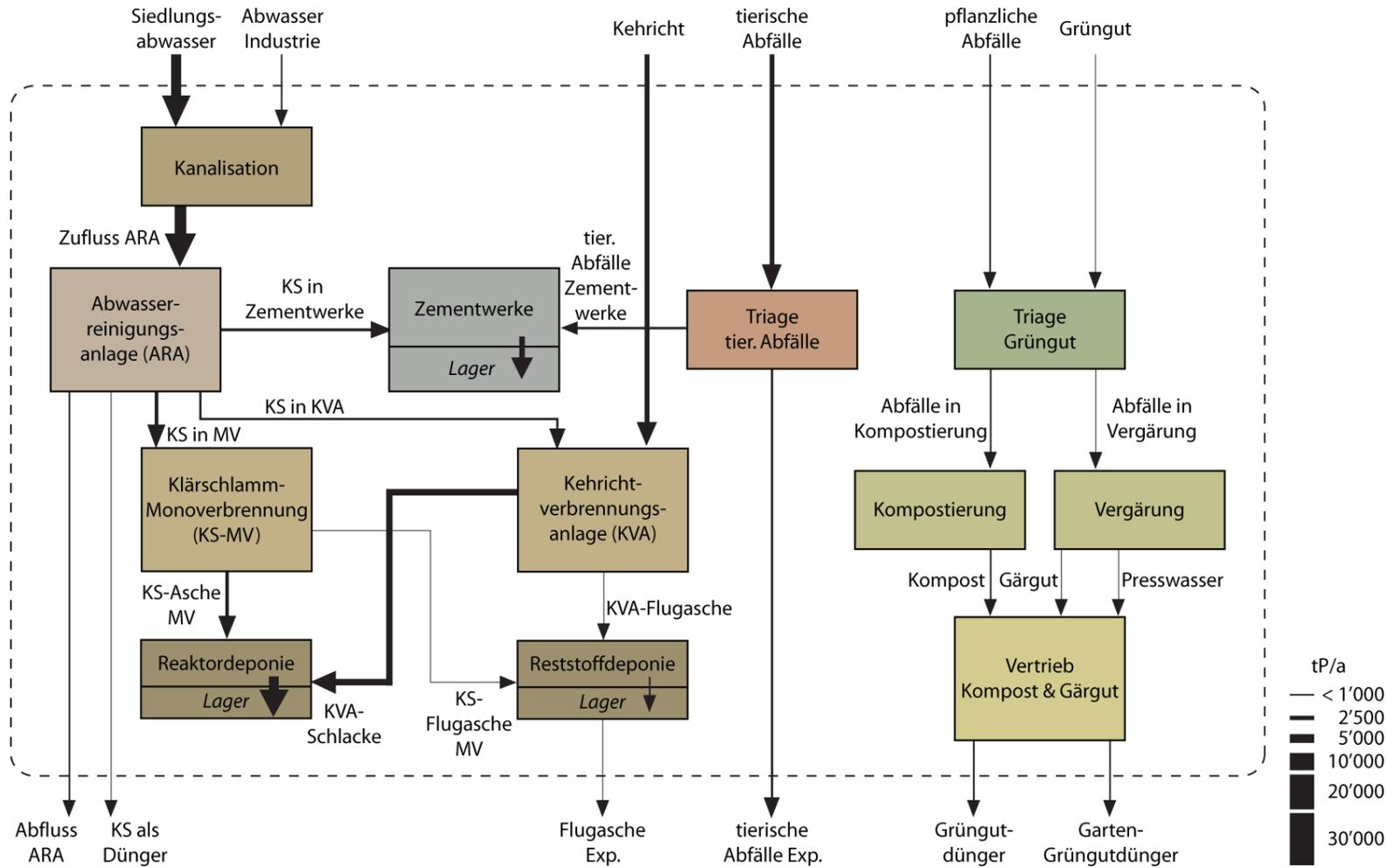
Das **Gesamtpotential** zur Rezyklierung von Phosphor in der *Abfallwirtschaft* ist mit ca. **13 500 tP/a** sehr gross, wird jedoch mit ca. 1700 tP/a in der Schweiz nur in eingeschränkter Masse genutzt (Grüngütdünger, KS als Dünger). Es werden ca. 1500 tP/a tierische Abfälle zur Aufbereitung ins Ausland exportiert. Die **P-Verluste** betragen demnach **> 10 000 tP/a** (ca. 80 %, aufgeteilt auf *Deponien, Zementwerk, Abfluss ARA*).

Fazit 1

Das mengenmässig grösste noch **ungenutzte P-Potential** in der *Abfallwirtschaft* ist in der Wiederaufbereitung und -verwendung des **Abwassers** bzw. Klärschlammes zu finden (ca. 5800 tP/a). Im Jahr 2006 wurden bereits ca. 2500 tP/a in *Klärschlamm-Monoverbrennungsanlagen* (KS-MV) verbrannt und anschliessend deponiert. Zusätzlich gehen durch Export 1500 tP/a in Form von tierischen Abfällen durch Export verloren.

Fazit 2

Abb. 8 > Phosphorhaushalt der Schweiz (2006): Modellergebnisse für das Subsystem Abfallwirtschaft



Tab. 6 > Phosphorhaushalt der Schweiz (2006): Modellergebnisse für das Subsystem Abfallwirtschaft

Prozess Output	Prozess Input	Flussname	Güterfluss (1000 t/a)			P-Konz. (g/kg)			P-Fluss (tP/a)		
Input											
Landw. Tiere	Triage tier. Abfälle	tierische Abfälle	100	+/-	67	30.27	+/-	20.00	3'015	+/-	298
Landw. Pflanzen	Triage Grüngut	pflanzliche Abfälle	105	+/-	10	0.87	+/-	0.09	91	+/-	13
Chem. Industrie	Kanalisation	Abwasser Industrie							786	+/-	338
Haushalte & Gewerbe	Kanalisation	Siedlungsabwasser	1'219'331	+/-	248'164	0.01	+/-	0.00	6'097	+/-	230
Haushalte & Gewerbe	KVA	Kehricht	2'754	+/-	127	0.91	+/-	0.08	2'503	+/-	240
Haushalte & Gewerbe	Triage Grüngut	Grüngut	883	+/-	74	1.13	+/-	0.09	998	+/-	92
Output											
Triage tier. Abfälle		tierische Abfälle Exp.	71	+/-	4	21.12	+/-	3.39	1'505	+/-	248
ARA	Landw. Pflanzen	KS als Dünger	22	+/-	1	27.22	+/-	4.94	594	+/-	112
Vertr. Kompost & Gärgut	Landw. Pflanzen	Grüngutdünger							498	+/-	165
Vertr. Kompost & Gärgut	Haushalte & Gewerbe	Garten-Grüngutdünger							592	+/-	140
ARA	Gewässer	Abfluss ARA	1'618'187	+/-	324'536	0.00	+/-	0.00	1'069	+/-	324
Reststoffdeponie		Flugasche Exp.	29	+/-	1	6.48	+/-	6.48	185	+/-	185
Subsysteminterne Flüsse											
Kompostierung	Vertr. Kompost & Gärgut	Kompost	280	+/-	122	3.30	+/-	1.40	923	+/-	92
Vergärung	Vertrieb Kompost & Gärgut	Gärgut	31	+/-	3	3.90	+/-	1.80	122	+/-	57
Vergärung	Vertr. Kompost & Gärgut	Presswasser	7	+/-	10	6.00	+/-	0.60	45	+/-	62
KVA	Reaktordeponie	KVA-Schlacke	793	+/-	1	4.46	+/-	0.35	3'536	+/-	275
KVA	Reststoffdeponie	KVA-Flugasche	63	+/-	1	6.48	+/-	0.19	407	+/-	13
Kanalisation	ARA	Zufluss ARA	1'946'116	+/-	149'548	0.00	+/-	0.00	6'882	+/-	356
ARA	KVA	KS in KVA	48	+/-	4	29.86	+/-	4.36	1'440	+/-	230
ARA	KS-MV	KS in MV	90	+/-	4	27.90	+/-	2.76	2'507	+/-	234
ARA	Zementwerke	KS in Zementwerk	46	+/-	5	27.47	+/-	4.72	1'272	+/-	244
KS-MV	Reaktordeponie	KS-Asche MV	36	+/-	2	63.51	+/-	5.42	2'256	+/-	205
KS-MV	Reststoffdeponie	KS-Flugasche MV	39	+/-	41	6.48	+/-	6.48	251	+/-	96
Triage tier. Abfälle	Zementwerke	tier. Abfälle Zementwerk	68	+/-	3	22.24	+/-	3.57	1'510	+/-	249
Triage Grüngut	Kompostierung	Abfälle in Kompostierung	778	+/-	65	1.19	+/-	0.10	923	+/-	92
Triage Grüngut	Vergärung	Abfälle in Vergärung	146	+/-	14	1.14	+/-	0.11	166	+/-	23
Lageränderungen (Prozesse)									Lageränderung (t)		
Reaktordeponie									5'792	+/-	328
Reststoffdeponie									473	+/-	209
Zementwerke									2'781	+/-	348
Total									9'046	+/-	522

3.1.7 Subsystem Gewässer

Im Subsystem *Gewässer* wird der diffus in Wasser gelöste Phosphor gesammelt. Der Phosphoreintrag in die aquatischen Systeme der Schweiz beträgt ca. 2000 tP/a.

Weitere Aspekte:

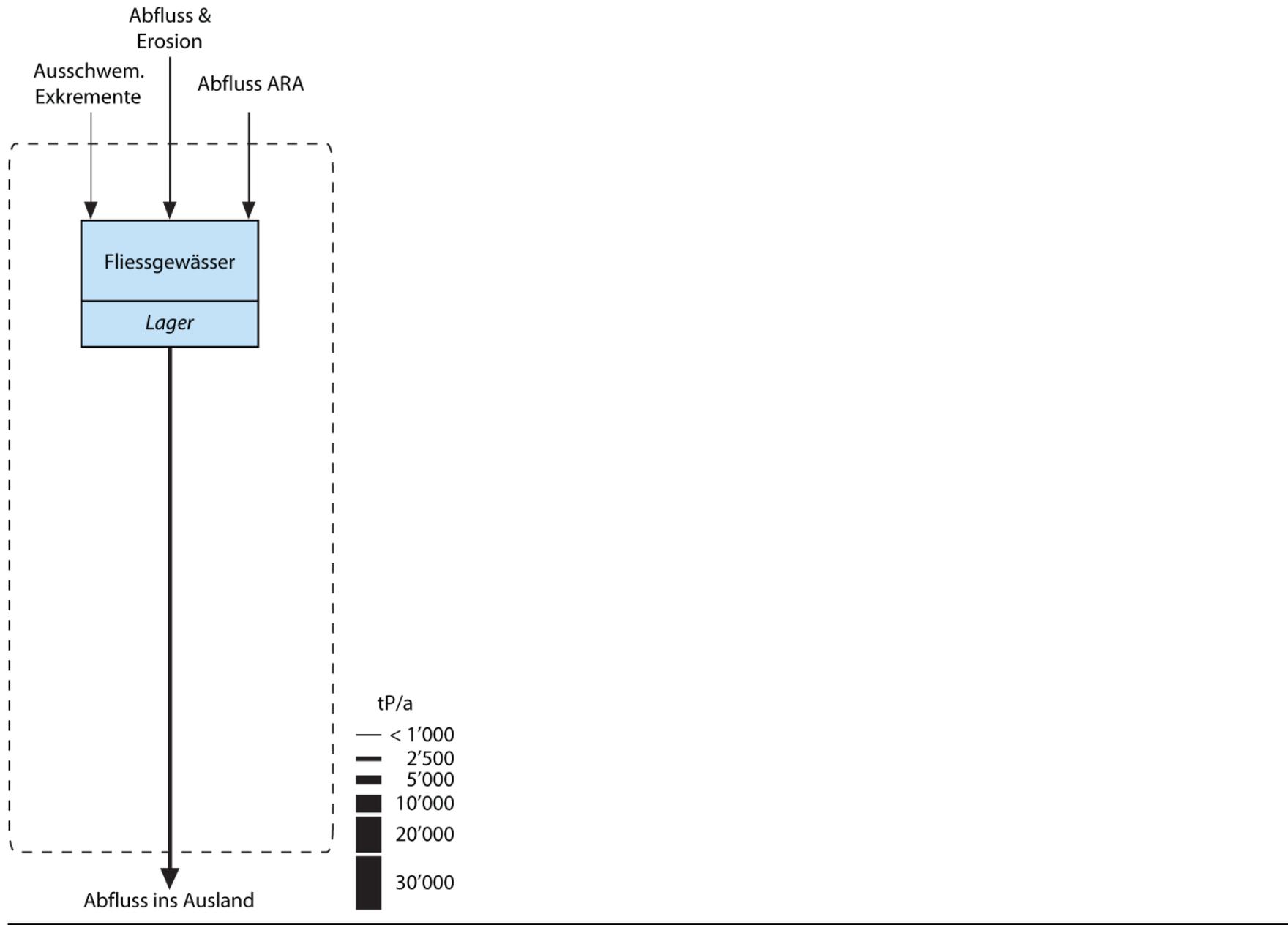
- > Die Einträge durch die *Landwirtschaft* und die *Abfallwirtschaft* liegen mit je ca. 1000 tP/a in der gleichen Grössenordnung.
- > Von der Phosphorfracht im Abfluss ARA stammen ca. 80 % vom gereinigten Abwasser und nur 20 % vom Regenüberlauf.¹⁷
- > Die Ausschwemmungsverluste direkt von den Höfen (ohne Felder) sind vernachlässigbar.
- > Die P-Inputs weisen relativ grosse Unsicherheiten auf, insbesondere der Regenüberlauf¹⁷ und der Abfluss & Erosion.

Bezogen auf das Gesamtsystem ist der diffuse Eintrag in die *Gewässer* mit ca. 2000 tP/a aus Ressourcensichtweise von **untergeordneter Bedeutung**, doch nicht vernachlässigbar. Es ist hier zu betonen, dass bei der Bewertung der Umweltrelevanz von entscheidender Bedeutung ist, inwieweit der Phosphor gelöst oder im Sediment gebunden bzw. bioverfügbar ist.

Fazit

¹⁷ Diese Aufteilung ist Teil der Ergebnisse, doch ist hier aufgrund einer vereinfachten Darstellung nicht dargestellt.

Abb. 9 > Phosphorhaushalt der Schweiz (2006): Modellergebnisse für das Subsystem Gewässer



Tab. 7 > Phosphorhaushalt der Schweiz: Modellergebnisse für das Subsystem Gewässer

Prozess Output	Prozess Input	Flussname	Güterfluss (1000 t/a)			P-Konz. (g/kg)			P-Fluss (tP/a)		
Input											
Landw. Tiere	Fliessgewässer	Ausschwem. Exkrememente							20	+/-	10
Landw. Pflanzen	Fliessgewässer	Abfluss & Erosion							1071	+/-	238
Abfallwirtschaft	Fliessgewässer	Abfluss ARA	1618187	+/-	324536	0.00	+/-	0.00	1069	+/-	324
Output											
Fliessgewässer		Abfluss ins Ausland							2160	+/-	106
Subsysteminterne Flüsse											
Keine											
Lageränderungen (Prozesse)									Lageränderung (t)		
Fliessgewässer									0	+/-	0

3.2 Resultate der Unsicherheitsanalyse¹⁸

Nach Durchführung der Ausgleichsrechnung wurden mithilfe der Phosphorflüsse und ihrer absoluten Unsicherheiten die relativen Unsicherheiten¹⁹ berechnet. Da sich die Unsicherheitsanalyse ausschliesslich auf die Ergebnisse der ersten Stufe (Zwischenbericht) beziehen, werden diese als Zwischenresultate im Anhang beispielhaft abgebildet und die absoluten und relativen Unsicherheiten hinsichtlich Korrelation diskutiert (Anhang A4, Abb. 22); daneben wird die Verteilung der relativen Unsicherheiten der Flüsse nach der Ausgleichsrechnung dargestellt, um einen Überblick über die Verteilung der relativen Unsicherheiten im Phosphorsystem zu gewähren (Anhang A4, Abb. 23).

Eine Gegenüberstellung der relativen Unsicherheiten der Phosphorkonzentrationen und der Güterflüsse hat ergeben, dass die Unsicherheiten der berechneten Phosphorflüsse in der ersten Stufe grossteils von den Unsicherheiten der Phosphorkonzentrationen stammten.

3.3 Fazit

Die Schweiz ist ein Nettoimporteur von Phosphor. Jährlich werden ca. 16 500 tP importiert und ca. 4 000 tP exportiert. Der Import erfolgt weitgehend über die Futtermimporte für die Tierproduktion (5 600 tP/a) und Düngerimporte für die Produktion von pflanzlichen Nahrungsmitteln (5 900 tP/a). Der Export findet hauptsächlich in Form von Abfluss ins Ausland durch die Gewässer (ca. 2 000 tP/a) statt. Eine weitere wichtige Rolle im Export von Phosphor spielen die tierischen Abfälle (1 500 tP/a).

Innerhalb des Gesamtsystems stellt der Phosphorkreislauf in der Landwirtschaft, d. h. *Landwirtschaft Tiere* und *Landwirtschaft Pflanzen*, mit ca. 30 000 tP/a mengenmässig die bedeutendsten Flüsse. Es ist zu beachten, dass das Lagerwachstum vor allem in der *Landwirtschaft Pflanzen* mit ca. 3 500 tP/a und in der Abfallwirtschaft mit über 9 000 tP/a bedeutend ist.

Das grösste Potential zur Schliessung des Phosphorkreislaufes liegt dementsprechend deutlich in der *Abfallwirtschaft*. Im Jahr 2006 wurden lediglich 8 % der in die *Abfallwirtschaft* gelangenden Phosphorflüsse wieder in die *Landwirtschaft Pflanzen* der Schweiz zurückgeführt. 4 % werden als Grüngütdünger in Haushalt und Gewerbe zurückgeführt; 11 % werden als tierische Abfälle und 8 % werden über die Gewässer exportiert. Von den weiteren fast 70 % (vorwiegend Klärschlamm und tierische Abfälle) gelangten die Klärschlämme in die *KVA*, die *Klärschlammmonoverbrennungsanlage* und von dort in eine *Reaktordeponie*, wurden in *Zementwerken* verbrannt oder exportiert. In den ersten Fällen ist der Phosphor nicht oder schwer aufzubereiten und

¹⁸ In diesem Kapitel beziehen sich alle Angaben auf die im Modell berechneten Werte zum Stand des Zwischenberichtes. Da die Unsicherheitsanalyse als methodische Arbeitshilfe für die Priorisierung bei der Validierung herangezogen wurde und nicht zur Beurteilung des in diesem Bericht präsentierten finalen Modells, wird hier auf eine Aktualisierung der abgebildeten Werte bewusst verzichtet. Dies bedeutet, dass die Abbildung teilweise von den im Rahmen der Validierung verbesserten Werten (Kap. 3.1) abweichen kann.

¹⁹ Stand Zwischenbericht vom August 2008.

verfügbar, beim Export könnte der Phosphor in Form von Dünger wieder importiert werden. Die Grüngütdünger spielen für den P-Haushalt der Schweiz eine untergeordnete Rolle.

Auf Basis einer Unsicherheitsanalyse wurden mithilfe eines einfachen Konzeptes die relevanten fehlerbehafteten Flüsse gezielt identifiziert und anschliessend vervollständigt und validiert. Die Relevanzmatrix hat sich dabei als nützliches Instrument bei der Priorisierung zu validierender Flüsse erwiesen. Auf diese Weise konnte die Qualität des Modells hinsichtlich Unsicherheiten merklich verbessert werden.

4 > Handlungsoptionen für die Optimierung des Phosphorhaushalts der Schweiz

Wie in Kapitel 3 dargestellt wurde, importierte die Schweiz im Jahr 2006 ca. 17000 t Phosphor, wobei der Export lediglich 4000 tP betrug. Die restlichen 13000 t trugen zum Lagerwachstum in den Böden und in den Deponien bei. Im Hinblick auf die langfristige Möglichkeit einer Phosphorverknappung (Steen 1998) und der damit verbundenen Abhängigkeit von Phosphor exportierenden Ländern, sowie dem Gedanken des Schliessens von Kreisläufen, wurden Handlungsoptionen für die Optimierung des Phosphorhaushalts der Schweiz erarbeitet und evaluiert. Der Fokus lag auf der Rückführung von Phosphor aus dem Subsystem Abfallwirtschaft. Es wurden jeweils die maximal möglichen Optimierungen berechnet, um das Potential einzelner Optionen abschätzen und vergleichen zu können. Zusätzlich wurden, wo sinnvoll, realistischere Szenarien gerechnet. Für jedes Szenario wurden verschiedene Aspekte der Umsetzbarkeit der Szenarien, wie die ökonomische Tragbarkeit, der ökologische Nutzen, die gesellschaftliche Akzeptanz und die Machbarkeit der Technologie diskutiert.

4.1 Recycling von Klärschlamm als Dünger

Jährlich fallen in der Schweiz ca. 7500 tP im Klärschlamm an. Aufgrund gesundheitlicher Bedenken und dem hohen Schwermetallgehalt ist die Verwendung von Klärschlamm als Dünger für die Landwirtschaft seit 2003 verboten (mit Übergangsfristen bis 2006) (Bafu 2003). Im Untersuchungsjahr 2006 wurden noch letzte geringe Mengen von Klärschlamm in der Landwirtschaft verwendet (ca. 600 tP). Klärschlamm muss heute verbrannt werden. Dies geschieht in den Öfen der Zementindustrie, in Kehrichtverbrennungsanlagen und in speziellen Schlamm-Monoverbrennungsanlagen (MV). Heute wird die in den MV-Anlagen entstandene Asche auf Reaktordeponien entsorgt. Diese Asche ist reich an Phosphor und könnte potentiell als Dünger verwendet werden. Um eine Kontamination mit Schwermetallen und anderen Rückständen zu verhindern, gibt es verschiedene Aufbereitungsverfahren, so beispielsweise ein thermo-chemisches Verfahren der Firma ASH DEC, bei welchem die kritischen Stoffe unter hoher Temperatur mittels Salzen aus der Klärschlammasche extrahiert werden. Die Asche aus der Klärschlamm-Monoverbrennung wird so zu einem schadstoffarmen Dünger weiterverarbeitet.

Das Szenario: Klärschlamm-Asche als Dünger

Der gesamte Klärschlamm wird von den Kläranlagen in MV-Anlagen gebracht und verbrannt. Die dabei entstehende Klärschlammasche (KS-Asche) wird aufbereitet und als Dünger in der Landwirtschaft eingesetzt. Kein Klärschlamm wird mehr in den Zementwerken und Kehrichtverbrennungsanlagen mit verbrannt. Die KS-Asche wird nicht mehr deponiert, sondern aufbereitet, nur die Flugasche der MV Anlagen²⁰ mit toxischen Rückständen wird weiterhin in der Reststoffdeponie gelagert. Der zusätzliche KS-Asche-Dünger ersetzt importierten Mineraldünger. Da verschiedene Dünger unterschiedliche Düngereffekte aufweisen, wurden zwei Szenarien gerechnet: eines, bei dem die Qualität des Phosphors ausser Acht gelassen wird (d. h. 1kg Phosphor im KS-Asche Dünger ersetzt 1kg Phosphor als Mineraldünger), im folgenden *KS-Asche Dünger 100 %* genannt. Beim zweiten Szenario wird eine relative Düngungseffizienz von 40 % des Recyclingdüngers angenommen (d. h. 1kg Phosphor im KS-Asche Dünger ersetzt 0,4 kg Phosphor als Mineraldünger), im folgenden *KS-Asche Dünger 40 %* genannt. Dieses Szenario basiert auf ersten Schätzungen der Düngungseffizienz von KS-Aschen-Dünger (Simone Nanzer, persönliche Mitteilung).²¹

Resultate

Durch den Einsatz des KS-Asche Düngers nimmt die Menge importierten P-Mineraldüngers um zwei Drittel auf 1500 tP/a ab. Zudem reduziert sich das Wachstum des Phosphorlagers in der Schweiz um einen Drittel (von 12 600 tP/a auf 8100 tP/a), v. a. da weniger Phosphor in den Deponien des Subsystems *Abfallwirtschaft* und im Zement eingelagert wird (total von 9000 tP/a auf 4400 tP/a reduziert) (Abb. 10, Tab. 8).

Szenario KS-Asche Dünger 100 %

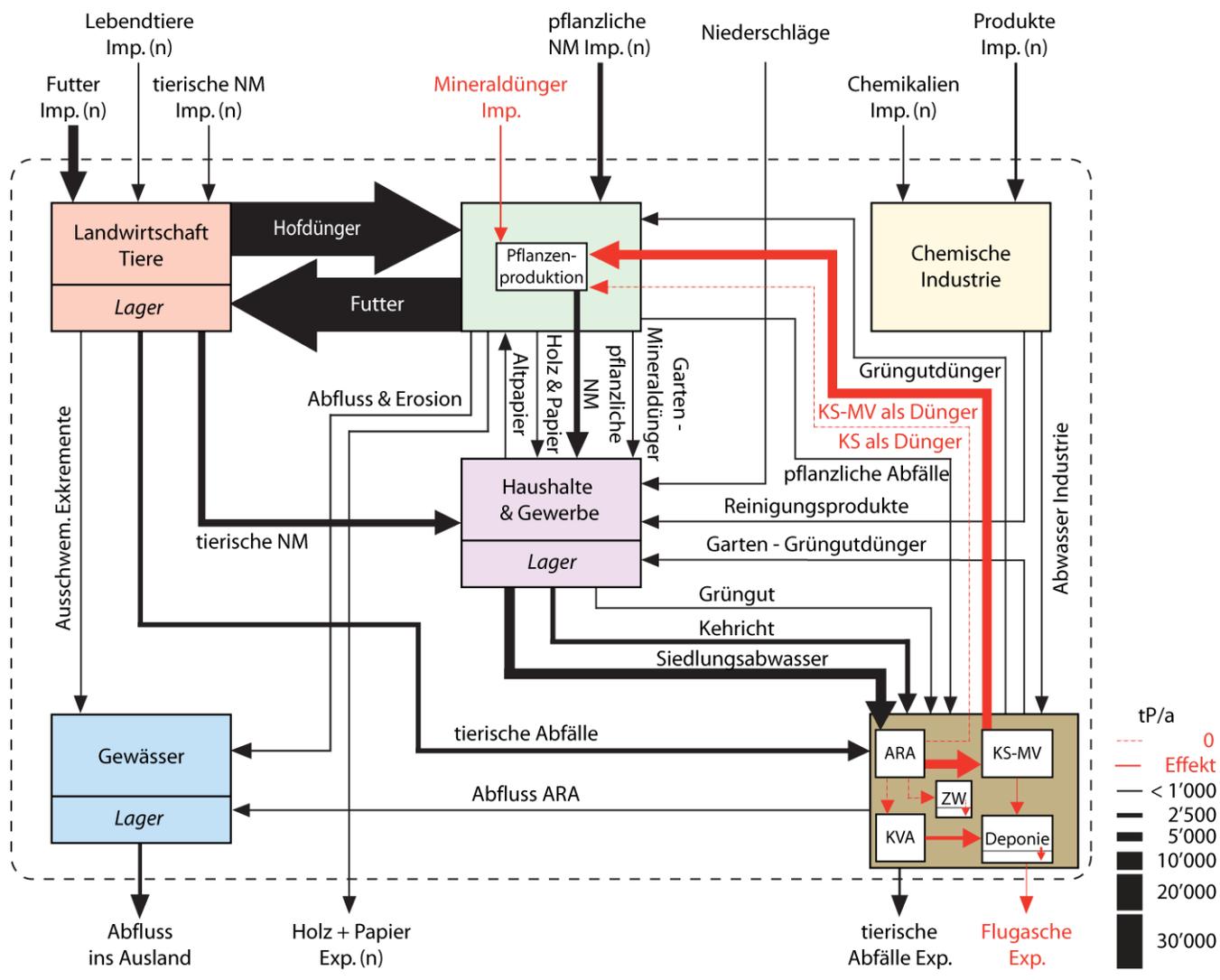
Im Vergleich zum vorangehenden Szenario sind die Veränderungen hier kleiner. Die angenommene geringere Düngungseffizienz des KS-Asche Düngers führt dazu, dass der P Import durch Mineraldünger von ca. 6000 tP/a nur auf 4500 tP/a reduziert werden kann. Verglichen mit 2006 wird total 10 % weniger Phosphor in *Landwirtschaft Pflanzen* und *Deponien* abgelagert (11 100 t/a) (Tab. 8). Es findet jedoch eine Verlagerung statt: 4600 tP/a weniger Phosphor wird in Deponien und im Zement gelagert, dafür akkumulieren 3000 tP/a mehr in den landwirtschaftlichen Böden.

Szenario KS-Asche Dünger 40 %

²⁰ Der Term Flugasche ist hier etwas irreführend: Es handelt sich hierbei um die Rückstände aus der Rauchgasreinigung, welche toxische Rückstände enthalten. Aus der Flugasche aus dem Elektrofilter wird hingegen der KS-Aschen-Dünger hergestellt.

²¹ Genauere Daten zur Düngungseffizienz von Klärschlammaschen-Düngern werden nach Abschluss der Dissertation von S. Nanzer vorliegen.

Abb. 10 > Systembild Szenario Klärschlamm-Asche als Dünger 100%. KS-MV: Klärschlamm Monoverbrennung



ZW: Zementwerk

Tab. 8 > Szenario Klärschlamm-Asche als Dünger: Berechnete Resultate (STAN-Output) von 2006 und den beiden Szenarien 40 % bzw. 100 % Recycling

Input											
Landw. Tiere	Futter Imp. (n)	5'615	+/-	628	5'615	+/-	628	5'615	+/-	628	
	Lebendtiere Imp. (n)	33	+/-	4	33	+/-	4	33	+/-	4	
Landw. Pflanzen	tierische NM Imp. (n)	688	+/-	172	685	+/-	172	685	+/-	172	
	Mineraldünger Imp.	5'886	+/-	59	4'498	+/-	558	1'533	+/-	558	
Chem. Industrie	pflanzliche NM Imp. (n)	2'447	+/-	238	2'441	+/-	238	2'441	+/-	238	
	Chemikalien Imp. (n)	360	+/-	0	360	+/-	0	360	+/-	0	
Haushalte & Gewerbe	Produkte Imp. (n)	1'456	+/-	338	1'365	+/-	331	1'365	+/-	331	
	Niederschläge	23	+/-	8	23	+/-	8	23	+/-	8	
Output											
Landw. Pflanzen	Holz & Papier Exp. (n)	66	+/-	9	66	+/-	9	66	+/-	9	
Abfallwirtschaft	Flugasche Exp.	185	+/-	185	210	+/-	78	210	+/-	78	
	tierische Abfälle Exp.	1'505	+/-	248	1'506	+/-	248	1'506	+/-	248	
Gewässer	Abfluss ins Ausland	2'160	+/-	106	2'161	+/-	106	2'161	+/-	106	
Systeminterne Flüsse											
Landw. Tiere	Landw. Pflanzen	Hofdünger	29'385	+/-	1'401	29'386	+/-	1'401	29'386	+/-	1'401
	Haushalte & Gewerbe	tierische NM	3'488	+/-	295	3'471	+/-	296	3'471	+/-	296
	Abfallwirtschaft	tierische Abfälle	3'015	+/-	298	3'017	+/-	298	3'017	+/-	298
	Gewässer	Ausschwem. Exkrememente	20	+/-	10	20	+/-	10	20	+/-	10
Landw. Pflanzen	Landw. Tiere	Futter	29'572	+/-	1'556	29'561	+/-	1'556	29'561	+/-	1'556
	Haushalte & Gewerbe	Garten-Mineraldünger	180	+/-	24	180	+/-	24	180	+/-	24
	Haushalte & Gewerbe	pflanzliche NM	4'016	+/-	253	4'005	+/-	253	4'005	+/-	253
	Haushalte & Gewerbe	Holz & Papier	337	+/-	53	337	+/-	53	337	+/-	53
	Abfallwirtschaft	pflanzliche Abfälle	91	+/-	13	91	+/-	13	91	+/-	13
	Gewässer	Abfluss & Erosion	1'071	+/-	238	1'041	+/-	241	1'041	+/-	241
	Chem. Industrie	Haushalte & Gewerbe	Reinigungsprodukte	1'031	+/-	33	1'030	+/-	33	1'030	+/-
Haushalte & Gewerbe	Abfallwirtschaft	Abwasser Industrie	786	+/-	338	695	+/-	331	695	+/-	331
	Landw. Pflanzen	Altpapier	69	+/-	7	69	+/-	7	69	+/-	7
	Abfallwirtschaft	Siedlungsabwasser	6'097	+/-	230	6'070	+/-	227	6'070	+/-	227
	Abfallwirtschaft	Kehricht	2'503	+/-	240	2'497	+/-	237	2'497	+/-	237
Abfallwirtschaft	Abfallwirtschaft	Grüngut	998	+/-	92	999	+/-	92	999	+/-	92
	Landw. Pflanzen	KS als Dünger	594	+/-	112	0	+/-	0	0	+/-	0
	Landw. Pflanzen	Grüngutdünger	498	+/-	165	501	+/-	165	501	+/-	165
	Landw. Pflanzen	KS-Asche als Dünger	0	+/-	0	5'092	+/-	322	5'092	+/-	322
	Haushalte & Gewerbe	Garten-Grüngutdünger	592	+/-	140	590	+/-	140	590	+/-	140
	Gewässer	Abfluss ARA	1'069	+/-	324	1'100	+/-	329	1'100	+/-	329
P-Lageränderungen (Prozesse) (tP)											
Landw. Pflanzen		3'546	+/-	802	6'766	+/-	994	3'741	+/-	994	
Abfallwirtschaft		9'046	+/-	522	4'370	+/-	353	4'370	+/-	353	
Total Lageränderung		12592	+/-	956	11'136	+/-	1'056	8'111	+/-	1'056	

Diskussion

Die Wiederverwendung von Phosphor im Klärschlamm ist aus Ressourcensicht sinnvoll; die Phosphorbilanz der Schweiz wird ausgeglichener, die Abhängigkeit von P-Mineraldünger exportierenden Ländern kann reduziert werden. Der kritische Faktor dieser Handlungsoption ist die Qualität des Düngers, der aus der Klärschlammasche hergestellt wird. Wird eine Düngungseffizienz von 40 % angenommen, ist der Nutzen der Massnahme deutlich geringer als bei einer 100 %-igen Düngungseffizienz. Problematisch ist vor allem die Akkumulation von Phosphor in den landwirtschaftlichen Böden. Beim *Szenario KS-Asche Dünger 40 %* ergibt sich ein P-Überschuss (Input pro Output) von 15 %. Die heutige Direktzahlungspolitik der Schweiz erlaubt lediglich einen maximalen Überschuss von 10 %, um noch Subventionen zu erhalten (ÖLN-Richtlinie)²². Das heisst, die Wahrscheinlichkeit, dass der KS-Asche-Dünger bei einer Düngungseffizienz von 40 % voll in der Schweiz verwendet wird, ist gering. Zudem müssten je nach Düngungseffizienz des KS-Aschen-Düngers Ertragseinbussen in Kauf genommen werden, was die Marktchancen eines solchen Düngers verringert. Beim Szenario *KS-Asche Dünger 100 %* ergibt sich ein P-Überschuss im Boden von 8 %, was im tolerierten Bereich der ÖLN-Richtlinien liegt.

Um am Markt Chancen zu haben, muss der Preis von Recyclingdünger tiefer sein als der von Mineraldünger. Mit potentiell steigenden Mineraldüngerpreisen auf den Weltmärkten wird dies einfacher zu bewerkstelligen sein. Die Firma ASH DEC hat das deklarierte Ziel, Recycling-Dünger billiger als Mineraldünger anzubieten (Spuhler 2009). Die volkswirtschaftlichen Kosten könnten durch den Verkauf von Klärschlammasche reduziert werden, da die Kosten der Deponierung wegfallen. Es müssten jedoch neue Monoverbrennungsanlagen gebaut werden, da die Kapazität von 91 000 t TS/a (Simone Nanzer, unveröffentlichte Daten) der bestehenden 14 MV-Anlagen der Schweiz nicht ausreichen, um sämtliche Klärschlämme zu verbrennen. Eine genaue Kosten-Nutzen-Rechnung würde hierzu nötig.

Ökonomische Tragbarkeit

Um eine Kontamination der Böden zu verhindern, muss die Konzentrationen an Schwermetallen und organischen Schadstoffen in KS-Asche-Düngern geprüft werden und die geltenden Richtlinien der Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (Anhang A5) eingehalten werden. Um das Umweltrisiko abzuschätzen, drängt sich ein Vergleich der Schadstoffe verschiedener Düngertypen auf. Laut der Firma ASH DEC (2008) zeigen die mit ihrem Verfahren behandelte KS-Aschen-Dünger tiefere Uran- und Cadmiumbelastungen als Mineraldünger, bei Chrom, Kupfer, Nickel und Zink sind die Gehalte höher als bei Mineraldüngern, jedoch immer noch unterhalb der gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte. Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass die Elimination von Schwermetallen aus dem Klärschlamm Dünger der Phosphorverfügbarkeit möglicherweise entgegenwirkt, wie Topfversuche zeigten (Nanzer 2009). Durch Zugabe von Additiven ($MgCl_2$) oder durch einen Säureaufschluss des Düngers

Ökologische Aspekte

²² Im Biolandbau (10 % der Schweizer Landwirtschaftsbetriebe) ist gar keine Mineraldüngung erlaubt, d. h. hier könnte KS-Asche als Ersatz von Hofdünger oder Grüngütdünger eingesetzt werden. V. a. für Bio-Betriebe mit wenig oder ohne Viehwirtschaft wäre dies ein möglicherweise willkommener organischer Dünger.

könnte die Düngungseffizienz jedoch gesteigert werden. Hier sind weitere Optimierungen des KS-Aschen Aufbereitungsverfahrens nötig.

Neben Schwermetallen und organischen Schadstoffen ist auch die Energiebilanz ein wichtiger Umweltaspekt, der berücksichtigt werden sollte. Klärschlamm eignet sich zwar als Brennstoff, muss jedoch vorgetrocknet werden, was energieaufwändig ist. Um die Umweltauswirkungen des Düngers im Detail zu evaluieren, würde sich ein Vergleich der Ökobilanz von Mineraldüngern und Klärschlammrecyclingdünger anbieten.

Durch die thermische und chemische Aufbereitung des Klärschlammes können Sicherheitsbedenken der Gesellschaft beim Ausbringen von Klärschlamm auf den Feldern reduziert werden. Die politische Notwendigkeit einer sinnvollen Aufbereitung von Klärschlamm scheint gegeben zu sein. Widerstand könnte seitens der Zementindustrie entstehen, welche Klärschlämme als CO₂-neutralen Brennstoff benötigen. Diese machen ca. 20 % der verwendeten alternativen Brennstoffe aus (cemsuisse 2006). Langfristige Klärschlamm-Abnahmeverträge der Zementindustrie würden zurzeit eine komplette Wiederaufbereitung von Klärschlämmen als Dünger nicht möglich machen.

Für einen Einsatz in der Landwirtschaft ist es essentiell, dass eine gute Düngerwirkung von Klärschlammdüngern nachgewiesen werden kann, die Dünger in einer einfach anwendbaren Form vorliegen (z. B. NPK-Dünger) und somit bei Bauern als Ersatz von Mineraldüngern eingesetzt werden können. Eine offene Frage ist, wie hoch die Akzeptanz der Bauern für diese Dünger wäre.

Die Verfahren zur Wiederverwendung von P aus Klärschlammaschen und die Herstellung von Düngern sind noch in Entwicklung, wobei 2008 eine erste Pilotanlage ihren Betrieb aufnahm (ASH DEC 2008). Diese Technologie wird vermutlich in den kommenden Jahren marktreife erlangen. Neben dem beschriebenen Verfahren der Firma ASH DEC bestehen noch andere Verfahren zur Nutzung von Phosphor im Klärschlamm, sowohl aus den Aschen wie auch aus dem Frischschlamm. Eine gute Übersicht hierzu geben Hermann (2009), Schaum (2007) und WAR (2002). Wie oben erwähnt, muss insbesondere die Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor verbessert werden (s. Dissertation Simone Nanzer, ETH, unveröffentlicht).

Gesellschaftliche/Politische
Akzeptanz

Technische/Logistische
Umsetzbarkeit

4.2 Recycling von tierischen Abfällen

Im Jahr 2006 fielen ca. 100 000 t tierische Abfälle an, die etwa 3000 t Phosphor enthielten. Davon wurde nur ein sehr geringer Teil des Phosphors wieder verwendet, als Futtersuppe zur Schweinefütterung (65 tP/a). Die restlichen Abfälle wurden entweder in den Zementwerken verbrannt (1500 tP/a) oder ins Ausland exportiert (1500 tP/a). Dies widerspiegelt den Umstand, dass tierische Nebenprodukte ein hygienisches Risiko tragen, da sie Träger von diversen Seuchenerregern sein können (z. B. BSE, Maul- und Klauenseuche, klassische Schweinepest) (BVET 2004). Die Verwendung von tierischen Abfällen ist seit dem Jahr 2004 in der revidierten Verordnung über die Entsorgung tierischer Abfälle (VTNP) geregelt. Hierzu werden die Abfälle in 3 Kategorien eingeteilt: In die Kategorie I fallen besonders risikobehaftete tierische Abfälle

(z. B. von an Seuchen erkrankten Tieren). Diese müssen drucksterilisiert und verbrannt werden, eine energetische Nutzung ist erlaubt. Tierische Abfälle der Kategorie II (bei denen gesundheitliche Bedenken bestehen), können nach Drucksterilisation zu technischen Zwecken verwendet werden. Nur die Abfälle der Kategorie III (lebensmitteltaugliche Abfälle, Blut, Häute etc.) dürfen (eingeschränkt) verfüttert werden (Perler 2004).

