



Synthesebericht für interessierte Fachpersonen

Zürcher Klärschlamm Entsorgung
unter besonderer Berücksichtigung
der Ressourcen Aspekte



**Baudirektion
Kanton Zürich**

AWEL Amt für
Abfall, Wasser, Energie und Luft

Inhaltsverzeichnis

Ausgangslage	3
Erste Abklärungen: Klärschlamm-Monoverbrennung an bestehenden KVA-Standorten favorisiert	4
Vertiefte Abklärungen im Jahre 2009	5
Richtige Verfahrenswahl unter besonderer Berücksichtigung der Ressourcenaspekte	6
Resultate des Vergleichs der Entsorgungsvarianten im Überblick	15
P-Rückgewinnung ohne Zwischenlagerung direkt aus der Asche der geplanten Monoverbrennungsanlagen in Sicht? Konzeptstudie ASH DEC	17
Literaturverzeichnis	22

Hinweis: Informationen zum aktuellen Stand der Klärschlammplanung sind unter dem Titel «Klärschlamm-Agenda» in der Rubrik «Wissenswertes» unter www.abfall.zh.ch zu finden.

Impressum

Autoren:

Dr. Leo Morf, Sektion Abfallwirtschaft

Dr. Markus Koch, Sektion Abwasserreinigungsanlagen

Zürich, Dezember 2009

Ausgangslage

Klärschlamm wurde Siedlungsabfall

Klärschlamm muss in der Schweiz seit Inkrafttreten des Verbots der Ausbringung in die Landwirtschaft (per 1. Oktober 2006) wie Siedlungsabfall entsorgt werden. Die Zunahme an Schadstoffen im Klärschlamm verunmöglicht die direkte landwirtschaftliche Nutzung. Für seine jährlich rund 100 000 Tonnen entwässerten Klärschlamm (entspricht rund 30 000 Tonnen Trockensubstanz) benötigt der Kanton Zürich eine langfristig kostengünstige, sichere und ökologische Entsorgung.

Schon 2003 legte der Zürcher Regierungsrat per Regierungsratsbeschluss die Grundsätze für den Zürcher Klärschlamm Entsorgungsplan fest. Dieser berücksichtigte bereits damals ökologische und ökonomische Kriterien und räumte der Entsorgungsautonomie des Kantons hohe Priorität ein, um die Entsorgungssicherheit zu gewährleisten. Gemäss diesem Entsorgungsplan wird der Zürcher Klärschlamm heute über drei Pfade entsorgt: in Kehrverbrennungsanlagen (KVA), im Zementwerk (nach vorgängiger Trocknung in Schlamm Trocknungsanlagen) sowie in zwei Schlammverbrennungsanlagen.

Träger des wertvollen Phosphors

Klärschlamm ist nicht nur ein interessanter Energielieferant, sondern auch ein bedeutender Träger des wertvollen Nährstoffs Phosphor, der für Mensch und Natur lebenswichtig ist. Die global vorhandenen Primärressourcen werden schon in etwa 100 Jahren zur Neige gehen und die Qualität nimmt bereits heute deutlich ab (Verunreinigungen, Schadstoffe). Mit dem Verbot der Ausbringung von Klärschlamm in die Landwirtschaft ging dieser ein wichtiger Phosphor- (und Stickstoff-) Dünger verloren: Untersuchungen haben gezeigt, dass die im Klärschlamm gebundene Menge an Phosphor pro Jahr etwa gleich gross ist wie die mit Mineräldünger importierte. Neben der Energie gilt es also auch dafür zu sorgen, dass die (spätere) Rückgewinnung des Wertstoffs Phosphor möglich ist. Detailliertere Informationen zum Thema Phosphor gibt es in der Broschüre «Phosphor im Klärschlamm – Informationen zur künftigen Rückgewinnung» unter www.abfall.zh.ch.

Wirtschaftlich optimale Nutzung erneuerbarer Energie und Phosphorrückgewinnung als Planungsvorgaben im Kanton Zürich

2007 wurde zur Sicherstellung einer langfristigen, ökologischen und ökonomischen Entsorgungsplanung der Regierungsratsbeschluss (RRB) 572/2007 gefasst. Dieser beinhaltet klare Vorgaben für die wirtschaftlich optimale Nutzung erneuerbarer Energie und die Möglichkeit zur P-(=Phosphor-)Rückgewinnung:

«Rahmenbedingungen für die Planung zukünftiger Entsorgungswege bilden die Festlegungen zur *Phosphorrückgewinnung* und *Energienutzung*. Im Sinne einer nachhaltigen Ressourcenwirtschaft ist die Planung zukünftiger Entsorgungswege, insbesondere beim Bau von neuen Anlagen, so auszurichten, dass die (spätere) Rückgewinnung des Wertstoffs Phosphor möglich ist. Die im Klärschlamm enthaltene erneuerbare Energie soll, unabhängig vom Ort der Behandlung, wirtschaftlich optimal genutzt werden.»

Erste Abklärungen: Klärschlamm-Monoverbrennung an bestehenden KVA-Standorten favorisiert

Der Auftrag zur Umsetzung des Regierungsratsbeschlusses ging 2007 an das Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL). Das AWEL hat mit allen öffentlichen Institutionen Kontakt aufgenommen, welche in die Klärschlammentsorgung des Kantons involviert sind. Gemeinsames Ziel war die zuverlässige und ökologische Klärschlammentsorgung zu konkurrenzfähigen Preisen. Die gemeinsam erarbeitete erste Konzeptstudie kam Ende 2008 zu folgenden Schlüssen:

- Mit einer Monoverbrennung in unmittelbarer Nähe der KVA kann der grösste energetische Nutzen erzielt werden.
- Mit diesem Verfahren kann auch die Rahmenbedingung für die (spätere) P-Rückgewinnung erfüllt werden. [1]
- Als Standorte wurden die KVA Hagenholz in Zürich sowie die Kehrichtverwertung Zürcher Oberland KEZO in Hinwil vorgesehen.

Vertiefte Abklärungen im Jahre 2009

Ende 2008 haben die politisch Verantwortlichen für die Zürcher Klärschlamm Entsorgung festgelegt, dass im Jahre 2009 vertiefte Abklärungen bezüglich der Verfahrens- und Standortwahl durchgeführt werden.

Untersuchungen zu ausgewählten Standorten für Monoverbrennungsanlagen

Für drei mögliche Standorte, die beiden KVA Hagenholz in Zürich und Hinwil (KEZO) sowie die Abwasserreinigungsanlage (ARA) Werdhölzli in Zürich, wurde durch ERZ Entsorgung+Recycling Zürich und die KEZO je ein Vorprojekt für eine Klärschlamm-Monoverbrennungsanlage ausgearbeitet. Darin

- sollte dargelegt werden, was die Realisierung einer solchen Anlage am jeweiligen Standort bedeuten würde,
- sollten die technischen Konzepte und die wirtschaftlichen Rahmengrössen geliefert werden und
- sollten die in früheren Studien geschätzten Energienutzungspotentiale von KVA-Abwärme geprüft werden.

Die Resultate dieser Vorprojekte sind nicht Gegenstand des vorliegenden Berichts. Sie lieferten aber als «Referenz-Entsorgungsweg» im Rahmen eines ergänzenden Umfeldbeobachtungsprojekts wichtige Informationen für die Beurteilung alternativer Entsorgungswege.

Richtige Verfahrenswahl unter besonderer Berücksichtigung der Ressourcenaspekte

Parallel zur Erstellung der Vorprojekte wurde im Jahr 2009 im Projekt «*Umfeldbeobachtung Klärschlamm Entsorgung Kanton Zürich*» des AWEL vertieft abgeklärt, ob neben der Monoverbrennung mit (späterer) P-Rückgewinnung aus der Asche («Referenz-Entsorgungsweg») andere Entsorgungswege für den Klärschlamm existieren, die ebenfalls die Vorgaben des RRB 572/2007 einhalten und dem Stand der Technik entsprechen. Für die Umfeldbeobachtung wurde der aktuelle Wissensstand erfasst und synthetisiert. Dies geschah anhand einer umfangreichen Literaturrecherche, zahlreicher Gespräche mit Systemanbietern, mittels eines Expertenworkshops und Anlagenbesuchen.

Die Option der Direktnutzung des Phosphors (ohne Zwischenlagerung) wurde genauer geprüft. Phosphor ist in der Asche enthalten, die beim Referenz-Entsorgungsweg Monoverbrennung anfällt. Die Prüfung erfolgte durch ein externes Beratungsbüro in Koordination mit den Vorprojekten für das aktuell am weitesten entwickelte thermochemische Verfahren der Firma ASH DEC (www.ashdec.com). Für die Abklärungen wurde das Verfahren unter den gegebenen Rahmenbedingungen (Stand der Entwicklung, Markt, Standorte etc.) in den Anlagenverbund mit den Monoverbrennungsanlagen der Vorprojekte integriert.

Folgende Fragestellungen standen im Zentrum der Abklärungen:

- Ist die Monoverbrennung mit (späterer) P-Rückgewinnung aus der Asche der am besten geeignete Entsorgungsweg? Oder existieren in Kombination mit der P-Rückgewinnung an anderen Orten der Abwasserbehandlung bzw. Klärschlamm Entsorgung besser geeignete Varianten, die ebenfalls den Vorgaben entsprechen?
- Lohnt es sich aufgrund der aktuellen Situation, Phosphor aus der Asche der Monoverbrennung schon heute direkt zurückzugewinnen, statt diesen für die spätere Nutzung in Reststoffdeponiekompartimenten zwischenzulagern?

Die Erkenntnisse dieser Abklärungen zur Verfahrenswahl werden in der Folge für den interessierten Leser zusammengefasst. Den Ressourcenaspekten wurde besondere Beachtung geschenkt.

Phosphorflüsse in der Abwasser- und Klärschlammbehandlung: mögliche Orte der Rückgewinnung

Phosphor kann grundsätzlich an vier Stellen der gesamten Prozesskette der Abwasser- und Klärschlammbehandlung zurückgewonnen werden (siehe Abbildung 1 und Tabelle 1), nämlich aus

- dem Abwasserreinigungsanlagen (ARA)-Ablauf,
- dem Schlammwasser,
- dem entwässertem Faul(klär)schlamm und
- der Klärschlamm asche.