4.2.1 Recycling von tierischen Abfällen als Dünger

In Zusammenhang mit der BSE-Krise wurde die Verwendung von Fleisch- und Knochenmehl für die Düngerherstellung im Jahr 2000 eingestellt (Herter et al. 2003). Ca. 3000 tP/a gehen der Schweiz dadurch verloren. Die tierischen Abfälle könnten jedoch auch verbrannt werden und die Aschen, ähnlich der Klärschlammasche, mittels eines thermo-chemischen Verfahrens behandelt werden. So könnten in Zukunft Dünger aus den Tierabfällen hergestellt werden, welche reduzierte gesundheitliche und Umweltrisiken bergen. Dies wäre insbesondere interessant, da die Phosphorkonzentration in den Tierknochen bedeutend höher ist als in anderen Gütern (Lamprecht et al., in prep.).

Das Szenario: Tiermehl als Dünger

Alle tierischen Abfälle werden verbrannt, die Asche wird thermo-chemisch aufbereitet und in der Landwirtschaft als Dünger eingesetzt. Keine tierischen Abfälle werden in den Zementwerken mit verbrannt oder exportiert. Die bereits heute als Futter verwendeten tierischen Abfälle (Futtersuppe) werden weiterhin den Schweinen verfüttert.

Analog zum Szenario der Verwendung von KS-Düngern ist auch bei Tiermehldüngern die Frage nach der Düngungseffizienz zentral. Auch hier wurden 2 Szenarien gerechnet: *Szenario Tiermehl-Dünger 100 %* (bei dem 1 kg Phosphor im Tiermehldünger 1 kg Phosphor im Mineraldünger ersetzt) und *Szenario Tiermehl-Dünger 40 %* (bei dem 1 kg Phosphor im Tiermehl-Dünger 0,4 kg Phosphor im Mineraldünger ersetzt). Für die Tiermehl-Dünger wurde die gleiche Düngungseffizienz wie bei Klärschlammaschen angenommen.

Resultate

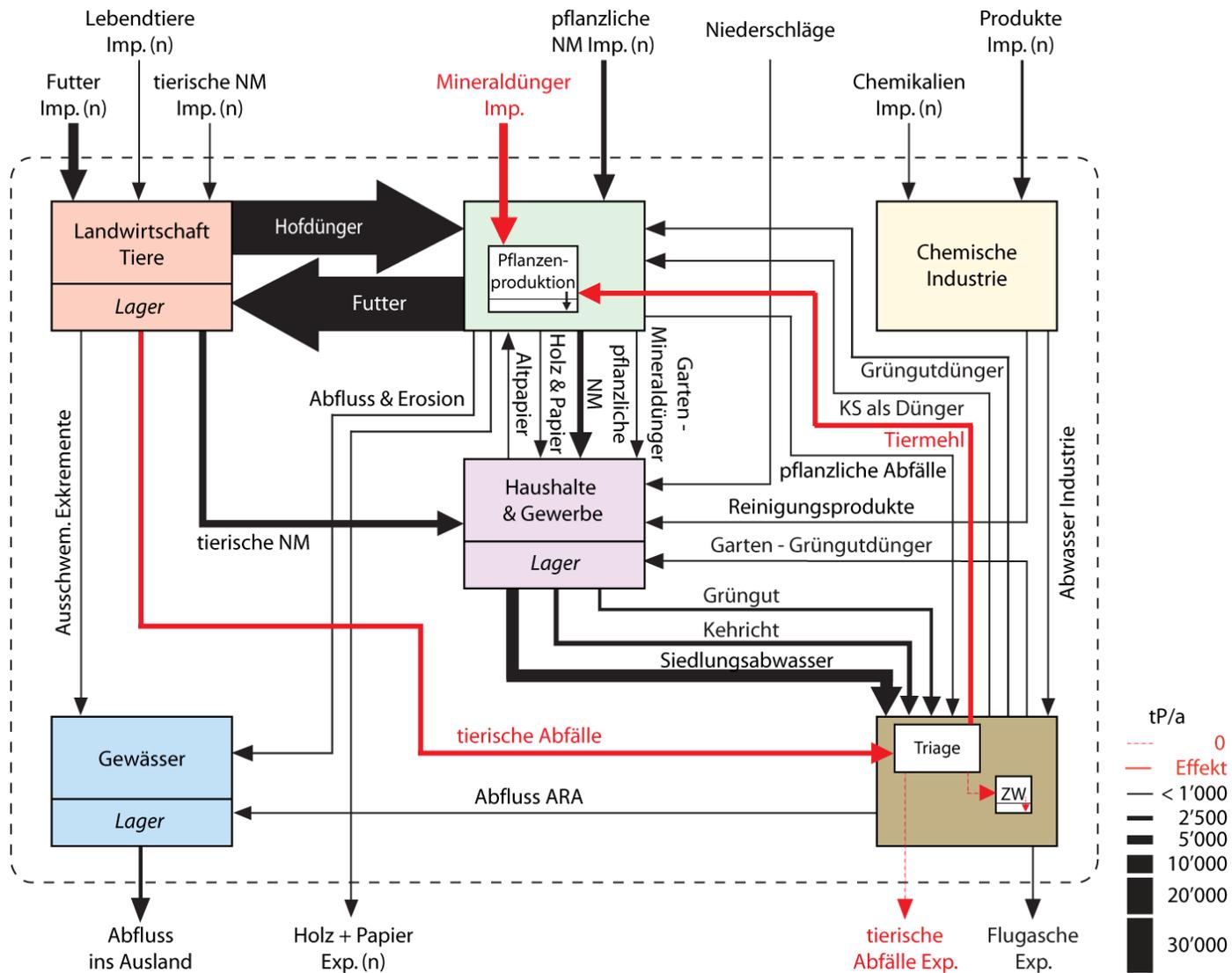
Durch den Einsatz des Tiermehl-Düngers nimmt die Menge importierten P-Mineraldüngers um 50 % auf 2900 tP/a ab. Im Subsystem Abfallwirtschaft werden jährlich noch 7500 tP deponiert, was zu einer Reduktion des Phosphorlagerwachstums in der Schweiz von rund 10 % führt, (Abb. 11, Tab. 9).

Szenario Tiermehl-Dünger 100 %

Wie beim Szenario KS-Aschen Dünger 40 % entsteht hier auch eine Verlagerung: es werden 1500 tP/a weniger im Subsystem Abfallwirtschaft (sprich in den Zementwerken) eingelagert, jedoch zusätzliche 1800 tP/a in den landwirtschaftlichen Böden (Subsystem Landwirtschaft Pflanzen) akkumuliert. Dies führt dazu, dass sich die P-Gesamtbilanz der Schweiz kaum ändert. Es muss jedoch 20 % weniger P-Mineraldünger importiert werden.

Szenario Tiermehl-Dünger 40 %

Abb. 11 > Systembild Szenario Tiermehl-Asche als Dünger 100 %



ZW: Zementwerk. NM: Nahrungsmittel

Tab. 9 > Szenario Tiermehl-Asche als Dünger: Berechnete Resultate (STAN-Output) von 2006 und den beiden Szenarien 40 % bzw. 100 % Recycling

Input											
Landw. Tiere	Futter Imp. (n)	5'615	+/-	628	5'617	+/-	628	5'617	+/-	628	
	Lebendtiere Imp. (n)	33	+/-	4	33	+/-	4	33	+/-	4	
	tierische NM Imp. (n)	688	+/-	172	692	+/-	172	692	+/-	172	
Landw. Pflanzen	Mineraldünger Imp.	5'886	+/-	59	4'680	+/-	356	2'871	+/-	356	
	pflanzliche NM Imp. (n)	2'447	+/-	238	2'450	+/-	238	2'450	+/-	238	
Chem. Industrie	Chemikalien Imp. (n)	360	+/-	0	360	+/-	0	360	+/-	0	
	Produkte Imp. (n)	1'456	+/-	338	1'459	+/-	338	1'459	+/-	338	
Haushalte & Gewerbe	Niederschläge	23	+/-	8	23	+/-	8	23	+/-	8	
Output											
Landw. Pflanzen	Holz & Papier Exp. (n)	66	+/-	9	66	+/-	9	66	+/-	9	
Abfallwirtschaft	Flugasche Exp.	185	+/-	185	185	+/-	185	185	+/-	185	
	tierische Abfälle Exp.	1'505	+/-	248	0	+/-	0	0	+/-	0	
Gewässer	Abfluss ins Ausland	2'160	+/-	106	2'160	+/-	106	2'160	+/-	106	
Systeminterne Flüsse											
Landw. Tiere	Landw. Pflanzen	Hofdünger	29'385	+/-	1'401	29'375	+/-	1'401	29'375	+/-	1'401
		Haushalte & Gewerbe	3'488	+/-	295	3'469	+/-	294	3'469	+/-	294
	Abfallwirtschaft	tierische Abfälle	3'015	+/-	298	3'172	+/-	277	3'172	+/-	277
		Gewässer	Ausschwem. Exkremente	20	+/-	10	20	+/-	10	20	+/-
Landw. Pflanzen	Landw. Tiere	Futter	29'572	+/-	1'556	29'695	+/-	1'554	29'695	+/-	1'554
		Haushalte & Gewerbe	Garten-Mineraldünger	180	+/-	24	180	+/-	24	180	+/-
	Haushalte & Gewerbe	pflanzliche NM	4'016	+/-	253	4'022	+/-	253	4'022	+/-	253
		Holz & Papier	337	+/-	53	337	+/-	53	337	+/-	53
	Abfallwirtschaft	pflanzliche Abfälle	91	+/-	13	91	+/-	13	91	+/-	13
		Gewässer	Abfluss & Erosion	1'071	+/-	238	1'072	+/-	238	1'072	+/-
Chem. Industrie	Haushalte & Gewerbe	Reinigungsprodukte	1'031	+/-	33	1'031	+/-	33	1'031	+/-	33
		Abfallwirtschaft	Abwasser Industrie	786	+/-	338	788	+/-	338	788	+/-
Haushalte & Gewerbe	Landw. Pflanzen	Altpapier	69	+/-	7	69	+/-	7	69	+/-	7
		Abfallwirtschaft	Siedlungsabwasser	6'097	+/-	230	6'092	+/-	230	6'092	+/-
	Abfallwirtschaft	Kehricht	2'503	+/-	240	2'497	+/-	240	2'497	+/-	240
		Grüngut	998	+/-	92	998	+/-	92	998	+/-	92
Abfallwirtschaft	Landw. Pflanzen	KS als Dünger	594	+/-	112	594	+/-	112	594	+/-	112
		Grüngutdünger	498	+/-	165	495	+/-	165	495	+/-	165
	Landw. Pflanzen	Tiermehl als Dünger	0	+/-	0	3'172	+/-	277	3'172	+/-	277
		Haushalte & Gewerbe	Garten-Grüngutdünger	592	+/-	140	594	+/-	140	594	+/-
	Gewässer	Abfluss ARA	1'069	+/-	324	1'068	+/-	324	1'068	+/-	324
P-Lageränderungen (Prozesse) (tP)											
Landw. Pflanzen		3'546	+/-	802	5'372	+/-	834	3'564	+/-	834	
Abfallwirtschaft		9'046	+/-	522	7'530	+/-	424	7'530	+/-	424	
Total Lageränderung		12'592	+/-	956	12'902	+/-	936	11'094	+/-	936	

Diskussion

Bei der Verwendung von tierischen Abfällen als Düngern gelten die gleichen Überlegungen zur ökonomischen Tragbarkeit wie bei den Klärschlammaschen.

Ökonomische Tragbarkeit

Es gibt verschiedene Wege, um tierische Abfälle zu entsorgen. Hierbei können Energie oder Nährstoffe in unterschiedlichen Anteilen wieder verwendet werden. Mittels Ökobilanzen kann ermittelt werden, welche der Entsorgungswege aus ökologischer Sicht am sinnvollsten ist. Wellinger (2004) verglich in seiner Studie die Energie-, Massen- und CO₂-Flussbilanzen von drei Entsorgungsvarianten: Verbrennung tierischer Abfälle in zirkulierender Wirbelschicht (ZWS), Vergärung nach Thermodruck-Hydrolyse (TDH) und direkte Vollvergärung. Dabei schnitt die ZWS-Verbrennung energetisch am besten ab. Wenn nun in Zukunft die daraus entstehenden Aschen weiter zu Phosphordünger aufbereitet werden können, kann sowohl die Energie sinnvoll genutzt, wie auch der Phosphor recycelt werden. Ob dies verfahrenstechnisch möglich ist, bedarf weiterer Abklärungen.

Ökologische Aspekte

Die Verwendung von Tier- und Knochenmehl für die Düngerherstellung wurde im Jahr 2000 in Zusammenhang mit dem BSE-Risiko eingestellt (Herter et al., 2003; Lamprecht et al., under review). Vor einer erneuten Einführung müssten diese Risiken abgeklärt werden. Da der Dünger aufgrund von thermisch und chemisch behandelten Tierabfällen hergestellt werden könnte, sollten die gesundheitlichen Risiken klein sein.

Gesellschaftliche/Politische Akzeptanz

Wie bei den Klärschlämmen könnte es Diskussionen gegen ein Gebot zur Wiederverwendung der tierischen Abfälle zu Düngerzwecken mit der Zementindustrie geben, welche etwa gleiche Mengen (je ca. 20 %) an Klärschlämmen und tierischen Abfällen als alternative, CO₂-neutrale Brennstoffe zur Herstellung von Zement verwenden (cemsuisse 2006). Zusätzlich zu der Frage der Akzeptanz der Bauern, diesen Tiermehl-Dünger einzusetzen, ist auch Frage der gesellschaftlichen Akzeptanz zu klären. Wichtig ist hierbei vor allem inwiefern die Konsumenten Widerstände hegen gegen Gemüse, Früchte oder Getreide, das mit Tiermehl gedüngt wurde.

Es ist zu prüfen, ob die Aschen aus Tierabfällen in den gleichen Anlagen thermochemisch aufbereitet werden können wie die Klärschlammaschen (z. B. ASH DEC). Andernfalls müsste eine eigene Technik entwickelt werden, die eine aus gesundheitlicher und Umweltsicht sichere Verwendung von tierischen Abfällen als Dünger zulässt. Zu prüfen wäre auch, ob die Abfälle der Kategorie II und III nur mit Drucksterilisation und ohne vorherige Verbrennung zu Dünger verwendet werden könnten. Dies wäre energetischer evtl. sinnvoller.

Technische/Logistische Umsetzbarkeit

4.2.2 Recycling von tierischen Abfällen als Tierfutter

Im Zuge der BSE-Krise wurde europaweit ein Verbot der Verfütterung von tierischen Abfällen ausgesprochen. Die Tiermehle, ein wichtiger Proteinlieferant, wurden zu grossen Teilen mit Soja aus Amerika (Brasilien, Argentinien, USA) ersetzt. Im Jahr 2006 wurden ca. 5600 tP/a in Form von Tierfutter importiert.

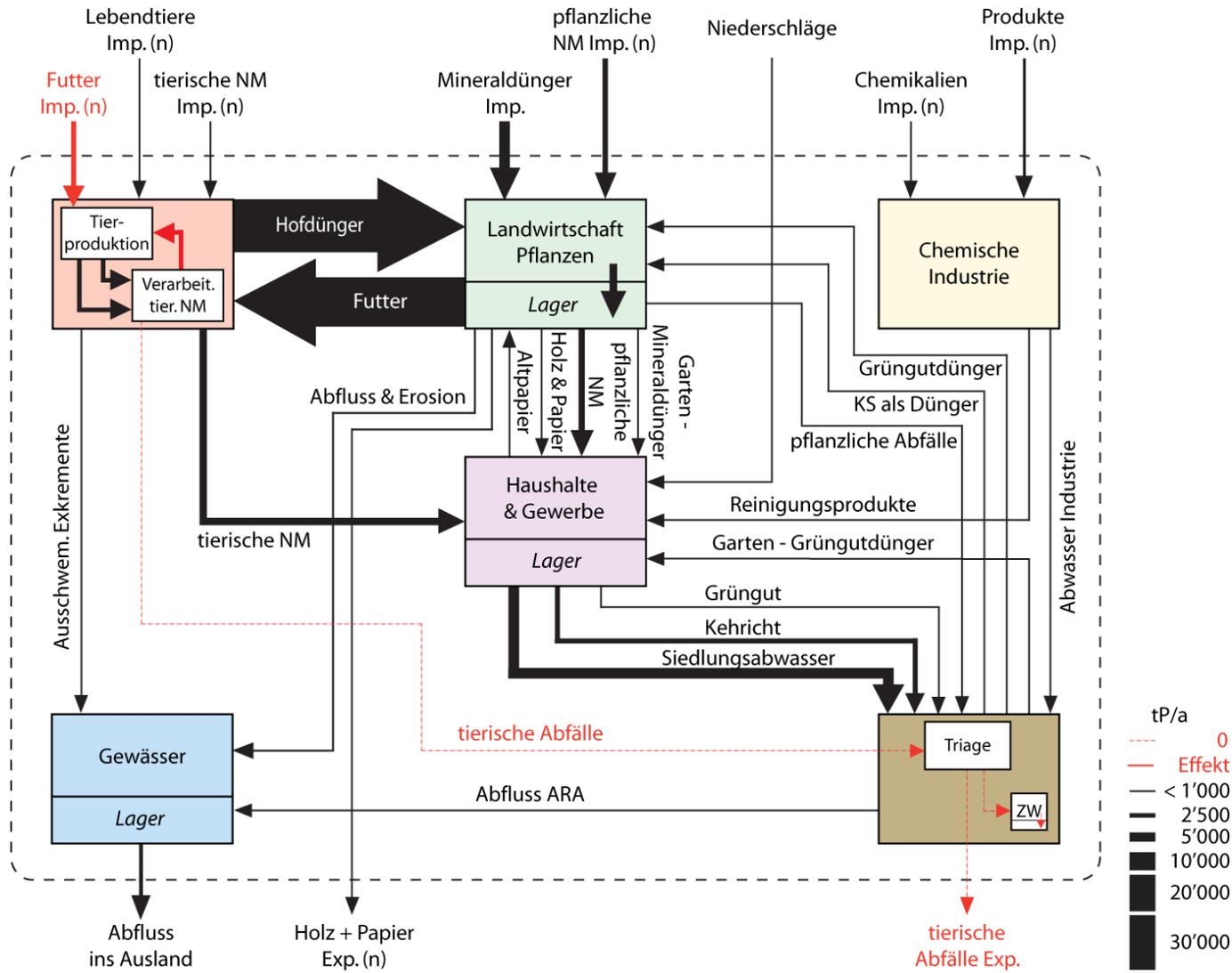
Das Szenario: Tiermehl als Tierfutter

Alle tierischen Abfälle werden innerhalb des Subsystems Landwirtschaft Tiere wieder verwendet. Nach einer hygienischen Aufbereitung der Abfälle zu Tiermehl (Drucksterilisation bei 133 °C und 3 bar während 20 Minuten) wird dieses wieder den Tieren verfüttert. Es werden keine tierischen Abfälle mehr in der Zementindustrie mit verbrannt und keine Abfälle werden mehr exportiert. Somit gelangen keine tierischen Abfälle in das Subsystem Abfallwirtschaft. Die bereits heute als Futter verwendeten tierischen Abfälle (Futtersuppe) werden weiterhin den Schweinen verfüttert.

Resultate

In diesem Szenario ersetzt die Menge Phosphor in den tierischen Abfällen die gleiche Menge an Phosphor in importierten Futtermitteln. Durch die Verfütterung von Tiermehlen kann das Wachstum des Phosphorlagers in der Schweiz um maximal 9% reduziert (Abb. 10, Tab. 10). Ca 1500 tP werden nicht mehr in der Zementindustrie verwendet, werden also weniger in der Abfallwirtschaft akkumuliert.

Abb. 12 > Systembild Szenario Tiermehl als Futter



ZW: Zementwerk. NM: Nahrungsmittel

Tab. 10 > Szenario Tiermehl als Futter: Berechnete Resultate (STAN-Output) von 2006 und dem Szenario Tiermehl als Futter

Prozess Output	Prozess Input	Flussname	2006 (tP/a)			Tiermehl als Futter (tP/a)		
Input								
	Landw. Tiere	Futter Imp. (n)	5'615	+/-	628	2'859	+/-	824
		Lebendtiere Imp. (n)	33	+/-	4	33	+/-	4
		tierische NM Imp. (n)	688	+/-	172	697	+/-	172
	Landw. Pflanzen	Mineraldünger Imp.	5'886	+/-	59	5'886	+/-	59
		pflanzliche NM Imp. (n)	2'447	+/-	238	2'454	+/-	238
	Chem. Industrie	Chemikalien Imp. (n)	360	+/-	0	360	+/-	0
		Produkte Imp. (n)	1'456	+/-	338	1'463	+/-	338
	Haushalte & Gewerbe	Niederschläge	23	+/-	8	23	+/-	8
Output								
Landw. Pflanzen		Holz & Papier Exp. (n)	66	+/-	9	66	+/-	9
Abfallwirtschaft		Flugasche Exp.	185	+/-	185	18	+/-	18
		tierische Abfälle Exp.	1'505	+/-	248	0	+/-	0
Gewässer		Abfluss ins Ausland	2'160	+/-	106	2'160	+/-	106
Systeminterne Flüsse								
Landw. Tiere	Landw. Pflanzen	Hofdünger	29'385	+/-	1'401	29'408	+/-	1'401
	Haushalte & Gewerbe	tierische NM	3'488	+/-	295	3'443	+/-	297
	Abfallwirtschaft	tierische Abfälle	3'015	+/-	298	0	+/-	0
	Gewässer	Ausschwem. Exkremete	20	+/-	10	20	+/-	10
Landw. Pflanzen	Landw. Tiere	Futter	29'572	+/-	1'556	29'282	+/-	1'617
	Haushalte & Gewerbe	Garten-Mineraldünger	180	+/-	24	180	+/-	24
	Haushalte & Gewerbe	pflanzliche NM	4'016	+/-	253	4'031	+/-	254
	Haushalte & Gewerbe	Holz & Papier	337	+/-	53	337	+/-	53
	Abfallwirtschaft	pflanzliche Abfälle	91	+/-	13	91	+/-	13
	Gewässer	Abfluss & Erosion	1'071	+/-	238	1'073	+/-	238
Chem. Industrie	Haushalte & Gewerbe	Reinigungsprodukte	1'031	+/-	33	1'031	+/-	33
	Abfallwirtschaft	Abwasser Industrie	786	+/-	338	792	+/-	338
Haushalte & Gewerbe	Landw. Pflanzen	Altpapier	69	+/-	7	69	+/-	7
	Abfallwirtschaft	Siedlungsabwasser	6'097	+/-	230	6'086	+/-	230
	Abfallwirtschaft	Kehricht	2'503	+/-	240	2'489	+/-	240
	Abfallwirtschaft	Grüngut	998	+/-	92	997	+/-	92
Abfallwirtschaft	Landw. Pflanzen	KS als Dünger	594	+/-	112	594	+/-	112
	Landw. Pflanzen	Grüngutdünger	498	+/-	165	492	+/-	165
	Haushalte & Gewerbe	Garten-Grüngutdünger	592	+/-	140	596	+/-	140
	Gewässer	Abfluss ARA	1'069	+/-	324	1'067	+/-	324
P-Lageränderungen (Prozesse) (tP)								
Landw. Pflanzen			3'546	+/-	802	3'843	+/-	925
Abfallwirtschaft			9'046	+/-	522	7'687	+/-	382
Total Lageränderung			12592	+/-	956	11'530	+/-	1'001

Diskussion

Für die Tierproduzenten waren Tiermehle, vor dem Fütterungsverbot, günstige Futtermittel. Eine Nachfrage nach Tiermehlen wäre demnach gegeben.

Ökonomische Tragbarkeit

Tiermehle haben im Vergleich zu anderen Futtermitteln eine hohe Phosphorkonzentration verglichen mit dem Proteingehalt. Um die gleiche Menge Proteine zu füttern, erhalten die Tiere höhere Phosphormengen (mehr dazu unter technische/logistische Umsetzbarkeit). Diese würden auch vermehrt ausgeschieden und somit ausgewaschen werden. Der Phosphorfluss «Ausschwemmung Exkrement» könnte sich demnach erhöhen, was zur Eutrophierung von Gewässern beitragen würde (In der vorliegenden Berechnung des Szenarios wurde dies nicht berücksichtigt).

Ökologische Aspekte

Es bestehen Sicherheitsbedenken für die Tier- und menschliche Gesundheit. Aus hygienischer Sicht sind vor allem Tierabfälle von Rindern problematisch, da die Prionen (Eiweisse, welche BSE verursachen), die Drucksterilisation überdauern können. Gesellschaftlich einfacher umsetzbar wäre eine Nutzung der Geflügel und Schweineabfälle. Um ethische Bedenken zu berücksichtigen, sollte Kannibalismus ausgeschlossen werden (keine Schweineabfälle den Schweinen füttern). Dies würde jedoch eine Trennung der Tierabfälle voraussetzen, was aus logistischer und ökonomischer Sicht problematisch sein könnte.

Gesellschaftliche/Politische Akzeptanz

In diesem Szenario wurde davon ausgegangen, dass gleiche Mengen Phosphor den Tieren verfüttert werden soll. Phosphor im Tiermehl ersetzt also zu gleichen Mengen Phosphor in importiertem Futter. Für die Tierfütterung entscheidend ist jedoch nicht rein der Phosphorgehalt, sondern der Nährwert (also Proteine, Energie, Mineralstoffe). Um zu realistischeren Ersatzraten von importierten Futtermitteln durch Tiermehl zu gelangen, müssten die Nährwerte der Futtermittel ausgeglichen sein und die Qualität vergleichbar.

Technische/Logistische Umsetzbarkeit

4.3 **Konsequentes Recycling von Grüngut und biogenen Abfällen aus Haushalten**

Im Jahr 2006 wurden rund 880 000 t Grüngut separat gesammelt, 720 000 t biogene Abfälle aus Haushalten wurden im Kehricht in der KVA verbrannt. Der Phosphor des im Kehricht enthaltenen Grünguts wurde schliesslich in Form von KVA-Schlacke oder -Flugasche deponiert und war somit für den Kreislauf verloren. Viele Gemeinden haben in den letzten Jahren eine Separatsammlung für Grünabfälle errichtet, an vielen Orten besteht dieses Angebot jedoch nicht. In der Stadt Zürich besteht beispielsweise nur eine Sammlung für Gartenabraum, nicht jedoch für organische Küchenabfälle.

Szenario: Konsequentes Recycling von biogenen Abfällen aus Haushalten

Das im Kehricht enthaltenen biogenen Abfälle werden konsequent gesammelt und in die Vergärung oder Kompostierung gebracht. Der daraus entstandene zusätzliche Dünger wird in der Landwirtschaft eingesetzt. Der Phosphor des Düngers ersetzt

gleiche Mengen an importiertem P-Mineraldünger. Der Anteil an Phosphor der biogenen Abfälle, welche separat gesammelt wird, entfällt im Kehricht. Somit wird weniger Kehricht verbrannt und weniger KVA-Schlacke und KVA-Flugasche wird deponiert. Es wurden zwei Szenarien mit zwei verschiedenen Recyclingraten gerechnet: Im *Szenario Recycling des Grünguts und der biogenen Abfälle aus dem Kehricht 100%* wird in allen Schweizer Gemeinden eine Separatsammlung von biogenen Abfällen aus Haushalten eingerichtet, das gesamte anfallenden biogenen Abfälle wird wieder verwendet (zusätzlich 720 000 t). Im *Szenario Grüngut-Recycling (Grüngut und biogene Abfälle aus Haushalten) 60%* setzt sich der Trend der zunehmenden Grüngutsammlung der letzten 10 Jahre fort. Es werden zusätzliche 450 000 t Grüngut und biogene Abfälle rezykliert. Dies entspricht der Zunahme an separat gesammeltem Grüngut während den Jahren 1996–2006 (Hügi et al. 2008).

Resultate

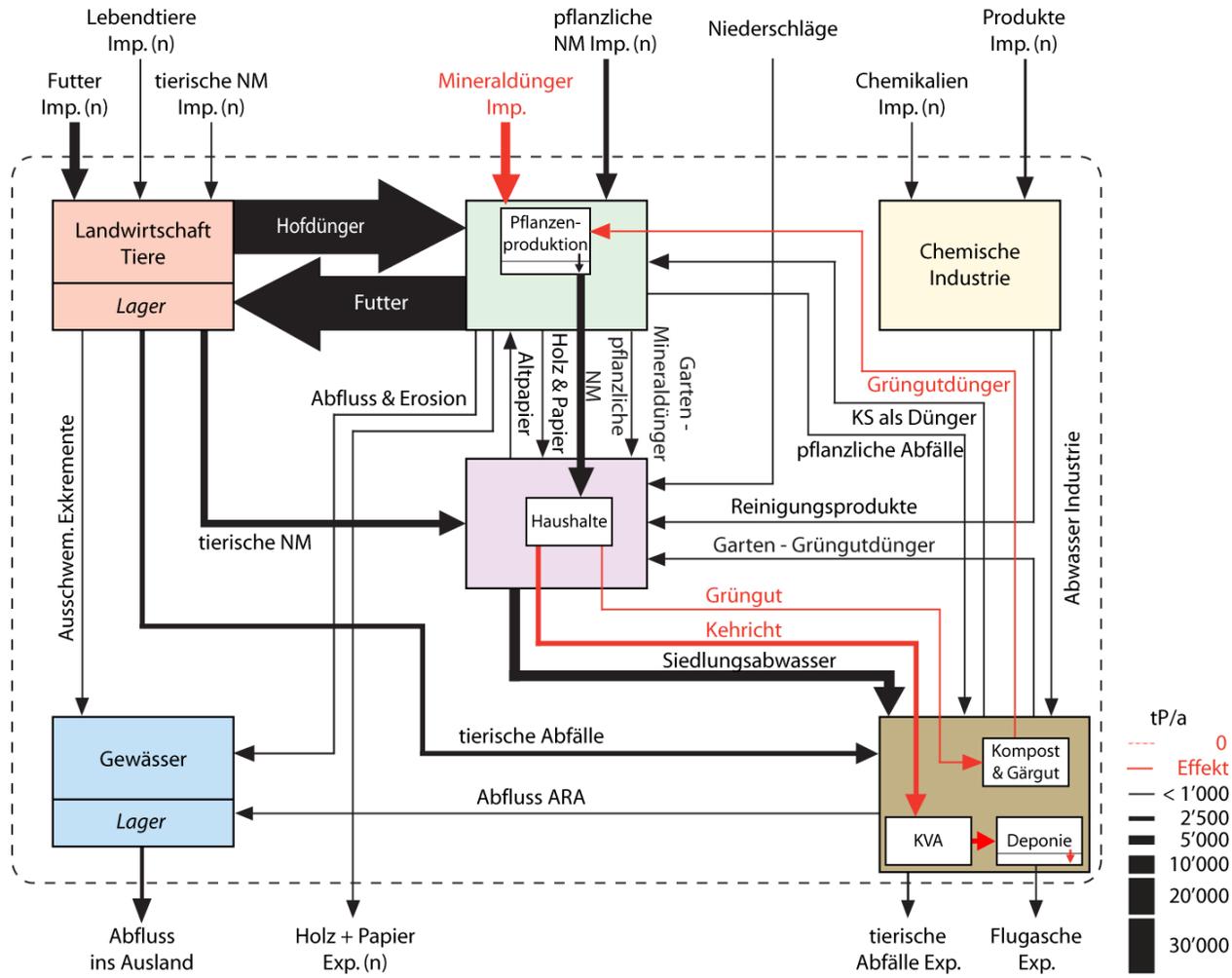
In diesem Szenario können, zusätzlich zum Status Quo, weitere 800 tP/a im Grüngut und biogenen Abfällen aus Haushalten recycelt werden (Abb. 13, Tab. 11). Dadurch wäre die Phosphorfracht im Grüngutdünger ca. 2,8-mal grösser als in 2006. Für das gesamte Phosphorsystem der Schweiz ändert sich jedoch wenig. Verglichen mit 2006 werden jährlich ca. 6% weniger Phosphor in der Schweiz akkumuliert. Dies ist vor allem auf die reduzierte Menge an deponierter KVA-Schlacke und -Flugasche zurückzuführen (Deponierung von 8300 tP/a verglichen mit 9046 tP/a in 2006). Es werden zudem 12% weniger P-Mineraldünger importiert als 2006.

Szenario Grüngut-Recycling
100%

Die Veränderungen des Phosphorhaushalts der Schweiz sind in diesem Szenario gering. Durch die reduzierte Deponierung von KVA-Schlacke und -Flugasche reduziert sich das Wachstum des Phosphorlagers im Gesamtsystem um 4%. Die P-Fracht im Grüngutdünger ist mehr als verdoppelt, was zu einer Reduktion an Mineraldüngerimport von ca. 7% führt.

Szenario Grüngut-Recycling 60%

Abb. 13 > Systembild Szenario Grüngut-Recycling 100%: KVA Kehrichtverbrennungsanlage



NM: Nahrungsmittel

Tab. 11 > Szenario Grüngut-Recycling: Berechnete Resultate (STAN-Output) von 2006 und den Szenarien 60 % bzw. 100 % Grüngut-Recycling

Prozess Output	Prozess Input	Flussname	2006 (tP/a)			60% Grüngut-Recycling (tP/a)			100% Grüngut-Recycling (tP/a)		
Input											
	Landw. Tiere	Futter Imp. (n)	5'615	+/-	628	5'614	+/-	628	5'615	+/-	628
		Lebendtiere Imp. (n)	33	+/-	4	33	+/-	4	33	+/-	4
		tierische NM Imp. (n)	688	+/-	172	680	+/-	172	687	+/-	172
	Landw. Pflanzen	Mineraldünger Imp.	5'886	+/-	59	5'444	+/-	272	5'158	+/-	292
		pflanzliche NM Imp. (n)	2'447	+/-	238	2'435	+/-	237	2'445	+/-	238
	Chem. Industrie	Chemikalien Imp. (n)	360	+/-	0	360	+/-	0	360	+/-	0
		Produkte Imp. (n)	1'456	+/-	338	1'449	+/-	338	1'450	+/-	339
	Haushalte & Gewerbe	Niederschläge	23	+/-	8	23	+/-	8	23	+/-	8
Output											
Landw. Pflanzen		Holz & Papier Exp. (n)	66	+/-	9	66	+/-	9	66	+/-	9
Abfallwirtschaft		Flugasche Exp.	185	+/-	185	163	+/-	33	150	+/-	52
		tierische Abfälle Exp.	1'505	+/-	248	1'508	+/-	248	1'505	+/-	248
Gewässer		Abfluss ins Ausland	2'160	+/-	106	2'160	+/-	106	2'160	+/-	106
Systeminterne Flüsse											
Landw. Tiere	Landw. Pflanzen	Hofdünger	29'385	+/-	1'401	29'387	+/-	1'401	29'385	+/-	1'401
	Haushalte & Gewerbe	tierische NM	3'488	+/-	295	3'450	+/-	290	3'483	+/-	292
	Abfallwirtschaft	tierische Abfälle	3'015	+/-	298	3'020	+/-	298	3'015	+/-	298
	Gewässer	Ausschwem. Exkrememente	20	+/-	10	20	+/-	10	20	+/-	10
Landw. Pflanzen	Landw. Tiere	Futter	29'572	+/-	1'556	29'548	+/-	1'556	29'569	+/-	1'556
	Haushalte & Gewerbe	Garten-Mineraldünger	180	+/-	24	179	+/-	24	180	+/-	24
	Haushalte & Gewerbe	pflanzliche NM	4'016	+/-	253	3'993	+/-	251	4'013	+/-	252
	Haushalte & Gewerbe	Holz & Papier	337	+/-	53	336	+/-	53	337	+/-	53
	Abfallwirtschaft	pflanzliche Abfälle	91	+/-	13	91	+/-	13	91	+/-	13
	Gewässer	Abfluss & Erosion	1'071	+/-	238	1'068	+/-	238	1'069	+/-	238
Chem. Industrie	Haushalte & Gewerbe	Reinigungsprodukte	1'031	+/-	33	1'031	+/-	33	1'031	+/-	33
	Abfallwirtschaft	Abwasser Industrie	786	+/-	338	778	+/-	338	779	+/-	338
Haushalte & Gewerbe	Landw. Pflanzen	Altpapier	69	+/-	7	69	+/-	7	69	+/-	7
	Abfallwirtschaft	Siedlungsabwasser	6'097	+/-	230	6'114	+/-	229	6'097	+/-	229
	Abfallwirtschaft	Kehricht	2'503	+/-	240	1'976	+/-	233	1'694	+/-	241
	Abfallwirtschaft	Grüngut	998	+/-	92	1'482	+/-	82	1'812	+/-	99
Abfallwirtschaft	Landw. Pflanzen	KS als Dünger	594	+/-	112	595	+/-	112	595	+/-	112
	Landw. Pflanzen	Grüngutdünger	498	+/-	165	944	+/-	111	1'298	+/-	122
	Haushalte & Gewerbe	Garten-Grüngutdünger	592	+/-	140	629	+/-	92	605	+/-	93
	Gewässer	Abfluss ARA	1'069	+/-	324	1'072	+/-	325	1'071	+/-	325
P-Lageränderungen (Prozesse) (tP)											
Landw. Pflanzen			3'546	+/-	802	3'591	+/-	841	3'626	+/-	849
Abfallwirtschaft			9'046	+/-	522	8'551	+/-	451	8'263	+/-	456
Total Lageränderung			12'592	+/-	956	12'142	+/-	954	11'889	+/-	964

Diskussion

Ökonomische Tragbarkeit: Sowohl die Entsorgung von Grüngut und der biogenen Abfälle im Kehricht wie auch die Kompostierung/Vergärung verursacht Kosten, die in den meisten Gemeinden durch Abfallgebühren oder -steuern gedeckt werden. Laut Hügi et al. (2008) sind die totalen Entsorgungskosten für die Abfallverbrennung (63 Fr./Kopf/Jahr) und die Separatsammlungen vergleichbar (51 Fr./Kopf/Jahr). Diese Zahlen sind jedoch für alle Abfälle und nicht spezifisch für Grüngut. Zudem sind diese Zahlen Schwankungen unterworfen, da die Transport- und Verbrennungskosten nicht konstant sind. Zudem können die Kosten je nach Situation der Gemeinden unterschiedlich ausfallen. Zudem ist der Markt für Kompost und Gärgut bereits mehr als gesättigt. Die Bauern werden bezahlt, damit sie den Grüngutdünger abnehmen (Lang et al. 2006).

Aus ökologischer Sicht ist vor allem die Belastung von Böden durch die Verwendung von mit organischen Schadstoffen belastetem Grüngutdünger zu bedenken. Eine Studie von Kupper et al. (2008) zeigte, dass der Eintrag von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) in die landwirtschaftliche Nutzfläche der Schweiz durch die Verwendung von Kompost und Gärgut deutlich höher lag als bei Hofdüngern und Klärschlamm. Ökotoxikologische Untersuchungen wiesen jedoch nicht darauf hin, dass die organischen Schadstoffe im Kompost und Gärgut ein Risiko für die Bodenorganismen darstellen. Herter et al. (2003) kommen zum Schluss, dass die Kompostierung im Vergleich zur Verbrennung nur dann als nachhaltiger bezeichnet werden kann, wenn bei der Grüngutsammlung auf hohe Reinheit und tiefe Schadstoffgehalte geachtet wird.

Bei der Umsetzung einer konsequenten Grüngutsammlung wären einerseits die Gemeinden gefragt, welche die Separatsammlungen organisieren und für deren Finanzierung sorgen müssten. Bereits heute besteht der Trend, dass viele Gemeinden Grüngutsammlungen einführen. Ein Zwang von Seiten des Bundes würde vermutlich auf Widerstand stossen. In gewissen Gemeinden, wie beispielsweise der Stadt Zürich, wurde eine Einführung einer Grünabfallsammlung diskutiert und verworfen. Laut einer Studie von ERZ (2006) würde eine getrennte Sammlung von biogenen Abfällen aus den Haushalten der Stadt Zürich keine grossen Vorteile bezüglich Energiegewinnung, CO₂-Ausstoss, und ökologischer und ökonomischer Optimierung der Abfallwirtschaft bringen. Hierbei wurde jedoch der Aspekt des Phosphor-Recyclings nicht explizit beachtet.

Bei der Einführung einer konsequenten Grüngutsammlung wären andererseits die Haushalte gefordert, die Abfälle richtig zu entsorgen. Im Hinblick auf die Qualität der Grüngutdünger ist hier eine Sensibilisierung und «Umerziehung» der breiten Bevölkerung nötig, damit nur qualitativ hochwertiges Grüngut in die Separatsammlung gelangt. Dies ist wiederum mit grossen Kosten verbunden.

Die 720 000 t Grüngut und biogene Abfälle, welche heute im Kehricht enthalten sind, können vermutlich nicht alle wiederverwertet werden. Laut einer Studie des BAFU (Hügi et al. 2008) handelt es sich bei einem beträchtlichen Anteil um noch verpackte

Ökologische Aspekte

Gesellschaftliche/Politische
Akzeptanz

Technische/Logistische
Umsetzbarkeit

Lebensmittel oder um relativ stark mit anderen Abfallfraktionen verunreinigte biogene Abfälle. Solche Abfälle eignen sich aufgrund des hohen Trennaufwandes nur sehr bedingt für eine Verwertung.

Unabhängig vom gewählten Verfahren (Kompostierung oder Vergärung) ist indes in jedem Fall darauf zu achten, dass auch bei einer gesteigerten Sammelquote die Qualität der eingesammelten biogenen Abfälle erhalten bleibt. Zusätzliche Fremdstoffe führen zu höheren Verarbeitungskosten und bei der Kompost- und Gärgutanwendung zu Qualitätsverlust und damit zu Absatzschwierigkeiten (Hügi et al. 2008).