AN = anaerobe
(unbelüftete) Zone
DN = (unbelüftete)
Denitrifikationszone
N = (belüftete)
Nitrifikationszone

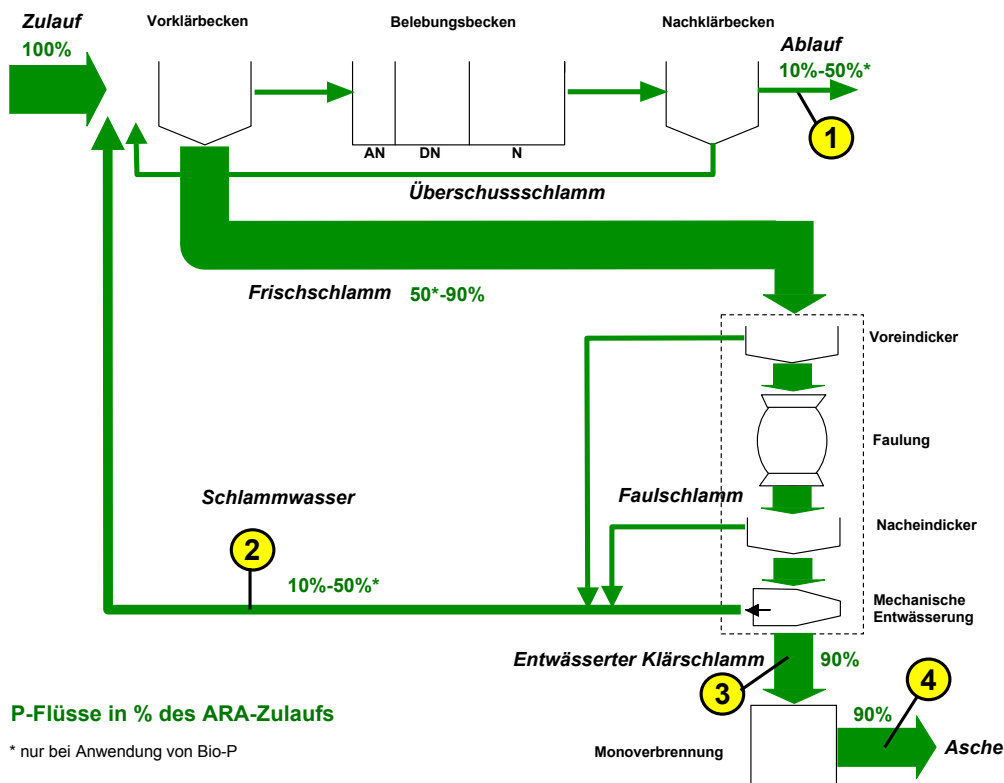


Abbildung 1: Phosphorrflüsse in % des ARA-Zulaufs und mögliche Einsatzstellen zur P-Rückgewinnung in kommunalen ARA und Klärschlammensorgung [2]

Einsatzstelle	Massenstrom (kg/Einwohner Tag)	Phosphorkonzentration (g/kg)	Bindungsform	Theoretisch maximales Potential im Strom (in % des Zulaufs)	Zurückgewonnener Phosphor mit bestem Verfahren (in % des Zulaufs)
1	200	<0,005	gelöst	50	45
	Verfahren als Alternative zur üblichen Fällung mit Metallsalzen. Es wurde versucht, niedrige Phosphorgehalte im ARA-Ablauf mit anderen Fällmitteln, mit Kristallisation und Adsorption von Phosphor zu erreichen. Verfahren sind aufgrund der niedrigen Phosphorkonzentrationen und der grossen zu behandelnden Volumenströme teuer.				
2	1-10	0,02-0,1	gelöst	50	35
	Das Schlammwasser eignet sich viel besser für die Phosphorelimination als der ARA-Ablauf, <u>sofern</u> der Phosphor durch vermehrte biologische Elimination (Bio-P) im Klärschlamm eingebunden wird. Der durch Bio-P eingebundene Phosphor kann aus dem Schlamm rückgelöst werden. Dies führt zu einer etwa 50 Mal höheren Konzentration im Schlammwasser als im ARA-Ablauf. Meistens wird der Phosphor als Magnesiumammoniumphosphat (MAP) auskristallisiert. Mit den besten Verfahren können 35% des Gesamtzulaufs an Phosphor aus dem Schlammwasser zurückgewonnen werden. Wird kein Bio-P angewandt, liegt das Potential nur bei 10%.				
3	0,15	10	biologisch/chemisch	90	70
	Bei der P-Rückgewinnung aus dem Faulschlamm wird zuerst der Phosphor aus dem Schlamm gelöst, meist durch sauren Aufschluss. Anschliessend wird der Phosphor üblicherweise wieder aus dem Schlammwasser auskristallisiert. Gleichzeitig mit dem Phosphor werden die Schwermetalle gelöst. Deshalb sehen einige Verfahren eine Schwermetallfällung als Sulfid vor. Bis zu 70% des Gesamtzulaufs können so aus dem Schlamm zurückgewonnen werden.				
4	0,03	64	chemisch	90	85
	In der bei der Monoverbrennung anfallenden Asche liegt der Phosphor relativ konzentriert vor (zirka 6% der TS). Dies vereinfacht die Rückgewinnung und macht die erforderliche Anlagengrösse kleiner. Bis zu 85% des Gesamtzulaufs aus der Asche können so direkt zurückgewonnen werden. Die Asche kann in speziell vorgesehenen Reststoffdeponien für die spätere Nutzung zwischengelagert werden.				