Aufgrund der oben aufgeführten Argumente scheint das *Szenario Grüngut-Recycling 60 %* durchaus ein erreichbares Ziel, wobei der Nutzen für den Phosphorhaushalt der Schweiz sehr gering ist. Das *Szenario Grüngut-Recycling (Grüngut und biogene Abfälle aus Haushalten) 100 %* scheint politisch, ökonomisch sowie logistisch kaum umsetzbar, da eine nationale Gesetzgebung die Gemeinden dazu verpflichten müsste, eine Grüngut-Separatsammlung einzuführen und der Nutzen aus Sicht des Phosphorrecyclings beschränkt ist.

4.4 **Maximales Recyclingpotential durch Kombination der Einzelhandlungsoptionen**

Um das Phosphormanagement der Schweiz zu optimieren, sollten möglichst viele Kreisläufe geschlossen werden. Deshalb wurde eine Kombination der oben dargestellten Szenarien gerechnet. Darin wird sowohl der Phosphor aus Klärschlämmen, tierischen Abfällen sowie aus dem Grüngut und den biogenen Abfällen aus Haushalten wieder verwendet.

Szenario: Kombination aller Handlungsoptionen

Die Massnahmen zur Wiederverwendung von Klärschlammaschen sowie von Grüngut und biogenen Abfällen aus Haushalten werden wie oben beschrieben umgesetzt. Bei den tierischen Abfällen wurde die Option «Tiermehl-Dünger» verwendet, da dieser aus hygienischer Sicht unproblematischer und daher realistischer erscheint. Es wurden drei Szenarien gerechnet: Eines, bei dem jeweils die Szenarien mit den kleineren Recyclingraten kombiniert wurden (*Szenario Kombination Minimum*). Bei der Kombination der grösseren Recyclingraten (jeweils 100 %-Szenarien) ergab sich ein negativer Import von Mineraldüngern, also ein Export von Recyclingdüngern. Hier wurden zwei Möglichkeiten gerechnet: *Szenario Kombination Maximum (mit Export)* und *Szenario Kombination Maximum (kein Export)*. Beim Letzteren wurde bei der Berechnung der Import von Mineraldüngern auf null gesetzt.²³

²³ Dieses zweite Szenario ohne Export wurde nur der Vollständigkeit halber berechnet und ist nicht sehr realistisch. Der gesamte Recyclingdünger würde in der Landwirtschaft eingesetzt und nicht exportiert.

Resultate

Durch die Kombination der jeweiligen Minimums-Szenarien reduziert sich der totale P-Import im Vergleich zum Jahr 2006 um ca. 3200 tP/a (ca. 13 %). Dies setzt sich zusammen aus einem reduzierten Import von Mineraldüngern (-50 %). Da dennoch weiterhin Futtermittel, Reinigungsprodukte, sowie Lebensmittel importiert werden, beträgt der P-Import immer noch 13 300 tP/a (Tab. 12). Das Lagerwachstum im Subsystem *Abfallwirtschaft* reduziert sich auf fast einen Fünftel (von 9000 tP/a auf 2000 tP/a); im Subsystem *Landwirtschaft Pflanzen* erhöht sich das Lager durch die tiefe Düngungseffizienz der KS-Asche Düngers von 3500 tP im 2006 auf 8900 tP).

Szenario Kombination Minimum

Bei der Kombination der 100 %-Szenarien übersteigt die Herstellung von Recyclingdüngern aus Klärschlammaschen, Tiermehl-Asche und Grüngut die importierte Menge an Mineraldüngern: es ergibt sich ein negativer Fluss bei den Mineraldüngern (-2200 tP/a) (Abb. 14, Tab. 12). Das heisst, 2200 tP/a werden in Form von Recyclingdüngern exportiert.²⁴ Dennoch muss berücksichtigt werden, dass wie in dem vorangegangenen Szenario die Schweiz weiterhin Futtermittel und somit Phosphor importiert (5600 tP/a). Der totale P-Import beträgt jedoch lediglich 50 % des Importes im Jahr 2006 (ca. 8000 tP/a). Zusätzlich nimmt das P-Lagerwachstum in der Schweiz um ebenfalls 50 % ab. Im Subsystem *Abfallwirtschaft* werden noch 1700 tP/a deponiert (82 % weniger als 2006), im Subsystem *Landwirtschaft Pflanzen* ergibt sich eine leichte Zunahme des im Boden angereicherten Phosphors im Vergleich zu 2006 (+16 %).

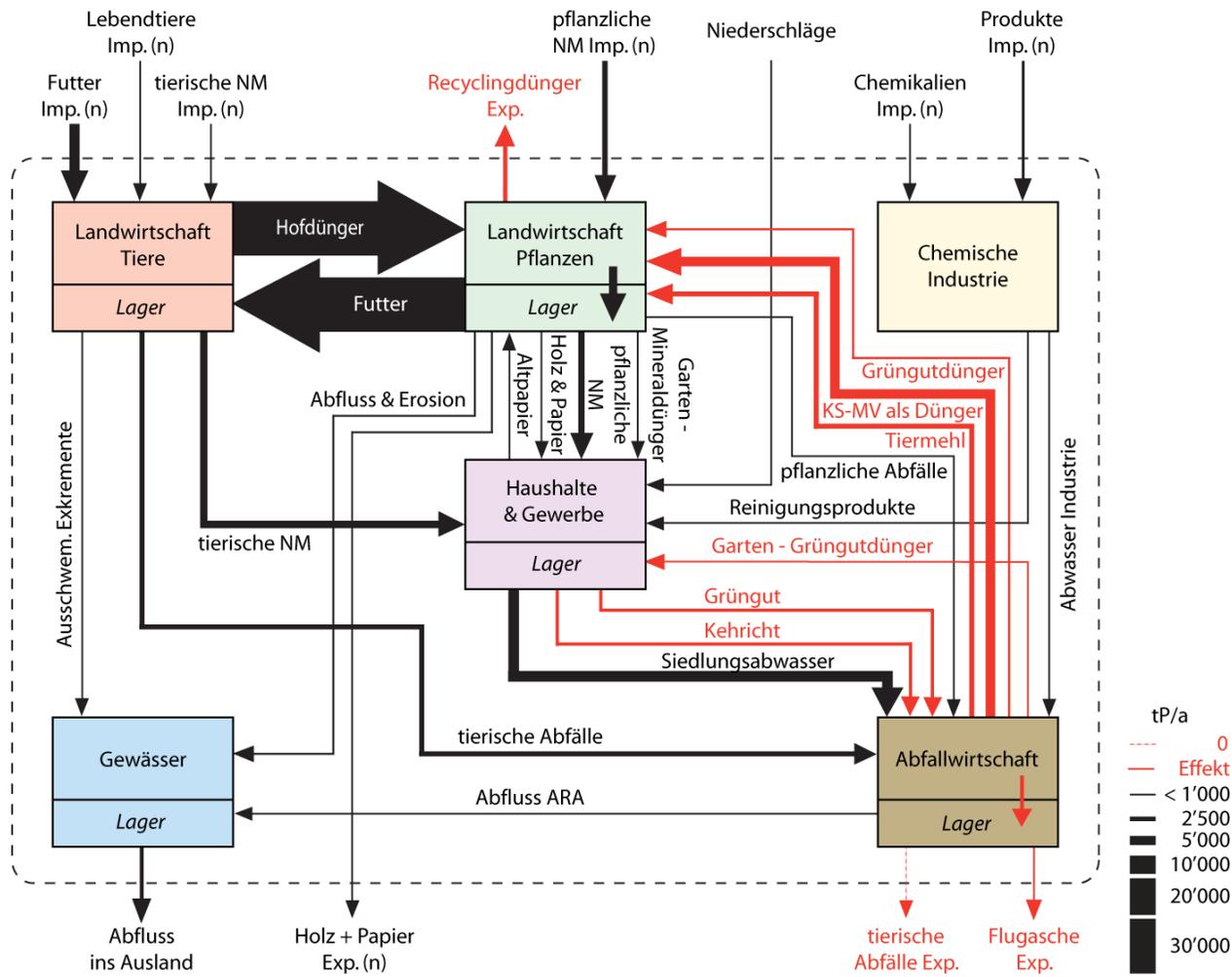
Szenario Kombination Maximum
(mit Export)

Falls kein Recyclingdünger exportiert wird, ergibt sich eine P-Bilanz im System Schweiz von +7900 tP/a, das heisst das P-Lagerwachstum reduziert sich um einen Drittel im Vergleich mit dem Jahr 2006. Der Phosphorhaushalt im Subsystem *Abfallwirtschaft* ist gleich wie im *Szenario Kombination Maximum (mit Export)* (82 % weniger P-Akkumulation als 2006). Im Subsystem *Landwirtschaft Pflanzen* ergibt sich jedoch im Vergleich zu 2006 eine um 60 % (oder 2700 tP/a) erhöhte Anreicherung (gegeben durch die Annahme, dass der Dünger nicht exportiert wird). Es wird kein Mineraldünger mehr importiert, jedoch weiterhin Futter in das Subsystem *Landwirtschaft Tiere*.

Szenario Kombination Maximum
(kein Export)

²⁴ Dieser Exportfluss würde aus dem Subsystem *Abfallwirtschaft* kommen. Aufgrund des bestehenden Phosphor-Modells wurde jedoch ein negativer Mineraldüngerimports berechnet, der dem Export von Recyclingdüngern entspricht. Dies entspricht der Annahme, dass im Subsystem *Landwirtschaft Pflanzen* ein Prozess Düngerhandel besteht, durch welchen alle importierten und exportierten Düngemittel fliessen.

Abb. 14 > Systembild Szenario-Kombination maximale Varianten, mit Export



NM: Nahrungsmittel

Tab. 12 > Szenario Kombination. Berechnete Resultate (STAN-Output) von 2006 und Kombination der Minimalen und Maximalen Szenarien

Prozess Output	Prozess Input	Flussname	2006 (tP/a)		Kombi Min. (tP/a)		Kombi Max. (kein Exp.) (tP/a)		Kombi Max. (mit Exp.) (tP/a)	
Input										
	Landw. Tiere	Futter Imp. (n)	5'615	+/- 628	5'614	+/- 628	5'615	+/- 628	5'615	+/- 628
		Lebendtiere Imp. (n)	33	+/- 4	33	+/- 4	33	+/- 4	33	+/- 4
		tierische NM Imp. (n)	688	+/- 172	644	+/- 171	648	+/- 171	648	+/- 171
	Landw. Pflanzen	Mineraldünger Imp.	5'886	+/- 59	2'871	+/- 724	0	+/- 0	-2'209	+/- 733
		pflanzliche NM Imp. (n)	2'447	+/- 238	2'377	+/- 235	2'384	+/- 235	2'384	+/- 235
	Chem. Industrie	Chemikalien Imp. (n)	360	+/- 0	360	+/- 0	360	+/- 0	360	+/- 0
		Produkte Imp. (n)	1'456	+/- 338	1'322	+/- 331	1'327	+/- 332	1'327	+/- 332
	Haushalte & Gewerbe	Niederschläge	23	+/- 8	23	+/- 8	23	+/- 8	23	+/- 8
Output										
Landw. Pflanzen		Holz & Papier Exp. (n)	66	+/- 9	66	+/- 9	66	+/- 9	66	+/- 9
Abfallwirtschaft		Flugasche Exp.	185	+/- 185	195	+/- 20	187	+/- 20	187	+/- 20
		tierische Abfälle Exp.	1'505	+/- 248	0	+/- 0	0	+/- 0	0	+/- 0
Gewässer		Abfluss ins Ausland	2'160	+/- 106	2'162	+/- 106	2'162	+/- 106	2'162	+/- 106
Systeminterne Flüsse										
Landw. Tiere	Landw. Pflanzen	Hofdünger	29'385	+/- 1'401	29'386	+/- 1'401	29'385	+/- 1'401	29'385	+/- 1'401
	Haushalte & Gewerbe	tierische NM	3'488	+/- 295	3'237	+/- 280	3'259	+/- 282	3'259	+/- 282
	Abfallwirtschaft	tierische Abfälle	3'015	+/- 298	3'198	+/- 277	3'195	+/- 277	3'195	+/- 277
	Gewässer	Ausschwem. Exkremente	20	+/- 10	20	+/- 10	20	+/- 10	20	+/- 10
Landw. Pflanzen	Landw. Tiere	Futter	29'572	+/- 1'556	29'550	+/- 1'552	29'563	+/- 1'553	29'563	+/- 1'553
	Haushalte & Gewerbe	Garten-Mineraldünger	180	+/- 24	179	+/- 24	179	+/- 24	179	+/- 24
	Haushalte & Gewerbe	pflanzliche NM	4'016	+/- 253	3'882	+/- 246	3'895	+/- 247	3'895	+/- 247
	Haushalte & Gewerbe	Holz & Papier	337	+/- 53	335	+/- 52	335	+/- 52	335	+/- 52
	Abfallwirtschaft	pflanzliche Abfälle	91	+/- 13	91	+/- 13	91	+/- 13	91	+/- 13
	Gewässer	Abfluss & Erosion	1'071	+/- 238	1'026	+/- 243	1'028	+/- 243	1'028	+/- 243
Chem. Industrie	Haushalte & Gewerbe	Reinigungsprodukte	1'031	+/- 33	1'030	+/- 33	1'030	+/- 33	1'030	+/- 33
	Abfallwirtschaft	Abwasser Industrie	786	+/- 338	652	+/- 331	657	+/- 331	657	+/- 331
Haushalte & Gewerbe	Landw. Pflanzen	Altpapier	69	+/- 7	69	+/- 7	69	+/- 7	69	+/- 7
	Abfallwirtschaft	Siedlungsabwasser	6'097	+/- 230	6'166	+/- 223	6'156	+/- 224	6'156	+/- 224
	Abfallwirtschaft	Kehricht	2'503	+/- 240	1'550	+/- 187	1'266	+/- 195	1'266	+/- 195
	Abfallwirtschaft	Grüngut	998	+/- 92	1'494	+/- 82	1'825	+/- 99	1'825	+/- 99
Abfallwirtschaft	Landw. Pflanzen	KS als Dünger	594	+/- 112	0	+/- 0	0	+/- 0	0	+/- 0
	Landw. Pflanzen	Grüngutdünger	498	+/- 165	992	+/- 110	1'322	+/- 122	1'322	+/- 122
	Landw. Pflanzen	KS-Asche als Dünger	0	+/- 0	5'129	+/- 324	5'125	+/- 324	5'125	+/- 324
	Landw. Pflanzen	Tiermehl als Dünger	0	+/- 0	3'198	+/- 277	3'195	+/- 277	3'195	+/- 277
	Haushalte & Gewerbe	Garten-Grüngutdünger	592	+/- 140	593	+/- 91	594	+/- 93	594	+/- 93
	Gewässer	Abfluss ARA	1'069	+/- 324	1'116	+/- 332	1'114	+/- 332	1'114	+/- 332
P-Lageränderungen (Prozesse) (tP)										
Landw. Pflanzen			3'546	+/- 802	8'892	+/- 1'057	6'322	+/- 772	4'113	+/- 772
Abfallwirtschaft			9'046	+/- 522	1'929	+/- 198	1'652	+/- 205	1'652	+/- 205
Total Lageränderung			12'592	+/- 956	10'821	+/- 1'075	7'974	+/- 799	5'765	+/- 799

Diskussion

Bei einer Kombination von Massnahmen müssen alle bei den einzelnen Szenarien diskutierten Aspekte berücksichtigt werden. Zusätzlich stellt sich die Frage, was ein Export von Recyclingdüngern für Konsequenzen hätte, bzw. welche Rahmenbedingungen dafür gegeben sein müssten.

Eine Umsetzung der Wiederverwendung von Klärschlämmen, tierischen Abfällen und Grüngut verursacht Kosten. Es stellt sich die Frage, wer diese zu tragen hat. Nach dem Verursacherprinzip müssten die Haushalte über Abfall- und Abwassergebühren (Grüngut und Klärschlammrecycling) und die fleischverarbeitende Industrie (bzw. die Fleischkonsumenten über höhere Preise) die Kosten tragen. Es könnte auch argumentiert werden, dass die Abnehmer des recycelten Phosphors (also die Landwirte) die Kosten übernehmen sollen, jedoch werden diese den Recyclingdünger nur verwenden, wenn sich dies ökonomisch auch lohnt (d. h. die Kosten vergleichbar oder tiefer sind als Mineraldünger). Mit zunehmender Verknappung von qualitativ hochstehendem Phosphordünger und ansteigenden Preisen wird sich die Umsetzung der oben genannten Massnahmen vermehrt auch aus ökonomischer Sicht lohnen.

Ökonomische Tragbarkeit

Aus ökologischer Sicht kann die bei allen Szenarien leicht bis stark erhöhte Akkumulation von Phosphor in den landwirtschaftlichen Böden zu Problemen der Auswaschung und Eutrophierung führen. Hingegen führen alle drei berechneten kombinierten Szenarien zu einer starken Ressourcenschonung, da 50–100 % des Mineraldünger-Verbrauchs eingespart werden bzw. sogar im Ausland zur Reduzierung des Verbrauchs beitragen (im Falle des Recyclingdünger-Export-Szenarios). Zu beachten ist jedoch, dass weiterhin ein P-Import in die Schweiz stattfinden wird, vor allem in Form von Futtermitteln für die Tierproduktion.

Ökologische Aspekte

Beim Export von Recyclingdüngern ist die Gesetzgebung der Importländer, z. B. der Europäischen Union entscheidend. In Österreich wurde die Verwendung von Klärschlammaschen-Dünger bereits zugelassen (ASH DEC 2008).

Gesellschaftliche/Politische Akzeptanz

Wie oben erwähnt, verbrennt die Zementindustrie beträchtliche Mengen an Klärschlamm und tierischen Abfällen. Wenn diese beiden Brennstoffe anderweitig verwendet würden, fallen 40 % ihrer alternativen (CO₂-neutralen) Brennstoffe weg. Diese müssten durch die Verwendung anderer, allenfalls fossiler Brennstoffe ersetzt werden, und allfällige CO₂-Kompensationszahlungen geleistet werden. Die Akzeptanz dieser beiden Phosphor-Recyclingmassnahmen dürfte demnach von der Zementindustrie zu diskutieren sein. Vor allem aber müsste die Akzeptanz der Bauern und der Bevölkerung vor der Umsetzung der Massnahmen geprüft werden.

Um möglichst grosse Mengen an Mineraldünger durch Recyclingdünger zu ersetzen, muss die Düngungseffizienz und Qualität des Recyclingdüngers mit jener des Mineraldüngers vergleichbar sein. Hierzu muss das Verfahren der Recyclingdüngerherstellung weiter optimiert werden. Wichtig ist auch, dass in den Substraten (Klärschlamm, tierische Abfälle, Grüngut und biogenen Abfällen aus Haushalten) enthaltenen Schad-

Technische/Logistische Umsetzbarkeit

stoffe entfernt werden können, oder durch Trennung von besonders kontaminiertem Substrat nicht in die Dünger gelangen.

Vor der Umsetzung von Massnahmen zum Phosphorrecycling müsste die Frage beantwortet werden, wie viel Mineraldünger durch Recycling-Dünger ersetzt werden kann, ohne dass die Erträge zurückgehen (mit heutigen und künftigen Verfahren).

4.5 **Fazit**

Das Phosphormanagement in der Schweiz ist momentan nicht optimal gestaltet. Potentielle Recyclingwege, wie die Fütterung von tierischen Abfällen oder die Verwendung von Klärschlamm als Dünger, wurden in den letzten Jahren aus Sicherheitsgründen verboten. Um diese Kreisläufe wieder zu schliessen, und den Phosphorimport der Schweiz zu reduzieren, muss ein sicheres Recycling von Phosphor angestrebt werden. Klärschlamm und tierische Abfälle zeigen das grösste Potential (Reduktion der P-Akkumulation von maximal 4400 tP/a bzw. 1500 tP/a), das konsequente Recycling von Grünabfällen hingegen zeigt ein vergleichsweise kleines Potential (maximal 700 tP/a), siehe Tab. 13). Für Klärschlamm scheint die thermochemische Behandlung eine viel versprechende und aus Umwelt- und Hygieneaspekten sichere Variante zu sein. Die technische Umsetzbarkeit für die thermochemische Verwertung von tierischen Abfällen müsste näher geprüft werden. Ein zentraler Aspekt ist die Qualität des Düngers. Es muss sichergestellt werden, dass keine zusätzliche Kontamination der Böden stattfindet und die Düngungseffizienz gewährleistet ist.

Bei den vorgestellten Massnahmen zur Wiederverwendung von Phosphor kann die Phosphorbilanz der Schweiz verbessert, jedoch nicht ausgeglichen werden (also gleich viel Import wie Export). Dies liegt am kaum umsetzbaren Recycling von Phosphor im Kehricht (trotz konsequenter Sammlung von Grüngut und biogenen Abfällen aus Haushalten würden ca. 1300 tP/a an nicht-organischem Kehricht verbleiben). Zudem geht bei der Abwasserreinigung und bei der anschliessenden Verbrennung der Klärschlämme ein Teil des Phosphors verloren (als Abfluss ins Ausland und als Klärschlamm-Schlacke, welche auf Reaktordeponien gelagert wird). Des Weiteren wird Phosphor, auch mit Umsetzung der Szenarien, in den landwirtschaftlichen Böden akkumuliert. Mit zunehmender Verteuerung des Phosphordüngers könnte diese Praxis sich jedoch ändern. Ob die Düngung schon heute reduziert werden könnte ohne Ertragsseinbussen in Kauf zu nehmen ist schwierig zu beurteilen, da die Bodenprozesse und Boden-Pflanzeninteraktionen komplex und regional und zeitlich sehr verschieden sind. Zu Beachten sind hier auch die Entwicklungen der Pflanzenzüchtung, womit allenfalls die Erträge mit geringeren P-Gaben erreicht werden könnten.

Tab. 13 > Effektivität der Massnahmen*Vergleich der Phosphorbilanz der Schweiz im Jahr 2006 mit den verschiedenen Szenarien*

	2006	KS-Asche Dünger 100 %	Grüngut-Re- cycling 100 %	Tiermehl- Dünger 100 %	Tiermehl als Futter 100 %	Kombi Max. (mit Exp.)
Maximale Varianten						
Total Import (tP/a)	16500	12100	15800	13500	13800	8200
Total Export (tP/a)	3900	3900	3900	2400	2300	2400
Lageränderung (tP/a)	12600	8200	11900	11100	11500	5800
Minimale Varianten						
Total Import (tP/a)	16500	15000	16000	15300	13800	13200
Total Export (tP/a)	3900	3900	3900	2400	2300	2400
Lageränderung (tP/a)	12600	11100	12100	12900	11500	10800
<i>(gerundete Werte)</i>						

Nächste Schritte

Die vorgestellten Szenarien zeigen das Potential verschiedener Massnahmen, die getroffen werden könnten, um den Phosphorhaushalt der Schweiz zu optimieren. Das grösste Potential liegt beim Klärschlamm. Bereits heute bestehen 14 Klärschlamm-Monoverbrennungsanlagen. Die dabei entstehenden Klärschlammaschen sind jedoch bis heute ungenutzt. Als erster Schritt wäre es sicher sinnvoll, die Aschen der bestehenden Anlage separat zu deponieren. So können diese, sobald sichere Verfahren zur Klärschlamm-Aschen-Düngerherstellung marktreif sind, als Rohstoff verwendet werden. In einem nächsten Schritt wäre zu prüfen, ob tierische Abfälle im gleichen Aufbereitungsverfahren zu Dünger verwertet werden könnten. Separatsammlungen von Grüngütdünger schweizweit zu forcieren scheint wenig effektiv, da das noch vorhandene Potential vergleichsweise gering ist, da eine Separatsammlung von Grüngut bereits heute von den Gemeinden vermehrt umgesetzt wird.

5 > Monitoring von Phosphorflüssen

5.1 Konzept des Monitorings

Das Monitoring-Tool wurde in Microsoft Excel erstellt. Die aktuellen Kerngrößen werden im Tool eingegeben und alle Flüsse des Systems werden neu berechnet oder vom Jahr 2006 übertragen. Es müssen jeweils nur die Gütermengen eingegeben werden, woraus eine automatische Berechnung der Phosphorflüsse erfolgt. Die Eingabedaten wurden in zwei Kategorien eingeteilt: Daten, die aufdatiert werden müssen (need-to-have) und Daten, die aufdatiert werden können (nice-to-have). Bei den nice-to-have-Daten werden, falls die Daten eingegeben werden, die aufdatierten Werte verwendet, bei Nichteingabe wird mit den Werten von 2006 gerechnet. Die anschließende Berechnung der Phosphorflüsse der Schweiz erfolgt in STAN.

Die need-to-have und nice-to-have Flüsse für das Monitoring wurden aufgrund folgender Kriterien ausgewählt:

- > zeitliche Variabilität;
- > Wichtigkeit des Flusses im System;
- > periodische Datenverfügbarkeit;
- > starke Betroffenheit des Flusses durch voraussichtliche Massnahmen.

Neben einigen wichtigen Güterflüssen wurden gewisse Veränderungen des Gesamtsystems mittels Kerngrößen erfasst, und die Flüsse entsprechend angepasst. So wurden alle Flüsse, die zum Beispiel abhängig sind von der Einwohnerzahl oder der Grösse der Viehbestände, mit diesen Kerngrößen gekoppelt.

5.2 Beschreibung des Monitoringtools

Im Monitoring-Tool müssen mehrheitlich Daten aus den Subsystemen Landwirtschaft Tiere, Landwirtschaft Pflanzen und Abfallwirtschaft eingegeben werden. Die Daten stammen aus ca. 12 Datentabellen. Die Gütermengen von 61 Subflüssen und Kerngrößen müssen aktualisiert werden (need-to-have), 58 zusätzliche Subflüsse können, wenn vorhanden, aufdatiert werden (nice-to-have). Mittels der Phosphorkonzentrationen der Güter werden die Phosphorflüsse berechnet. Aufgrund der eingegebenen Werte, werden 22 Flüsse direkt und 23 indirekt, proportional zur Änderung eines vorhergehenden Flusses, berechnet (siehe Tab. 14). Weitere 11 Flüsse werden proportional zur Bevölkerungsgrösse berechnet. Hier liegt die Annahme zugrunde, dass die durchschnittliche pro Kopf Flussgrösse sich über die Zeit nicht merklich verändert. 31 Flüsse wurden direkt aus dem Jahr 2006 übernommen, da die Aufdatierung hier keinen grossen Zusatznutzen bringt.

Funktionen des Monitoring-Tools

- > Werte Überprüfen: Testet die eingegebenen Werte auf:
 - Plausibilität: Um Fehler bei der Dateneingabe zu prüfen, werden die eingegebenen Daten mit Standardwerten verglichen (d. h. hier die Werte des Jahres 2006). Wenn die Eingabewerte mehr als 10 % davon abweichen, werden die Daten farblich hervorgehoben. Diese Daten können dann nochmals auf Richtigkeit geprüft werden. Eine Berechnung ist trotzdem möglich;
 - Unzulässige Eingaben: Unzulässige Eingabewerte (Leerkzellen, Text, etc.) werden farblich hervorgehoben und müssen korrigiert werden.
- > STAN Input File Generieren: Mit dieser Funktion wird eine Exceldatei mit zwei Tabellenblättern erstellt. Im Tabellenblatt «Güter» sind alle Güterflüsse aufgelistet in der Reihenfolge, wie sie in der Datentabelle von STAN aufgeführt sind. Im Tabellenblatt «Phosphor» sind alle Phosphorflüsse und Phosphorkonzentrationen aufgelistet. Dieses Ausgabefile wird automatisch mit Datum und Zeit beschriftet. Die Daten aus dem Excelfile können so in STAN übertragen werden;
- > Reset: Löscht den Inhalt der need-to-have Zellen, setzt die nice-to have Zellen auf den Ursprungswert zurück. So kann neu mit der Dateneingabe begonnen werden;
- > Reset All: Stellt den Ursprungszustand des Dateneingabefeldes wieder her. Die Ursprungswerte (aus dem Jahr 2006) werden eingefüllt, die Zellen wieder wie zu Beginn eingefärbt;
- > Alle Werte Löschen: Löscht alle Daten und Zelleneinfärbungen im Dateneingabefeld.

5.3

Validierung des Monitoringtools

Die Validierung des P-Monitoringtools erfolgte mittels Vergleichen zum Originalsystem. Dabei wurde das System mit den Werten des Jahres 2006 im Tool berechnet und anschliessend mit dem Originalsystem (2006) verglichen. Die Berechnungen im P-Monitoringtool wurden soweit angepasst, bis die Abweichungen von der Originalberechnung möglichst gering waren. Um zu testen, ob das Tool auch mit Eingabewerten aus anderen Jahren sinnvolle Resultate liefert, wurde das System mit Daten aus dem Jahr 2000 berechnet. Die Resultate des Originalsystems (2006), und der Berechnungen mittels P-Monitoringtool (2006 und 2000) sind in Tab. 15 dargestellt. Die Unterschiede zwischen dem Originalsystem und den Berechnungen des Tools aus demselben Jahr sind gering und liegen innerhalb der Unsicherheiten. Für das Jahr 2000 liegen die Unterschiede vor allem bei den tierischen Abfällen, welche noch zu grösseren Teilen als Futter verwendet wurden und bei den Klärschlämmen, welche als Dünger eingesetzt wurden. So wurden auch geringere Mengen Mineraldünger und Futter importiert.

Tab. 14 > Berechnung der Flüsse im P-Monitoringtool

Flüsse und Prozesse	direkt berechnet	Indirekt berechnet	Proportional z. Bevölk.	Wert von 2006
Importflüsse				
Futter Imp. (n)	x			
Lebendtiere Imp. (n)		x		
tierische NM Imp. (n)	x			
Mineraldünger Imp.	x			
pflanzliche NM Imp. (n)	x			
Chemikalien Imp. (n)				x
Produkte Imp. (n)				x
Niederschläge				x
Exportflüsse				
Holz & Papier Exp. (n)				x
Flugasche Exp.				x
tierische Abfälle Exp.	x			
-				x
Abfluss ins Ausland				x
Systeminterne Flüsse				
Hofdünger	x			
tierische NM	x			
tierische Abfälle				
Ausschwem. Exkrementa				x
Futter	x			
Garten-Mineraldünger				x
pflanzliche NM	x			
Holzgüter				x
Energieholz				x
Papier				x
pflanzliche Abfälle		x		
Abfluss & Erosion				x
Reinigungsprodukte			x	
Abwasser Industrie			x	
Altpapier				x
Siedlungsabwasser			x	
Kehricht	x			
Grüngut	x			
-				x
KS als Dünger	x			
Grüngutdünger		x		
KS-Asche als Dünger	x			

Flüsse und Prozesse	direkt berechnet	Indirekt berechnet	Proportional z. Bevölk.	Wert von 2006
Tiermehl als Dünger	x			
Garten-Grüngutdünger		x		
zus.gefasst zu «Abfluss ARA»			x	
zus.gefasst zu «Abfluss ARA»			x	

Subsysteminterne Flüsse

Landwirtschaft Tiere				
Schlachttiere Exp.		x		
Tiere Schlachtung	x			
Milch & Eier			x	
Masttiere Imp.		x		
Futtersuppe	x			
Tiermehl als Futter	x			
inländ. tierische NM		x		

Landwirtschaft Pflanzen

inländ. pflanzliche NM	x			
pflanzliche NM Imp.		x		
pflanzliche NM Exp.		x		
Nutzholz				x
Holz Imp.				x
Papier & -rohstoffe Imp.				x
Holz Exp.				x
inländ. Papierrohstoffe				x
Papier & -rohstoffe Exp.				x

Chemische Industrie

Chemikalien Exp.				x
Chemische Produkte Exp.				x
Chemikalien Imp.				x
Chemische Produkte Imp.				x

Haushalte & Gewerbe

Komp. Küchenabfälle			x	
Fäkalien			x	
Urin			x	
Speisereste Abwasser			x	
Papier in Kehricht				x
Asche in KVA				x
Asche in Garten				x
Gartenabfall				x

Abfallwirtschaft

Flüsse und Prozesse	direkt berechnet	Indirekt berechnet	Proportional z. Bevölk.	Wert von 2006
Kompost		x		
Gärgut		x		
-		x		
Presswasser		x		
-		x		
-		x		
KVA-Schlacke		x		
KVA-Flugasche		x		
Zufluss ARA			x	
KS in KVA	x			
KS in MV	x			
KS in Zementwerk	x			
-		x		
KS-Asche MV		x		
KS-Flugasche MV		x		
tier. Abfälle Zementwerk	x			
Abfälle in Kompostierung		x		
Abfälle in Vergärung		x		
Gewässer				
-				x
-				x

Tab. 15 > Vergleichende Übersicht der Phosphorflüsse: Originalsystem (2006) vs. mittels P-Monitoringtool berechnete Systeme von 2000 und 2006

Prozess Output	Prozess Input	Flussname	Original (2006) (tP/a)		Monitoring (2006) (tP/a)		Monitoring (2000) (tP/a)	
Input								
	Landw. Tiere	Futter Imp. (n)	5'618	+/- 628	5'615	+/- 628	4'023	+/- 402
		Lebendtiere Imp. (n)	33	+/- 4	33	+/- 4	43	+/- 4
		tierische NM Imp. (n)	750	+/- 173	688	+/- 172	683	+/- 178
	Landw. Pflanzen	Mineraldünger Imp.	5'886	+/- 59	5'886	+/- 59	4'796	+/- 48
		pflanzliche NM Imp. (n)	3'013	+/- 261	2'447	+/- 238	2'906	+/- 308
	Chem. Industrie	Chemikalien Imp. (n)	360	+/- 0	360	+/- 0	360	+/- 0
		Produkte Imp. (n)	1'535	+/- 338	1'456	+/- 338	1'452	+/- 357
	Haushalte & Gewerbe	Niederschläge	23	+/- 8	23	+/- 8	23	+/- 8
Output								
	Landw. Pflanzen	Holz & Papier Exp. (n)	66	+/- 9	66	+/- 9	66	+/- 9
	Abfallwirtschaft	Flugasche Exp.	185	+/- 185	185	+/- 185	185	+/- 185
		tierische Abfälle Exp.	1'484	+/- 248	1'505	+/- 248	610	+/- 119
	Gewässer	Abfluss ins Ausland	2'159	+/- 106	2'160	+/- 106	2'158	+/- 106
Systeminterne Flüsse								
Landw. Tiere	Landw. Pflanzen	Hofdünger	29'369	+/- 1'401	29'385	+/- 1'401	29'300	+/- 1'397
	Haushalte & Gewerbe	tierische NM	3'814	+/- 303	3'488	+/- 295	3'422	+/- 288
	Abfallwirtschaft	tierische Abfälle	2'972	+/- 298	3'015	+/- 298	2'757	+/- 308
	Gewässer	Ausschwem. Exkremente	20	+/- 10	20	+/- 10	20	+/- 10
Landw. Pflanzen	Landw. Tiere	Futter	29'774	+/- 1'557	29'572	+/- 1'556	30'750	+/- 1'485
	Haushalte & Gewerbe	Garten-Mineraldünger	180	+/- 24	180	+/- 24	180	+/- 24
	Haushalte & Gewerbe	pflanzliche NM	3'321	+/- 271	4'016	+/- 253	3'382	+/- 273
	Haushalte & Gewerbe	Holz & Papier	339	+/- 53	337	+/- 53	338	+/- 53
	Abfallwirtschaft	pflanzliche Abfälle	90	+/- 13	91	+/- 13	115	+/- 77
	Gewässer	Abfluss & Erosion	1'094	+/- 235	1'071	+/- 238	1'115	+/- 235
Chem. Industrie	Haushalte & Gewerbe	Reinigungsprodukte	1'031	+/- 33	1'031	+/- 33	989	+/- 32
	Abfallwirtschaft	Abwasser Industrie	864	+/- 338	786	+/- 338	823	+/- 357
Haushalte & Gewerbe	Landw. Pflanzen	Altpapier	69	+/- 7	69	+/- 7	69	+/- 7
	Abfallwirtschaft	Siedlungsabwasser	5'960	+/- 231	6'097	+/- 230	5'753	+/- 224
	Abfallwirtschaft	Kehricht	2'339	+/- 239	2'503	+/- 240	2'383	+/- 217
	Abfallwirtschaft	Grüngut	978	+/- 91	998	+/- 92	751	+/- 82
Abfallwirtschaft	Landw. Pflanzen	KS als Dünger	589	+/- 112	594	+/- 112	2'113	+/- 344
	Landw. Pflanzen	Grüngutdünger	430	+/- 167	498	+/- 165	244	+/- 162
	Landw. Pflanzen	KS-Asche als Dünger	0	+/- 0	0	+/- 0	0	+/- 0
	Landw. Pflanzen	Tiermehl als Dünger	0	+/- 0	0	+/- 0	0	+/- 0
	Haushalte & Gewerbe	Garten-Grüngutdünger	638	+/- 143	592	+/- 140	621	+/- 141
	Gewässer	Abfluss ARA	1'044	+/- 319	1'069	+/- 324	1'022	+/- 315
P-Lageränderungen (Prozesse) (tP)								
	Landw. Pflanzen		4'491	+/- 817	4'556	+/- 785	3'481	+/- 725
	Abfallwirtschaft		8'834	+/- 487	8'830	+/- 535	7'786	+/- 529
	Total		13'325	+/- 951	13'386	+/- 950	11'267	+/- 897

5.4

Fazit

Das P-Monitoringtool ermöglicht eine rasche und einfache Aufdatierung und Neuberechnung des Phosphorhaushalts der Schweiz. Mittels weniger wichtiger Kerndaten können Veränderungen des Systems erkannt und quantifiziert werden. Zudem kann die Effektivität von allfälligen Massnahmen ex-ante und ex-post evaluiert werden.

Da es sich bei der Phosphor Stoffflussanalyse um ein quasi-stationäres System handelt, sind keine dynamischen Berechnungen und Simulationen möglich. Die zeitlichen Entwicklungen können jedoch durch mehrfaches Berechnen des Phosphorhaushalts in verschiedenen Zeitabständen dargestellt werden.

6 > Schlussfolgerungen und Massnahmen

In der vorliegenden Studie wurde der Phosphorhaushalt der Schweiz für das Jahr 2006 einschliesslich der Unsicherheiten der Phosphorflüsse analysiert.

Die Schweiz ist ein Nettoimporteur für Phosphor. Jährlich werden ca. 16 500 tP importiert und ca. 4 000 tP exportiert; d. h. das System Schweiz weist ein Wachstum des gesamten Phosphorlagers von ca. 12 500 tP pro Jahr auf. Der Import erfolgt zu 90 % über die Landwirtschaft (Futterimporte und Mineraldüngerimporte); der Export findet hauptsächlich in Form von Abfluss ins Ausland durch die Gewässer und den Export von tierischen Abfällen statt. Das höchste Lagerwachstum des Systems ist in den Subsystemen Landwirtschaft Pflanzen und Abfallwirtschaft mit Zunahmen von ca. 3 500 tP/a bzw. ca. 9 000 tP/a zu verzeichnen.

Innerhalb des Systems wird der Phosphorhaushalt vor allem durch die *Landwirtschaft* (Hofdünger, Futtermittel) und die *Abfallwirtschaft* dominiert, in vermindertem Masse auch durch *Haushalte & Gewerbe*. Die *Chemische Industrie* und die *Gewässer* sind mit Phosphorumsätzen < 2 500 tP/a weniger bedeutende Verteil- bzw. Sammelprozesse.

In der *Landwirtschaft* beinhaltet der quasi geschlossene Kreislauf zwischen der Tierproduktion und der pflanzlichen Produktion die bedeutendsten Flüsse innerhalb des Systems Schweiz (Hofdünger und das Futter für die Tiere je ca. 30 000 tP/a). Weiter spielen die Importe von Futtermitteln und Mineraldünger mit 5 600 tP/a bzw. 5 900 tP/a eine wesentliche Rolle für die pflanzliche Produktion. Grüngütdünger aus Kompostierung und Vergärung sind mit zusammen knapp 1 100 tP/a von geringer Bedeutung für das Gesamtsystem.

Das Subsystem *Haushalte & Gewerbe* ist ein Durchlaufprozess mit einem Input ca. 9 700 tP/a, bestehend zu ca. 78 % aus Nahrungsmitteln, ca. 10 % aus Reinigungsmitteln, ca. 9 % aus Dünger und < 3 % aus Holz/Papier. Die konsumierten Güter gelangen in Form von unterschiedlichen Abfallstoffen direkt in die Abfallwirtschaft und stellen mehr als 70 % des Inputs in die Abfallwirtschaft dar (Siedlungsabwasser, Kehricht, Grüngut).

In der *Abfallwirtschaft* werden jährlich ca. 13 500 tP umgesetzt. Lediglich 10 % (ca. 1 700 tP/a) wurden 2006 in der Schweiz aufbereitet und wieder in der Landwirtschaft eingesetzt. Ca. 1 500 tP/a tierische Abfälle werden zur Aufbereitung ins Ausland exportiert. Die P-Verluste betragen demnach > 10 000 tP/a (ca. 80 %). Dabei sind die Deponien mit Abstand die bedeutendsten Senken dieses Subsystems ca. 6 300 tP/a gefolgt von den Zementwerken mit jährlich ca. 3 000 tP

Das mengenmässig grösste noch ungenutzte P-Potential in der *Abfallwirtschaft* ist in der Wiederaufbereitung und -verwendung des Abwassers bzw. Klärschlammes zu finden (ca. 7500 tP/a). Im Jahr 2006 gelangten die Klärschlämme in die KVA (%), in die Klärschlammmonoverbrennungsanlage und von dort in eine Reaktordeponie (2500 tP/a), oder wurden in Zementwerken verbrannt. Zusätzlich gehen durch Export 1500 tP/a in Form von tierischen Abfällen durch Export verloren.

Aus Ressourcensicht ist das Phosphormangement in der Schweiz zurzeit nicht optimal gestaltet. Potentielle Recyclingwege, wie die Fütterung von tierischen Abfällen oder die Verwendung von Klärschlamm als Dünger, wurden in den letzten Jahren wegen Umwelt- und Hygienisiken verboten. Der P-Kreislauf könnte jedoch zu einem grossen Teil geschlossen und so der Import von mineralischem Dünger reduziert werden. Die vier Handlungsoptionen:

- a) Klärschlamm Asche als Dünger;
- b) Tiermehl als Dünger;
- c) Tiermehl als Tierfutter;
- d) Konsequentes Recycling von Grüngut

zeigen das Potential zur Schliessung des P-Kreislaufes in der Schweiz auf. Mit der Handlungsoption KS-Asche als Dünger sinkt bei einer reinen P-Bilanzierung der Bedarf an Mineraldünger auf 20 %; beim Tiermehl als Dünger auf 50 %; beim konsequenten Recycling von Grüngut auf 87 %. Das Tiermehl als Futter reduziert den Futterimport um 50 %. Diese Resultate zeigen das Potential aus reiner Phosphor-Sicht. Werden nun weitere Faktoren wie die Düngereffizienz und die Realisierbarkeit einbezogen, so ist das Potential beim Klärschlamm-Asche Dünger und dem Tiermehl Dünger um 60 % geringer; beim Konsequenten Recycling von Grüngut 40 % geringer. Die Kombination der Massnahmen, kann jedoch unter Berücksichtigung dieser Faktoren zu einer 50 %-igen Reduktion des Mineraldüngerimports führen. Hier muss jedoch beachtet werden, dass sich die Zunahme des P-Lagers im landwirtschaftlichen Boden verdoppeln würde. Es ist noch zu prüfen, welche Konsequenzen dies aus Umweltsicht haben könnte.

Das grösste Potenzial zur Optimierung des P-Kreislaufes in der Schweiz liegt beim Klärschlamm. Hier besteht auch die wichtigste Steuerungsoption für das BAFU. Bereits heute bestehen 14 Klärschlamm-Monoverbrennungsanlagen, dessen Aschen jedoch noch nicht als Dünger eingesetzt werden können. Als erster Schritt wäre es sicher sinnvoll, die Aschen der bestehenden Anlage separat zu deponieren. So können diese, sobald sichere Verfahren zur Klärschlamm-Aschen-Düngerherstellung marktreif sind, als Rohstoff verwendet werden. Hier könnte eine gezielte finanzielle Unterstützung die Markteinführung in der Schweiz beschleunigen. In einem nächsten Schritt wäre zu prüfen, ob tierische Abfälle im gleichen Aufbereitungsverfahren zu Dünger verwertet werden könnten. Separatsammlungen von Grüngutdünger schweizweit zu forcieren scheint wenig effektiv, da das noch vorhandene Potential vergleichsweise gering ist, da eine Separatsammlung von Grüngut bereits heute von den Gemeinden vermehrt umgesetzt wird.

7 > Ausblick

Die vorliegende Studie hat gezeigt, dass das grösste Potenzial zur Verbesserung der Phosphorbewirtschaftung in der Schweiz innerhalb der Abfallwirtschaft liegt. Das Verbesserungspotential ist hoch und vermag sogar im Fall einer geringen Düngereffizienz 50% des Mineraldüngerbedarfes der Schweiz zu decken. In Anbetracht der mittelfristig verknappenden Phosphatressourcen und der damit einhergehenden Qualitätsabnahme der Rohphosphate sollten die Möglichkeiten zur Aktivierung dieses Potentials geprüft werden.

Für eine Verbesserung des Phosphorhaushaltes sind neben der Ressourcenperspektive noch weitere Aspekte zu berücksichtigen, die in dieser Studie ansatzweise erläutert werden. Folgende vier Aspekte werden als relevant eingestuft.

Bei der Analyse der ökonomischen Tragbarkeit wäre es sinnvoll eine vergleichende Kosten-Nutzen-Analyse für die vorgestellten Einzelmassnahmen, wobei auch der Umsetzungsgrad berücksichtigt werden könnte (z. B. bei der Grüngutsammlung) durchzuführen. Von Interesse ist dabei vor allem die Preisrelation zwischen z.B. Klärschlammasche-Dünger und Mineraldünger pro Düngeeinheit. Wäre der Preis für den Klärschlammasche-Dünger pro Düngeeinheit höher, so sollte die Nachfrage nach diesem Produkt finanziell unterstützt werden. Dabei stellt sich die Frage, wer die Kosten für die zusätzliche Aufbereitung des Klärschlammes tragen soll, ob also die Verursacher, die Anwender oder der Staat die zusätzlichen Kosten übernehmen.

Ökonomische Tragbarkeit

Die Frage nach der **gesellschaftlichen Akzeptanz** und der **politischen** Rahmenbedingungen sind relevant hinsichtlich der Anpassung des Phosphorhaushaltssystems. Innerhalb der Schweiz sollte in erster Linie die Akzeptanz der Bauern, sowie die der Bevölkerung analysiert und berücksichtigt werden. Damit stellt sich die Frage, inwiefern diese neuartigen Sekundärdüngerrohstoffe in die landwirtschaftliche Gesetzgebung einbezogen werden sollen, d. h. inwiefern das Label biologischer Anbau die Verwendung von Sekundärdüngerrohstoffen stützt und wie deren verminderte Düngereffizienz methodisch berücksichtigt wird. In diesem Zusammenhang ist auch die Gesetzgebung der potentiellen Importländer, z. B. der Europäischen Union, von Bedeutung. In Österreich wurde beispielsweise die Verwendung von Klärschlammaschen-Dünger bereits zugelassen (ASH DEC 2008).

Gesellschaftliche Akzeptanz und politische Rahmenbedingungen

Zusätzlich ist die technische/logistische Umsetzbarkeit in Betracht zu ziehen. Von besonderer Relevanz sind dabei: a) Zeitpunkt der Verfügbarkeit der Recyclingtechnologie; b) Schadstoffreduktionspotential bei maximaler Düngereffizienz; und c) weitere Feldversuche zur Steigerung der Düngereffizienz.

Technische/Logistische Umsetzbarkeit

Letztlich sollten noch einige ökologische Aspekte nicht ausser Acht gelassen werden. Im Falle einer Düngereffizienz $< 100\%$ wurde eine sukzessive Erhöhung des Phosphorlagers in den landwirtschaftlichen Böden festgestellt. Es stellt sich die Frage, inwiefern diese Phosphate ausgewaschen werden und zur Eutrophierung beitragen können.

Ökologische Aspekte

> Anhang

A1 Abbildungen der Subsysteme

Die Stoffflusssysteme der 6 Subsysteme sind einzeln (Abb. 16–Abb. 21). Die Systemgrenze ist gestrichelt dargestellt. Die Ellipsen der Flüsse beinhalten die projektinternen Kurzbezeichnungen der Flüsse; dabei sind die Flüsse des Gesamtsystems in Importe (I), Exporte (E) und interne Flüsse (A) unterteilt, das sind hier die Flüsse zwischen den Subsystemen. Die Subsysteme wie auch die Prozesse in ihnen sind jeweils derart durchnummeriert (in Lesrichtung), dass in der Kurzbezeichnung dieser Flüsse jeweils der Herkunfts- und der Zielprozess deutlich werden²⁵. Analog gilt dies für die Flüsse innerhalb der Subsysteme, wobei die Prozesse der Subsysteme erneut durchnummeriert werden und der Bezeichnung die zuvor zugeordnete Subsystem-Nummerierung vorangestellt wird²⁵. Dadurch ist die Identifikation der Flüsse bzw. Lager eindeutig gewährleistet; zudem wurde damit die alphanumerische Sortierung innerhalb STAN und ggf. Excel zur logischen Gruppierung der Flüsse nutzbar.

²⁵ Beispielsweise führt der Fluss A12, Hofdünger, von Subsystem 1 (Landwirtschaft Tiere) zu Subsystem 2 (Landwirtschaft Pflanzen); der Fluss 1_A31, Futtersuppe, führt innerhalb Subsystem 1 (Landwirtschaft Tiere) von Prozess 3 (Verarbeitung tier. Nahrungsmittel) zu Prozess 1 (Tierhaltung).

Abb. 16 > Subsystem Landwirtschaft Tiere

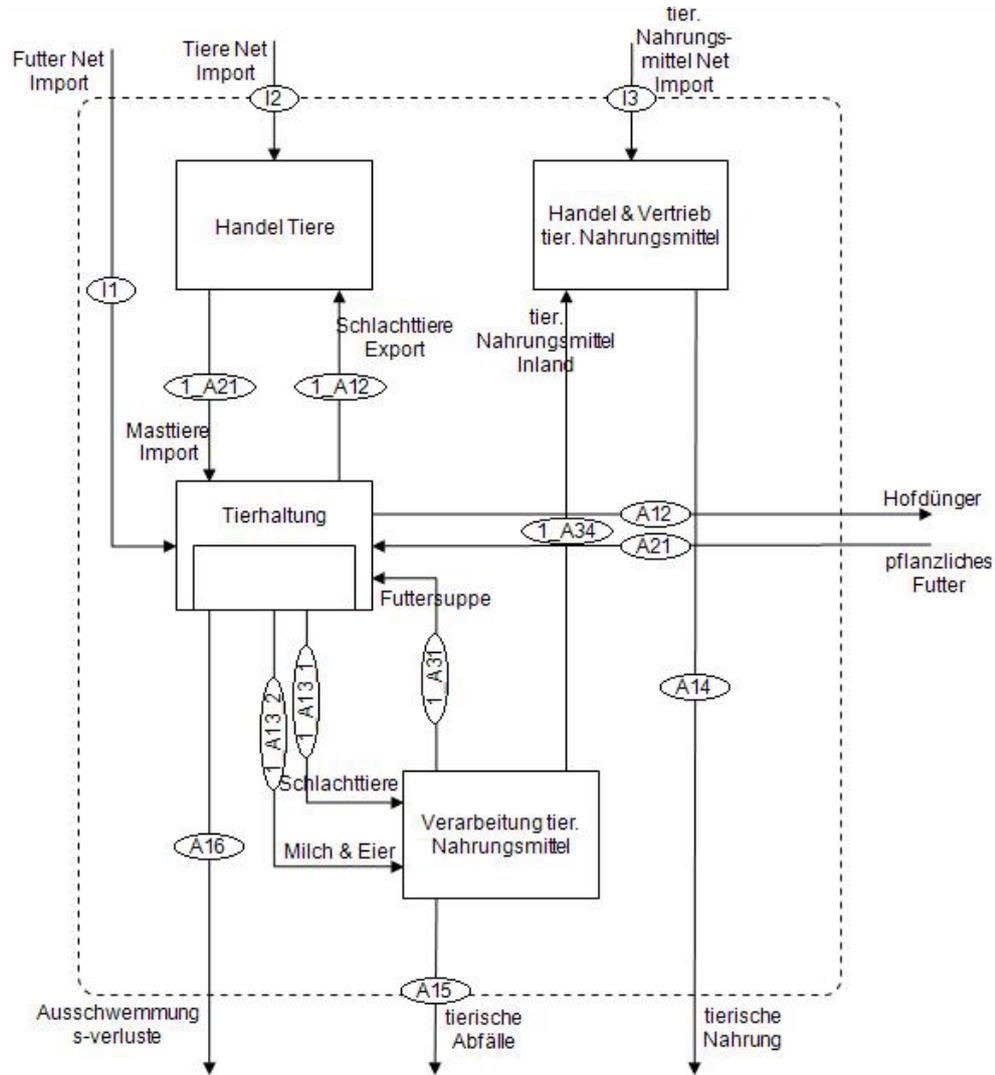


Abb. 17 > Subsystem Landwirtschaft Pflanzen

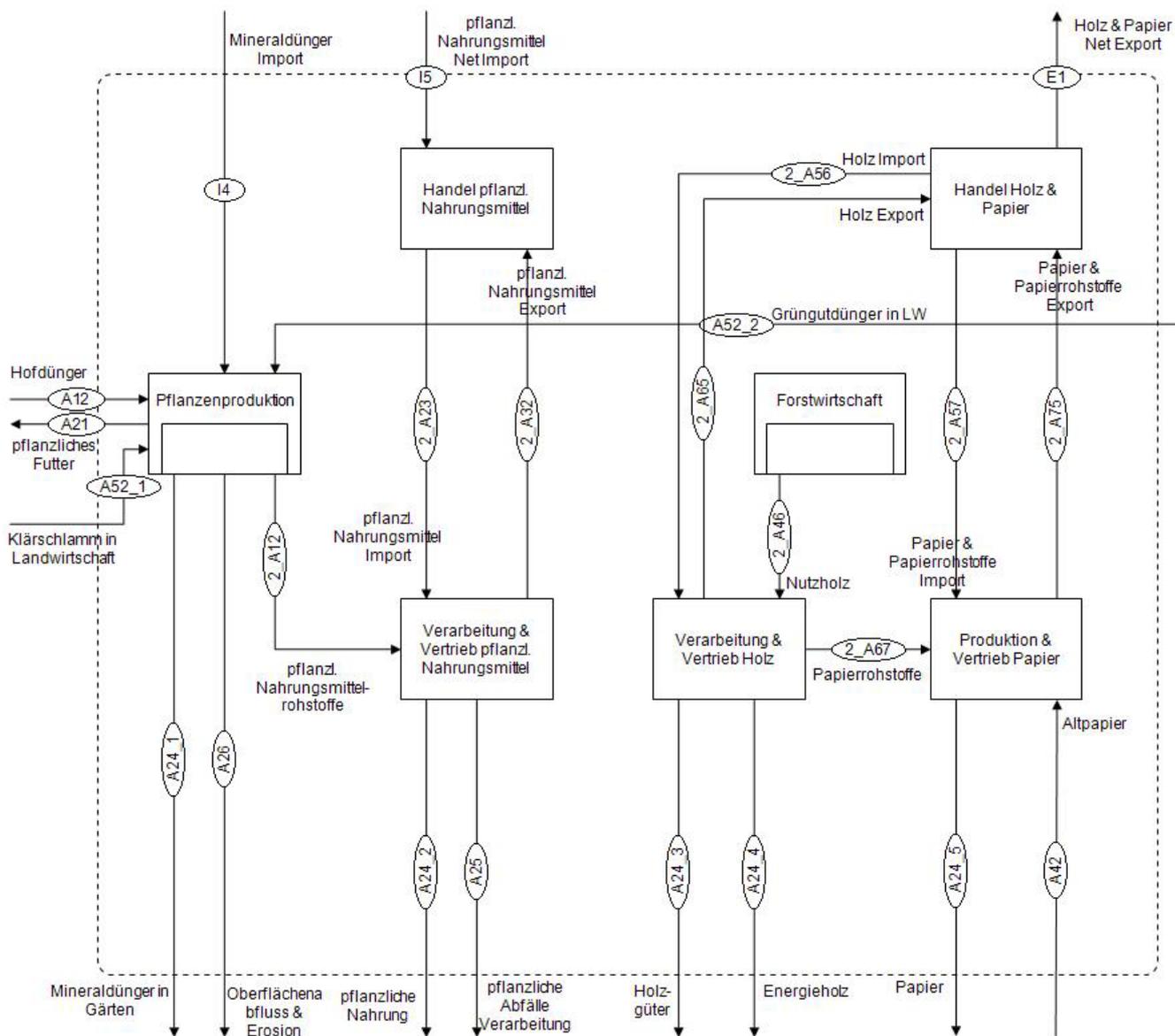


Abb. 18 > Subsystem chemische Industrie

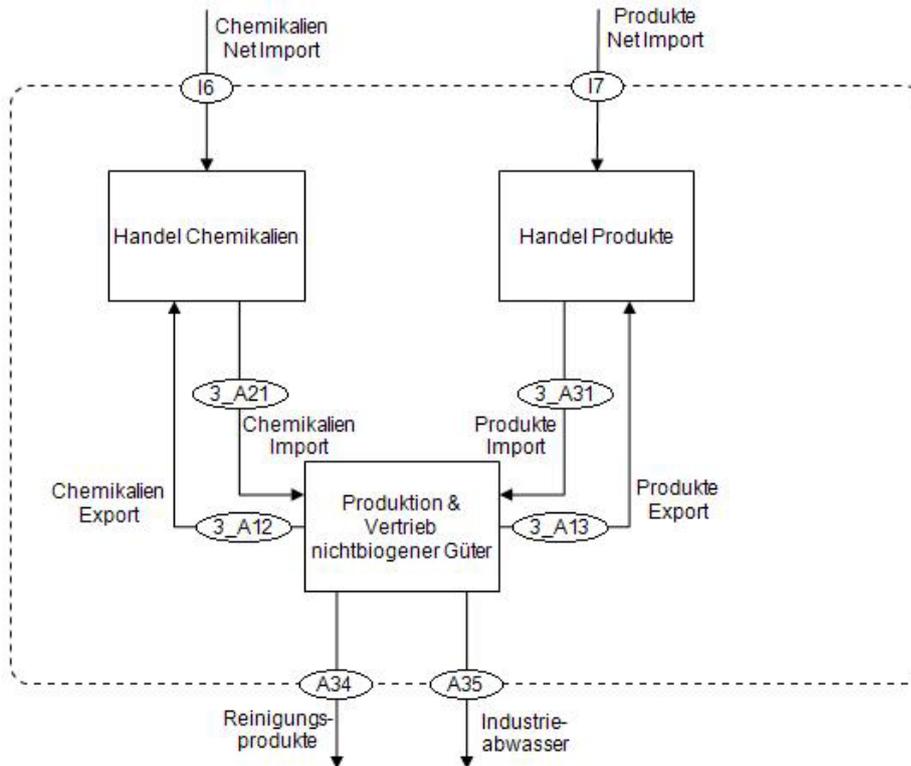


Abb. 19 > Subsystem Haushalt & Gewerbe

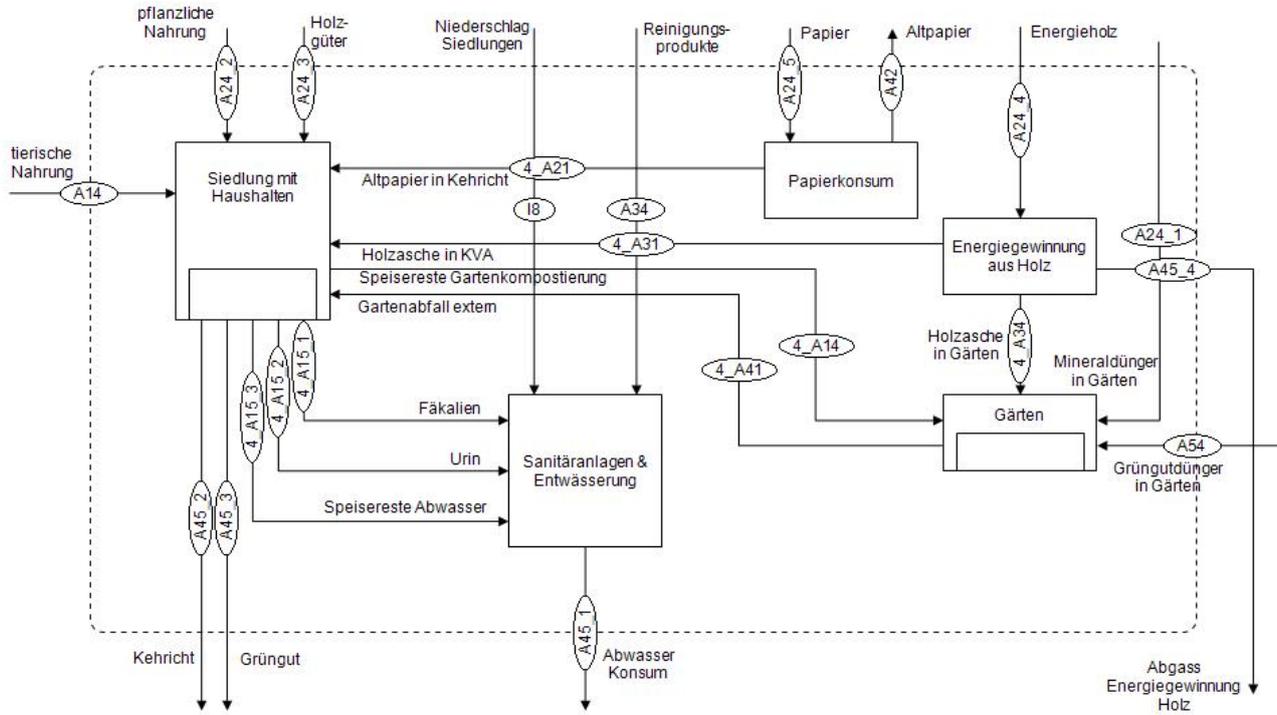


Abb. 20 > Subsystem Abfallwirtschaft

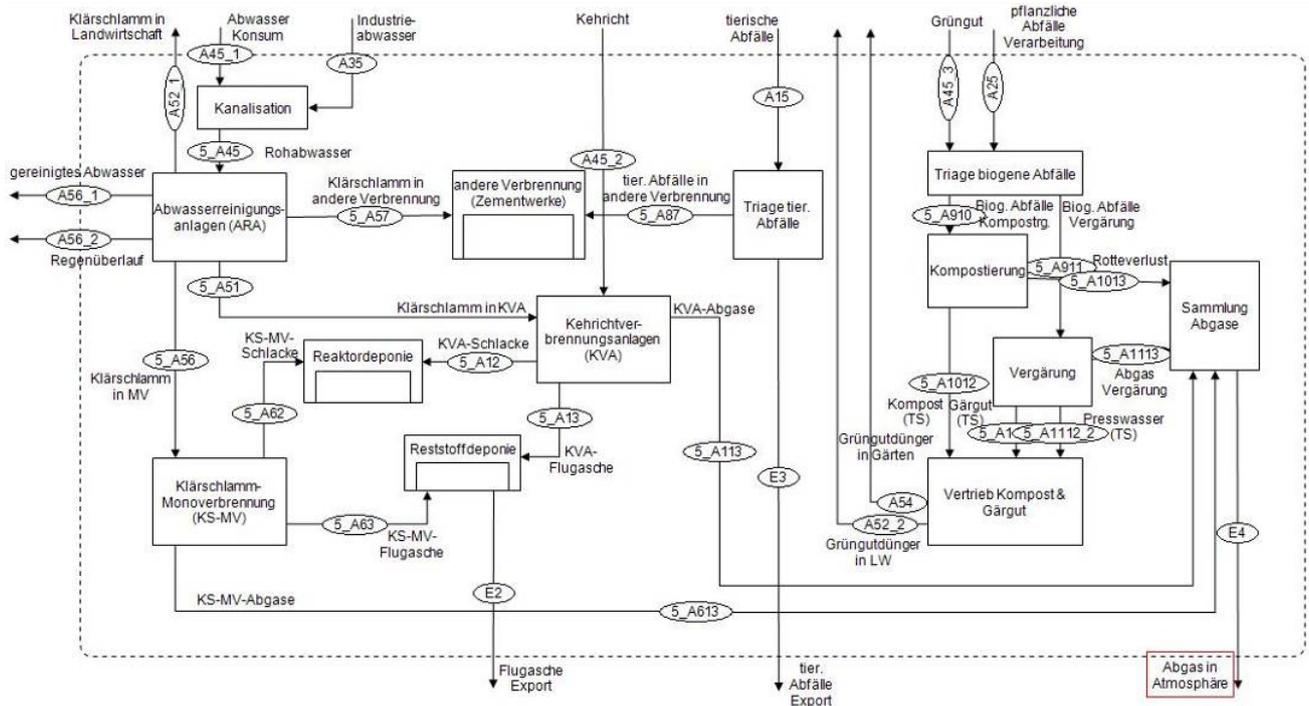
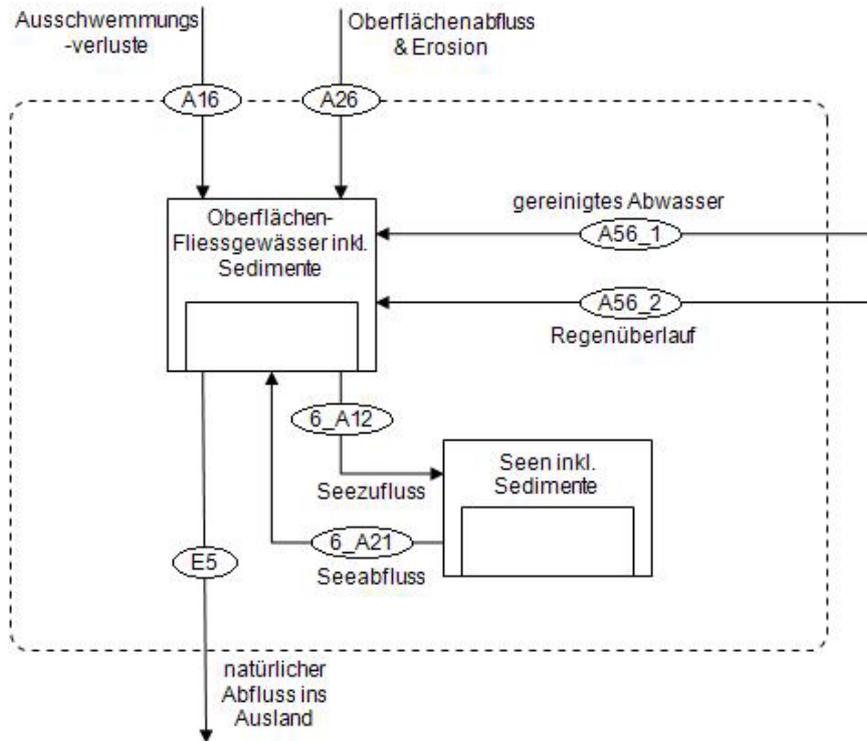


Abb. 21 > Subsystem Gewässer



A2 Beschreibung der Prozesse und Flüsse

Im Folgenden werden die Prozesse und Flüsse einzeln beschrieben, soweit dies für die Systemwahl und für die Diskussion der Studie erforderlich ist. Bei den Beschreibungen werden Prozesse und Flüsse des Systems (Gesamtsystem und Subsysteme) jeweils kursiv dargestellt, so dass zur Vereinfachung auf Doppelbeschreibungen verzichtet werden konnte.

Die Flüsse sind unter ihren Arbeitsnahmen (vgl. STAN) aufgeführt. Diese Flussnamen sind nicht immer deckungsgleich mit den verwendeten Flussnamen im Bericht. Die untenstehende Tabelle gibt Aufschluss über die Namensänderungen.

Namen im Bericht (Kommunikationsnamen)	Namen im STAN (Arbeitsnamen)
Importflüsse	Importflüsse
Futter Imp. (n)	I1,Futter Net Import
Lebendtiere Imp. (n)	I2,Tiere Net Import
tierische NM Imp. (n)	I3,tier. Nahrungs-mittel Net Import
Mineraldünger Imp.	I4,Mineraldünger Import
pflanzliche NM Imp. (n)	I5,pflanzl. Nahrungsmittel Net Import
Chemikalien Imp. (n)	I6,Chemikalien Net Import
Produkte Imp. (n)	I7,Produkte Net Import
Niederschläge	I8,Niederschlag Siedlungen
Exportflüsse	Exportflüsse
Holz+Papier Exp. (n)	E1,Holz & Papier Net Export
Flugasche Exp.	E2,Flugasche Export
tierische Abfälle Exp.	E3,tier. Abfälle Export
-	E4,Abgas in Atmosphäre
Abfluss ins Ausland	E5,natürlicher Abfluss ins Ausland
Systeminterneflüsse	Systeminterneflüsse
Hofdünger	A12,Hofdünger
tierische NM	A14,tierische Nahrung
tierische Abfälle	A15,tierische Abfälle
Ausschwem. Exkrememente	A16,Ausschwemmungs-verluste Exkrememente
pflanzliches Futter	A21,pflanzliches Futter
Garten-Mineraldünger	A24_1,Mineraldünger Gärten
pflanzliche NM	A24_2,pfl. Nahrung
Holzgüter	A24_3,Holzgüter
Energieholz	A24_4,Energieholz
Papier	A24_5,Papier
pflanzliche Abfälle	A25,pflanzliche Abfälle Verarbeitung
Abfluss+Erosion	A26,Oberflächenabfl. & Erosion

Namen im Bericht (Kommunikationsnamen)	Namen im STAN (Arbeitsnamen)
Reinigungsprodukte	A34,Reinigungsprodukte
Abwasser Industrie	A35,Industrieabwasser
Altpapier	A42,Altpapier
Siedlungsabwasser	A45_1,Abwasser Konsum
Kehricht	A45_2,Kehricht
Grüngut	A45_3,Grüngut
-	A45_4,Abgas Energiegewinnung Konsum
KS als Dünger	A52_1,Klärschlamm in Landwirtschaft
Grüngutdünger	A52_2,Grüngutdünger in LW
KS-Asche als Dünger	A52_3,KS-MV in Landwirt.
Tiermehl als Dünger	A52_4,Tiermehl-Dünger
Garten-Grüngutdünger	A54,Grüngutdünger in Gärten
zus.gefasst zu «Abfluss ARA»	A56_1,gereinigtes Abwasser
	A56_2,Regenüberlauf
Subsysteminterne Flüsse	Subsysteminterne Flüsse
Landwirtschaft Tiere	1_Landwirtschaft Tiere mit Verarbeitung und Handel
Schlachttiere Exp.	1_A12,Schlachttiere Export
Tiere Schlachtung	1_A13_1,Schlachttiere
Milch+Eier	1_A13_2,Milch & Eier
Masttiere Imp.	1_A21,Masttiere Import
Futtersuppe	1_A31_1,Futtersuppe
Tiermehl als Futter	1_A31_2,Tiermehl Futter
inländ. tierische NM	1_A34,tier. Nahrungsmittel Inland
Landwirtschaft Pflanzen	2_Landwirtschaft Pflanzen mit Verarbeitung und Handel
inländ. pflanzliche NM	2_A12,pflanzl. Nahrungsmittel-rohstoffe
pflanzliche NM Imp.	2_A23,pflanzl. Nahrungsmittel Import
pflanzliche NM Exp.	2_A32,pflanzl. Nahrungsmittel Export
Nutzholz	2_A46,Nutzholz
Holz Imp.	2_A56,Holz Import
Papier+-rohstoffe Imp.	2_A57,Papier & Papierrohstoffe Import
Holz Exp.	2_A65,Holz Export
inländ. Papierrohstoffe	2_A67,Papierrohstoffe
Papier+-rohstoffe Exp.	2_A75,Papier & Papierrohstoffe Export
Chemische Industrie	3_Produktion, Handel und Vertrieb nicht biogener Güter
Chemikalien Exp.	3_A12,Chemikalien Export
Chemische Produkte Exp.	3_A13,Produkte Export
Chemikalien Imp.	3_A21,Chemikalien Import
Chemische Produkte Imp.	3_A31,Produkte Import
Haushalte+Gewerbe	4_Konsum
Komp. Küchenabfälle	4_A14,Speisereste Gartenkompostierung
Fäkalien	4_A15_1,Fäkalien

Namen im Bericht (Kommunikationsnamen)	Namen im STAN (Arbeitsnamen)
Urin	4_A15_2,Urin
Speisereste Abwasser	4_A15_3,Speisereste Abwasser
Papier in Kehricht	4_A21,Altpapier in Kehricht
Asche in Kehricht	4_A31,Holzasche in KVA
Asche in Garten	4_A34,Holzasche in Gärten
Gartenabfall	4_A41,Gartenabfall extern
Abfallwirtschaft	5_Abfallwirtschaft
Kompost	5_A1012,Kompost (TS)
Gärgut	5_A1013,Rotteverlust
-	5_A1112_1,Gärgut (TS)
Presswasser	5_A1112_2,Presswasser (TS)
-	5_A1113,Abgas Vergärung
-	5_A113,KVA-Abgase
KVA-Schlacke	5_A12,KVA-Schlacke
KVA-Flugasche	5_A13,KVA-Flugasche
Zufluss ARA	5_A45,Rohabwasser
KS in KVA	5_A51,Klärschlamm in KVA
KS in MV	5_A56,Klärschlamm in MV
KS in Zementwerk	5_A57,Klärschlamm in andere Verbrennung
-	5_A613,KS-MV-Abgase
KS-Asche MV	5_A62,KS-MV-Schlacke
KS-Flugasche MV	5_A63,KS-MV-Flugasche
tier. Abfälle Zementwerk	5_A87,tier. Abfälle in andere Verbrennung
Abfälle in Kompostierung	5_A910,Biog. Abfälle Kompostgr.
Abfälle in Vergärung	5_A911,Biog. Abfälle Vergärung
Gewässer	6_Oberflächengewässer
-	6_A12,Seezufluss
-	6_A21,Seeabfluss

A2-1 Gesamtsystem

A2-1.1 Prozesse

Der Prozess Landwirtschaft Tiere umfasst die Tierhaltung von Rindern, Kälbern, Schweinen, Hühnern, Pferden, Schafen und Ziegen (ohne Wildtiere, Fische und Haustiere) inklusive der Schlachtung und Verarbeitung von Tieren und tierischen Produkten bis zur Nahrungsqualität bzw. zur Entsorgung des Anteils tierischer Abfälle. Ebenso eingeschlossen ist die Fütterung der Tiere. Hinzu kommen der Im- & Export von Tieren und tierischen Produkten. Hingegen sind überwiegend für andere Zwecke als zur Nahrungsmittelproduktion hergestellte Güter (Kleidung und Schuhe, Wolle, Horn, Felle) ausgenommen.

Landwirtschaft Tiere:
Verarbeitung & Handel

Der Prozess Landwirtschaft Pflanzen umfasst die gesamte schweizerische landwirtschaftliche Pflanzenproduktion, Forstwirtschaft und die Verarbeitung der aus ihnen gewonnenen Produkte. Die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion schliesst den Pflanzenbau von Feldfrüchten, Obstbau und Futterbau ein sowie die Verarbeitung und den Handel mit pflanzlichen Nahrungsmitteln. Dazu gehören die Ernte und die Verarbeitung der Früchte bis zur Nahrungsqualität bzw. zur Entsorgung des Anteils pflanzlicher Abfälle, aber auch die Düngung der Felder mit Hofdüngern²⁶, Mineraldüngern und Grüngütdüngern. Hingegen sind die überwiegend für andere Zwecke als zur Nahrungsmittelproduktion angebauten Nutzpflanzen (Hanf, Flachs) ausgenommen sowie der Garten- und Landschaftsbau.

Explizit eingeschlossen sind auch die zur Tierhaltung genutzten landwirtschaftlichen Weideflächen, nicht jedoch die Tiere selbst.

Die forstwirtschaftliche Pflanzenproduktion umfasst die Produktion und den Im- und Export von Nutzholz, seine Verarbeitung zu Holzgütern, Energieholz und die Produktion in der Zellstoff- und Papierindustrie.

Hinzu kommen der Im- & Export von Lebensmitteln, Holz und Papier.

Landwirtschaft Pflanzen:
Verarbeitung & Handel

Der Prozess Produktion, Handel & Vertrieb nichtbiogener Güter umfasst die Verarbeitung, den Vertrieb und den Im- und Export jener phosphorrelevanten Produkte, die nicht aus der Tierhaltung oder dem Pflanzenbau stammen. Untersucht werden phosphorhaltige Reinigungsmittel und phosphorhaltige Chemikalien.

Produktion, Handel & Vertrieb
nichtbiogener Güter

Der Prozess Konsum umfasst die phosphorrelevanten Aktivitäten im direkten Umfeld des Menschen und seinen Siedlungen. Dies sind die Zubereitung sowie die menschliche Aufnahme und Abgabe von Nahrung, die häusliche Reinigung (Wäsche, Putzen) ebenso wie die Nutzung von Papier und Holzgütern. Darüber hinaus wird die Nutzung von Holz zur Energiegewinnung gezählt.

Phosphor: Summe des Nahrungs- und Waschmittel-Inputs werden genannt: 2330 tP, unbekannter P-Export aus Haushalten (dazu unbekannter P-Import und P-Export in/aus Industrie) (Schluep, Thomann et al. 2006).

Konsum (Haushalt und Gewerbe)

Der Prozess Abfallwirtschaft umfasst die technischen Anlagen zur Entsorgung der Abfälle in der Schweiz. Für die festen Abfälle sind die Kehrlichtverbrennungsanlagen (KVA), die Klärschlamm- Monoverbrennungsanlagen und die industriellen Verbrennungen, allen voran die Verbrennung in Zementwerken. Für das Abwasser wird die Siedlungswasserwirtschaft mit den Kanalisationen und den Abwasserreinigungsanlagen (ARA) bilanziert. Hinzu kommt die Deponierung der Abfallprodukte aus den technischen Abfallbehandlungsprozessen.

Abfallwirtschaft

Bei den biogenen Abfällen werden die Kompostierung und die Vergärung berücksichtigt.

²⁶ Mit Ausnahme der Austräge von Hofdünger auf den Bauernhöfen, d.h. der Fluss Ausschwemmung Exkremete, wird der gesamte anfallende Hofdünger als Fluss in die Landwirtschaft Pflanzen geführt, also auch jene Mengen, die zur Düngung der Viehweiden dienen, da das Viehfutter von Weiden (Stroh, Heu etc.) dem Subprozess Pflanzenwirtschaft angehört.

A2-1.2

Der Prozess Oberflächengewässer umfasst die Flüsse, Bäche und Seen der Schweiz mit ihren Sedimenten. Phosphor kann an der Grenzschicht zwischen Wasserkörper und Sedimentkörper partikulär ausfallen.

Oberflächengewässer

Interne Flüsse

Hofdünger ist die Summe der in der Viehwirtschaft anfallenden Produkte Stallmist und Gülle, die aufgrund ihrer Nährstoffzusammensetzung und einem positiven Einfluss auf die Bodeneigenschaften zur in der Pflanzenproduktion zur Düngung eingesetzt werden.

Hofdünger (A12)

Stallmist, bestehend aus Stalleinstreue und Tierexkrementen, wird zur Düngung den Böden untergepflügt oder auf Wiesen gestreut, in der Regel nach einer Stapelgärung (Frei & Peyer 1991). Gülle ist das in Wasser aufgeschwemmte teils flüssige Ausscheidungsprodukt der Tiere aus dem Stall (Frei & Peyer 1991). Sie ist relativ phosphatarm und wird überwiegend auf Wiesen, seltener im Ackerbau verwendet. Beim Einsatz von Gülle droht bei verminderter Aufnahme im Boden Nährstoffverlust und Grundwasserverschmutzung.

Nahrung des Menschen, die aus der Tierhaltung gewonnen wird. Hierzu zählen Fleisch, Innereien, Eier, Milch, Honig sowie Produkte daraus, unabhängig vom Herkunftsland.

Tierische Nahrung (A14)

Abfälle aus der Verarbeitung tierischer Nahrungsmittel in der Schweiz. Vereinfachend wird hier nur die Fleischverarbeitung behandelt²⁷: Schlachtabfälle aus den Stufen Schlachtereie und Zerlegerei (ausgebeinte Tierknochen, Schlachtabgang, Sehnen und Fettabschnitte), inklusive der Rohstoffe, die gekühlt exportiert und im Ausland zu Futtermittel und Heimtiernahrung verarbeitet werden.

Tierische Abfälle (A15)

Nicht darin enthalten sind lebensmitteltaugliche Nebenprodukte, die zu Nahrungsmitteln aufbereitet werden (z. B. Speisefette), Nutztier-, Heimtier- und Versuchstierkadaver. Die Kadaver sind von untergeordneter Bedeutung (ca. 10 % der Phosphorfracht in tierischen Nebenprodukten (Lamprecht 2004).

Ausschwemmungsverluste gelöster und partikulärer Bestandteile («run-off») von Exkrementen aus den Tierstallungen der Bauernhöfe (d. h. ohne Viehweideflächen; vgl. Fluss A26).

Ausschwemmungsverluste Exkremente (A16)

Feldfrüchte, die innerhalb der schweizerischen Landwirtschaft im Pflanzenbau gewonnen, teilweise verarbeitet und zur Fütterung in der Tierhaltung eingesetzt werden. Dies schliesst folgende Feldfrüchte ein: Futtergetreide, Futtererbsen, Futterrüben, Grünfütter, Heu, Emd, Silomais, Stroh, Lupinen, Kartoffeln.

Futter (A21)

Anteil Mineraldünger, der ausserhalb des Pflanzenbaus eingesetzt wird, sondern in den Gärtnereien und Gärten der Haushalte. Aus Darstellungsgründen wird dieser Fluss durch den Prozess Landwirtschaft Pflanzen geführt.

Mineraldünger in Gärten (A24_1)

²⁷ In der Schweiz wird für die Abfälle aus der Fleischverarbeitung der Begriff «Tierische Nebenprodukte aus der Fleischverarbeitung» verwendet ().