Tabelle 1: Zusammenfassung der wichtigsten Charakteristika der möglichen Einsatzstellen zur P-Rückgewinnung in der kommunalen ARA [3]

Gemäss Tabelle 1 sind die Einsatzstellen mehr oder weniger geeignet und Verfahren zur P-Nutzung müssen entsprechend angepasst werden.

Aktuell knapp 30 bekannte P-Rückgewinnungsverfahren

Anhand von umfangreichen Literaturstudien und Abklärungen mit Anlagenbetreibern, Lieferanten und Experten sind 29 Verfahren zur P-Rückgewinnung in der Abwasser- und Klärschlammbehandlung im Gross-, Pilot- sowie im Labormassstab ermittelt worden. Diese wurden für einen allfälligen Einsatz im Kanton Zürich ab 2015 evaluiert. Alle Verfahren sind in [4] und [2] beschrieben. Diese und weitere Literaturquellen sind zu finden unter www.abfall.zh.ch. Tabelle 2 zeigt alle in der Bewertung berücksichtigten Verfahren im Überblick.

Grau hinterlegt:
Für Phase II ausgewählte
Verfahren

	Phosphor in Wasser lösen: biologisch (B), durch saure Hydrolyse (S) oder thermisch (T)	Aus Wasser in feste Form überführen	Thermische Aufbereitung/Verbrennung	Aufkonzentration von Schwermetallen	Aussereuropäisch	Produkt	Ausschlusskriterien erfüllt
Kristallisation aus Schlammwasser oder eventuell Ablauf Einsatzstelle ① oder ②							
Airprex		x				MAP	Ja
Crystalactor		x				MAP oder andere	Ja
CSIR-Wirbelbettreaktor		x			x	MAP	Nein
Anlage im Grossmassstab Treviso, Italien	B	x				MAP und/oder HAP	Nein
Kurita-Festbett		x			x	MAP/ HAP	Unklar
Nishihara-Kristallisationsreaktor		x			x	MAP	Nein
Ostara		x			x	MAP	Ja
Peco	B	x				MAP	Nein
PRISA	B	x				MAP	Ja
P-ROC (im Propfos)		x				Calciumphosphat	Nein
Unitika Phosnix		x			x	MAP	Ja
Sonstige Abtrennung aus Schlammwasser oder eventuell Ablauf Einsatzstelle ① oder ②							
Magnetseparator		x				Eisenphosphat	Nein
Nachfällung/Flockungsfiltration		x				Magnesiumphosphat	Ja
PHOSIEDI		x					Nein
RIM/NUT-Ionentauscher		x				MAP	Nein
Sydney Water Board		x			x	Calciumphosphat	Nein
Klär- oder Faulschlamm Einsatzstelle ③							
Aqua Reci	T	x		x		Calciumphosphat	Nein
ATZ-Verfahren im Eisenbad			x			Schlacke	Nein
KREPRO	S	x		x		Eisenphosphat	Ja
Phoxnan (Loprox und Nanofiltration)	S	x		x		H3PO4	Nein
Seaborne	S	x		x		MAP	Ja
Stuttgarter Verfahren für Schlamm	S	x				MAP	Nein
Asche Einsatzstelle ④							
ASH DEC-Verfahren			x	x		Ca-Mg-Phosphat	Ja
Biocon	S	x				Phosphorsäure	Nein
Eberhard	S	x		x		Calciumphosphat	Nein
EPHOS		x		x			Nein
Mephrec			x			Schlacke	Nein
PASCH (RüPA)	S	x	x	x		MAP	Ja
SEPHOS	S	x		x		Calciumphosphat	Nein

Tabelle 2: Heute im Gross-, Pilot- und Labormassstab angewandte Verfahren der P-Rückgewinnung in der Abwasserreinigung und Klärschlammbehandlung [2] und [4]

Bewertung der P-Rückgewinnungsverfahren (Phase I)

In der ersten Bewertungsphase wurden sämtliche Verfahren nach folgenden *Ausschlusskriterien* bewertet:

- Ein Betriebsbeginn der Klärschlamm-Sorgungsvariante mit dem gewählten P-Rückgewinnungsverfahren muss gemäss vorgegebener Planung Anfang 2015 möglich sein. Das heisst, ein Phosphorrecycling muss ab 2015 (allenfalls über ein Zwischenlager) gewährleistet sein.
- Die Energienutzung aus dem Klärschlamm muss sichergestellt sein.
- Geltende Gesetze sind einzuhalten.

Integriert in die passende Prozesskette der Klärschlamm-Sorgungswege bzw. unter Inanspruchnahme der Zwischenlageroption für den P-haltigen Rückstand erfüllen nur die folgenden acht technischen Verfahren diese grundlegenden Kriterien:

- *Verfahren mit Auskristallisation von MAP (Magnesiumammoniumphosphat) aus Schlammwasser in einem Wirbel- oder Festbett.* Dabei werden Kristallfragmente, Sand oder Rohphosphat je nach Verfahren als Keime verwendet. Magnesium-Ionen und Natronlauge werden nach Bedarf beigemischt, um einen höheren Anteil an Phosphat zu gewinnen. Von fünf parallel auf verschiedenen Kontinenten und von verschiedenen Firmen entwickelten Verfahren (Crystalactor, Kurita-Festbettverfahren, Ostara, PRISA und Unitika Phosnix) wurden die beiden europäischen Verfahren *PRISA* und *Crystalactor* vertieft bewertet. Die anderen Anbieter sind nicht in Europa aktiv und hatten wenig Interesse, an einer Auswertung teilzunehmen. Es ist unsicher, ob sie in Europa eine Anlage liefern und warten können.
- *Airprex-Verfahren mit Auskristallisation von MAP direkt aus dem Nass-Schlamm-Gemisch.* Nach einer Fällung werden die Kristalle durch eine Sedimentation abgetrennt und der Schlamm wird entwässert. Die Ausbeute ist geringer, die Abtrennung sowie die Reinigung der Kristalle sind aufwendiger als in den vorher erwähnten Verfahren und es entstehen kleinere Kristalle. Dieses Verfahren hat jedoch den Vorteil, dass der Schlamm nach bereits erfolgter Phosphorelimination besser zu entwässern ist.
- *Verfahren mit Nachfällung von Magnesiumphosphat als Beispiel für eine Rückgewinnung aus dem gereinigten Abwasser.* Das Verfahren ist der Kristallisation aus Schlammwasser ähnlich. Die Wirtschaftlichkeit ist aufgrund der tieferen Phosphorkonzentrationen im Ablauf jedoch schlechter.
- *Zwei Verfahren, die Phosphor und Schwermetalle unter sauren Bedingungen aus dem Schlamm herauslösen.* Das *Seaborne-Verfahren* wurde in den letzten Jahren vereinfacht und ähnelt in seiner heutigen Form dem *KREPRO-Verfahren*. Bei beiden werden Phosphor und Schwermetalle unter sauren Bedingungen aus dem Schlamm herausgelöst. Beim *KREPRO-Verfahren* wird der Phosphor jedoch als Eisenphosphat statt als MAP gewonnen. Das *KREPRO-Verfahren* wurde 1995 drei Jahre erfolgreich im Grossmassstab betrieben. Aufgrund von mangelnder Wirtschaftlichkeit wurde es nicht weiterverfolgt. Das *Seaborne-Verfahren* wird seit 2007 grosstechnisch betrieben, und das Unternehmen scheint an seine Marktchancen zu glauben.
- *Zwei Verfahren zur thermo- bzw. nasschemischen P-Rückgewinnung aus der Asche.* Das *ASH DEC-Verfahren* wird seit 2008 im Pilotmassstab betrieben. Das *PASCH (RüPA)-Verfahren* wird in einer Pilotanlage frühestens 2010 in Betrieb genommen. Die Inbetriebnahme der Monoverbrennungsanlage könnte 2015 erfolgen und die Asche deponiert werden, bis ein P-Rückgewinnungsverfahren zur Praxisreife entwickelt wird. Dies gilt, wenn nachgewiesen werden kann, dass die Verfahren in Kombination mit einer Monoverbrennungsanlage am vorteilhaftesten sind.

Diese acht Verfahren wurden einzeln nach definierten quantitativen Kriterien bewertet und in die ganze Prozesskette vom ARA-Zulauf bis zur Klärschlamm Entsorgung mit allfälliger Deposition von Reststoffen integriert. Diese Integration erlaubt den Vergleich mit dem Referenz-Entsorgungsweg Monoverbrennung des entwässerten Klärschlammes mit P-Nutzung aus der Asche.

Detaillierte Bewertung der P-Rückgewinnungsverfahren (Phase II)

Für jedes der acht in Phase I ausgewählten P-Rückgewinnungsverfahren wurden weitere Daten erhoben. Dies geschah anhand einer detaillierten Literaturrecherche sowie mittels An- und Umfragen bei Systemanbietern, Anwendern und Experten. Literaturquellen sind zu finden unter www.abfall.zh.ch. Eine Auswertung erfolgte bezüglich der folgenden Hauptbewertungskriterien:

- Kosten,
- Energiebedarf und
- gewonnene Phosphormenge bei geplantem Vollausbau im Kanton Zürich.

Abbildungen 2-4 zeigen die Resultate der Abklärungen zu den ausgewählten P-Rückgewinnungsverfahren für die einzelnen Kriterien im Überblick, inklusive Detailangaben zu Energie- und Kostenanteilen [5].