<p>Nahrung des Menschen, die aus dem Pflanzenbau gewonnen wird, unabhängig vom Herkunftsland. Hierzu zählen Getreide, Kartoffel und Stärke, Zucker, Sirup, Honig, Hülsenfrüchte, Nüsse, Kastanien, Kakao, Gemüse, Obst, pflanzliche Öle und Fette sowie Produkte daraus. Daneben sind Getränke enthalten.</p>	<p>Pflanzliche Nahrung (A24_2)</p>
<p>Der Fluss Holzgüter umfasst die aus Holz hergestellten Güter, die in den Gebäuden und bei deren Erstellung genutzt werden, das sind Bauholz, Möbel und sonstiges Holz.</p>	<p>Holzgüter (A24_3)</p>
<p>Der Fluss Energieholz umfasst das Holz, das zur Energiegewinnung in der Schweiz eingesetzt wird, unabhängig vom Verarbeitungsgrad. Hierzu zählen Restholz, Holzschnitzel und Sägemehl, doch ein zunehmender Anteil wird aufgrund der besseren Handhabbarkeit zu Pellets verarbeitet. Abfallholz, aus dem bei der Verbrennung in der KVA Energie gewonnen wird, wird hier nicht berücksichtigt.</p>	<p>Energieholz (A24_4)</p>
<p>Der Fluss «Papier» umfasst das Papier und den Karton, die in den Haushalten und Gewerben und sonstigen Bereichen (Büronutzungen) genutzt wird einschliesslich Verpackungen.</p>	<p>Papier (A24_5)</p>
<p>Pflanzliche Abfälle, die bei der Verarbeitung von Nahrungsmittelrohstoffen in der Nahrungsmittelindustrie anfallen.</p>	<p>Pflanzliche Abfälle Verarbeitung (A25)</p>
<p>Oberflächenabfluss mit erodiertem Material, der in die Oberflächengewässer gespült wird, aus dem Pflanzenbau inklusive Viehfutterbau sowie aus den zur Tierhaltung genutzten landwirtschaftlichen Weideflächen.</p>	<p>Oberflächenabfluss & Erosion (A26)</p>
<p>Phosphat- und phosphonathaltige Reinigungsmittel. Hierzu gehören Geschirrspülmittel, allgemeine Reinigungsmittel, Spezialreinigungsmittel, Reinigungsmittel für die Industrie. Der Einsatz von Phosphor in Textilwaschmitteln und Waschhilfsmitteln ist heute stark eingeschränkt; Seifen enthalten keinen Phosphor. Diese Produktgruppen werden daher vernachlässigt. Eine Einschränkung des Einsatzes von Phosphaten in Geschirrspülmitteln wurde in den vergangenen Jahren durch mehrere Motionen im Nationalrat diskutiert, doch jeweils abgelehnt (z. B. Motion zum Verbot von Phosphaten in Geschirrspülmitteln, von Ueli Leuenberger vom 14.12.2004).</p>	<p>Reinigungsprodukte (A34)</p>
<p>Abwasser aus der Industrie, welches durch industrieeigene Klärstufen vorgeklärt und anschliessend in die kommunale ARA eingeleitet wird. Der Anteil des Abwassers aus der Industrie, der nach Klärung in industrieeigenen ARA direkt in die Vorfluter eingeleitet wird oder ungeklärt in die Vorfluter eingeleitet wird, wird hier vernachlässigt.</p>	<p>Industrieabwasser (A35)</p>
<p>Altpapier umfasst jene Papier- und Kartonmengen, die nach ihrer Nutzung erneut in der Zellstoff-, Papier- und Kartonindustrie als Rohstoff in der Papier- und Kartonherstellung verwertet werden.</p>	<p>Altpapier (A42)</p>
<p>Sämtliches Abwasser aus den Haushalten und aus Industrie und Gewerbe, jedoch ohne den Anteil des Industrieabwassers (Fluss A35).</p>	<p>Abwasser Konsum (A45_1)</p>

Kehricht ist der Anteil der Siedlungsabfälle aus den privaten Haushalten und aus Industrie und Gewerbe, der nicht verwertet werden kann und deshalb in Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA) verbrannt werden muss. Kehricht wird in der Schweiz kommunal gesammelt. Im Flusse Kehricht enthalten ist auch das Sperrgut enthalten, d. h. jener Anteil, der wegen seiner Abmessungen nicht in Kehrichtsäcke passt und direkt an die KVA angeliefert wird. Hinzu kommen brennbare Bauabfälle, Sonderabfälle und übrige Abfälle, jedoch nicht der in KVA verbrannte Klärschlamm.

Kehricht (A45_2)

Der Kehricht wird in der Schweiz bis auf Ausnahmen in KVA entsorgt; die im- und exportierten Abfallmengen werden in diesem Fluss berücksichtigt, doch der besseren Übersicht wegen nicht als Im-/Exporte ausgewiesen, sondern dem schweizerischen Kehricht zugeordnet²⁸ (Bundesamt für Umwelt 2007b).

Kompostierbare Abfälle aus dem Prozess Konsum, die durch die kommunale Grüngutsammlung den Verwertungsanlagen zur Behandlung zugeführt werden (auch Grünabfuhr genannt), d. h. Grüngut aus den kommunalen Sammeldiensten (inkl. Gartenabfälle aus den privaten Hausgärten), aus dem Gartenbau (Gärtnereien), aus der Industrie und den öffentlichen Diensten (kommunale Gartenanlagen) (vgl. ARGE Jahresbericht zu den Inspektionen 2007). Darin eingeschlossen sind die Mengen aus Grossküchen, die der Vergärung zugeführt werden.

Grüngut (A45_3)

Lebensmittel- und Speiseabfälle aus den privaten Haushalten sind ausgeschlossen, da sie in den Gärten von Haushalten oder über mit dem Kehricht entsorgt werden. Widerrechtlich über das Grüngut entsorgte Lebensmittel- und Speiseabfälle, werden hier vernachlässigt. Ebenso werden die in grösseren Mengen anfallende Lebensmittel- und Speiseabfälle aus Grossküchen, die für die Tierfütterung als Futtersuppe verwendet werden, hier vernachlässigt. Eine Einschränkung der Nutzung von Futtersuppe ist zurzeit im Gange. Fremdstoffe im Grüngut machen ca. 1 %wt. aus und werden vor der Kompostierung bzw. Vergärung entfernt (Edelmann & Schleiss 2001); sie werde hier vernachlässigt.

Die Zusammensetzung des Inputs, also welche Anteile der o.g. Fraktionen in welchen Anteilen und Qualitäten vorliegen, beeinflusst die Elementkonzentrationen des Grünguts. Gegenüber dem Ausland ist in der Schweiz der Trockensubstanz-Anteil des Grünguts mit 40–50 %wt. (Edelmann & Schleiss 2001) relativ konstant, da quasi keine Essensreste verarbeitet werden. Dies deutet darauf hin, dass auch die Zusammensetzung relativ homogen im Vergleich zum Ausland ist.

Abgase der Energiegewinnung aus Holz in Haushalten und in Holzverbrennungsanlagen.

Abgas Energiegewinnung
Konsum (A45_4)

Als fester Rückstand des Klärprozesses fällt in den Abwasserreinigungsanlagen (ARA) Klärschlamm an. Seit der Einführung des Düngeverbotes für Klärschlamm²⁹ entfällt die Verwertungsmöglichkeit in der Landwirtschaft, die zuvor ein bedeutender Entsorgungsweg für Klärschlamm aus kommunalen ARA war. Der Klärschlamm wird zur Zeit thermisch in KVA oder anderen Verbrennungsanlagen entsorgt (Laube &

Klärschlamm in Landwirtschaft
(A52_1)

²⁸ Der Net-Import beträgt 8.3 %Gew. bezogen auf die in den KVA entsorgten Mengen.

²⁹ Das Düngeverbot wurde vom Bundesrat stufenweise eingeführt: ab Ma 2003 durfte kein Klärschlamm mehr als Düngemittel im futter- und Gemüsebau eingesetzt werden, ab Januar 2006 galt dies auch für die übrigen düngbaren Flächen (im Einzelfall von den Kantonen verlängerbar bis 2008).

Vonplon 2004). Nur in Ausnahmefällen kann Klärschlamm nach Aufbereitung in die Landwirtschaft eingebracht werden; diese Ausnahmen sind im Fluss Klärschlamm in die Landwirtschaft zusammengefasst.

Grüngütdünger in Landwirtschaft sind die Produkte aus der Kompostierung und der Vergärung von biogenen Abfällen aus Anlagen mit einer Verarbeitungsmenge > 100 t/a, welche in der Landwirtschaft eingesetzt werden. Vom Gärgut wird der überwiegende Anteil in der Landwirtschaft eingesetzt.
Güterebene: Aus methodischen Gründen wird nur die Trockensubstanz berücksichtigt.

Grüngütdünger in Landwirtschaft (A52_2)

Grüngütdünger in Gärten sind die Produkte aus der Kompostierung und der Vergärung von biogenen Abfällen aus Anlagen mit einer Verarbeitungsmenge > 100 t/a, welche in den Gärten eingesetzt werden, das sind Gartenanlagen von Gärtnereien und privaten Haushalten sowie kommunale Grünanlagen.
Güterebene: Aus methodischen Gründen wird nur die Trockensubstanz berücksichtigt.

Grüngütdünger in Gärten (A54)

Gereinigtes Abwasser, das aus den kommunalen Abwasserreinigungsanlagen (ARA) nach der Klärung in die Vorfluter geleitet wird

Gereinigtes Abwasser (A56_1)

Abwasser, das aus den kommunalen Abwasserreinigungsanlagen (ARA) aufgrund Kapazitätsüberschreitung ungeklärt bzw. nach Durchlauf eines Auffangbeckens in die Vorfluter geleitet wird, wird Regenüberlauf genannt. Er entlastet die ARA von überschüssigem, ungeklärtem Abwasser, das durch Regenwasser verdünnt wird. Vielerorts wird der Regenüberlauf vorgeklärt.
Die Menge des Regenüberlaufs wird nicht systematisch statistisch erfasst. Es existieren nur Abschätzungen des Anteils, der als Regenüberlauf aus den ARA gelangt (Herren 2008).

Regenüberlauf (A56_2)

A2-1.3 Importe

Der Fluss Futter Net Import umfasst den Aussenhandel von Futter für die Tierhaltung in der Schweiz (Import) bzw. ausserhalb der Schweiz (Export). Berücksichtigt werden Stroh, Heu, Rückstände aus der Produktion von Zucker und Stärke, von Sojaöl und anderen Ölen, Backfutter und anderes zubereitetes Futter sowie andere Tierfutter pflanzlicher Art (Güterauswahl wurde an Datenstruktur des Schweizerischen Bauernverbandes angepasst).

Futter Net Import (I1)

Importüberschuss von Tieren in Bezug auf die landwirtschaftliche Tierhaltung in der Schweiz, das sind die Importe von Masttieren und die Exporte von Schlachttieren (Exporte von Masttieren und Importe von Schlachttieren werden hier vernachlässigt). Importüberschuss von lebenden Tieren, d. h. Schlachttiere Export – Masttiere Import.

Tiere Net Import (I2)

Importüberschuss von tierischen Nahrungsmitteln und Nahrungsrohstoffen, d. h. tierische Nahrungsmittel Inland – tierische Nahrung für den Konsum in der Schweiz.

Tierische Nahrungsmittel Net Import (I3)

Der Fluss Mineräldünger Import bildet die importierte Menge von Mineräldünger für den Pflanzenbau und die Gärten (Gärtnereien, Gärten von Haushalten) ab. Dies

Mineräldünger Import (I4)

schliesst neben den importierten Handelsdüngern, die das Gros ausmachen, auch die Düngerrohstoffe ein, die in der Schweiz durch Mischen zum Handelsdünger verarbeitet werden³⁰.

Der Mineraldünger in der Schweiz wird vollständig importiert; Re-Exporte werden hier vernachlässigt.

Importüberschuss von pflanzlichen Nahrungsmitteln: pflanzl. Nahrungsmittel Import – pflanzl. Nahrungsmittel Export (jeweils einschliesslich Nahrungsmittelrohstoffen)

Pflanzliche Nahrungsmittel Net Import (I5)

Importüberschuss von Chemikalien mit Phosphorrelevanz: Chemikalien Import – Chemikalien Export.

Chemikalien Net Import (I6)

Importüberschuss von Produkten: Produkte Import – Produkte Export. Berücksichtigt wurden die Geschirrspülmittel und die Reinigungsmittel (ohne Textilwaschmittel, Waschhilfsmittel, Seifen)³¹.

Produkte Net Import (I7)

Niederschlagsmengen plus Trinkwassermengen, die in den Siedlungen gesammelt und durch die Kanalisation abgeführt werden. Nicht berücksichtigt werden jene Mengen, die im Siedlungsgebiet verdunsten, in den Boden versickern, direkt durch die Vorfluter abgeleitet werden oder anderweitig dem Kanalisationssystem verloren gehen.

Niederschlag Siedlungen (I8)

A2-1.4 Exporte

Exportüberschuss von Holz: Holz Export – Holz Import. Berücksichtigt wurden: Stamm-, Industrie- und Schnittholz, Furniere, Sperrholz, Spanplatten, Faserplatten, Rest- und Altholz, Halbfabrikate, Baumaterial.

Holz & Papier Net Export (E1)

Export von Flugasche aus den Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA) und den Klärschlamm-Monoverbrennungsanlagen (KS-MV). Das Gros der Flugaschen wird in Reststoffdeponien bzw. -kompartimenten in der Schweiz abgelagert. Die exportierten Flugaschen werden überwiegend in Untertagedeponien in Deutschland entsorgt, untergeordnet auch in Frankreich aufbereitet (Hügi 2008). Aus Gründen der Visualisierung werden die exportierten Flugaschen als Output der Reststoffdeponie geführt (als Summe der Flugasche aus den KVA und KS-MV).

Flugasche Export (E2)

Abfälle, die bei der Verarbeitung tier. Nahrungsmittel anfallen und als tierische Abfälle exportiert werden: tier. Abfälle – tier. Abfälle in andere Verbrennung. Berücksichtigt wurden tierische Nebenprodukte (TNP) inkl. Güter, die im Ausland verzehrt werden oder als Heimtiernahrung, sogenanntes «Pet-Food», verarbeitet werden. Gemäss Verordnung über die Entsorgung tierischer Nebenprodukte dürfen nur TNP der Kategorie 3 exportiert werden (Schweizerischer Bundesrat 2004b, BVET 2008); zudem ist der Export von TNP bewilligungspflichtig und muss dem BVET monatlich

Tier. Abfälle Export (E3)

³⁰ Handelsdünger werden in der Schweiz nur noch vereinzelt hergestellt, wobei die eigentliche Produktion im Ausland erfolgt und in der Schweiz lediglich die Mischung durch die Importeure. Gemäss Angaben der Treuhandstelle der schweizerischen Düngerpflanzlagerhalter (TSD) sind dies die Fa. Hauer (Gartendünger), Fa. Uetikon und Fa. Lonza AG (nur N-Dünger)(Zulliger 2008)

³¹ Phosphor tritt in Spuren in diversen Materialien bzw. Produkten auf, beispielsweise als Weichmacher oder Flammschutzmittel in Kunststoffen, aber auch in Edeltählen. Solche Spuren von Phosphor werden hier nicht berücksichtigt aufgrund von Irrelevanz.

gemeldet werden (Schweizerischer Bundesrat 2007)³². Hierzu zählen auch Knochen, Schwarten, Fette, Geflügelkarkassen, Häute und Felle aus Schlachtereien und TNP-verarbeitenden Betrieben, insbesondere Schweineknochen (Lamprecht 2004), die häufig im grenznahen Deutschland oder Frankreich weiterverarbeitet oder zunehmend nach Asien exportiert werden.

Austritt der Abgase aus den vier Entsorgungsprozessen Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA), Klärschlamm-Monoverbrennung (KS-MV), Kompostierung und Vergärung in die Atmosphäre, einschliesslich Wasserdampf.

Abgas in Atmosphäre (E4)

Natürlicher Abfluss von Flüssen und Bächen ins Ausland (d.b. ohne Grundwasser). Vereinfachend wird hier der natürliche Abfluss ins Ausland gleichgesetzt mit dem Abfluss aus den drei Flüssen Rhein, Rhone und Inn, wo sie die Schweiz verlassen. Für den Rhein wurde die Messstelle Weil am Rhein als Referenz gewählt; die Messkampagnen mit Abflussmengen und Stofffrachten wurden letztmalig für das Jahr 2000 durch die Internationale Kommission zum Schutz des Rheins IKSR dokumentiert (IKRK 2003)³³.

Natürlicher Abfluss ins Ausland (E5)

A2-2 Landwirtschaft Tiere

(ehemals: Landwirtschaft Tiere mit Verarbeitung und Handel)

A2-2.1 Prozesse

Der Prozess Tierhaltung umfasst die Haltung von Nutztieren in der Landwirtschaft der Schweiz, einschliesslich der Fütterung. Räumlich bezieht sich dieser Prozess auf die Höfe, ohne die Felder für die Tierhaltung oder Futtergewinnung.

Tierhaltung

Sammelprozess für den Aussenhandel lebender Tiere, das sind Masttiere (Jungtiere für die Aufzucht) und Schlachttiere (Tiere für die Schlachtung).

Handel Tiere

Verarbeitung der tierischen Nahrungsmittel, d.h. die Schlachtung von Tieren (Schlachttiere) und die Fleischverarbeitung. Darin eingeschlossen ist die Verarbeitung der tierischen Nebenprodukte (TNP) bis zum handelbaren Gut bzw. bis zu deren Entsorgung, wobei die Tierkadaver aus der landwirtschaftlichen Tierhaltung und den Haushalten einbezogen sind. Die knochenreichen Fleischteile der Fleischverarbeitung werden zu Mehl und Tierfett verarbeitet, die Weichteile (Innereien, Pressfleisch, Karkassen, Grieben) zu Futtersuppe und Heimtiernahrung; daneben fallen Häute und Felle an.

Verarbeitung tierischer Nahrungsmittel

Bei der Verarbeitung weiterer tierischer Nahrungsmittel werden Milch, Eier und Honig berücksichtigt.

³² Trotz der Meldepflicht für TNP ist eine Aufschlüsselung auf die verschiedenen Produkte zur Zeit nicht möglich (BVET 2008). Zudem ist die bewilligte exportierte Menge systematisch kleiner als die exportierte Menge, da Ausnahmen für Knochen und Schwarten möglich sind, welche lebensmittelkonform behandelt werden; ebenso sind verarbeitete TNP nicht bewilligungspflichtig (BVET 2008).

³³ Weitere mögliche Datenquellen sind das Projekt MONERIS, das durch das deutsche Umweltbundesamt zur Nährstoffbilanzierung von Meeresinträgen durchgeführt wurde.

A2-2.2	Flüsse	Sammelprozess für die im In- oder Ausland verarbeiteten tierischen Nahrungsmittel, die in den schweizerischen Aussenhandel gelangen und/oder in der Schweiz konsumiert werden. Bei den Rohwaren sind die Verpackung und der Verkauf dieser tierischen Nahrungsmittel eingeschlossen.	Handel & Vertrieb tierischer Nahrungsmittel
		Lebende Tiere, die zum Schlachten im Ausland exportiert werden.	Schlachttiere Export (1_A12)
		Lebende Tiere, die in schweizerischen Schlachthöfen geschlachtet und zu tierischen Nahrungsmitteln verarbeitet werden. Hier wird das Lebendgewicht der Tiere von beschauten Schlachtungen plus Hausschlachtungen angegeben. Berücksichtigt wurden Ochsen, Rinder, Stiere, Kühe, Kälber, Schweine, Schafe, Ziegen, Pferde, Geflügel, Kaninchen, Wildbret (Zuchtwild, ohne Wildtiere), Zuchtfische.	Schlachttiere (1_A13_1)
		Milch, Eier und weitere unverarbeitete Nahrungsmittel (Honig) aus der schweizerischen Tierhaltung.	Milch & Eier (1_A13_2)
		Lebende Tiere, die zur Mast in der Schweiz importiert werden.	Masttiere Import (1_A21)
		Der Fluss Futtersuppe fasst die Rückstände aus der Verarbeitung tier. Nahrungsmittel zusammen, die nicht für den Verzehr durch den Menschen bestimmt sind und nicht verbrannt oder exportiert werden. Der Einsatz der Futtersuppe wird aktuell im Rahmen der Harmonisierung von EU-Recht auch in der Schweiz zur Diskussion gestellt bzw. eingeschränkt.	Futtersuppe (1_A31)
		tierische Nahrungsmittel, die in der Schweiz erzeugt und verarbeitet wurden (Fleisch, Fleischerzeugnisse, Eier, Milch und Milchprodukte) und anschliessend und im In- oder Ausland konsumiert werden.	tierische Nahrungsmittel Inland (1_A34)
A2-3	Landwirtschaft Pflanzen	(ehemals: Landwirtschaft Pflanzen mit Verarbeitung und Handel)	
A2-3.1	Prozesse	Die Pflanzenproduktion umfasst die schweizerische Landwirtschaft ohne die Tierhaltung. Nicht enthalten sind die Forstwirtschaft (s.d.) und die Gärtnereien bzw. die Bewirtschaftung in den Gärten der Haushalte (Subsystem Konsum). Phosphor ist bei der Pflanzenproduktion bedeutender Hauptnährstoff – neben N und K -, der aufgrund der essentiellen Bedeutung im Pflanzenwachstum limitierend auftreten und zu Wachstumsmangel führen kann.	Pflanzenproduktion

Phosphor tritt im Boden i.d.R. als Phosphat auf³⁴, wodurch es stark gebunden ist. Die zurückgehaltenen Phosphate bilden das Lager des Prozesses, wobei die Phosphatverluste überwiegend durch die Erosion bestimmt sind (Frei & Peyer 1991)(Annahme Bodenmächtigkeit 0,5 m). Die P-Konzentration in Böden und ihre globalen Ein- und Austräge in sind in der Fachliteratur beschrieben (Scheffer, Schachtschabel et al. 1998). Der Phosphor in den Pflanzen wird aufgrund seiner geringen Bedeutung und des hohen Berechnungsaufwandes hier vernachlässigt.

Der Nährstoffentzug [kg/ha] hängt von der Pflanzenart und Sorte sowie dem Gesamtertrag ab. Für häufig vorkommende landwirtschaftliche Kulturen befindet sich der jährliche P₂O₅- Entzug im Bereich 50–110 kg/ha, was sich in der Düngungsnorm (40–110 kg/ha) niederschlägt, (vgl. Frei & Peyer 1991). Der jährliche P-Entzug beträgt 16–30 kg/ha (Scheffer, Schachtschabel et al. 1998). Die Zusammenhänge der benötigten Nährstoffmenge, der Düngieranwendung und eingesetzter Dünger ist in der Fachliteratur diskutiert (Frei & Peyer 1991). Die Einträge durch atmosphärische Deposition ist wesentlich geringer und wird hier vernachlässigt³⁵.

Sammelprozess für verarbeitete pflanzliche Nahrungsmittel und deren Rohstoffe, die zum Konsum oder zur Verarbeitung in den schweizerischen Aussenhandel gelangen, unabhängig von ihrem Produktions- oder Verarbeitungsort.

Handel pflanzlicher Nahrungsmittel

Der Prozess Verarbeitung & Vertrieb pflanzlicher Nahrungsmittel umfasst die Verarbeitung der pflanzlichen Nahrungsmittelrohstoffe zu Nahrungsmitteln.

Verarbeitung & Vertrieb pflanzlicher Nahrungsmittel

Der Prozess Forstwirtschaft umfasst die Holzproduktion in den schweizerischen Forsten (ohne Parks und Gärten). Das Lager des Prozesses umfasst die Waldböden (Annahme Bodenmächtigkeit 1 m) und die Menge an dort im Baumbestand vorrätigem Holz (Bundesamt für Umwelt 2008b).

Forstwirtschaft

Sammelprozess für Holz, Papierrohstoffe (Zellstoff, Holzschliff), Papier und Altpapier, die zum Konsum oder zur Verarbeitung in den schweizerischen Aussenhandel gelangen, unabhängig von ihrem Produktions- oder Verarbeitungsort.

Handel Holz & Papier

Der Prozess Verarbeitung & Vertrieb Holz umfasst die Holzindustrie, holzverarbeitende Industrie einschliesslich der Zellstoffindustrie, die aus dem inländischen und ausländischen Nutzholz Produkte (Holzgüter wie beispielsweise Möbel), Rohstoffe (Roh- und Halbfertigwaren, Zellstoff, Holzschliff) und Energieholz erzeugen und verkaufen. Altholz³⁶ wird i.d.R. thermisch verwertet (überwiegend in KVA) und daher nicht hier berücksichtigt.

Verarbeitung & Vertrieb Holz

Der Prozess Verarbeitung & Vertrieb Papier umfasst die Papier- und Kartonindustrie, die aus inländischen und ausländischen Papierrohstoffen (Zellstoff, Holzschliff, Altpa-

Herstellung & Vertrieb Papier

³⁴ Im anorganischen Mineralhaushalt spielen Eisenphosphate in Nassböden (Vivianit) oder sauren Böden (Strengit) eine Rolle. Daneben tritt er auch als Kalziumphosphat (Apatit) auf.

³⁵ Der jährliche Phosphoreintrag in die Böden durch Freilandniederschläge beträgt 0,1–1,2 kg P/ha (in Form von H₂PO₄) und kann in Waldgebieten um das 2–5fache höher liegen (Scheffer, Schachtschabel et al. 1998). Ein ähnlich grosser Phosphoreintrag ist durch Trockendisposition möglich (Boller 2008).

³⁶ Holz aus Gebäudeabbrüchen, Umbauten, Renovationen und Altholz aus Verpackungen oder alte Holzmöbel (Bundesamt für Umwelt 2008a).

A2-3.2 Flüsse

pier) die Produkte Papier und Karton für den inländischen oder ausländischen Konsum erzeugt. Hinzu kommt der Verkauf der Produkte in den schweizerischen Konsum, einschliesslich der importierten Papier- und Kartonmengen.

Der Fluss Nahrungsmittelrohstoffe umfasst die in der inländischen Pflanzenproduktion erzeugten Rohstoffe, das sind Getreide, Feldfrüchte, Früchte, ... Getränke werden hier vernachlässigt.

Pflanzliche
Nahrungsmittelrohstoffe (2_A12)

Import von pflanzlichen Nahrungsmitteln und Nahrungsmittelrohstoffen, die in der Schweiz verarbeitet werden und/oder in der Schweiz verzehrt werden.

Pflanzliche Nahrungsmittel Import
(2_A23)

Export von pflanzlichen Nahrungsmitteln und Nahrungsmittelrohstoffen, die im Ausland verzehrt und/oder im Ausland verarbeitet werden.

Pflanzliche Nahrungsmittel Export
(2_A32)

Nutzholz ist die Gesamtmenge Holz, das den schweizerischen Forsten durch die Forstwirtschaft entnommen wird, um es in der Holzindustrie zu verarbeiten, als Energieholz einzusetzen oder als Holz Export auszuführen. Dabei wird dasjenige Holz berücksichtigt, das durch die Forstämter registriert und damit durch das Bundesamt für Statistik erfasst wird (Schweiz Bundesamt für Statistik 2002); illegal entnommenes Holz wird als geringfügig eingeschätzt und hier vernachlässigt.

Nutzholz (2_A46)

Import von Nutzholz einschliesslich Roh- und Halbfertigwaren aus Holz, das in der Schweiz verarbeitet oder verwertet wird.

Holz Import (2_A56)

Import von Papier sowie von Papierrohstoffen wie Holzschliff, Zellstoff und Altpapier zum Einsatz in der Schweiz als Rohstoff in Papier- und Kartonfabriken. «Neu-Papier» als Konsumgut (Papier) wird durch den Prozess Herstellung & Vertrieb Papier in den schweizerischen Konsum geleitet.

Papier & Papierrohstoffe Import
(2_A57)

Export von Nutzholz aus der inländischen Forstwirtschaft einschliesslich Roh- und Halbfertigwaren aus Holz, das im Ausland verarbeitet oder verwertet wird. Den überwiegenden Anteil macht Stammholz aus.

Holz Export (2_A65)

Rohstoffe der Papier- und Kartonindustrie aus der inländischen Holzverarbeitenden Industrie einschliesslich der Zellstoffindustrie, d.h. Holzschliff und Zellstoff, zur Produktion von Papier und Karton.

Papierrohstoffe (2_A67)

Export von Papier sowie von Papierrohstoffen wie Holzschliff, Zellstoff und Altpapier zum Einsatz im Ausland als Rohstoff in Papier- und Kartonfabriken. «Neu-Papier» als Konsumgut (Papier) wird durch den Handel Holz & Papier in den ausländischen Konsum geleitet.

Papier & Papierrohstoffe Export
(2_A75)

A2-4 Chemische Industrie

(ehemals: Produktion, Handel & Vertrieb nichtbiogener Güter)

A2-4.1 Prozesse

Der Prozess Produktion & Vertrieb nichtbiogener Güter umfasst die Produktion von phosphorrelevanten Gütern in der Schweiz, soweit sie nicht Prozessen in den anderen Subsystemen zuzuordnen sind. Dies ist die Produktion in der chemischen Industrie. Beim Vertrieb werden hier ausschliesslich die diversen phosphat- und phosphonathaltigen Reinigungsmittel berücksichtigt. Hinzu kommen die Abwassermengen aus der Industrie, die aufgrund ihrer Verunreinigungen in werkseigenen Abwasserreinigungsanlagen geklärt bzw. vorgeklärt werden, bevor sie kommunalen Abwasserreinigungsanlagen zugeführt werden.

Produktion & Vertrieb nichtbiogener Güter

Sammelprozess für phosphorhaltige Chemikalien und Rohstoffe, die in den schweizerischen Aussenhandel gelangen, um sie im Inland oder Ausland in der Produktion der chemischen Industrie zu verarbeiten oder zu vertreiben.

Handel Chemikalien

Sammelprozess für phosphorhaltige Produkte, die in den schweizerischen Aussenhandel gelangen, um sie im Inland oder Ausland zu verarbeiten oder zu vertreiben. Berücksichtigt werden hier ausschliesslich die diversen phosphorhaltigen Reinigungsmittel.

Handel Produkte

A2-4.2 Flüsse

Export phosphorhaltiger Chemikalien, die im Ausland in der Industrie verarbeitet oder vertrieben werden. Ausgenommen sind diejenigen Chemikalien, die eindeutig der Reinigungsmittel- oder Düngerindustrie zugeordnet werden können. Die Reinigungsmittel werden als Produkte Export ausgeführt.

Chemikalien Export (3_A12)

Export phosphorhaltiger Produkte, die im Ausland verarbeitet oder vertrieben werden. Berücksichtigt werden hier ausschliesslich die diversen phosphorhaltigen Reinigungsmittel.

Produkte Export (3_A13)

Import phosphorhaltiger Chemikalien, die in der Schweiz als Rohstoff in der Industrie verarbeitet werden. Ausgenommen sind diejenigen Chemikalien, die eindeutig der Reinigungsmittel- oder Düngerindustrie zugeordnet werden können. Die Reinigungsmittel werden als Produkte Import, die Düngervorstoffe als Mineraldünger Import eingeführt.

Chemikalien Import (3_A21)

Einfuhr phosphorhaltiger Produkte, die in der Schweiz verarbeitet oder vertrieben werden. Berücksichtigt werden hier ausschliesslich die diversen phosphorhaltigen Reinigungsprodukte (Geschirrspül- und Reinigungsmittel). Das sogenannte Phosphat-

Produkte Import (3_A31)

verbot erlaubt in der Schweiz seit 1986 keinen Einsatz von Phosphaten in Waschmitteln; im Rahmen der Übernahme des Cassis-de-Dijon-Prinzips³⁷.

Die Datenlage macht eine Hochrechnung der SKW-Mengen 2004 auf a) den Gesamtreinigungsmittelmarkt der Schweiz und b) das Stichjahr 2006 erforderlich.

A2-5 Haushalt & Gewerbe

(ehemals: Konsum)

A2-5.1 Prozesse

Der Prozess Siedlung mit Haushalten umfasst die Aktivitäten Wohnen und Arbeiten, soweit sie nicht durch Prozesse in den beiden landwirtschaftlichen Subsystemen oder die Produktion nichtbiogener Güter abgedeckt sind. Zentral ist die Aufnahme pflanzlicher und tierischer Nahrung durch den Menschen³⁸ (Haustiere werden hier vernachlässigt³⁹). Daneben wird die Nutzung von Holzgütern (u.a. Möbel) einbezogen. Der Papierkonsum, die Energiegewinnung aus Holz und die Gärten sind als eigenständige Prozesse im selben Subsystem ausgegliedert. Eingeschlossen sind jedoch die häuslichen Entsorgungsaufgaben aus diesen 3 Prozessen, sofern die Abfälle in den Kehricht (Altpapier, Holzasche) oder das Grüngut (Gartenabfall) verbracht werden. Mit Eintritt der Flüsse Fäkalien, Urin und Speisereste Abwasser in das Abwassersystem werden diese dem Prozess Sanitäranlagen & Entwässerung zugeordnet.

Siedlung mit Haushalten

Phosphorlager: Der menschliche Körper enthält ca. 0,7 kgP/capita (Baccini 1993). Unter der Annahme dieses Durchschnittswertes entspricht dies einem Gesamtlager in den Menschen der Schweiz von ca. 5300 ± 800 tP

Papierkonsum ist der Einsatz von Papier und Karton.

Papierkonsum

Energiegewinnung aus Holz umfasst die Verbrennungsprozesse, die in Holzkraftwerken, gewerblichen und privaten Heizungen unterschiedlicher Grösse die Energie aus Energieholz einschliesslich Pellets nutzbar machen. Dieser Prozess stellt im Gegensatz zur anderen (industriellen) Verbrennung keine thermische Entsorgung, sondern eine rein energetische Nutzung der überwiegend für diesen Zweck produzierten Güter dar. Aufgrund ihrer Klimaneutralität wird die Energiegewinnung aus Holz als einem nachwachsenden regionalen Energierohstoff in den vergangenen Jahren zunehmend gefördert und hat einen starken Nutzungsanstieg erfahren. Dementsprechend steigt auch der jährliche Ascheanfall an. In Grossfeuerungsanlagen fallen bis zu drei Aschefractionen an, die hier vereinfachend zusammengefasst werden, das sind Grob-, Zyk-

Energiegewinnung aus Holz

³⁷ Das Cassis-de-Dijon-Prinzip zielt auf einen Abbau von Handelshemmnissen im Warenverkehr zwischen der Schweiz und der EU. Es bedingt einen uneingeschränkten Marktzugang von in der EU bzw. der Schweiz zugelassenen Waren auf dem jeweils anderen Warenmarkt. Das Phosphatverbot in Waschmitteln ist eine von 18 geplanten Ausnahmen dieses Prinzips; die Ausnahmeregelung für importierte Waschmittel ist jedoch nur vorläufig (Neue Luzerner Zeitung vom 2.11.2007).

³⁸ Der durchschnittliche Einwohner nimmt nach bisherigen Untersuchungen ca. 530 g P/E a auf mit ebenso hoher Ausscheidung (METAPOLIS; Annahme: Fließgleichgewicht im menschlichen Körper). Dies entspricht einem Gesamtinput für die Schweiz im Jahr 2006 von 4000 tP/a.

³⁹ Es wird angenommen, dass die Exkremente der Haustiere vollständig durch den Kehricht entsorgt werden (ggf. über System «Robydog») und dort ausreichend bilanziert ist.

Ionflug- und Feinstflugasche. Die relevanten Entsorgungswege für Holzasche in der Schweiz sind die Verwendung als Dünger (hier werden der Einsatz im Wald und in der Landwirtschaft vereinfachend komplett in Holzasche in Gärten geführt) und die Entsorgung der Holzasche in KVA; aufgrund des überwiegend dezentralen Ascheanfalls sind industrielle Verwertungen nicht interessant (EnergieSchweiz).

Der Verbrennungsprozess in Kehrichtverbrennungsanlagen, bei dem auch aus Altholz Energie gewonnen wird, wird hier nicht berücksichtigt, ebenso die Vergärung, welche einen separaten Prozess darstellt.

Güterebene: Die Aschenmengen bei der Holzverbrennung hängen stark von der Art des Holzbrennstoffs ab und schwanken im Bereich 0,5–12,0%wt. (Nyfeler 2007). Daher wird die Aschemenge direkt eingegeben und nicht per Transferkoeffizient bestimmt.

Unter Gärten versteht man die Gartenanlagen von Gärtnereien und privaten Haushalten sowie kommunale Grünanlagen.

Gärten

Der Prozess Sanitäranlagen & Entwässerung umfasst die Reinigungsprozesse und die Entsorgung von menschlichen Exkrementen, die an das Abwassersystem gebunden sind. Dies schliesst den Einsatz von Reinigungsprodukten in den Siedlungen mit Haushalten, einschliesslich des Einsatzes im Gewerbe, ebenso ein wie denjenigen Anteil der Speisereste, der über das Abwassersystem entsorgt wird. Es wird davon ausgegangen, dass alle in der Schweiz vertriebenen Reinigungsprodukte im Abwasser Konsum entsorgt werden.

Sanitäranlagen & Entwässerung

A2-5.2 Flüsse

Phosphorinput: Der jährliche Gesamtinput in die Privathaushalte beträgt ca. 0,9 kg P/capita, wobei zu Beginn der 1990er Jahre 90 % davon in den Nahrungsmitteln und 10 % in den Reinigungsmitteln zu finden ist (Baccini 1993). Aufgrund der Dominanz des Phosphors im Lebensmittelbereich wird näherungsweise angenommen, dass der per capita-Verbrauch im Subsystem Konsum heute ähnlich gross ist. Dies entspräche einem Gesamtinput von ca. 6800± 800 tP/a.

Der Fluss Speisereste Gartenkompostierung beschreibt den Anteil der Speisereste, der in den Gärten der Haushalte auf Kompostieranlagen verwertet wird.

Speisereste Gartenkompostierung (4_A14)

Feste Ausscheidungen des Menschen, die über Sanitäranlagen durch das Abwassersystem entsorgt werden.

Fäkalien (4_A15_1)

Flüssige Ausscheidungen (Urin) des Menschen, die über Sanitäranlagen durch das Abwassersystem entsorgt werden.

Urin (4_A15_2)

Anteil der Speisereste aus Haushalten, der durch die häusliche Abwasseranlage statt über den Kehricht, das Grüngut oder Kompostieranlagen in Gärten entsorgt wird.

Speisereste Abwasser (4_A15_3)

Anteil des Altpapiers, der nicht über die Separatsammlung Altpapier entsorgt wird.

Altpapier in Kehricht (4_A21)

Der Fluss Holzasche in KVA umfasst die Aschenmenge aus den Verbrennungsanlagen zur Energiegewinnung aus Holz, die über den Kehricht entsorgt wird. Der Grossteil der heute anfallenden Holzasche wird über den Kehricht entsorgt, insbesondere jener in den urbanen Haushalten.

Holzasche in KVA (4_A31)

Der Fluss Holzasche in Gärten umfasst die Aschenmenge aus den Verbrennungsanlagen zur Energiegewinnung aus Holz, die direkt in den hauseigenen Gärten als Düngemittel verstreut oder kompostiert wird. Dieser Entsorgungsweg ist insbesondere bei ländlichen Haushalten von Bedeutung.

Holzasche in Gärten (4_A34)

Dieser Fluss umfasst die pflanzliche Biomasse, die als Gartenabfall die Gärten verlässt und über die kommunale Grüngutsammlung (Separatsammlung) verwertet wird. Dementsprechend ist die pflanzliche Biomasse ausgenommen, die in den Gärten der Haushalte oder ihrer direkten Umgebung verbleiben und dort durch per Haus- bzw. Quartierkompostierung verwertet werden.

Gartenabfall (4_A41)

A2-6 Abfallwirtschaft

A2-6.1 Prozesse

Verbrennungsprozess von Kehricht in Kehrichtverbrennungsanlagen, bei dem die festen Rückstände Schlacke (KVA-Schlacke) und Filterasche (KVA-Flugasche), auch E-Filterstaub genannt, entstehen. Dabei beträgt die Masse der Schlacke ca. 20 % der Kehrichtmasse, und die Masse der Filterasche ca. 20 % der Schlackenmasse (Morf 2006); Rückstände aus der Abwasserbehandlung (Schlamm) werden hier vernachlässigt.

Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA)

Nicht verwertete brennbare Abfälle sind in der Schweiz seit 2000 in geeigneten Feuerungsanlagen zu verbrennen. Die Differenz zwischen Anlieferung und Entsorgung, d. h. die Zwischenlagerung in Bunkern, wird hier vernachlässigt (beträgt 1,4 % Gew. an der in KVA entsorgten Menge).

Auf Reaktordeponien werden die KVA-Schlacke und andere Verbrennungsrückstände bzw. Abfälle abgelagert, so dass mit chemischen und biologischen Prozessen zu rechnen und eine kontrollierte Entwässerung und Entgasung vorgeschrieben ist (Bundesamt für Umwelt 2008a). Bei der Bilanzierung der Güterflüsse werden die austretenden Deponiegase vernachlässigt.

Reaktordeponie

Auf Reststoffdeponien werden schwermetallreiche Materialien mit bekannter Zusammensetzung und mit nur geringen organischen Anteilen abgelagert, die weder Gase noch leicht wasserlösliche Stoffe abgeben können (Bundesamt für Umwelt 2008a). Die Basis und die Flanken der Deponie müssen abgedichtet sein, das Sickerwasser muss gesammelt und nötigenfalls behandelt werden.

Reststoffdeponie

Hier werden die Elektrofilterasche aus den Kehrlichtverbrennungsanlagen und den Klärschlamm-Monoverbrennungsanlagen berücksichtigt (KVA- bzw. KS-MV-Flugaschen, inkl. -Kesselaschen).

Sammelprozess der Flüsse Abwasser Konsum und Industrieabwasser.

Der Prozess Abwasserreinigungsanlagen (ARA) schliesst alle kommunalen ARA ein, nicht jedoch die rein industriellen ARA. In den kommunalen ARA wird das Rohabwasser durch bis zu 3 Klärstufen gereinigt. Beim Klärprozess fallen neben gereinigtem Abwasser auch feste Rückstände an, die als Klärschlamm (KS)⁴⁰, Rechengut und Sandfanggut zurückgehalten⁴¹, gesammelt und separat entsorgt werden. Pro Jahr fallen so ca. 30 kg/capita an Klärschlamm (TS) an (DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft 2005). Bei Kapazitätsengpässen, beispielsweise infolge starker Regenergebnisse, wird überschüssiges Abwasser in Entlastungsbauwerken zwischengelagert und später geklärt. Wo dies nicht möglich ist werden diese Abwassermengen ungeklärt bzw. nur vorgeklärt als so genannter Regenüberlauf in die Vorfluter eingeleitet. Der Anteil Regenüberlauf kann aufgrund technischer Gegebenheiten regional stark variieren.