Die *Vollkosten* wurden als Summe von folgenden Kostenanteilen berechnet: Personal, Betrieb, Rohstoffe, Energie und Kapitaldienst. Die Kosten werden in Schweizerfranken pro Einwohner und Jahr ausgedrückt.

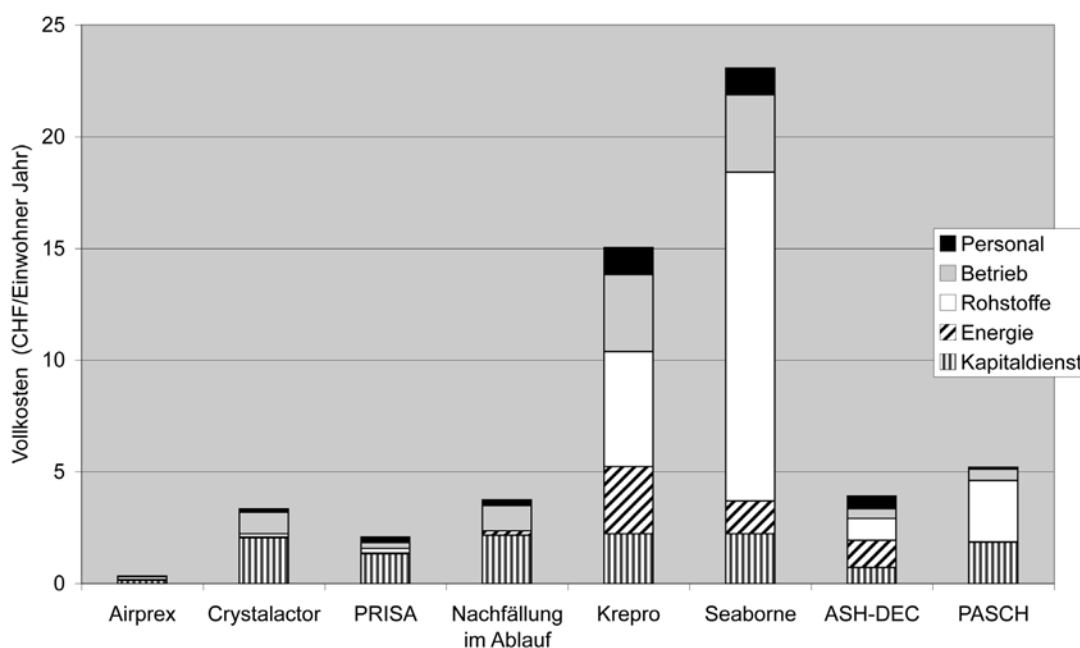


Abbildung 2: Vollkosten [5]

Der *kalkulierte Gesamtenergiebedarf* setzt sich aus folgenden Teilbeträgen zusammen: Graue Energie, Gas, Fernwärme und Strom. Graue Energie errechnet sich aus dem Rohstoffverbrauch (vor allem Chemikalien) und der spezifischen grauen Energie der Rohstoffe. Die graue Energie der Bauten und Anlagen wurde nicht berücksichtigt. Der Energiebedarf wird in Primärenergieäquivalenten (PE) ausgedrückt.

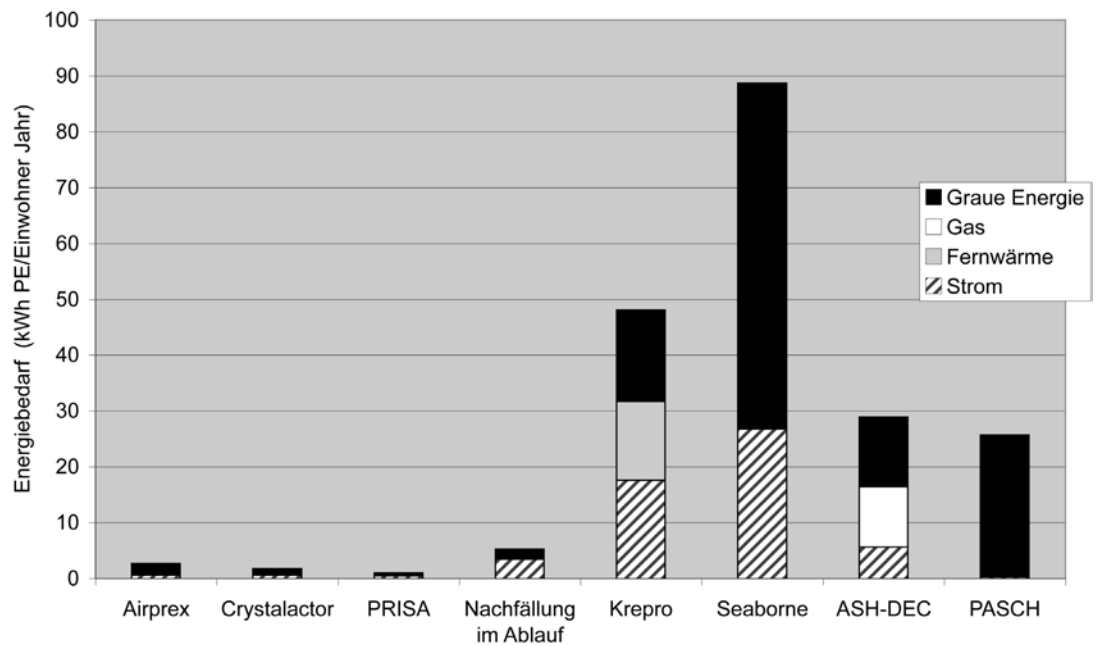


Abbildung 3: Gesamtenergiebedarf [5]