Die auf dem Gelände der ARA häufig vorhandenen Faultürme sind nicht Teil des Prozesses Abwasserreinigungsanlagen, sondern sind im Prozess Vergärung berücksichtigt.

Bei der Abwasserreinigung werden vorhandene Nährstoffe in mehrstufigen Reinigungsverfahren weitgehend eliminiert, beim Phosphor zu ca. 90 %⁴² (CIPEL 2007). Mit zunehmender Reinigungsstufe werden folgende Phosphatanteile eliminiert (S+E Semesterarbeit S13): mechanische Stufe (1. Stufe) 0–20 %; biologische Stufe (1.+2. Stufe) ca. 55 % – laut Fachartikel ist die Elimination der biologischen Stufe von 20 auf 40 % gestiegen (Siegrist & Boller 1999); chemische Fällung (1.+2.+3. Stufe) ca. 72 %; Fällungsfiltration (1.+2.+3.+4. Stufe) ca. 90 %.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden die Phosphorfrachten – mit Ausnahme des Klärschlammes – in einem eigenständigen Bericht durch Erhebung und Analyse auf kantonaler Ebene untersucht (Herren 2008)⁴³.

Güterebene: Aus Gründen der Datenkonsistenz wird den vom Bafu statistisch ausgewerteten Klärschlamm- und Rechengutdaten der Vorzug gegeben, denen die Werte der Kantone zugrunde liegen, da dort keine entsorgungsbrancheweise Differenzen bei den Trockensubstanzmengen auftauchen, sondern branchenübergreifende Annahmen getroffen sind (zumindest kantonsweise konsistent) (Laube 2008). Die Entsorgung von Klärschlamm in die Deponie und in den Export wurde hier vernachlässigt, da sie zusammen 1,0 %wt. ausmachen und damit nicht relevant sind (Laube 2008).

Verbrennungsprozess, bei dem Klärschlamm in speziell angepassten Verbrennungsanlagen ohne Vermischung mit anderen Abfällen als Verbrennungsinput eingesetzt wird.

Kanalisation

Abwasserreinigungsanlagen (ARA)

Klärschlamm-Monoverbrennung (KS-MV)

⁴⁰ Klärschlamm besteht aus >90 % Wasser (Frei & Peyer 1991) und wird in der Regel getrocknet und anschliessend verbrannt. Gewisse Anteile werden exportiert, überwiegend nach Deutschland. Da diese Anteile gering sind, werden sie hier vernachlässigt.

⁴¹ Rechengut (4.2 g P/kg TS) und Sandfanggut (6.2g P/kg TS) machen zusammen <15 % der Gesamtfracht (Klärschlamm+Rechengut+Sandfanggut) aus und werden hier vernachlässigt (Henseler, Scheidegger et al. 1990).

⁴² Die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft gibt einen Phosphorelimination von 89 % an (DWA (Hrsg.) 2005).

⁴³ Die Verfügbarkeit und Qualität von Daten zu den Phosphorfrachten sind auf kantonaler Ebene verschieden. Die P-Fracht der Kläranlagen wurde jeweils mittels Abwassermengen und P-Konzentration bestimmt.

Dabei entstehen die festen Rückstände Schlacke (KS-MV-Schlacke) und Filterasche (KS-MV-Flugasche)⁴⁴. Klärschlamm wird zunehmend in Monoverbrennungsanlagen verbrannt. Die Rückgewinnung von Phosphor aus diesen Schlacken erfolgt bisher in Pilotanlagen und wird aktuell in der Schweiz und im europäischen Ausland erforscht.

Güterebene: Der Transferkoeffizient von Klärschlamm (TS) beträgt in die KS-MV-Schlacke $0,43 \pm 0,03$ ⁴⁵, in die KS-MV-Abgase (Reingas) $0,53 \pm 0,03$ (Klonk 2007), der Rest wird der KS-MV-Flugasche zugewiesen; eigene Abschätzungen der Unsicherheit.

Sammelbegriff für thermische Entsorgungsprozesse neben jenem in den KVA und den Klärschlamm-Monoverbrennungsanlagen, also Prozesse in der industriellen Produktion. Damit sind Prozesse ausgenommen, die zur Energiegewinnung konstruiert sind. Hier werden als Inputmaterial Klärschlämme und tierische Abfälle berücksichtigt. Vereinfachend werden nur Güterflüsse in die Zementwerke bilanziert, da für diese Abfälle die Zementwerke (Drehöfen) die bedeutendsten Abnehmer sind (Laube & Vonplon 2004).

andere Verbrennung
(Zementwerke)

Triageprozess der tierischen Abfälle aus der Verarbeitung tierischer Produkte.

Güterebene: Das Gros der tierischen Abfälle wird in der Schweiz entsorgt, vor allem Mehl und Tierfett; die Exporte betragen laut Auskunft des Bundesamts für Veterinärwesen (BVET) ca. 10 % an der Gesamtmenge tierischer Abfälle (BVET 2008), das sind neben tierischen Nebenprodukten (inkl. Güter, die im Ausland verzehrt werden oder Heimtiernahrung auch (Schweine-) Knochen, Häute und Felle; eigene Schätzung des Fehlers ± 3 %).

Triage tierische Abfälle

Triageprozess der biogenen Abfälle aus der kommunalen Separatsammlung (Grüngut) und der Verarbeitung pflanzl. Nahrungsmittel.

Gütermenge: Die durch Kompostierung und Vergärung in der Schweiz verwertete Menge biogener Abfälle wird vom Bafu auf Grundlage von unter anderem des ARGE Inspektorats der Kompostier- und Vergärbranche der Schweiz hochgerechnet. Demnach betragen die pflanzlichen Abfallmengen, die in zentralen Anlagen kompostiert und vergärt werden 884 645 t (Bundesamt für Umwelt 2007a).

Triage biogene Abfälle

Kompostierung ist die fachgerechte Verrottung pflanzlichen und tierischen Materials unter Luftzutritt (Bundesamt für Umwelt 2008a). Hier werden die Kompostieranlagen zusammengefasst, die eine Verarbeitungsmenge biogener Abfälle von > 100 t/a aufweisen (also ohne Haus- und Quartierkompostierung, siehe Fluss Gartenabfall).

Im Rahmen einer verstärkten Nutzung von biogenen Abfällen als Rohstoff für Recyclingdünger wurde die Kompostierung von Biomasse in den vergangenen Jahren stark intensiviert.

Güterebene: Transferkoeffizient $k_{\text{Trockensubstanz}} = 0,27 \leftrightarrow k_{\text{Rotteverlust}} = 1 - k_{\text{Trockensubstanz}} = 0,73$, wobei das Wasser in der Feuchtsubstanz des Kompostes dem Rotteverlust zugeordnet ist (Edelmann & Schleiss 2001)⁴⁶.

Kompostierung

⁴⁴ Pro Tonne Kehricht fallen in KVA jeweils 22.5 kg Elektrofilterasche an (Hügi 2007); dieser Transferkoeffizient kann in erster Näherung auch für die Monoverbrennung von Klärschlamm übernommen werden (Laube 2008).

⁴⁵ Fa. Artho biovis gibt einen Richtwert von 0.40 als Transferkoeffizient in die Schlacke an.

Vergärung ist die biologische, sauerstofffreie Zersetzung von biogenen Abfällen unter kontrollierten Bedingungen durch die Aktivität von Mikroorganismen (einschliesslich Methan bildender Bakterien) mit dem Ziel der Erzeugung von Biogas sowie von festen Gärrückständen (Bundesamt für Umwelt 2008a). Bei der Co-Vergärung wird – im Gegensatz zur Vergärung Abfall aus der Landwirtschaft mitverwendet, beispielsweise Hofdünger. Aufgrund der Ähnlichkeit der Ausbildung des Gärguts (flüssig, fest) werden hier vereinfachend die Vergärung und die Co-Vergärung zusammengefasst im Prozess Vergärung.

Vergärung

Berücksichtigt werden hier die Vergärung von Abfällen, Hofdünger, Klärschlämmen und Energiepflanzen in Vergärungs- und Co-Vergärungsanlagen einschliesslich Klär-gasanlagen, die eine Verarbeitungsmenge biogener Abfälle von > 100 t/a aufweisen (also ohne Haus- und Quartierkompostierung, siehe Fluss Gartenabfall).

Im Rahmen einer verstärkten Nutzung von biogenen Rohstoffen als Rohstoff für Recyclingdünger wurde die Vergärung von Biomasse in den vergangenen Jahren stark intensiviert.

Güterebene: Die Transferkoeffizienten des Prozesses wurden auf Basis von Angaben zur Verfahrenstechnik durch die Fa. Kompogas⁴⁷ bestimmt (Vetter 2008).

In einer weiteren Studie wird der Anteil des Presswassers mit 190 l (Feuchtsubstanz!) pro Tonne Frischsubstanz angegeben (Schmidt, Welker et al. 2001).

Sammel- und Triageprozess der festen und flüssigen Produkte aus der Kompostierung (Kompost) und der Vergärung (Gärgut).

Vertrieb Kompost & Gärgut

Güterebene: Die Transferkoeffizienten der Triage der Recyclingdünger Kompost und Gärgut in die Prozesse Pflanzenproduktion und Gärten (Gärtnereien, private Haushalte, kommunale Grünanlagen) wurden auf Basis des Jahresberichts 2007 des Inspektors ARGE zu 0,80 : 0,20 bestimmt (Schleiss & Ammann et al. 2007), wobei die Unsicherheit zu jeweils 0,05 abgeschätzt wurde.

Sammelprozess der Abgase aus den Entsorgungsprozessen Kehrlichtverbrennungsanlagen und Klärschlamm-Monoverbrennung, aus dem Rotteverlust der Kompostierung sowie der Gasphase aus der Vergärung, inklusive Wasserdampf.

Sammlung Abgase

Die Input- und Outputflüsse enthalten kein Phosphor. Der Prozess dient der Bilanzierung der betroffenen Güterströme.

A2-6.2 Flüsse

KVA-Schlacke ist der Verbrennungsrückstand (Asche) von Kehrlicht in Kehrlichtverbrennungsanlagen (KVA).

KVA-Schlacke (5_A12)

Güterebene: gemäss Fachliteratur beträgt der Transferkoeffizient in die KVA-Schlacke 210 ± 10 kg/t FS.

⁴⁶ Der TS-Anteil von 27 % beruht auf langjährigen Messreihen in der Schweiz und kann als allgemeingültig angenommen werden (Schleiss 2008). **Bemerkung:** Für eine Kompostieranlage im Kanton Bern wurde der Transferkoeffizient des Komposts zu 38.8 % bestimmt, doch ist dieser mit der Sonderheit der Kanalrotte zu erklären. Durch die Kanalrotte wird viel organische Substanz erhalten, wodurch einerseits der Kompost eine niedrigere P-Konzentration erhält, andererseits wg. Rückständen im Kompost hinsichtlich der Einsatzmöglichkeiten eingeschränkt ist. Dieser hochmoderne Prozess ist zum heutigen Zeitpunkt untypisch für die Schweiz.

⁴⁷ Da die Fa. Kompogas die grosse Mehrheit der industriellen Vergärungsanlagen im Mittelland betreibt, sind deren Daten auch in anderen Beurteilungen als Grundlage verwandt worden, so z. B. vom Gewässerschutzamt Kt. BE (Andrini 2007).

KVA-Flugasche ist eine Mischung der von den Rauchgasen aus dem Feuerraum von Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA) mitgerissenen Asche-, Russ- und Staubpartikel (Rauchgasreinigungsrückstand), die im Staubabscheider (Elektrofilter) aufgefangen werden (Bundesamt für Umwelt 2008a). Aufgrund der vorliegenden Datenstruktur wird hier auch die Kesselasche einbezogen. Der Anteil der KVA-Flugasche, der mit der KVA-Schlacke entsorgt wird, wird hier nicht berücksichtigt, sondern im Fluss KVA-Schlacke.

KVA-Flugasche (5_A13)

Güterebene: gemäss Fachliteratur beträgt der Transferkoeffizient in die KVA-Flugasche 31 ± 1 kg/t FS.

KVA-Abgase sind die gasförmigen Verbrennungsprodukte von Kehricht in Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA).

KVA-Abgase (5_A113)

Der Fluss Rohabwasser umfasst die die Abwassermenge, die kommunalen ARA (Abwasserreinigungsanlagen) zur Klärung zugeführt wird. Dies entspricht der Summe von Abwasser Konsum und Industrieabwasser (exklusive des Abwassers, das nicht durch kommunale ARA sondern lediglich durch industrieeigene ARA behandelt wird). Es handelt sich um das «Abwasser aus Haushalten, Industrie und Gewerbe».

Rohabwasser (5_A45)

Der Fluss Klärschlamm in KVA ist der Anteil Klärschlamm, der in Kehrichtverbrennungsanlagen zusammen mit dem Kehricht verbrannt wird. Der unbehandelte Klärschlamm enthält einen Feststoffanteil von 4% (ATV – DVWK Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft 2003).

Klärschlamm in KVA (5_A51)

Der Fluss Klärschlamm in KS-Monoverbrennungsanlagen ist der Anteil Klärschlamm, der in Klärschlamm-Monoverbrennungsanlagen verbrannt wird. Dieser Entsorgungsprozess wird zunehmend gefördert und verbreitet, da hier die Rezyklierbarkeit der Nährstoffe gegenüber der Verbrennung in KVA erhöht ist.

Klärschlamm in KS-Monoverbrennungsanlagen (5_A56)

Der Fluss Klärschlamm in andere Verbrennung ist der Anteil Klärschlamm, der weder in KVA noch KS-Monoverbrennungsanlagen, sondern in anderen Verbrennungsanlagen verwertet wird. Dabei ist der bedeutendste Entsorgungsweg die Zugabe von Klärschlamm in die Drehöfen der Zementwerke.

Klärschlamm in andere Verbrennung (5_A57)

KS-MV-Schlacke ist der Verbrennungsrückstand (Asche) von Klärschlamm in KS-Monoverbrennungsanlagen (KS-MV).

KS-MV-Schlacke (5_A62)

KS-MV-Flugasche ist eine Mischung der von den Rauchgasen aus dem Feuerraum von KS-Monoverbrennungsanlagen (KS-MV) mitgerissenen Asche-, Russ- und Staubpartikel (Rauchgasreinigungsrückstand), die im Staubabscheider (Elektrofilter) aufgefangen werden (Bundesamt für Umwelt 2008a). Aufgrund der vorliegenden Datenstruktur wird hier auch die Kesselasche einbezogen.

KS-MV-Flugasche (5_A63)

Gasförmige Produkte der KS-Monoverbrennungsanlagen (KS-MV)

KS-MV-Abgase sind die gasförmigen Verbrennungsprodukte von Klärschlamm in KS-Monoverbrennungsanlagen (KS-MV).

KS-MV-Abgase (5_A613)

Tierische Abfälle der Kategorien 1 und 2, das sind Knochen bzw. Stoffwechselprodukte, müssen aktuell gemäss der Verordnung über die Entsorgung von tierischen Nebenprodukten (VTNP) verbrannt werden (Schweizerischer Bundesrat 2004a). Es handelt sich überwiegend um Mehl aus der Fleischverarbeitung und Tierfett. Der Fluss tierische Abfälle in andere Verbrennung ist der Anteil tierischer Abfälle, der nicht exportiert wird, sondern in Zementwerken oder betriebseigenen Verbrennungsanlagen von Fleischverarbeitungsbetrieben oder sonstigen Verbrennungsanlagen entsorgt wird. Der bedeutendste Entsorgungsweg ist die Zugabe tierischer Abfälle in die Drehöfen der Zementwerke. Tierische Abfälle der Kategorie 3 können mit einer Drucksterilisation behandelt und entsorgt werden oder exportiert werden.

tierische Abfälle in andere Verbrennung (5_A87)

Dieser Fluss ist der Anteil der biogenen Abfälle, die durch Kompostierung in Anlagen mit einer Verarbeitungsmenge biogener Abfälle von > 100 t/a, sogenannten zentralen Kompostieranlagen, verwertet werden.

biogene Abfälle Kompostierung (5_A910)

Dieser Fluss ist der Anteil der biogenen Abfälle, die durch Vergärung (einschliesslich Co-Vergärung) in Anlagen mit einer Verarbeitungsmenge biogener Abfälle von > 100 t/a, sogenannten zentralen Vergärungsanlagen, verwertet werden.

biogene Abfälle Vergärung (5_A911)

Kompost (TS) ist die Trockensubstanz des festen Produktes (Rückstand) der Kompostierung in Anlagen, die eine Verarbeitungsmenge biogener Abfälle von > 100 t/a aufweisen (also ohne Kompost aus Haus- und Quartierkompostierung)(Schleiss, Ammann et al. 2007).

Kompost (TS) (5_A1012)

Güterebene: Der Anteil der Trockensubstanz am (Frisch-)Kompost beträgt ca. 50 %wt. (Schleiss 2002, AWEL 2001).

Rotteverlust ist das gasförmige Produkt der Kompostierung in Anlagen, die eine Verarbeitungsmenge biogener Abfälle von > 100 t/a aufweisen. Da beim Kompost nur die Trockensubstanz berücksichtigt wird, wird hier zum Rotteverlust neben dem Wasserdampf in den Kompostierabgasen auch jene Wassermenge berücksichtigt, die in der Feuchtsubstanz des (Frisch-) Kompostes gebunden (vgl. oben: Kompost).

Rotteverlust (5_A1013)

Gärgut (TS) ist die Trockensubstanz des festen Produktes der Vergärung («festes Gärgut») in Anlagen, die eine Verarbeitungsmenge biogener Abfälle von > 100 t/a aufweisen (Schleiss, Ammann et al. 2007).

Gärgut (TS) (5_A1112_1)

Güterebene: Der Anteil der Trockensubstanz an der Frischsubstanz ist durch Messreihen der Fa. Kompogas zu 0,504 bestimmt (KOMPOGAS 2008a).

Presswasser (TS) ist die Trockensubstanz des flüssigen bzw. fliessfähigen Produktes der Vergärung («flüssiges Gärgut») in Anlagen, die eine Verarbeitungsmenge biogener Abfälle von > 100 t/a aufweisen (Schleiss, Ammann et al. 2007). Presswasser wird aufgrund seines Nährstoffreichtums als Flüssigdünger eingesetzt, überwiegend in der Landwirtschaft.

Presswasser (TS) (5_A1112_2)

Güterebene: Der Anteil der Trockensubstanz an der Frischsubstanz ist durch Messreihen der Fa. Kompogas zu 0,134 bestimmt (KOMPOGAS 2008b).

Abgas Vergärung ist das gasförmige Produkt der Vergärung in Anlagen, die eine Verarbeitungsmenge biogener Abfälle von > 100 t/a aufweisen (Schleiss, Ammann et al. 2007); der Anteil Abgas an den Produkten und der Anteil Wasserdampf am Abgas ist bei der Vergärung gegenüber der Kompostierung gering.

Abgas Vergärung (5_A1113)

Da bei Gärgut (TS) und Presswasser (TS) die Trockensubstanz berücksichtigt wird, wird zum Abgas Vergärung neben dem Wasserdampf in den Abgasen die Wassermenge berücksichtigt, die in der Feuchtsubstanz des festen Gärguts und im flüssigen Gärgut enthalten ist.

A2-7 Gewässer

(ehemals: Oberflächengewässer)

A2-7.1 Prozesse

Der Prozess Oberflächen-Fliessgewässer inkl. Sedimente umfasst die Flüsse und Bäche der Schweiz mit ihren Sedimenten. Vereinfachend wird angenommen, dass sämtliche Phosphorfrachten in die Oberflächengewässer (Fliessgewässer plus Seen) über die Fliessgewässer stattfinden. Dementsprechend werden auch jene Phosphorfrachten über diesen Prozess geführt, die direkt in die Seen eingebracht werden.

Oberflächen-Fliessgewässer
inkl. Sedimente

Grenzflüsse und -bäche sind ausgenommen, sobald sie flussabwärts nicht mehr durch die Schweiz fließen, d.b. beide Ufer im Ausland liegen.

Bisher sind geogene Einträge nicht berücksichtigt; eine Abschätzung der Gesteinserosion ist grundsätzlich möglich, doch aufwändig. Ebenso unberücksichtigt sind diffuse Einträge über die Luft (mit Ausnahme der Frachten über die Meteorwässer der ARAs (Niederschlag in Siedlungen).

Die Phosphorfrachten in die Fliessgewässer nahm seit den 1980er Jahren durch die verbesserte Elimination in den ARAs, das Phosphorverbot in Waschmitteln und eine besser kontrollierte Düngepraxis kontinuierlich ab. Die entsprechenden Zielvorgaben am Gesamtphosphor wurde weitgehend erreicht (Internationale Kommission zum Schutz des Rheins IKSR, Stromaufwärts – Bilanz Aktionsprogramm Rhein 2003).

Dieser Prozess umfasst die Seen der Schweiz mit ihren Sedimenten. Zur Abgrenzung gegenüber den Fliessgewässern siehe die Beschreibung des Prozesses Oberflächen-Fliessgewässers inkl. Sedimenten.

Seen inkl. Sedimente

Seen, die nicht vollständig in der Schweiz liegen, werden nicht berücksichtigt.

Mit der Verringerung der Nährstoffeinträge in die Seen sank auch deren Phosphorkonzentration kontinuierlich, so dass heute Phosphor nicht mehr in gleicher Masse als Problemstoff wahrgenommen wird⁴⁸.

⁴⁸ Von den schweizerischen Seen wird heute bzgl. Phosphorbelastung am häufigsten der Genfer See diskutiert (2006: 27.7 µg/l; Zielwert des Einzugsgebiets der Rhone: 20 µg/l), wobei als populäre Massnahme zur Verminderung des Phosphoreintrags die Kundensensibilisierung bzgl. Phosphor in Geschirrspülmitteln überwiegt.

A2-7.2 Flüsse

Dieser Fluss ist der natürliche Zufluss von Fliessgewässern in die Seen, die vollständig in der Schweiz liegen.

Seezufluss (6_A12)

Dieser Fluss ist der natürliche Abfluss von Fliessgewässern aus den Seen, die vollständig in der Schweiz liegen.

Seeabfluss (6_A21)

A3 Datenbasis

Im Folgenden (Tab. 16, Tab. 17) werden die Daten präsentiert, die als Parameter im Modell «Phosphorhaushalt der Schweiz» verwendet werden. Die Datenunsicherheiten wurden im Allgemeinen auf Basis der Datenquelle empirisch abgeschätzt, i.d.R. über eine Abschätzung der relativen Unsicherheit (vgl. Kap. 2.3 Unsicherheitsanalyse und Anhang A4 Unsicherheiten der Flüsse). Die Quellen der Modellparameter werden durch Angabe der Quellenummer in eckigen Klammern angegeben bzw. in den Bemerkungen erläutert.

Der Bezug der Erläuterungen wird jeweils durch Kennbuchstaben spezifiziert: (G) Güterfluss, (cP) Phosphorkonzentration, (P) Phosphorfluss.

Die Phosphorlager wurden ausserhalb des Modells berechnet.

Tab. 16 > Datenbasis der Phosphorflüsse

Fluss	Güterfluss [t]	Phosphorkonzentration [g P/kg]	Phosphorfluss [t]	Bemerkungen
A12 Hofdünger			29076 ± 1454	(P) FAL-Reckenholz: Agrarforschung, Juni 2001. Mistwerte von Kaninchen auf Geflügel übertragen.
A14 tierische NM	1'686'635 ± 84'332	[65] 2.41 ± 0.48	[31,50]	(G) Abschätzung nach [65] (cP) Abschätzung nach [31,50]
A15 tierische Abfälle		30.27 ± 20	[82] 2705 ± 541	(cP) nach Lamprecht (P) Berechnung nach Angaben von Centravo unter Berücksichtigung der Wasserverluste bei Verarbeitung bezogen auf Frischsubstanz
A16 Ausschwem. Exkreme			20 ± 10	(P) eigene Abschätzung.
A21 pflanzliches Futter	9'668'412 ± 483'421	[65] 3.47 ± 0.52	[26]	(G) Abschätzung nach [65] (cP) Abschätzung nach [26]
A24_1 Garten-Mineraldünger		1 ± 0.1	[5] 180 ± 24	(P) Abschätzung auf Basis früherer Untersuchungen [5] und eigenen Annahme (Gärtnereien=2*PHH)
A24_2 pflanzliche NM	3'777'045 ± 188'852	[65] 0.867 ± 0.0867	[31]	(G) Abschätzung nach [65] (cP) Abschätzung nach [31]
A24_3 Holz + Papier				A24_3 Holzgüter, A24_4 Energieholz und A24_5 Papier zusammengefasst im Resultateteil
A24_3 Holzgüter	1'275'000 ± 525'000	0.06 ± 0.006	[29]	(G) Müller, Oehler et al.(1995), Umrechnungsfaktor 0,75 t/m ³
A24_4 Energieholz	2'592'000 ± 129'600	[10] 0.06 ± 0.006	[29]	
A24_5 Papier	1'655'735 ± 16'557	[91] 0.06 ± 0.006		(G) zusätzlich Angaben des Bundesamt für Umwelt, 2007 (cP) Annahme der Konzentration analog A24_3 "Holzgüter"
A25 pflanzliche Abfälle	104'442 ± 10'444	[60] 0.867 ± 0.0867		(G) Abschätzung nach [60] (cP) Annahme der Konzentration analog A24_2
A26 Abfluss+Erosion			969 ± 485	(P) Prasuhn V., (2003) Entwicklung der Phosphor- und Stickstoffverluste aus diffusen Quellen in die Gewässer im REZGUS.
A34 Reinigungsprodukte			1031 ± 33	(P) eigene Berechnung auf Basis von Daten zum SKW, und zur Mifa AG
A35 Abwasser Industrie			850 ± 425	[71] (P) Schmutzwasser, ohne Fremdwasser
A42 Altpapier	1'214'734 ± 12'147	[91] 0.06 ± 0.006		(G) zusätzlich Angaben des Bundesamt für Umwelt, 2007; Abzug von 5%wt. Fremdstoffen (cP) Annahme der Konzentration analog A24_3 "Holzgüter"
A45_1 Siedlungsabwasser		0.005 ± 0.001	[71]	
A45_2 Kehricht	2'628'376 ± 131'419	[15] 0.665 ± 0.105		(cP) Berechnung nach Morf, Schenk et al.(2007)

Fortsetzung von Tab. 16

Fluss	Güterfluss [t]	Phosphorkonzentration [g P/kg]	Phosphorfluss [t]	Bemerkungen
A45_3 Grüngut	883'195 ± 88'320	[16] 1.13 ± 0.11	[30]	(G/cP) Bezug auf Festsubstanz
A45_4 Abgas Energiegewinnung Konsum		0 ± 0		Fluss im Resultateteil nicht aufgeführt.
A52_1 KS als Dünger	21'823 ± 1'091	[42] 27 ± 5		(cP) Annahme der Konzentration analog 5_A51
A52_2 Grüngütdünger				
A52_3 KS-MV-Schlacke in Landwirt.	0 ± 0	63.5 ± 6.35	0 ± 0	Handlungsoption: Fluss im Resultateteil nicht aufgeführt. (cP) Annahme der Konzentration analog 5_A62
A52_4 Tiermehl als Dünger	0 ± 0	30.27 ± 20	[82] 0 ± 0	Handlungsoption: Fluss im Resultateteil nicht aufgeführt.
A54 Garten-Grüngütdünger				
A56 Abfluss ARA				A56_1 und A56_2 zusammengefasst im Resultateteil
A56_1 gereinigtes Abwasser		0.00055	[39] 783 ± 117 [39]	(cP/P) eigene Erhebungen [39] (G) G=Rohabwasser-gereinigtes Abwasser-0.002% KS, eigene Erhebungen [39]
A56_2 Regenüberlauf	151'000'000 ± 131'000'000	[39] 0.0015 ± 0.00075	[39]	(cP) eigene Erhebungen [39]
E1 Holz+Papier Exp. (n)	1'102'899 ± 110'290	[91] 0.06 ± 0.006	[29]	(G) Berechnung mithilfe der entsprechenden Aussenhandelsflüsse
E2 Flugasche Exp.	28'500 ± 1'425	[18] 6.48 ± 6.48		(cP) Annahme der Konzentration analog 5_A63
E3 tierische Abfälle Exp.	70'704 ± 3'535	19 ± 3.8		(G/cP) G: Abschätzung nach Aussagen Soltermann (Centravo AG) und Müller (Geistlich Agrasana AG)
E4 Abgas in Atmosphäre		0 ± 0	0 ± 0	Fluss im Resultateteil nicht aufgeführt.
E5 Abfluss ins Ausland			2165 ± 108 [13]	
I1 Futter Imp. (n)	1'181'931 ± 59'097	[65] 4.8 ± 0.48	[26,82]	(G) Abschätzung nach [65] (cP) Berechnung nach [26,82]
I2 Lebewesen Imp. (n)	4'735 ± 474	[74] 7.1 ± 0.71	[50]	(G) Umrechnung mittels GVE-Faktoren (cP) eigene Berechnung nach [50] und dort angegebenen Referenzen
I3 tierische NM Imp. (n)	166'959 ± 1'670	[65] 5.14 ± 1.082	[31,50]	(cP) eigene Berechnung nach [31,50]
I4 Mineraldünger Imp.	282'109 ± 2'821	[92]	5886 ± 59 [65]	(G) eigene Berechnung
I5 pflanzliche NM Imp. (n)	2'448'594 ± 24'485	[65] 1.55 0.16	[26]	(G) Abschätzung nach [65] (cP) Abschätzung nach [26]
I6 Chemikalien Imp. (n)				Keine Eingabewerte im Modell, Berechnung aus Massenbilanz
I7 Produkte Imp. (n)				Keine Eingabewerte im Modell, Berechnung aus Massenbilanz
I8 Niederschläge	573'000'000 ± 286'500'000	[5]	23 ± 8 [5]	(G/P) Hochrechnung (hier nur Trinkwasser, ohne Berücksichtigung des Meteorwassers)

Fortsetzung von Tab. 16

Fluss		Güterfluss [t]		Phosphorkonzentration [g P/kg]		Phosphorfluss [t]	Bemerkungen
1_A12	Schlachttiere Exp.	2'756 ± 138	[65]	7.4 ± 0.37	[50]		(G) Umrechnung: GVE-Faktoren des BLW (cP) Literaturwerte übernommen
1_A13_1	Tiere Schlachtung	672'060 ± 33'603	[65,7]	6.7 ± 1	[31,50]		(G) Umrechnung: GVE-Faktoren des BLW, ausserdem Schlachtkörper in Lebendgewicht (cP) eigene Berechnung
1_A13_2	Milch+Eier	3'340'674 ± 167'330	[65]	0.93 ± 0.093	[31]		
1_A21	Masttiere Imp.	7'492 ± 75	[65]	7.1 ± 0.71	[50]		(G) Umrechnung: GVE-Faktoren des BLW (cP) Literaturwerte übernommen
1_A31_1	Futtersuppe	22'687 ± 1'134.35		2.8 ± 1			(G/cP) Abschätzung nach Aussagen Soltermann (Centravo AG) und Müller (Geistlich Agrasana AG) (cP) Dokumentationsstelle der Universität Hohenheim 1973
1_A31_2	Tiermehl als Futter	0 ± 0		30.27 ± 20	[82]	0 ± 0	Handlungsoption: Fluss im Resultateteil nicht aufgeführt.
1_A34	inländ. tierische NM	1'516'386 ± 151'639	[65]	2.1 ± 0.21	[31]		
2_A12	inländ. pflanzliche NM	2'887'501 ± 288'750	[65]	1 ± 0.1	[65,31]		(cP) eigene Berechnung: gewichtetes Mittel der Konzentrationen
2_A23	pflanzl. NM Imp.	2'675'848 ± 267'585	[65]	1.28 ± 0.128	[65,31]		(G) nur pflanzliche Nahrungsmittel berücksichtigt (cP) eigene Berechnung: gewichtetes Mittel der Konzentrationen
2_A32	pflanzl. NM Exp.	367'206 ± 16'360	[65]	1.28 ± 0.128	[65,31]		(G) nur pflanzliche Nahrungsmittel berücksichtigt (cP) eigene Berechnung: gewichtetes Mittel der Konzentrationen
2_A46	Nutzholz	5'515'250 ± 551'525	[20,10]	0.061 ± 0.0061	[62]		(G) eigene Berechnungen (cP) eigene Berechnungen auf Basis gewichteter Konzentrationen
2_A56	Holz Imp.	1'352'150 ± 135'215	[20]	0.084 ± 0.0084	[62]		(G) Daten für 2005
2_A57	Papier + -rohstoffe Imp.	1'786'848 ± 89'342	[91]	0.06 ± 0.006	[29]		
2_A65	Holz Exp.	2'529'570 ± 252'957	[20]	0.064 ± 0.0064	[62]		(G) Umrechnungsfaktoren übernommen
2_A67	inländ. Papierrohstoffe	1'003'725 ± 50'186	[91]	0.06 ± 0.006	[29]		
2_A75	Papier + -rohstoffe Exp.	1'712'327 ± 85'616	[91]	0.06 ± 0.006	[29]		
3_A12	Chemikalien Exp.					0 ± 0	(P) nicht bestimmt (ggf. via Chemikaliendatenbank)
3_A13	Chemische Produkte Exp.					100 ± 0	(P) eigene Erhebung zur Produktion der MIFA AG (Hr. Schwilch), 2008
3_A21	Chemikalien Imp.					360 ± 0	(P) eigene Erhebung zur Produktion der MIFA AG (Hr. Schwilch), 2008

Fortsetzung von Tab. 16

Fluss		Güterfluss [t]		Phosphorkonzentration [g P/kg]		Phosphorfluss [t]	Bemerkungen
3_A31	Chemische Produkte Imp.						Keine Eingabewerte im Modell, Berechnung aus Massenbilanz
4_A14	Komp. Küchenabfälle					26.3 ± 13.15	(P) eigene Berechnung nach pro-Kopf-Anfall [5], eigene Annahmen
4_A15_1	Fäkalien	338'000 ± 33'800	[5]			1661 ± 131	(G) Hochrechnung der Fäzesmenge pro Kopf auf die Schweiz (P) Abschätzung nach [5,37,43,44, 55,57,73]
4_A15_2	Urin	4'025'000 ± 402'500	[5]			2953 ± 231	(G) Hochrechnung der Fäzesmenge pro Kopf auf die Schweiz (P) Abschätzung nach [5,37,43,44, 55,57,73]
4_A15_3	Speisereste Abwasser					26.3 ± 13.15	(P) eigene Berechnung nach pro-Kopf-Anfall [5], eigene Annahmen
4_A21	Papier in Kehricht			0.06 ± 0.006			(cP) übernommen von "Fluss A24_3 Holzgüter"
4_A31	Asche in KVA	17'400 ± 3'000	[32,59]	10 ± 5	[59]		(G) eigene Berechnung nach [32,59]
4_A34	Asche in Garten	12'600 ± 3'000	[32,59]	10 ± 5	[59]		(G) eigene Berechnung nach [32,59]
4_A41	Gartenabfall	883'195 ± 88'320		1.13 ± 0.11			(G/cP) übernommen von "Fluss A45_3 Grüngut"
5_A113	KVA-Abgase			0 ± 0		0 ± 0	Fluss im Resultateteil nicht aufgeführt. (cP) kein P in Verbrennungsabgasen (G) nach Auskunft Bafu (Hr.Hügi), 2008, Angabe als Feuchtsubstanz (cP) Berechnung nach [15,56], umgerechnet auf Feuchtsubstanz
5_A12	KVA-Schlacke	793'301 ± 793		4.88 ± 0.52	[15,56]		(cP) Berechnung nach [15,56], bezogen auf Trockensubstanz
5_A13	KVA-Flugasche	62'784 ± 628	[18]	6.48 ± 0.19	[15,56]		(G/cP) gemäss internem Bericht: eigene Erhebungen, Auswertung von Literatur (G) kantonale Angaben nach Auskunft Bafu (Hr.Laube), 2008 (cP) Literaturangaben (Stadelmann, Külling et al., 2002)
5_A45	Zufluss ARA	1'950'000'000 ± 150'000'000	[39]	0.0047 ± 0.0035	[39]		(G) pers.comm. S. Nanzer/ETHZ, unveröffentlichte Daten (cP) Annahme der Konzentration analog Fluss 5_A51 "Klärschlamm in KVA"
5_A51	KS in KVA	46'668 ± 4'667	[54]	27 ± 5			(cP) Annahme der Konzentration analog Fluss 5_A51 "Klärschlamm in KVA"
5_A56	KS in MV	89'644 ± 4'482		27 ± 5			Fluss im Resultateteil nicht aufgeführt. (cP) kein P in Verbrennungsabgasen
5_A57	KS in Zementwerk	46'067 ± 4'607	[42]	27 ± 5			(G/cP) pers.comm. S. Nanzer/ETHZ, unveröffentlichte Daten
5_A613	KS-MV-Abgase			0 ± 0		0 ± 0	(cP) Annahme: gleiche Konzentration wie 5_A13; eigene Abschätzung der Unsicherheit
5_A62	KS-Asche MV	35'526 ± 1'776		63.5 ± 6.35			
5_A63	KS-Flugasche MV			6.48 ± 6.48			

Fortsetzung von Tab. 16

Fluss		Güterfluss [t]		Phosphorkonzentration [g P/kg]		Phosphorfluss [t]	Bemerkungen
5_A87	tier. Abfälle Zementwerk	67'344.672 ± 3'367.2336		20 ± 4			(G/cP) Abschätzung nach Aussagen Soltermann (Centravo AG) und Müller (Geistlich Agrasana AG)
5_A910	Abfälle in Kompostierung	738'682 ± 73'868	[41]	1.13 ± 0.11			(G) nach Auskunft Bafu (Hr.Hügi), 2008, ohne "Halle und Boxen" und "Platzkompostierung" (cP) Annahme der Konzentration analog A45_3 "Grüngut"
5_A911	Abfälle in Vergärung	144'513 ± 14'451	[41]	1.13 ± 0.11			(G) zentrale Kompostieranlagen, nach Auskunft Bafu (Hr.Hügi), 2008 (cP) Annahme der Konzentration analog 5_A910
5_A1012	Kompost			3.3 ± 1.4	[49]		
5_A1013	Rotteverlust			0 ± 0	[86]	0 ± 0	Fluss im Resultateteil nicht aufgeführt.
5_A1112_1	Gärgut	31'170 ± 3'030	[42]	3.9 ± 1.8	[49]		(G) umgerechnet nach Trockensubstanz
5_A1112_2	Presswasser			6 ± 0.6	[49]		
5_A1113	Abgas Vergärung			0 ± 0		0 ± 0	Fluss im Resultateteil nicht aufgeführt. (cP) kein P in Verbrennungsabgasen
6_A12	Seezufluss					0 ± 0	Fluss im Resultateteil nicht aufgeführt.
6_A21	Seeabfluss					0 ± 0	Fluss im Resultateteil nicht aufgeführt.

Tab. 17 > Datenbasis der Phosphorlager

Prozess	Güterlager [t]	Phosphorkonzentration [g P/kg]	Phosphorlager [t]	Bemerkungen
1	Landw. Tiere		8294 ± 829	
2	Landw. Pflanzen		9356993 ± 7923290	
4	Haushalte+Gewerbe		0 ± 0	Die Lager der Prozesse 1 bis 6 setzen sich aus den Lagern der Subprozesse zusammen
5	Abfallwirtschaft		unbekannt	
6	Gewässer		0 ± 0	
Subprozesse				
1_1	Tierproduktion		8'294 ± 829	[50,65] (P) eigene Berechnung auf Basis Nutztierbestand 2005 [65] und [50]
2_1	Pflanzenproduktion (Boden FS)		unbekannt	Modellausgangswert 0 t
2_4	Forstwirtschaft		9'356'993 ± 7'923'290	[20,62, 67] (P) eigene Berechnungen: Summe Boden Pflanzenbau [67] plus Waldbestand [20,62]
4_1	Siedlung mit Haushalten		unbekannt	Modellausgangswert 0 t
4_4	Gärten		0 ± 0	Annahme 0 t
5_2	Reaktordeponie		unbekannt	Modellausgangswert 0 t
5_3	Reststoffdeponie		unbekannt	Modellausgangswert 0 t
5_7	Zementwerke		unbekannt	Modellausgangswert 0 t
6_1	Fliessgewässer		unbekannt	Modellausgangswert 0 t

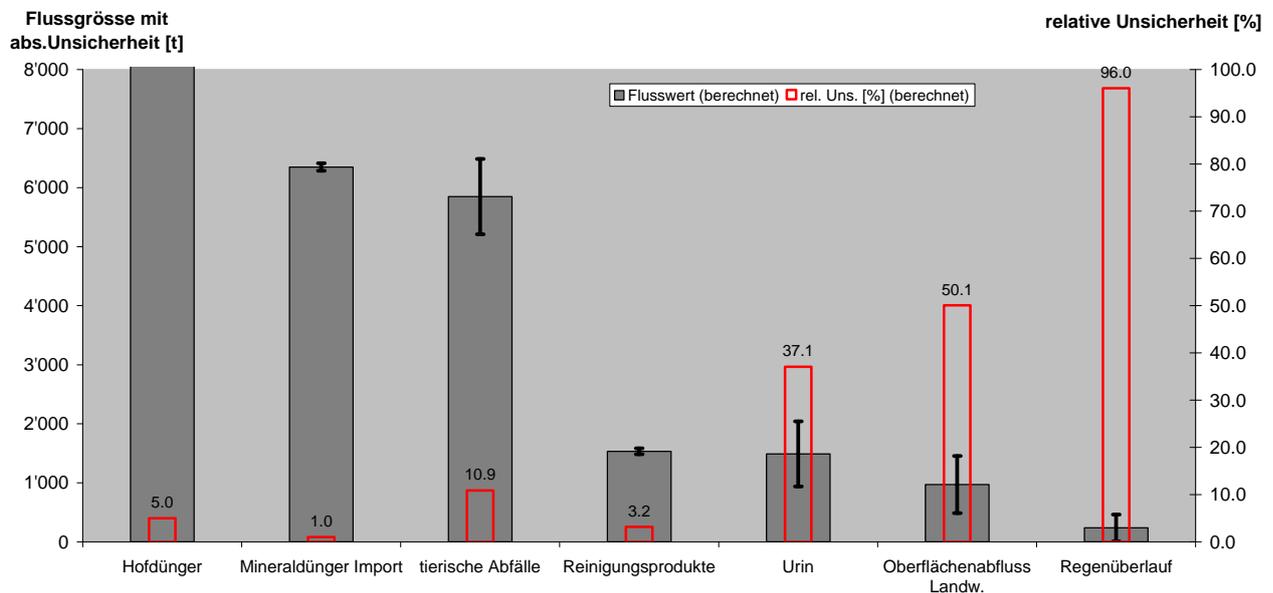
A4 Unsicherheiten der Flüsse

Die Streuung der Phosphorflüsse (Flussgrößen) bzw. der relativen Unsicherheit ist in der vorliegenden Studie weit: Die jährlichen Flussgrößen befinden sich im Wertebereich [0 t; 29 774 tP], die entsprechenden absoluten Unsicherheiten im Bereich [0 t; 1557 tP]; man erkennt daran die ausgeprägte Bandbreite der Flussgrösse. Da die Phosphorflüsse und die absoluten Unsicherheiten i.Allg. nicht direkt miteinander korrelieren, schwanken die relativen Unsicherheiten stark, hier im Bereich [0,00; 0,96].

Zur Veranschaulichung wird in Abb. 22 die Weite der Streuung beispielhaft anhand von 7 der 61 Flüsse des Systems dargestellt. Bei der Gegenüberstellung der absoluten bzw. relativen Unsicherheit mit den Flussgrößen wird deutlich, dass diese beiden unterschiedlich stark mit derselben korrelieren: Eine Korrelation des Phosphorflusses (Flussgrösse) mit den absoluten Fehlern ist für den gewählten Datensatz nicht deutlich erkennbar. Demgegenüber nimmt die relative Unsicherheit mit zunehmender Flussgrösse ab (Abb. 22).

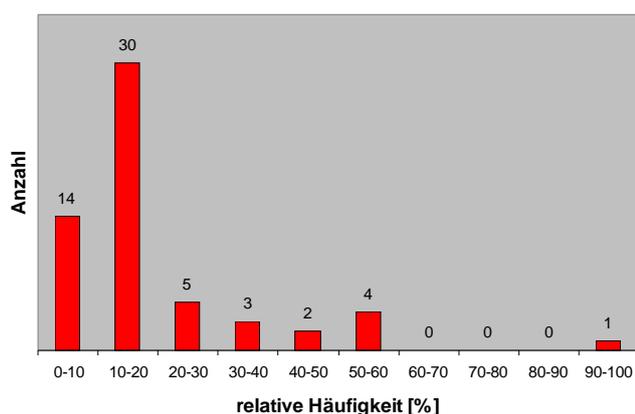
Abb. 22 > Flussgrösse von 7 ausgewählten Flüssen mit Darstellung der absoluten Unsicherheiten (schwarze «Fehlerbalken», linke Ordinate) und der relativen Unsicherheiten (rote Hohlbalken, rechte Ordinate mit zusätzlicher Wertangabe)

Die Flüsse sind von links nach rechts in abnehmender Flussgrösse aufgeführt.



Die Verteilung der relativen Unsicherheiten der Flüsse nach ihrer Berechnung ist in Abb. 23 dargestellt. Fast ausnahmslos sind die relativen Unsicherheiten der 59 ausgewerteten Flüsse⁴⁹ < 60 %. Dreiviertel der relativen Unsicherheiten sind sogar < 20 %.

Abb. 23 > Histogramm der relativen Häufigkeit der berechneten Flussgrössen im Modell



Beurteilung der Unsicherheiten

Als Vorbereitung der Anwendung der Relevanzmatrix werden die absoluten und relativen Unsicherheiten der oben ausgewählten und diskutierten Flüsse exemplarisch entsprechend ihrer Grösse durch Klassierung auf Ordinalniveau bewertet (Einteilung in: sehr klein, klein, mittel, gross, sehr gross) (Tab. 18).

Tab. 18 > Beurteilung der absoluten und relativen Unsicherheiten ausgewählter Flüsse

	Absolute Unsicherheit	Relative Unsicherheit
Hofdünger	gross (1500 t/a)	klein (5 %)
Mineraldünger Import, Reinigungsprodukte	minimal	klein < 3 %)
Tierische Abfälle	mittel (500 t/a)	mittel (35–50 %)
Urin, Oberflächenabfluss LDW		gross (35–50 %)
Regenüberlauf	klein (200 t/a)	sehr gross (100 %)

Auf Basis der Resultate der Abb. 22 wird für ausgewählte Flüsse semiquantitativ dargestellt, wo die Unsicherheiten relevant sind und Unsicherheiten in der zweiten Stufe des Modells zu beheben gewesen waren. Als Darstellungsform wird die in Kap. 2.3 eingeführte Relevanzmatrix gewählt.

⁴⁹ Auswertbar waren sämtliche Flüsse mit Angabe der Flussgrösse und der absoluten Unsicherheit. Bisher nicht berücksichtigte Flüsse (in Kap. 3 mit Flusswert und Unsicherheit 0 versehen) wurden hier nicht berücksichtigt.

Abb. 24 > Relevanzmatrix

Klassierungsschema zur Bestimmung der Relevanz der Unsicherheit in Abhängigkeit der Grösse des Flusses und seiner absoluten Unsicherheit.

	grosse relative Unsicherheit	kleine relative Unsicherheit
grosse Flüsse	tier. Abfälle Urin	Hofdünger Dünger Import Reinigungsprodukte
kleine Flüsse	Oberflächenabfluss LW Regenüberlauf	Reinigungsprodukte

(vgl. abb. 22)

In Abb. 24 werden die Unterschiede in den Eigenschaften der Phosphorflüsse deutlich, so dass mit der Bewertung auf Basis der Flussgrösse und Unsicherheit folgende Fälle unterscheidbar sind:

- > Relevant: tierische Abfälle, Urin (da relativ gross und unsicher);
- > Irrelevant: Reinigungsprodukte (geringe Unsicherheit);
- > Bedingt relevant: übrige Flüsse.

A5 Gesetzliche Grundlagen

a) DüV	Verordnung vom 10. Januar 2001 über das Inverkehrbringen von Düngern (Düngerverordnung)
b) EDAV	Verordnung vom 18. April 2007 über die Ein-, Durch- und Ausfuhr von Tieren und Tierprodukten
c) GSchV	Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober 1998
d) StoV	ChemRRV Verordnung zur Reduktion von Risiken beim Umgang mit bestimmten besonders gefährlichen Stoffen, Zubereitungen und Gegenständen vom 18. Mai 2005
e) TVA	Technische Verordnung über Abfälle vom 10. Dezember 1990
f) USG	Bundesgesetz vom 7. Oktober 1983 über den Umweltschutz (Umweltschutzgesetz)
g) VTNP	Verordnung vom 23. Juni 2004 über die Entsorgung von tierischen Nebenprodukten
h) VeVA	Verordnung über den Verkehr mit Abfällen vom 22. Juni 2005

A6 Risikoanalyse

A6-1 Risikokonzept eines nachhaltigen Phosphorhaushalts

An dieser Stelle wird das Konzept zur Risikobetrachtung hinsichtlich des Phosphorhaushalts erläutert. Hierfür werden zuerst der wissenschaftliche Hintergrund mit seinen Prinzipien sowie die Herkunft des angewandten Konzepts vorgestellt; anschliessend wird das Konzept zur Risikobetrachtung anhand von zwei Fallbeispielen bezogen auf den Phosphorkreislauf erläutert. Anhand der vorangegangenen Analysen werden erste Ansätze für ein auf Unsicherheiten basierendes, Managementsystem erarbeitet (Mouron 2005, Mouron et al. 2006).

A6-1.1 Einleitung

Die Rohstoff- und Abfallpolitik ist immer wieder gefordert Entscheidungen zu treffen, damit der Umgang mit Rohstoffen und Abfällen den Kriterien der Nachhaltigkeit möglichst nahe kommt. Eine zentrale Aufgabe des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) besteht darin Entscheidungsgrundlagen und Regelungsvorschläge für diese Politik zu beschaffen und zu erarbeiten. Das BAFU umreisst die Anforderung an eine Entscheidungsunterstützung wie folgt: «Entscheide im Bereich der Abfall- und Rohstoffpolitik sollen soweit als möglich auf der Basis von zuverlässigen Daten über Stoff- und Güterflüsse sowie über die bei Herstellung, Gebrauch und Entsorgung verursachte Umweltbelastung gefällt werden» (Fahrni 2007). Angewendet auf den Phosphorhaushalt in der Schweiz ist man am BAFU aktuell daran die einzelnen Phosphorflüsse mittels einer Software (STAN) laufend aktualisiert zu halten und auch zukunftsgerichtete Szenarien zu rechnen. Sind die Daten für den Phosphorhaushalt bekannt, stellt sich die Frage: «Sind heute und in Zukunft die Kriterien für einen nachhaltigen Stoffhaushalt erfüllt?» Wenn nein: «Welche Massnahmen sind angemessen?» Weil sich die Bedingungen für die Phosphorflüsse immer wieder ändern können, (Beispiel: BSE, Rinderwahnsinn → Verbot für Dünger mit Knochenmehl), stellen sich diese Fragen periodisch. Es ist deshalb für das BAFU von Interesse ein möglichst effizientes und wirkungsvolles Konzept für die Beantwortung dieser zwei Fragen zur Hand zu haben.

Im Folgenden wird der heutige Stand des Wissens über Risikoanalysen verwendet, um die aktuelle Rohstoff- und Abfallpolitik bezüglich des Phosphorhaushalts in der Schweiz daran zu reflektieren. Als Referenz für die aktuelle Situation wird auf das BAFU-Dokument «Schliessung von Stoffkreisläufen – vom frommen Wunsch zur dringenden Notwendigkeit? Die Perspektive der Behörden» (Fahrni 2007) abgestützt. Aus dieser Gegenüberstellung werden Vorschläge abgeleitet, wie das BAFU ihr Konzept zur Bereitstellung von zukünftigen Entscheidungsgrundlagen zuhanden von politischen Behörden optimieren könnte.

A6-1.2 Methodik der Risikoanalyse

Eine umfassende Darstellung über das aktuelle Wissen und die Praxis der Risikoanalyse ist kürzlich erschienen im Buch «Risiko – Über den gesellschaftlichen Umgang mit

Unsicherheit» (Renn 2007a). Eine Kurzfassung ist online verfügbar (Renn 2007b). Die in diesem Buch präsentierte Methodik der Risikoanalyse ist weitgehend abgestimmt mit dem International Risk Governance Council in Genf (IRGC 2005) und dem Wissenschaftlichen Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen von Deutschland (WBGU 1999, 2000). Die im Folgenden dargestellte Methodik lehnt sich an diese Quelle an.

Eine vollständige Risikoanalyse besteht aus vier Komponenten (Tab. 19).

Tab. 19 > Komponenten einer Risikoanalyse

1. Definition von Risiken und Schutzgütern [Risk Identification]	<ul style="list-style-type: none"> • Festlegen, was man unter Risiko versteht • Kriterien für die Bestimmung von Schutzgütern aufstellen • Schutzgüter identifizieren
2. Bewertung von Risiken [Risk Assessment]	Wissenschaftlicher Prozess zur Ermittlung unerwünschter Konsequenzen und ihrer Ursachen, so wie zur Messung von Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmass.
3. Evaluation von Risiken [Risk Evaluation]	Verfahren zur Ermittlung der Akzeptanz eines bestimmten Risikos.
4. Management von Risiken [Risk Management]	Prozess, der das Risiko auf ein von der Gesellschaft tolerierbares Mass zu senken und für Kontrolle, Überwachung und Kommunikation mit der Öffentlichkeit zu sorgen.

A6-1.3 Definition von Risiko und Schutzgut

Risiko wird bei Renn (2007b) in einer allgemeinverständlichen Formulierung folgendermassen definiert:

«**Risiko** ist die Möglichkeit, dass menschliches Handeln oder Naturereignisse negative Folgen für das haben, was Menschen lieb und teuer ist.»

«Was Menschen lieb und teuer ist» heisst etwas abstrakter ausgedrückt: «Was für Menschen **Wert** hat». Eine Risikosituation besteht daher ganz allgemein dann, wenn Werte gefährdet sind. Auf dem Hintergrund des Anspruchs der Nachhaltigkeit (Brundtland 1987; Fahrni 2007: S. 3–4; SR 101 Art. 73 Nachhaltigkeit) sind damit ökonomische, ökologische und soziale Werte gemeint und zwar für einen Zeithorizont der die gegenwärtigen und die zukünftigen Generationen umfasst. Durch den Begriff der Nachhaltigkeit entsteht also die Verantwortung, bestimmte Werte zu schützen. Solche Werte werden sinngemäss als «Schutzgüter» bezeichnet. Obwohl bei den technischen Wissenschaften oft die Umwelt und die Gesundheit als Schutzgüter im Vordergrund stehen, ist es im Zusammenhang mit dem Nachhaltigkeitsanspruch sinnvoll, wenn man den Begriff «Schutzgüter» genügend breit definiert, wie beispielsweise:

Schutzgüter sind ökonomische, ökologische oder soziale Werte, die man vor Risiken schützen will mit Blick auf die gegenwärtigen und zukünftigen Generationen.

A6-1.4 Bewertung von Risiken

Mit der wissenschaftlichen Risikobewertung wird eine Antwort gegeben, wie stark ein Schutzgut gefährdet ist. Es gibt verschiedene Verfahren, welche für die Risikobewertung eingesetzt werden können (Tab. 20). Jedoch alle Risikobewertungen haben zum Ziel, **Wahrscheinlichkeiten für unerwünschte Folgen** für bestimmte Schutzgüter abzuschätzen.

Die Schadenswahrscheinlichkeiten für Schutzgüter sind in der Praxis häufig nicht isoliert zu betrachten, da **Risikoverkettungen** vorliegen können. Risikoverkettungen werden oft auch als «systemische Risiken» bezeichnet. Das heisst, wenn bei einem Schutzgut die Wahrscheinlichkeit für unerwünschte Folgen gesenkt wird, kann bei andern Schutzgütern die Schadenswahrscheinlichkeit oder das Schadensausmass dadurch steigen. Es gibt oft ein «Risiko der Risikoverhinderung», da Schutzgüter manchmal in nicht offensichtlicher Weise in Wechselbeziehung stehen.

Ein Beispiel dafür sind die zusätzlichen Verkehrsoffer in den USA als Folge der Verlagerung von Flugreisen auf die Strasse unter dem Eindruck des Terroranschlages vom 11. September 2001 (Gigerenzer 2004).

Tab. 20 > Verfahren der Risikobewertung

1. Versicherungstechnische Analysen	<ul style="list-style-type: none"> • Extrapolation von Vergangenheit auf Zukunft; Eintrittswahrscheinlichkeiten werden anhand von Datengrundlagen berechnet.
2. Analyse der Gesundheitsrisiken	<ul style="list-style-type: none"> • Dosis-Wirkungs-Modelle Es werden wahrscheinliche Ursachen und deren Beitrag für die Gesundheitsgefährdung abgeschätzt.
3. Probabilistische Risikobeurteilung	<ul style="list-style-type: none"> • Man untersucht Fehlerraten in technischen Systemen, um deren Wahrscheinlichkeit zu bestimmen. • Verteilungsmuster werden untersucht, um Zusammenhänge von Mittelwerten, Streubreite (Standardabweichung) und asymmetrischen Verteilungen aufzudecken.

A6-1.5 Evaluation von Risiken

Die Risikoevaluation ist im Grunde eine Risikoabwägung. Ausgehend von der Definition von Schutzgütern und der wissenschaftlichen Risikobewertung geht es in diesem Schritt nun darum, die Risikoakzeptanz der betroffenen Personen, Gruppen oder Institutionen abzuklären. Abhängig von der Risikoakzeptanz lässt sich der entsprechende Handlungsbedarf ableiten, um die Schutzgüter zu schützen (= Risikomanagement). Die Evaluation der Risiken stellt eine Brücke zwischen Risikobewertung und Risikomanagement dar.

gement dar. Überbrückt wird mit der Evaluation das Tal zwischen gesammeltem Expertenwissen einerseits und den Wünschen, Anliegen und Wahrnehmung der Öffentlichkeit andererseits.

Die Variante «Null Risiko» gibt es praktisch nie; wenn wir essen wollen, dann braucht es Phosphordünger für die landwirtschaftliche Produktion und damit nehmen wir zu einem gewissen Grad die Gefährdung von Schutzgütern in Kauf. Entscheidend ist, ob die Risiken vertretbar sind, ob sie verhältnismässig sind im Vergleich zu dem was man gewinnen will. In der Praxis der Risikoevaluation hat sich bewährt, jedes Risiko nicht nur bezüglich der klassischen Parametern «Eintrittswahrscheinlichkeit» und «Schadenspotenzial» einzuschätzen, sondern noch weitere Risikoparameter zu berücksichtigen (Tab. 21). Die ersten drei Parameter in Tab. 21 basieren auf wissenschaftlichen Untersuchungen, wie sie bei der Risikobewertung beschrieben sind. Die andern vier Parameter (4.–7.) berücksichtigen Faktoren, welche die Menschen «beunruhigen», die hingegen aus wissenschaftlicher Perspektive als rational erscheinen. Diese vier Parameter bilden die oben erwähnte Brücke zwischen der öffentlichen Wahrnehmung und der wissenschaftlichen Risikobewertung.

Tab. 21 > Risikoparameter für die Risikoevaluation (Risikoabwägung)

1. Eintrittswahrscheinlichkeit	(W)
2. Ausmass der Schadensfolgen	(A)
3. Abschätzungssicherheit	(S)
4. Persistenz	(P)
5. Reversibilität	(R)
6. Verzögerungswirkung, Spätfolgen	(V)
7. Mobilisierungspotenzial	(M)

Renn et al. 2007: S.163

Das Ampelmodell

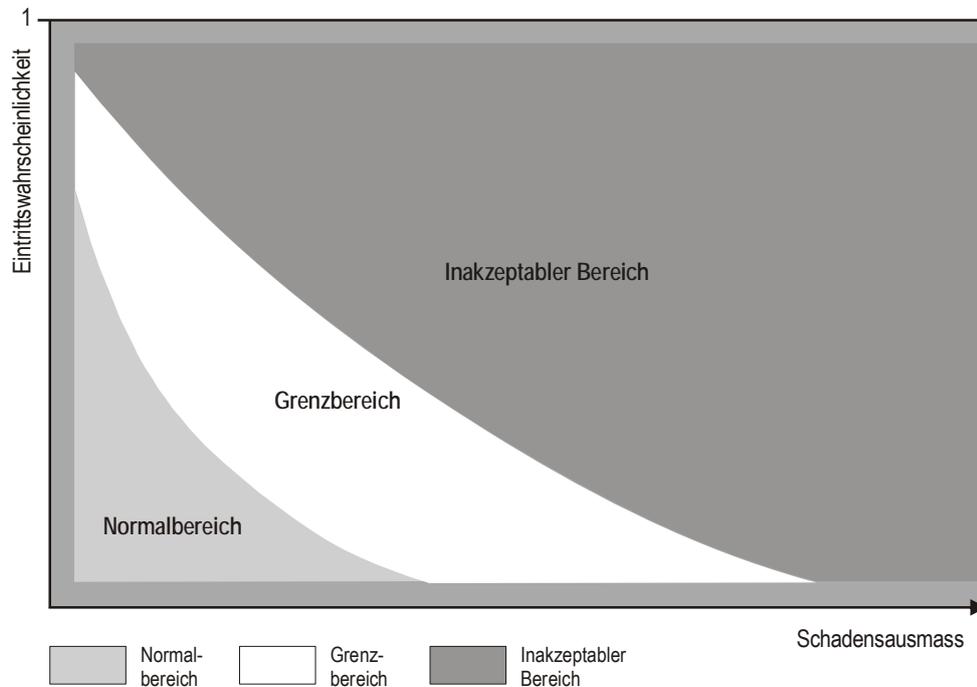
Für den praktischen Umgang mit den Risikoparametern von Tab. 4 wird heute in verschiedenen Ländern, unter anderem auch in der Schweiz, Dänemark, Deutschland und Grossbritannien, das so genannte **Ampelmodell** verwendet. Das heisst, aufgrund der Risikoparameter wird ein Risiko einer von drei prinzipiellen Kategorien zugeteilt; entweder ist das Risiko akzeptabel oder inakzeptabel und wenn beides nicht eindeutig zutrifft, wird es dem so genannten Grenzbereich zugeteilt; analog zu einer Verkehrsampel, welche entweder auf grün und rot steht und mit gelb einen Zwischenbereich markiert (Abb. 25).

Grün symbolisiert den «Normalbereich». Hier sind alle Risikoparameter zwar nicht gleich Null, aber auf einem relativ tiefen Niveau. Es besteht wenig Ungewissheit bezüglich dieser Parameter, die Nutzen sind unbestritten und ein kosteneffektives Sicherheitsniveau lässt sich leicht finden. Die Erfahrung zeigt, dass etwa 80 % aller

Risiken in diese Kategorie fallen. Darum handelt es sich um eine überschaubare Anzahl von Risiken, die genauer untersucht werden müssen.

Beim gelben und roten Bereich befindet sich mindestens ein Parameter auf relativ hohem Niveau, die Ungewissheit ist gross, der Nutzen gesellschaftlich stark umstritten und ein tolerierbares Sicherheitsniveau noch nicht erreicht. Deshalb ist Handlungsbedarf vorhanden, um das Risiko aus dem gelben in den grünen Bereich zu verschieben. Wird ein Risiko dem roten Bereich zugeordnet, dann ist die Risikolage so prekär, dass sogar in Erwägung gezogen werden sollte, auf diese Risikoquelle zu verzichten.

Abb. 25 > Das Ampelmodell für die Risikoevaluation



Quelle: Renn et al. 2007: S.96.

Der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WGBU) entdeckte bei seinen Untersuchungen immer wiederkehrende Risikotypen, denen Namen aus der griechischen Mythologie verliehen wurden. Insgesamt können 6 Risikotypen unterschieden werden. Sie sind in Tab. 22 kurz beschrieben. Wenn man Risiken diesen Risikotypen zuordnet gewinnt man viel Differenziertheit für eine konstruktive Diskussion bezüglich Risikoakzeptanz. Ein weiterer wichtiger Effekt ist, dass diese Risikotypen für Gestaltung des Risikomanagements eine sehr gute Orientierung bieten.

Tab. 22 > Klassifikation von Risikotypen

Typ	Beispiel
1 Damoklesschwert	
<ul style="list-style-type: none"> • extrem tiefe Eintrittswahrscheinlichkeit (W) • grosses Ausmass der Schadensfolgen (A) • wenig Ungewissheit zu W und A, d. h. gute Abschätzungsunsicherheit (S) 	<ul style="list-style-type: none"> • Kernenergie, Chemieanlagen, Dämme
2 Zyklon	
<ul style="list-style-type: none"> • grosse Ungewissheit oder Unwissenheit über die Eintrittswahrscheinlichkeit • grosses Ausmass der Schadensfolgen (A) 	<ul style="list-style-type: none"> • Naturkatastrophen, karzinogene Stoffe in geringen Dosen
3 Pythia	
<ul style="list-style-type: none"> • grosse Ungewissheit über die Eintrittswahrscheinlichkeit (W) • grosse Bandbreite bei potenziellen Schäden (A) • erwiesener Kausalzusammenhang zwischen Auslöser und Schaden 	<ul style="list-style-type: none"> • Eingriffe in Geozyklen, Klimaveränderung, Gentechnik, Gesundheitsrisiken durch Chemikalien oder Lebensmittel, neue Seuchen, BSE
4 Büchse der Pandora	
<ul style="list-style-type: none"> • grosse Ubiquität • grosse Persistenz führt zu Anreicherung von Schadstoffen • kleine Reversibilität • die Schadensfolgen sind nicht klar einzugrenzen, man basiert deshalb auf plausiblen Szenarien zu möglichen Schäden, Vorsorgemassnahmen sind deshalb gefragt 	<ul style="list-style-type: none"> • Ubiquitäre, persistente Chemikalien, DDT, Ozon, Xenobiotika, Monofunktionalität von Kulturpflanzen
5 Cassandra	
<ul style="list-style-type: none"> • - Eintrittswahrscheinlichkeit eher hoch - Ausmass des Schadens eher hoch - grosse Verzögerungswirkung, Spätfolgen (langer Zeitraum zwischen Ursache und Wirkung), deshalb wenig Beunruhigung bei den meisten Menschen 	<ul style="list-style-type: none"> • Mutagene Wirkungen, Langzeitfolgen von Klimaveränderungen
6 Medusa	
<ul style="list-style-type: none"> • Eintrittswahrscheinlichkeit eher ungewiss • Ausmass des Schadens eher klein obwohl grosse Exposition • grosses Mobilisierungspotential, die Menschen sind ängstlich und besorgt, die Unzufriedenheit ist gross, obwohl die meisten Experten sagen, dass es keinen Anlass zur Beunruhigung gibt. 	<ul style="list-style-type: none"> • Elektromagnetische oder ionisierende Strahlung, karzinogene Stoffe unterhalb der Signifikanzgrenze

Renn et al. 2007

A6-1.6 Management von Risiken

Die Aufgabe des Risikomanagements besteht darin, die für den Risikotyp passenden **Schutzmassnahmen** zu finden und umzusetzen. Renn et al. (2007) schlagen drei verschiedene Managementstrategien vor, die wenn nötig auch kombiniert werden können (Tab. 23).

Risikoorientierte Managementstrategie:

Diese Strategie kommt zum Einsatz, wenn uns die wissenschaftliche Risikobewertung genug Fakten über das potenzielle Schadensausmass und über die Eintrittswahrscheinlichkeit liefern konnte. Sobald die Zahlen zu den Risiken vorliegen, können wir sie in das Ampelmodell einfügen. Wenn ein Risiko in den gelben oder roten Bereich fällt, müssen wir entweder das **Katastrophenpotenzial und/oder die Eintrittswahrscheinlichkeit reduzieren**. Je nach Situation ist es auch notwendig die Persistenz, die Ubiquität oder die Irreversibilität zu reduzieren. Der Einsatz von risiko-minimierenden Techniken (BACT = best available control technology) sind oft sehr wirksam für das risikoorientierte Management. Wo es möglich ist modellieren wir auch die «individuelle Varianz», damit wir nicht nur über Mittelwerte, sondern auch über die Streuung Bescheid wissen, welche bei individuellen Situationen auftreten kann. Daraus lassen sich beispielsweise Sicherheitsfaktoren begründen. Das Instrumentarium des risikoorientierten Managements ist in der Praxis verbreitet und wird deshalb auch als «klassisches Risikomanagement» bezeichnet.

Das risikoorientierte Management passt gut zur Regulierung der zwei Risikotypen «**Damokles**» und «**Zyklop**». Dieses Management ist auch passend für alle «Normalrisiken»; also für Risiken mit messbarer Wahrscheinlichkeit und einem nicht katastrophalen Schadenspotenzial.

Vorsorgeorientierte Managementstrategie

Wenn wir das Schadensmass, die Eintrittswahrscheinlichkeit oder andere Risikoparameter aus Tab. 21 nicht kennen, ist die vorsorgeorientierte Managementstrategie angebracht. Wenn die Ungewissheit zu gross ist, muss Vorsicht den Handlungsmassstab prägen. Die Verantwortlichen geraten nämlich in Schwierigkeiten, sollte der Schaden doch schlimmer als vermutet ausfallen und sich vielleicht auch noch als ubiquitär und/oder persistent herausstellen. Als Schutzmassnahmen sind eine strenge Überwachung und klare Haftungsregeln empfehlenswert. Dadurch werden alle, welche mit solchen Risiken umgehen wachsamer. Es sollte der Grundsatz «so wenig wie möglich und so viel wie nötig» (ALAR: »as low as reasonably possible») angewandt werden. Damit kann erreicht werden, dass ein vernünftiges Verhältnis von Nutzen und ungewissen Ergebnissen gefunden werden kann.

Ist ein Risiko dem roten Bereich zuzuordnen, sind Verbote angebracht. Aber Verbote sollten nur sehr sparsam eingesetzt werden, denn sie können auch kontraproduktiv wirken und wichtige Entwicklungen verunmöglichen. Für das vorsorgeorientierte Management sind zahlreiche andere, kostengünstige und wirksame Instrumente unter-

halb der Verbotsebene vorhanden, welche zeitliche und räumliche Beschränkungen umsetzen. Wenn man allerdings durch mehr Forschung und Untersuchungen sich vom vorsorgeorientierten Ansatz hin zum risikoorientierten Ansatz bewegen kann, dann sollte man das tun.

Das vorsorgeorientierte Management eignet sich zur Regulierung der beiden Risikotypen «**Pythia**» und «**Pandora**». Eine vorsorge Strategie ist deshalb sinnvoll, wenn die **Widerstandskraft (Resilienz)** und Robustheit gegenüber Überraschungen gestärkt werden soll.

Diskursorientierte Managementstrategie

Wenn **Ambiguität** vorliegt, brauchen wir ein diskursorientiertes Management. Wir sprechen von Ambiguität, wenn Ergebnisse zu den Risikoparametern unterschiedlich ausgelegt werden kann. Oft verwechselt man Ambiguität mit Ungewissheit oder man macht keinen Unterschied zwischen beiden. Bei der Ungewissheit ist man sich einig, dass man es mit grossen Unsicherheiten zu tun hat aber es gibt keine unterschiedlichen Interpretationen davon. Wenn kein Konsens über die Interpretation der Ergebnisse vorliegt, wie im Falle der Ambiguität, dann rückt die Risiko-Kommunikation ins Zentrum. Ziel ist ein politischer Konsens, eine Einigung über die verschiedenen Standpunkte. Hier sind Verfahrenstechniken gefragt, die Offenheit, Transparenz und Klarheit schaffen. Notwendig dafür ist das Vertrauen in die Institutionen, welche ein solches diskursorientiertes Management durchführen. **Kommunikationsverfahren** binden die verschiedenen Interessengruppen ein und beteiligen die Öffentlichkeit. Die Schnittstelle zwischen Öffentlichkeit und Fachleuten soll damit verbessert werden. Verursacher, Träger und Regulatoren von Risiken müssen möglichst aktiv in den Kommunikationsprozess gebracht werden, um sich über kollektive Ziele zu Verständigen. Ein zunehmender Bedarf an diskursiven Verfahren ist in verschiedenen Ländern auszumachen, vor allem in demokratischen Staaten mit hoher Vielfalt an normativen Vorstellungen, woraus eben Ambiguität entstehen kann. Einiges an Entwicklungsarbeit steht allerdings noch an, um diskursive Verfahren zu entwerfen und in Gang zu bringen, um mit Ambiguität konstruktiv umzugehen.

Das diskursive Management eignet sich für die beiden Risikotypen «**Kassandra**» und «**Medusa**».

Tab. 23 > Strategien für das Risikomanagement

	Risikotyp	Handlungsstrategien
Risikoorientiertes Management		
Hinreichendes Wissen zu den Risikoparametern	Damokles und Zyklon	Klassische Risikoabschätzung, Kosten-Nutzen-Analyse, Risiko-Risiko-Vergleiche; Katastrophenpotenzial reduzieren, Wahrscheinlichkeit ermitteln, Nutzen-Risiko-Abwägung, Forschung intensivieren
Vorsorgeorientiertes Management		
Grosse Unsicherheit, Ungewissheit oder Unkenntnis (Unwissenheit)	Pythia und Pandora	Vorsorgeprinzip anwenden, Substitute entwickeln, zeitliche und örtliche Begrenzungen, Verringerung der Verwundbarkeit
Diskursorientiertes Management		
Grosse Ambiguität (Mehrdeutigkeit der Ergebnisse)	Kassandra und Medusa	Bewusstseinsbildung, Vertrauensbildung, Partizipation, Diskussionsforen anbieten, Konfliktschlichtung

nach Renn et al. 2007

A6-2 Resultate: Status des Risikokonzepts und Optimierungsvorschläge

A6-2.1 Definition von Risiken und Schutzgütern im Gesamtsystem Phosphor

Wenn es um die Gestaltung eines nachhaltigen Stoffhaushaltes geht, wird in der Dokumentation des BAFU (Fahrni 2007) zwar der Begriff «Risiko» nicht explizit verwendet, jedoch der Begriff «Schutzgüter» wird im gleichen Sinn verwendet wie dies hier im Kapitel «Definition von Risiko und Schutzgut» beschrieben ist. **Der Risikobegriff ist somit für die aktuelle Rohstoff- und Abfallpolitik mindestens implizit durch den Begriff «Schutzgut» vorhanden.** Diese Feststellung erscheint deshalb wichtig, damit der Begriff Risiko nicht nur für klassische Umweltrisiken, wie Hochwasser oder Bergstürze reserviert bleibt. Der Risikobegriff ist umfassender und kann die Nachhaltigkeitsziele des Phosphorhaushalts zu unterstützen.

Einschätzung des Status

Geschützt soll ein Schutzgut aber nicht um jeden Preis werden. Auch hier hat das BAFU den Nachhaltigkeitsbegriff konsequent angewendet. Das BAFU hält fest, dass Emission und Energie über alle Etappen des Lebensweges eines Produktes oder einer Dienstleistung mitbetrachtet werden sollen und dass die Rohstoffnutzung und der Umgang mit Abfällen zum wirtschaftlichen Wohlstand sowie zur sozialen Sicherheit und Gerechtigkeit in der Schweiz und im Ausland beitragen soll (Fahrni 2007: S.4). Im Weiteren hat das BAFU Grundsätze formuliert, wann ein Stoff Schutzmassnahmen benötigt. Ob Schutzmassnahmen benötigt werden hängt ab von (Fahrni 2007: S.7):

- > der Häufigkeit der Ressource
- > dem mit der Gewinnung aus natürlichen Stoffen verbundenem Aufwand an Energie und der Umweltbelastung

- > dem durchschnittlichen Verbrauch im Vergleich zur Häufigkeit

Ein wichtiger Grundsatz des BAFU im Zusammenhang mit Rohstoffen als Schutzgütern ist das Bestreben nach **möglichst geschlossenen Kreisläufen**. Da es sich bei qualitativ guten Phosphorerzen um eine nicht erneuerbare Ressource handelt, gilt beim BAFU folgender Grundsatz (Fahrni 2007: S. 6): «Bei nicht erneuerbaren Ressourcen, welche bei der Nutzung nicht zerstört werden, müssen wir zu Abfall gewordene Produkte recyceln.» Aktuell ist jedoch nur ein sehr kleiner Rückfluss von Phosphor in die Landwirtschaft vorhanden, nämlich mittels Grüngütdünger. Die zwei grossen Quellen für den P-Rückfluss Klärschlamm und tierische Abfälle sind zurzeit gesperrt. «Seit 1. Mai 2003 darf Klärschlamm nicht mehr als Dünger verwendet werden; er muss künftig umweltverträglich verbrannt werden» (UVEK 2003). Grund ist hier eine zu grosse Belastung des Klärschlammes mit Schadstoffen und Krankheitserregern, welche irreversible Bodenschäden und inakzeptable Risiken für die Gesundheit und Beeinträchtigung der Lebensmittelqualität zur Folge hätten. Am Falle von tierischen Abfällen sind diese für die Wiederverwendung verboten wegen der Gefahr von BSE-Übertragung (Rinderwahnsinn).

Um Verluste an Phosphor durch Abwaschung von Gülle und die damit verbundenen negativen Folgen in Gewässern durch Eutrophierung in den Griff zu bekommen, sind Massnahmen wie beispielsweise obligatorische Nährstoffbilanz auf landwirtschaftlichen Betrieben und Vorschriften für die zeitliche und örtliche Ausbringung von Gülle in Kraft.

Als Schutzgüter im Zusammenhang mit dem Phosphorhaushalt sind aktuell im Zentrum der Rohstoffpolitik:

- > Die Bodenfruchtbarkeit in der Schweiz bezüglich Phosphor-Versorgung und Schutz vor Schwermetallen
- > Lebens- und Futtermittelqualität bezüglich Gesundheitsrisiko durch Schwermetallaufnahme
- > Wasserqualität als Schutz vor Eutrophierung

In Abb. 2 sind sechs Schutzgüter im Gesamtsystem Phosphor eingezeichnet, die wir für einen Ansatz zur Optimierung vorschlagen. Drei davon sind bereits Ziel von politischen Massnahmen, gemäss vorherigem Abschnitt, nämlich die Schutzgüter 2a «Bodenfruchtbarkeit von Agrarland in der Schweiz», 3 «Lebens- und Futtermittelqualität» und 5 «Wasserqualität». Wir schlagen vor, **drei weitere Schutzgüter in Betracht zu ziehen**, nämlich Nummer 1 «Knappe Phosphorerze», Nummer 2b «Bodenfruchtbarkeit von Agrarland im Ausland», und Nummer 4 «Recycling von pflanzlichen Nährstoffen». Diese drei neuen Schutzgüter bekommen erst Gewicht, wenn man das System Phosphor von der auf die Schweiz konzentrierten Perspektive, **mit einer globalen Perspektive erweitert**. Die wachsende Weltbevölkerung und der sich stark wandelnde Lebensstandard und Lebensstil von grossen Massen von Menschen sehen wir als entscheidende Risikoquelle für die Schutzgüter 1, 2b und 4 an. Im Einzelnen:

Optimierungsvorschläge

Gründe für Nr.1 «Phosphorerze» als Schutzgut anzusehen:

Die weltweite Nachfrage nach Phosphordüngern wird steigen. Die Vorräte an Phosphorerzen sind endlich, besonders diejenige welche gut zugänglich sind und ein gutes P/Cd-Verhältnis aufweisen. Andere Phosphorquellen als Erze sind zwar vorhanden, wie beispielsweise Phosphor in Sedimenten von Gewässern, doch die Gewinnung ist noch nicht kommerzialisiert.

Gründe für Nr.2b «Bodenfruchtbarkeit von Agrarland im Ausland» als Schutzgut anzusehen:

In die Schweiz fliesst zurzeit etwa doppelt soviel Phosphor aus importierten Futter- und Lebensmitteln, wie durch P-Düngerimporte ins Land kommen. Aus einer Nachhaltigkeitsperspektive sollten deshalb für ausländische Böden die gleichen Schutzmassnahmen angestrebt werden, wie für die schweizerischen Agrarflächen, welche seit Jahren ein unbestrittenes Schutzgut darstellen.

Gründe für Nr.4 «Recycling von pflanzlichen Nährstoffen» als Schutzgut anzusehen:

Recycling von Phosphor aus Klärschlamm und tierischen Abfällen ist politisch wünschbar. Die Möglichkeit Phosphor und andere Pflanzennährstoffe wiederzugewinnen ist deshalb ein Wert an sich. Dieses Recycling ist jedoch aus verschiedenen Gründen gefährdet, bzw. nicht umsetzbar: Hygienische Gründe (tierische und menschliche Pathogene und diverse Schadstoffe welche vom Menschen ausgeschieden werden), gesundheitliche Gründe (Schwermetalle). Nebst diesen Gefahrenquellen ist auch der Preis für Importdünger von Bedeutung für die Rentabilität von Investitionen in die Entwicklung von Innovationen und Firmen, die den Recyclingservice erbringen könnten. Je unsicher die Investitionen in diese Technologien sind, desto weniger wird investiert und desto länger dauert es bis Lösungen für das P-Recycling im Einsatz stehen.

A6-2.2 Risikobewertung

Einschätzung des Status

Zum Gesamtsystem der Phosphorflüsse in der Schweiz liegen Studien vor (Lamprecht, 2004; BAFU 2006). Mit unserem Projekt hat das BAFU eine noch präzisere Phosphorflussanalyse in Auftrag gegeben, unter Verwendung der Software STAN. Dabei wurde erstmals auch die Datengrundlage beurteilt, indem die absoluten und relativen Fehler abgeschätzt wurden. Die Fehler liegen für die meisten Flüsse in einem befriedigenden Rahmen. Schwieriger wird es, wenn in die Zukunft extrapoliert wird. Bezüglich der Verfügbarkeit von Phosphorerzen bestehen Schätzungen, welche die Vorräte, bei gleichbleibendem jährlichem Verbrauch auf 100 bis 200 Jahre schätzen (Sinden & Leyshon 1998; Smil 2000, Barros 2007). Solche Vorratsschätzungen sind aber sehr unsicher, weil sie Zeiträume von über 100 Jahren betreffen und unberechenbare Faktoren, wie globale P-Nachfrage und zukünftige Innovationen bei der P-Fördertechnik, eine wichtige Rolle spielen. Aber auch für die P-Subsysteme, wie im Falle der «Abfallwirtschaft», können die P-Flüsse durch überraschend auftretende Ereignisse verändert werden. Das breite und akute Auftreten von BSE (Rinderwahn) ist ein aktuelles Beispiel dafür.