Die *Phosphormenge*, die im Kanton Zürich mit einem Verfahren zurückgewonnen werden kann, wurde mit der Mindestanlagengrösse, die der Verfahrensanbieter empfiehlt, kalkuliert. Dann wurde der Anteil der Einwohner, die über diese Mindestgrösse an ARA angeschlossen sind, berechnet. Dieser Anteil wiederum wurde mit dem Phosphoranteil im Zulauf, der mit dem Verfahren zurückgewonnen werden kann, multipliziert. So wurde festgestellt, welcher Anteil des im Abwasser des Kantons anfallenden Phosphors zurückgewonnen werden kann. Analog wurden die Kosten und der Energiebedarf pro Einwohner kalkuliert.

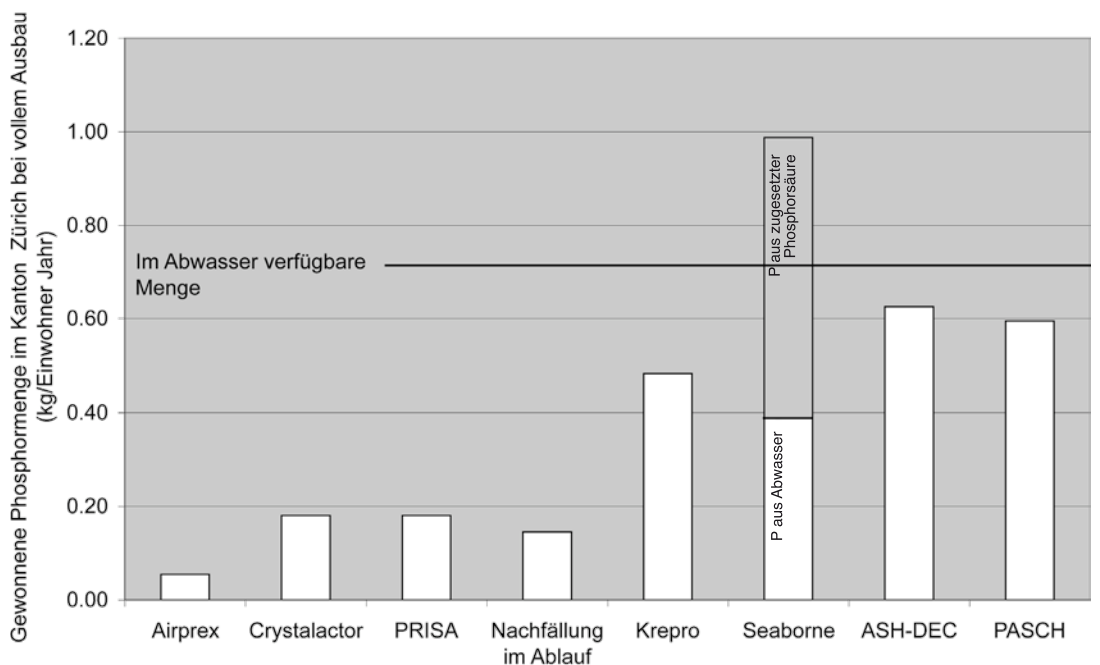


Abbildung 4: P-Rückgewinnung im Vergleich zum Gesamtpotenzial [5]