Bezüglich täglicher Phosphorversorgung des Menschen durch Lebensmittel gibt es keine Gesundheitsgefährdungen durch Über- oder Unterversorgung (Tab. 22). Für Cadmium hingegen, welches über Phosphordünger und andere Quellen in den Boden und dann in pflanzliche Lebensmittel und über Futtermittel in Fleischwaren gerät, werden tägliche Aufnahmen geschätzt, die relativ nahe an den Grenzwerten der WHO liegen (Tab. 24). Über Dosis-Wirkungs-Modelle für Cd weiss man relativ viel. Wie stark der Beitrag von Phosphordüngern für die Gefährdung der Bodenfruchtbarkeit durch Eintrag von Cd und anderen Schwermetallen ist, bestehen in der Literatur unterschiedliche Meinungen. Smil (2000, S.82) warnt, dass der Cd-Eintrag durch P-Dünger in seiner Wirkung nicht unterschätzt werden darf. Das BAFU (2006, S.144) kommt zum Schluss, dass der Cd-Eintrag durch P-Dünger, durch den Austrag mittels Erntegütern, etwa neutralisiert werde. Beide Literaturquellen sind sich aber einig, dass Cd-Eintragungen in Böden vor allem auch über die Luft als Immissionen von Verbrennungsprozessen in die Böden gelangen. Cd in Klärschlamm ist ebenfalls ein Problem, stammt aber zu einem grossen Teil ebenfalls nicht aus P-Düngern sondern aus Cd-haltigen Produkten wie Farben oder Batterien.

Zu Verfahren 1
«Versicherungstechnische
Analysen»

Zu Verfahren 2 «Analyse der
Gesundheitsrisiken»

Tab. 24 > Tageskonsum und Grenzwerte für Phosphor und Cadmium

Stoff	Mittelwert heute	Grenzwert*	Quelle
P	1,5 g	800 g	Smil 2000, p. 56
Cd	40 µg	50–70 µg (1 µg/kg Körpergewicht)	Smil 2000, p. 82

* recommended daily allowance, WHO

Zu Verfahren 3 «Probabilistische Risikoabschätzung»

Über die Bandbreite möglicher Schwankungen der verschiedenen P-Flüsse im Gesamtsystem ist wenig Kenntnis vorhanden, das gleiche gilt wahrscheinlich auch für die Cd-Flüsse. Das Verteilungsmuster solcher Schwankungen, sowohl innerhalb eines Jahres als auch über mehrere Jahre hinweg, ist noch ein offenes Feld für Untersuchungen und würde der Risikobewertung eine wertvolle Ergänzung liefern.

Probabilistische Risikoabschätzung

Optimierungsvorschläge

Bis jetzt sind die P-Flüsse relativ statisch auf ein Stichjahr bezogen. Vor allem für die probabilistische Risikoabschätzung besteht deshalb Bedarf, die Bandbreiten der P-Flüsse über mehrere Jahre einzuschätzen. Das ergibt eine dynamischere Sicht der Risikobewertung für die einzelnen Schutzgüter. Mit STAN steht dazu nun ein geeignetes Instrument zur Verfügung

Verkettung der Risiken respektive der Schutzgüter

Es besteht ein hoher Grad an Risikoverkettungen bezüglich der Schutzgüter im System Phosphor. Diese Verkettungen sollten in der Risikobewertung stärker berücksichtigt werden. Beispiele von Fragen und Hypothesen, die genauer abgeklärt werden sollten:

- > Wie beeinflussen Cd/P-Limiten beim Import von P-Düngern das Risiko bei den andern Schutzgütern? Was bewirkt das bei den P-Dünger-Preisen? Werden damit P-Dünger mit höheren Verunreinigungen vermehrt in andern Ländern eingesetzt und dort das Schutzgut 2b (Bodefruchtbarkeit ausländischer Böden) negativ beeinflusst? Was hat das für Auswirkungen auf die Qualität der importierten Lebens- und Futtermittel und somit auf das Schutzgut 2a (Bodenfruchtbarkeit inländischer Böden) und das Schutzgut 3 (Gesundheit).
- > Die Knappheit bei P-Düngern könnten unerwünschte Konsequenzen nach sich ziehen, beispielsweise durch stark steigende Preise bei Düngern, was sich dann negativ auf das landwirtschaftliche Einkommen und auf die Lebensmittelpreise auswirken kann. Auch die Verfügbarkeit von Lebensmitteln würde tangiert.
- > Die Preise von P-Düngern haben auch Einfluss auf die Rentabilität von P-Recycling-Unternehmen und somit auf das Schutzgut 4 (Recycling von pflanzlichen Nährstoffen). In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage: Wie weit sollen neue P-Quellen und Techniken zur Steigerung der P-Effizienz auf dem Feld gefördert werden? Damit würde das Schutzgut 1 (Phosphorerze) geschont, jedoch das Schutzgut 4 (P-Recycling) vielleicht negativ beeinflusst.
- > Ab wann wird ein zu langes Verbot für die Düngerherstellung aus tierischen Abfällen wegen dem BSE-Risiko selber zu einem unverhältnismässigen Risiko, weil sich das Verbot negativ auf das P-Recycling und die P-Ressourcenschonung auswirkt?

Methodenbedarf

Nebst der Stoffflussanalyse sind Vollkostenberechnungen und Lebenszyklusanalysen (Öko-Bilanzen) für die Risikobewertung unerlässlich. Damit können Investitions- und

Umweltrisiken des P-Recyclings abgeklärt werden; aber auch das Verknappungsrisiko kann untersucht werden hinsichtlich der Wirkung auf die landwirtschaftlichen Einkommen, oder der Wirkung auf die Versorgungssicherheit mit Lebensmitteln, oder die Entwicklung für Lebensmittelpreise. Wie steht es mit der Überwachung des Cd im Boden? Was bringen Modelle statt Messungen? Die gleiche Frage stellt sich auch für die Überwachung der importierten Lebensmittel.

Individuelle Varianz berücksichtigen: Wie weit können Konsumentinnen und Konsumenten durch ihr Kaufverhalten Schwermetallrisiken vermeiden?

A6-2.3 Risikoevaluation

Die sieben Risikoparameter (Tab. 21) und die sechs Risikotypen (Tab. 22) werden in der aktuellen Ressourcenpolitik im Zusammenhang mit dem Phosphorhaushalt nicht explizit verwendet. Doch kann davon ausgegangen werden, dass solche oder ähnliche Überlegungen zu den politischen Massnahmen geführt haben, welche heute für die mit dem Phosphorhaushalt zusammenhängenden Risiken gelten. Das Konzept der aktuellen Situation gleicht stark dem Ampelmodell. Ob ein Risiko dem Bereich rot, gelb oder grün zugeordnet ist, lässt sich aus den aktuellen, politischen Massnahmen interpretieren. Diese reichen von Verboten (rot), über Gebote und Vorschriften (gelb oder rot) bis hin zu Definitionen von Anforderungen (grün oder gelb).

Einschätzung des Status

Hier eine provisorische Einschätzung der aktuellen Risikoevaluation gemäss Ampelmodell (Abb. 25) und der Schützgüter (Abb. 26):

> **Inakzeptable Risiken (rot):**

- Ausbringen von Klärschlamm als Dünger
→ Verbot
Wirkt bei Schutzgut 2a und 3
- Verwendung von tierischen Abfällen als Dünger
→ Verbot
Wirkt bei Schutzgut 3

> **Risiken im Grenzbereich (gelb):**

- Eutrophierungsrisiko durch Abschwemmen von Gülle
→ Vorschrift für Nährstoffbilanz auf landwirtschaftlichen Betrieben, als Voraussetzung für Direktzahlungen; Regeln und Anforderungen für das Ausbringen
→ P-Gehalte in kritischen Gewässern werden überwacht
Wirkt bei Schutzgut 5
- Eutrophierungsrisiko durch Phosphate aus Geschirrspülmittel und anderen Reinigungsmitteln (ohne Waschmittel)
→ spezielle Reinigungsstufe in ARA's eingeführt
Wirkt bei Schutzgut 5

> Risiken im Normalbereich (grün):

- Verknappung von gut zugänglichen Phosphorerzen mit tiefen Schwermetallgehalten
→ keine politische Massnahmen, aber Problem ist erkannt
Betrifft Schutzgut 1
- Cd-Eintrag in landwirtschaftliche Böden durch Import von Phosphordüngern
→ keine Limiten für Cd/P bei Düngern, doch Problem ist erkannt
Betrifft Schutzgut 2a und 3
- Cd-Eintrag in landwirtschaftliche Böden durch Import von Futter- und Lebensmitteln
→ keine Limiten für Cd in Futter- oder Lebensmitteln, doch Problem ist erkannt
→ keine Limiten für Cd-Gehalt in Agrarböden
Betrifft Schutzgut 3 und 2a
- Cd-Eintrag in landwirtschaftliche Böden durch Luft (Cd aus Verbrennungsprozessen) oder Wasser (Cd aus Farben oder Batterien)
→ Vorschriften für Entsorgung von Cd-haltigen Gegenständen
Betrifft Schutzgut 2a und 3
- Eutrophierungsrisiko durch Phosphate aus Waschmitteln
→ Anforderungen sind definiert: Nur noch Waschmittel ohne Phosphate sind heute in der Schweiz erhältlich. Geschirrspülmittel enthalten allerdings immer noch Phosphate, die Gesamtmenge ist jedoch relativ gering.
Betrifft Schutzgut 5

Die drei Schützgüter 2a, 3 und 5, welche bisher das Ziel von politischen Massnahmen waren, sollten periodisch überprüft werden, ob die bisherige Risikoakzeptanz (rot, grün, gelb) auch in Zukunft zutreffen wird und unter welchen Umständen sich der Risikobereich ändern würde.

Optimierungsvorschläge

Die drei Schutzgüter 1, 2b und 4, welche bis anhin nicht explizit als Schutzgüter im politischen Blickfeld sind, sollten ebenfalls mit dem Ampelmodell evaluiert werden. Man sollte auch prüfen, wie weit es Sinn macht innerhalb von einzelnen P-Subsystemen eine Einschätzung mit dem Ampelmodell vorzunehmen.

Eine Anwendung der 6 Risikotypen, wie sie in Tab. 22 aufgeführt sind, wurde bisher für das Gesamtsystem Phosphor nicht erstellt. Wir empfehlen dies für jedes Schutzgut respektive Risiko zu tun, weil dadurch Argumente für die Zuteilung zu grün, gelb, oder rot differenziert werden, was eine sachliche Diskussion und Kommunikation positiv unterstützen kann.

Beispiel für Schutzgut Nr. 1 «Phosphat-Ressource» (Erschöpfung guter P-Erze und Verfügbarkeit von neue P-Quellen)

Es könnte sich um den Risikotyp **Pythia** handeln. Die Abschätzungssicherheit ist klein. Die Eintrittswahrscheinlichkeit bezogen auf Ort und Zeit sehr ungewiss. Das Schadensausmass ist ebenfalls ziemlich ungewiss und möglicherweise recht hoch, weil eine

Knappheit der P-Ressourcen sich negativ auf die Risiken aller andern Schutzgüter im P-System auswirken kann.

Beispiel für Schutzgut 3 «Lebensmittelqualität und -verfügbarkeit»

Hier trifft wohl der Risikotyp **«Kassandra»** zu. Charakteristisch ist die enorme Verzögerungswirkung. Weder können neue und preiswerte Quellen für P-Dünger innerhalb kurzer Frist erschlossen werden, noch kann eine allfällige Schwermetallbelastung von Agrarböden schnell korrigiert werden (hohe Persistenz und Ubiquität). Die Risikosituation entwickelt sich eher schleichend als sprunghaft. Die Aufmerksamkeit für solche Schutzgüter tendiert tief zu sein. Wenn dann Probleme spürbar werden, kann nicht schnell genug Gegensteuer gegeben werden. Im Weiteren ist die Eintrittswahrscheinlichkeit hoch, denn es gibt einen direkten Zusammenhang zwischen P-Düngerverfügbarkeit und Lebensmittelverfügbarkeit, so wie zwischen Cd/P in P-Düngern und Cd-Eintrag in Agrarböden.

A6-2.4 Risikomanagement

Aktuell wird praktisch ausschliesslich vorsorgeorientiertes Risikomanagement betrieben. Wahrscheinlich deshalb, weil für keines der Schutzgüter oder Risiken hinreichendes Wissen zu den Risikoparametern vorliegt, um eine risikoorientierte Managementstrategie politisch zu rechtfertigen. Deshalb vermuten wir auch, dass aktuell für die Schutzgüter im Zusammenhang mit Phosphor der Risikotyp **«Pythia»** zutrifft, wozu ein **«vorsorgeorientiertes Management»** passend ist.

Einschätzung des Status

Ob ein diskursorientierter Managementansatz für gewisse Risiken vorliegt, können wir nicht abschätzen. Vorgesehen wäre es, denn die Regulierungsvorschläge des BAFU werden mit betroffenen Kreisen besprochen, bevor Empfehlungen zuhanden der politischen Behörden herausgegeben werden. Als gerechtfertigt erachten wir es insbesondere im Zusammenhang mit der Cadmiumproblematik eine **«diskursorientierte Strategie»** zu verstärken, denn diese Art von Risikomanagement passt zum Risikotyp **«Kassandra»**.

Allerdings haben wir einen Grossteil der Risiken der **«Stufe gelb»** zugeordnet. Gelb bedeutet, dass die Risiken in einem Problembereich liegen. Dabei ist es prinzipiell wünschenswert durch ein geeignetes Risikomanagement in den grünen Bereich einzuschwenken oder mindestens nicht in den Roten Bereich zu gelangen. Deshalb ist die heutige Rohstoffpolitik herausgefordert, die Situation respektive das Risikomanagement zu optimieren. Diesem Handlungsbedarf könnte vielleicht mit den folgenden Vorschlägen nachgekommen werden.

Da wahrscheinlich kurzfristig kaum Informationen beschafft werden können, um von einem vorsorgeorientierten Managementansatz zu einer risikoorientierten Strategie vorwärts zu kommen, wird der Überwachung und damit auch einem effektvollen Monitoringsystem grosse Bedeutung zukommen. Ein solches System sollte nicht nur die P-Flüsse sondern auch die Cd-Flüsse und andere Schadstoffflüsse mit einbeziehen,

Optimierungsvorschläge

welche in irgend einer Weise mit dem P-Fluss bei der Rohstoffgewinnung, dem Einsatz auf dem Feld oder den Fragen rund um das P-Recycling verknüpft sind.

Auch wenn einige Risiken heute als akzeptabel (grün) bezeichnet werden können, so ist gerade auch bei diesen Risiken eine Wachsamkeit angesagt, da sich die Situation überraschend ändern kann.

Um die Rohstoff- und Abfallpolitik möglichst robust zu gestalten empfehlen wir wegen dem hohen Grad an Risikoverkettung nicht nur punktuell einzugreifen, sondern eine ganze Palette von Innovationen im Auge zu behalten. Die Tab. 25 zeigt ein mögliches Portfolio an Innovationsfeldern und nennt einige Beispiele. Aus diesen Innovationsfeldern können neue Handlungsoptionen gewonnen werden, welche helfen können, die Risiken rund um die verschiedenen Schutzgüter auf ein akzeptables Mass zu senken oder dort zu halten.

Tab. 25 > Mögliche Innovationsfelder für Phosphor-Effizienz und Cadmium-Reduktion

Neue Quellen

Phosphate von Böden in Seen und Meeren

Schwimmende «Algen-Röhren»

Industrie

Neue P-Düngerformulierung: PII-Komponenten → PI-Komponenten

Pflanzenbau

P-Mobilisation im Boden von PIII-Komponenten durch:
Mikroorganismen; Pflanzenzüchtung (verbesserte P-Resorptionsrate, P-Effizienz)

Pflanzenzüchtung → Sorten mit tiefen Cd-Gehalte

Abfallwirtschaft

P-Recycling und Cd-Elimination bei Abfällen

- Klärschlamm
 - Tierknochen
 - Schweinegülle auf dem Hof → z.B.: Österreichische Firma AshDec
-

A6-3 Fazit

- a) Eine umfassende Risikoanalyse, wie sie im Kapitel «Methodik» vorgestellt wurde, bietet auch für die Rohstoff- und Abfallpolitik Optimierungspotenzial. Der Begriff «Risikomanagement» muss nicht nur für klassische Extremereignisse, wie beispielsweise Bergstürze oder Hochwasser reserviert bleiben.
- b) Das BAFU ist bereits bei allen vier Komponenten der Risikoanalyse aktiv. Vorschläge und Handlungsbedarf für eine Weiterentwicklung dieser Tätigkeiten konnten trotzdem für alle vier Komponenten abgeleitet werden.
- c) Das neue Tool für die Phosphorflussanalyse, basierend auf der Software STAN, kann für alle vier Komponenten der Risikoanalyse genutzt werden, da damit Simulationen für verschiedene Rahmenbedingungen durchgeführt werden können.
- d) Die Methodik der Risikoanalyse gibt ein Raster vor, welches international bereits gut implementiert ist. Dies ist deshalb wichtig, weil ein Risikomanagement im System Phosphor auch eine globale Perspektive zu integrieren hat. Eine Harmonisierung der Methodik der Risikoanalyse kann daher die Kommunikation auch über die Landesgrenzen hinweg unterstützen. Die Methodik der Risikoanalyse wird sich durch die Anwendung noch weiter entwickeln müssen. Wobei klar ist, dass keine Methodik auf alle Risiken passen kann, aber auch nicht für alle Risiken eine neue Methode erfunden werden muss.
- e) Investitionen und Anstrengung besonders bei der Risikobewertung, unter Berücksichtigung der Risikoverkettungen, könnten sich lohnen. Je besser die Risikobewertung, desto besser kann ein risikooptimiertes Management realisiert werden, welches das Gesamtsystem des Phosphorhaushaltes im Auge behält.

> Verzeichnisse

Abkürzungen

ARA

Abwasserreinigungsanlage

AWEL

Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (Kanton ZH)

Bafu

Bundesamt für Umwelt

BLW

Bundesamt für Landwirtschaft

BUWAL

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (neu: Bafu)

BVET

Bundesamt für Veterinärwesen

Cemsuisse

Verband der Schweizerischen Zementindustrie

CIPEL

Commission internationale pour la protection des eaux du Léman – internationale Kommission zum Schutz des Genfersees

DüV

Verordnung vom 10. Januar 2001 über das Inverkehrbringen von Düngern (Düngerverordnung)

EDAV

Verordnung über die Ein-, Durch- und Ausfuhr von Tieren und Tierprodukten

FS

Feuchtsubstanz

GSchV

Gewässerschutzverordnung

KVA

Kehrichtverbrennungsanlage

SKW

Schweizerischer Kosmetik- und Waschmittelverband

StoV

Verordnung über umweltgefährdende Stoffe (Stoffverordnung)

TNP

tierische Nebenprodukte

TS

Trockensubstanz

VTNP

Verordnung über die Entsorgung tierischer Nebenprodukte

VSKT

Vereinigung Schweizer Kantonstierärztinnen und Kantonstierärzte

Abbildungen

Abb. 1

Modell Phosphorhaushalt der Schweiz: Darstellung des Hauptsystems

26

Abb. 2

Relevanzmatrix: Relevanz der Unsicherheit in Abhängigkeit der Grösse des Flusses und seiner relativen Unsicherheit

34

Abb. 3

Phosphorhaushalt der Schweiz (2006): Modellergebnisse für das Hauptsystem

37

Abb. 4

Phosphorhaushalt der Schweiz (2006): Modellergebnisse für das Subsystem Landwirtschaft Tiere

40

Abb. 5

Phosphorhaushalt der Schweiz (2006): Modellergebnisse für das Subsystem Landwirtschaft Pflanzen

43

Abb. 6

Phosphorhaushalt der Schweiz (2006): Modellergebnisse für das Subsystem Chemische Industrie

46

Abb. 7

Phosphorhaushalt der Schweiz (2006): Modellergebnisse für das Subsystem Haushalte & Gewerbe

49

Abb. 8

Phosphorhaushalt der Schweiz (2006): Modellergebnisse für das Subsystem Abfallwirtschaft

52

<p>Abb. 9 Phosphorhaushalt der Schweiz (2006): Modellergebnisse für das Subsystem Gewässer 55</p> <p>Abb. 10 Systembild Szenario Klärschlamm-Asche als Dünger 100 %. KS-MV: Klärschlamm Monoverbrennung 61</p> <p>Abb. 11 Systembild Szenario Tiermehl-Asche als Dünger 100 % 66</p> <p>Abb. 12 Systembild Szenario Tiermehl als Futter 70</p> <p>Abb. 13 Systembild Szenario Grüngut-Recycling 100 %: KVA Kehrichtverbrennungsanlage 74</p> <p>Abb. 14 Systembild Szenario-Kombination maximale Varianten, mit Export 79</p> <p>Abb. 15 Systembild Subsystem Abfallwirtschaft, Szenario-Kombination maximale Varianten, mit Export 80</p> <p>Abb. 16 Subsystem Landwirtschaft Tiere 97</p> <p>Abb. 17 Subsystem Landwirtschaft Pflanzen 98</p> <p>Abb. 18 Subsystem chemische Industrie 99</p> <p>Abb. 19 Subsystem Haushalt & Gewerbe 100</p> <p>Abb. 20 Subsystem Abfallwirtschaft 100</p> <p>Abb. 21 Subsystem Gewässer 101</p> <p>Abb. 22 Flussgrösse von 7 ausgewählten Flüssen mit Darstellung der absoluten Unsicherheiten (schwarze «Fehlerbalken», linke Ordinate) und der relativen Unsicherheiten (rote Hohlbalken, rechte Ordinate mit zusätzlicher Wertangabe) 133</p> <p>Abb. 23 Histogramm der relativen Häufigkeit der berechneten Flussgrössen im Modell 134</p>	<p>Abb. 24 Relevanzmatrix: Klassierungsschema zur Bestimmung der Relevanz der Unsicherheit in Abhängigkeit der Grösse des Flusses und seiner absoluten Unsicherheit (vgl. Abb. 22) 135</p> <p>Abb. 25 Das Ampelmodell für die Risikoevaluation 141</p> <p>Abb. 26 Mögliche Schutzgüter im Gesamtsystem Phosphor, rote Felder Nr. 1–5 148</p> <p>Tabellen</p> <hr/> <p>Tab. 1 Phosphorhaushalt der Schweiz (2006): Modellergebnisse für das Gesamtsystem 38</p> <p>Tab. 2 Phosphorhaushalt der Schweiz (2006): Modellergebnisse für das Subsystem Landwirtschaft Tiere 41</p> <p>Tab. 3 Phosphorhaushalt der Schweiz (2006): Modellergebnisse für das Subsystem Landwirtschaft Pflanzen 44</p> <p>Tab. 4 Phosphorhaushalt der Schweiz (2006): Modellergebnisse für das Subsystem Chemische Industrie 47</p> <p>Tab. 5 Phosphorhaushalt der Schweiz (2006): Modellergebnisse für das Subsystem Haushalte & Gewerbe 50</p> <p>Tab. 6 Phosphorhaushalt der Schweiz (2006): Modellergebnisse für das Subsystem Abfallwirtschaft 53</p> <p>Tab. 7 Phosphorhaushalt der Schweiz: Modellergebnisse für das Subsystem Gewässer 56</p> <p>Tab. 8 Szenario Klärschlamm-Asche als Dünger: Berechnete Resultate (STAN-Output) von 2006 und den beiden Szenarien 40 % bzw. 100 % Recycling 62</p> <p>Tab. 9 Szenario Tiermehl-Asche als Dünger: Berechnete Resultate (STAN-Output) von 2006 und den beiden Szenarien 40 % bzw. 100 % Recycling 67</p>
---	--

Tab. 10	Szenario Tiermehl als Futter: Berechnete Resultate (STAN-Output) von 2006 und dem Szenario Tiermehl als Futter	71
Tab. 11	Szenario Grüngut-Recycling: Berechnete Resultate (STAN-Output) von 2006 und den Szenarien 60 % bzw. 100 % Grüngut-Recycling	75
Tab. 12	Szenario Kombination. Berechnete Resultate (STAN-Output) von 2006 und Kombination der Minimalen und Maximalen Szenarien	81
Tab. 13	Effektivität der Massnahmen	84
Tab. 14	Berechnung der Flüsse im P-Monitoringtool	87
Tab. 15	Vergleichende Übersicht der Phosphorflüsse: Originalsystem (2006) vs. mittels P-Monitoringtool berechnete Systeme von 2000 und 2006	90
Tab. 16	Datenbasis der Phosphorflüsse	127
Tab. 17	Datenbasis der Phosphorlager	132
Tab. 18	Beurteilung der absoluten und relativen Unsicherheiten ausgewählter Flüsse	134
Tab. 19	Komponenten einer Risikoanalyse	138
Tab. 20	Verfahren der Risikobewertung	139
Tab. 21	Risikoparameter für die Risikoevaluation (Risikoabwägung)	140
Tab. 22	Klassifikation von Risikotypen	142
Tab. 23	Strategien für das Risikomanagement	145
Tab. 24	Tageskonsum und Grenzwerte für Phosphor und Cadmium	149

Tab. 25	Mögliche Innovationsfelder für Phosphor-Effizienz und Cadmium-Reduktion	154
----------------	---	-----

Literatur

- Andrini M. 2007: Die Kompostierung ist kein Auslaufmodell. Kompostierung, Verbrennung und Vergärung von Grüngut im Variantenvergleich. GSA Informationsbulletin. Bern. 1: 42–45.
- ASH DEC 2008: P- und Mehrnährstoffdünger aus Klärschlammaschen. Präsentation. www.susan.bam.de/pdf-partners/08-04_ashdec_firmen-anlagenpraesentation_de.pdf. Zugriff: 24.4.09.
- ATV – DVWK Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft A. u. A. e. V.H., Ed. 2003: Abwasser im Klartext. Hennef, Deutschland.
- Baccini P. und Brunner P. 1991: Metabolism of the Anthroposphere. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg.
- Baccini P. 1993: Metapolis. Güterumsatz und Stoffwechselprozesse in den Privathaushalten einer Stadt. Nationales Forschungsprogramm 25 «Stadt und Verkehr» (Schweiz) Projekt Metapolis. St. Gallen Stadtverwaltung. Zürich, Nationales Forschungsprogramm Stadt und Verkehr: A-B.
- Baccini P., Bader H.P. 1996: Regionaler Stoffhaushalt, Spektrum, Akademischer Verlag, Heidelberg.
- Barros R. 2007: Phosphorous Flows in the World at the Continental Level. Working paper, Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETH).
- Baum S., Baier U. 2008: Biogene Güterflüsse der Schweiz 2006. Massen- und Energieflüsse Umwelt Wissen 31/2008. Wädenswil, Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften.
- Boller M. 2008: pers. comm.
- Brundtland Report 1987: Our Common Future, Report of the World Commission on Environment and Development, Published as Annex to General Assembly document A/42/427.
- Brunner P., Rechberger H. 2004: Practical handbook of material flow analysis, CRC Press LLC, Boca Raton, Florida.
- Bundesamt für Energie (BfE) 2007: Schweizerische Holzenergiestatistik. Erhebung für das Jahr 2006 mit modifizierter Erfassungsmethodik.
- Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2003: Düngen mit Klärschlamm wird verboten. Medienmitteilung vom 26.3.2003. www.admin.ch/cp/d/3e816ebe_1@presse1.admin.ch.html. Zugriff: 15.5.2009.

Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2003: Faltblatt zum Klärschlammverordnung. Bundesamt für Umwelt, Bern.

Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2006: Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz 2006. Umwelt-Wissen.
www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/00072/index.html?lang=de. Zugriff: 28.05.09.

Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2006: Organische Mikroverunreinigungen und Nährstoffe. Eine Standortbestimmung für die Siedlungswasserwirtschaft. Bundesamt für Umwelt, Bern.

Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2006: Statistiken: Daten des Jahres 2006. Anlieferungen in KVA 2006,
www.bafu.admin.ch/abfall/01517/01519/05042/index.html?lang=de. Zugriff: 15.05.09.

Bundesamt für Umwelt (BAFU) (2007a). Abfallmengen und Recycling 2006 im Überblick.
www.bafu.admin.ch/abfall/01517/01519/05042/index.html?lang=de. Zugriff: 11.04.2008.

Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2007b: Anlieferungen in KVA 2006.
www.bafu.admin.ch/abfall/01517/01519/05042/index.html?lang=de. Zugriff: 05.05.2008.

Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2007: Sonderabfallstatistik 2006. BAFU Sektion Altlasten und Industrieabfälle.

Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2008a: Abfallglossar der Abteilung Abfall und Rohstoffe. www.bafu.admin.ch/abfall/01471/index.html?lang=de. Zugriff: 09.04.2008.

Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2008b: Jahrbuch Wald und Holz 2006. B. f. Umwelt. Ittigen, Schweiz, Bundesamt für Umwelt.

BVET 2004: BVET Magazin 2004/01. Neue Wege für Schlachtabfälle.
www.bvet.admin.ch/dokumentation/00327/01310/01559/index.html?lang=de. Zugriff: 28.05.09.

BVET 2008: pers. comm.

Cemsuisse 2006: Kennzahlen 2006.
www.cemsuisse.ch/index.html?page_id=2&node=49&change_lid=2. Zugriff: 24.4.09.

Cencic O. 2008: pers. comm.

CIPEL 2007: Bessere Erkennung von Mikroschadstoffen, Reduktion ihrer Konzentrationen im Wasser, Renaturierung der Ufer. Thonon-les-Bains, CIPEL: 2.

DLG 1973: DLG-Futterwerttabellen, Mineralstoffgehalte in Futtermitteln. DLG-Verlag. Frankfurt.

DWA (Hrsg.) 2005: Zahlen und Fakten zum Thema Wasser, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.

DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft 2005: Zahlen und Fakten zum Thema Wasser.

ECN 2003: Phyllis, database for biomass and waste, Version 4.13. Energy research Centre of the Netherlands. Zugang über: www.ecn.nl/phyllis.

Edelmann W. und Schleiss K. 2001: Ökologischer, ökonomischer und energetischer Vergleich von Vergärung, Kompostierung und Verbrennung fester biogener Abfallstoffe. Bern, BUWAL.

Elmadfa I. 1988: Die grosse GU Nährwert-Tabelle. Giessen: Gräfe und Unzer (GU).

EnergieSchweiz 2006: Aschenentsorgung umweltfreundlich und ökologisch. Holzenergie Schweiz. Zürich: 4.

ERZ 2006: Verwertung der biogenen Abfälle in der Stadt Zürich. Bericht mit besonderer Berücksichtigung der biogenen Abfälle aus Haushalten. ERZ Entsorgung + Recycling Zürich.

Fahmi H.-P. 2007: Schliessung von Stoffkreisläufen – vom frommen Wunsch zur dringenden Notwendigkeit? Die Perspektive der Behörden. Folien präsentiert an der Tagung vom 12. April 2007, Bundesamt für Umwelt, Bern.

Frei E. und Peyer K. 1991: Boden – Agrarpädagogie Eigenschaften, Entstehung, Verbreitung, Klassierung, Kartierung des Bodens und Nutzung im Pflanzenbau. Bern etc., Haupt.

Gigerenzer G. 2004: Dread Risk, September 11, and Fatal Traffic Accidents. *Psychological Science* 15 (4): 286–287.

Heinss U., Larmie S., Strauss M. 1998: Solids separation and pond systems for the treatment of faecal sludges in the tropics: lessons learnt and recommendations for preliminary design. Dübendorf; EAWAG/SANDEC: 68 p.

Henseler G., Scheidegger R. et al. 1990: Die Bestimmung der Güter- und Stoffflüsse im regionalen Wasserhaushalt. Regionale Stoffhaushaltstudie Unteres Bünztal – RESUB: Teilprojekt RESUB WASSER Projekt. Dübendorf, Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung Abwasserreinigung und Gewässerschutz (Dübendorf) Abteilung Abfallwirtschaft und Stoffhaushalt.

Hermann L. 2009: Rückgewinnung von Phosphor aus der Abwasserreinigung – eine Bestandesaufnahme. Umwelt-Wissen Nr. 0929, Bundesamt für Umwelt, Bern.

Herren M. 2008: Quantifizierung der Phosphorfrachten in Schweizer Kläranlagen, Soziale und Industrielle Ökologie, Universität Zürich.

Herter U., Kupper T., Külling T. 2003: Risikoabschätzung zur landwirtschaftlichen Abfalldüngerverwertung. Schriftenreihe der FAL 48, Zürich.

Hügi M. 2007: pers. comm.

Hügi M., Gerber P. et al. 2008: Abfallwirtschaftsbericht 2008. Zahlen und Entwicklungen der schweizerischen Abfallwirtschaft 2005–2007. Umwelt-Zustand Nr. 0830. Bundesamt für Umwelt, Bern. 199 S.

Jardin N. 2005: Bilanzierung der Emissionen aus der Niederschlagswasserbehandlung – Massnahmen zur Verbesserung der Immissionssituation, KA – Abwasser/Abfall 52: 11.

Jonsson H., und Vinneras B. 2007: Experiences and suggestions for collection systems for source-separated urine and faeces. *Water Science and Technology* 56 (5): 71–76.

IRGC, International Risk Governance Council 2005: White Paper on Risk Governance. Towards an Integrative Approach. Author: O. Renn with Annexes by P. Graham. International Risk Governance Council, Geneva.

Klonk J. 2007: Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammaschen – Klärschlammverwertung und Ressourcenschutz (Projekt SUSAN). Wien, Technische Universität Wien, Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft.

KOMPOGAS 2008a: Kompogas Naturdünger fest. Gärgut (Kompost): 4.

KOMPOGAS 2008b: Kompogas Naturdünger flüssig (Presswasser): 4.

Kupper T., Brändli R., Pohl M., Bucheli T., Becker-van Slooten K. 2008: Organische Schadstoffe in Kompost und Gärgut der Schweiz. *AGRARForschung* 15 (6): 270–275.

Lamprecht H. 2004: Beitrag von Knochen am Phosphorhaushalt der Schweiz und Phosphorrecycling unter dem Einfluss der BSE-Problematik. *Natural and Social Science Interface*. Zürich, ETH Zürich. Diplom: 166.

Lamprecht H., Lang D.J., Binder C.R. 2008: Ressourcenschonung oder gesundheitliche Vorsorge – Beispiel des Entsorgungsdilemmas bei der Knochenentsorgung im Zuge der BSE Krise (submitted to GAIA, December 2008).

Lang D.J., Binder C.R., Scholz R.W., Schleiss K., Stäubli B. 2006: Material and money flows as a means for industry analysis of recycling schemes: A case study of regional bio-waste management. *Resources, Conservation and Recycling*. 49 (2): 159–190.

Laube A., Vonplon A. 2004: Klärschlamm Entsorgung in der Schweiz. Mengen- und Kapazitätserhebung. Bern, Bundesamt für Umwelt Wald und Landschaft (BUWAL).

Laube A. 2008: pers. comm.

Montangero A., Belevi H. 2008: An approach to optimise nutrient management in environmental sanitation systems despite limited data. *Journal of Environmental Management* 88: 1538–1551.

Morf L. 2006: Chemische Zusammensetzung verbrannter Siedlungsabfälle. Untersuchungen im Einzugsgebiet der KVA Thurgau. *Umwelt-Wissen*. B. f. Umwelt. Bern, Bundesamt für Umwelt: 104.

Munoz I. 2008: Consider a Spherical Man. A Simple Model to Include Human Excretion in Life Cycle Assessment of Food Products. *Journal of Industrial Ecology*, 12 (4): 521–538.

Nanzer S. 2009: Phosphorus speciation of sewage sludge ashes and potential for fertilizer production. In: Ashley K., Mavinic D., Koch F. (Eds) 2009. *International Conference on Nutrient Recovery From Wastewater Streams*. Vancouver: 830 p.

Nyfeler F. 2007: Aktuelle Verwendungsmöglichkeiten von Holzaschen. *Umweltingenieurwesen*. Wädenswil, Schweiz, Hochschule Wädenswil. Diplomstudiengang: 42.

Papineschi J., Baddeley A., Taylor S. and Elliott T. 2008: Regional Biowastes Management Study. East of England Regional Assembly. *Eunomia Research & Consulting Ltd*. Bristol.

Perler L. 2004: Die neue Verordnung über die Entsorgung von tierischen Nebenprodukten (VTNP), Vortrag von Lukas Perler, Leiter Fachberatung, BVET, Olten, 1. April 2004.

Rademacher P. 2005: Nährelementgehalte in den Kompartimenten wichtiger Wirtschaftsbaumarten und deren Bedeutung für die Reststoffverwertung. *Holz als Roh- und Werkstoff* 63: 285–296. Springer-Verlag.

Renn O., Schweizer P.-J., Dreyer M., Klinke A. (2007a). *Risiko – Über den gesellschaftlichen Umgang mit Unsicherheit*. Oekom Verlag, München: 271 Seiten.

Renn O., (2007b). *Risiken und ihre Rolle in der Gesellschaft*. Ortwin Renn, Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg, Stuttgart, Deutschland. http://ec.europa.eu/food/risk/session1_1_de.pdf.

SBV 2007: Statistische Erhebungen und Schätzungen über Landwirtschaft und Ernährung. (div. Jahrgänge). Statistiken unter: www.sbv-usp.ch/de/statistik. Zugang August 2008. Schweizerischer Bauernverband SBV, Brugg.

Schaum C. 2007: Verfahren für eine zukünftige Klärschlammbehandlung – Klärschlammkonditionierung und Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm-asche. Schriftenreihe WAR 185. TU Darmstadt.

Scheffer F., Schachtschabel P. et al. 1998: *Lehrbuch der Bodenkunde*. Stuttgart, Enke.

Schleiss K. 2002: Kompostvermarktung in der Schweiz. Baar: 28.

Schleiss K., Ammann A. et al. 2007: Jahresbericht zu den Inspektionen 2007. Kompostier- und Vergärungsanlagen. Jahresbericht zu den Inspektionen. Münchenbuchsee, ARGE Inspektorat der Kompostier- und Vergärbranche der Schweiz: 23.

Schleiss K. 2008: pers. comm.

Schluop M., Thomann M. et al. 2006: Organische Mikroverunreinigungen und Nährstoffhaushalt. Eine Standortbestimmung für die Siedlungswasserwirtschaft. Umwelt-Wissen. Bundesamt für Umwelt. Bern, Bundesamt für Umwelt: 238.

Schmidt S., Welker A. et al. 2001: Vergleichende Untersuchung der Stoffströme bei der Vergärung von Bio- und Restabfall. Müll und Abfall. Fachzeitschrift für Behandlung und Beseitigung von Abfällen. Organ für Entsorgungspraxis und Kreislaufwirtschaft 08.

Schouw N.L., Danteravanich S., Mosbaek H., Tjell J.C. 2002: Composition of human excreta – a case study from Southern Thailand. The Science of The Total Environment 286 (1–3): 155–166.

Schweizerisches Bundesamt für Statistik 2002: Wald und Holz in der Schweiz: Jahrbuch 2002. Neuchâtel, Office Fédéral de la Statistique.

Schweizerischer Bundesrat 1998: Gewässerschutzverordnung (GSchV), Schweizerischer Bundesrat. 814.201: 60.

Schweizerischer Bundesrat 2004a: Verordnung über die Entsorgung von tierischen Nebenprodukten, Schweizerischer Bundesrat. 916.441.22: 32.

Schweizerischer Bundesrat 2004b: Verordnung über die Entsorgung von tierischen Nebenprodukten (VTNP). 916.441.22: 36.

Schweizerischer Bundesrat 2007: Verordnung über die Ein-, Durch- und Ausfuhr von Tieren und Tierprodukten (E-DAV), Schweizerischer Bundesrat. 916.443.10: 15.

Siegrist H., M. Boller 1999: Auswirkungen des Phosphatverbots in den Waschmitteln auf die Abwasserreinigung in der Schweiz. Korrespondenz Abwasser. Abfall Organ der ATV-DVWK und des Güteschutz Kanalbau, ATV-DVWK Abwassertechnische Vereinigung (Deutschland Bundesrepublik), Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall., Hennef, Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik. 46: 57–65.

Sinden J., Leyshon D. 1998: Phosphorus availability in the 21st century. Management of a non-renewable resource. Phosphorus & Potassium No. 217, 25–31.

Smil V. 2000: Phosphorus in the Environment: Natural Flows and Human Interferences. Annu. Rev. Energy Environ. 25: 53–88. Kontamination von P-Dünger mit Schwermetallen und Gesundheit.

Spieß E. 1999: Nährstoffbilanz der schweizerischen Landwirtschaft für die Jahre 1975 bis 1995. Schriftenreihe der FAL 28. 46 S.

Spuhler M. 2009: Klärschlamm bald wieder als Dünger nutzbar. Abwasser NEWS. www.abwassertechnik.at/news/index.php?starteintraege=15. Zugriff am 24.4.09

Steen I. 1998: Phosphate Recovery. Phosphorus availability in the 21st century. Management of a non-renewable resource. www.nhm.ac.uk/research-curation/research/projects/phosphate-recovery/p&k217/steen.htm. Zugriff: 15.05.09.

UVEK 2003: Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie, Kommunikation, März 2003. Düngen mit Klärschlamm wird verboten. Presse und Informationsdienst der Bundesbehörden, Bern.

Vetter 2008: pers. comm. Hr. Vetter, Fa. KOMPOGAS.

WAR 2002: Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm und Klärschlamm-asche. Schriftenreihe WAR 147. TU Darmstadt.

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 1999: Welt im Wandel. Strategien zur Bewältigung globaler Umweltrisiken. Jahresgutachten 1998, Springer, Berlin.

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2000: World in Transition: Strategies for Managing Global Environmental Risks. Annual Report 1998, Springer, Heidelberg & Berlin.

Wellinger A. 2004: Längerfristige Sicherstellung der Entsorgung tierischer Abfälle. Energie-, Massen- und CO₂-Bilanzen. Nova Energie GmbH, Aadorf.

ZPK 2006: Verband der Schweizer Zellstoff-, Papier- und Kartonindustrie, Jahresbericht 2006.

Zulliger M. 2008: pers. comm. Treuhandstelle der Schweizerischen Dünger-Pflichtlagerhalter (TSD).