Vergleich aller drei Hauptkriterien

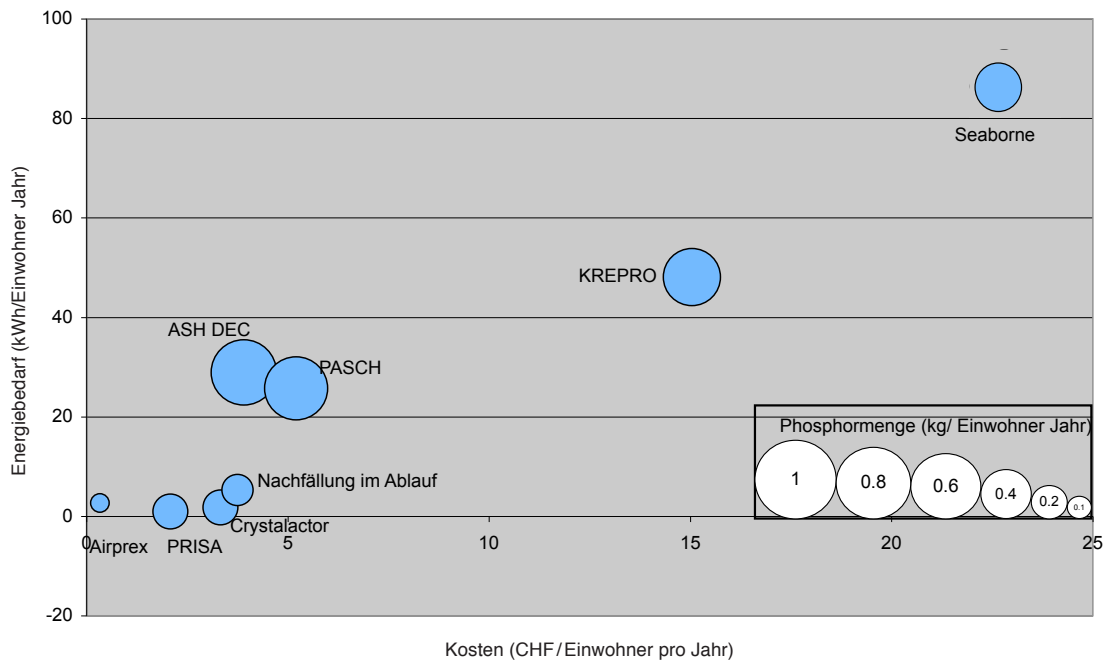


Abbildung 5: Vergleich der Hauptkriterien aus Abbildungen 2-4 [5]

Erkenntnisse aus dem Vergleich

Die Resultate zeigen:

- Kristallisationsverfahren bieten bezüglich Kosten und Energiebedarf einen Vorteil.
- Verfahren mit Rückgewinnung aus der Asche ergeben deutlich höhere P-Rückgewinnungsmengen und die Kosten pro Menge Phosphor liegen tiefer als bei Verfahren mit P-Rückgewinnung aus dem Schlamm.
- Verfahren mit P-Rückgewinnung aus dem Schlamm sind sehr teuer und erfordern nochmals deutlich mehr Energie als die Verfahren mit Rückgewinnung aus der Asche. Sie können dies auch nicht mit wesentlich höherer P-Rückgewinnung wettmachen.

Die Verfahren mit P-Rückgewinnung aus der Asche sind also den Verfahren mit P-Rückgewinnung aus Schlamm und Schlammwasser insgesamt eindeutig überlegen.

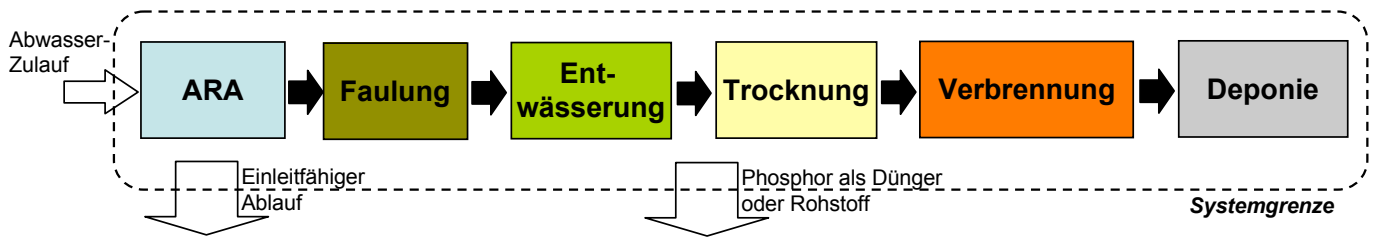


Abbildung 6: Systemgrenze der Prozessketten für den Vergleich der alternativen Klärschlammbehandlungswege mit dem Referenz-Entsorgungsweg Monoverbrennung [5]

Bewertung möglicher Klärschlammbehandlungswege mit P-Rückgewinnung

Die P-Rückgewinnungsverfahren wurden nun in die gesamte Prozesskette der Klärschlammbehandlung vom Zulauf in die ARA bis zur allfälligen Deponierung integriert und mit einer identischen Methodik bewertet. Nur so konnte abgeklärt werden, ob bessere alternative Entsorgungswege für den Klärschlamm bestehen als die Monoverbrennung mit (späterer) P-Rückgewinnung aus der Asche.

Für jede Prozesskette der alternativen Entsorgungswege wurden folgende Aspekte vorausgesetzt:

- Einhaltung der geltenden Gesetze,
- Reinigung des Abwassers bis zur Erreichung der geforderten Ableitungsqualität,
- Erzeugung eines markttauglichen Düngers oder Industrierohstoffs bzw. deponierbarer Reststoffe.

Für die Bewertung der Prozessketten wurden aus den acht untersuchten P-Rückgewinnungsverfahren stellvertretend folgende Verfahren berücksichtigt und integriert:

- ASH DEC- und PASCH-Verfahren zur P-Rückgewinnung aus Asche,
- PRISA-Verfahren stellvertretend für Auskristallisation/Fällung aus Schlammwasser/Abwasser,
- KREPRO-Verfahren stellvertretend für einen sauren Aufschluss aus dem Schlamm.

Erstere zwei Verfahren nutzen Phosphor nach dem Verbrennungs-/Oxidationsprozess mit Energienutzung/Mineralisierung und Schadstoffzerstörung, die beiden letzteren davor.

Als Verbrennungs-/Oxidationsprozesse kommen für die verschiedenen Entsorgungsvarianten grundsätzlich die Monoverbrennung, die Nassoxidation, die Verbrennung in KVA und das Zementwerk (bei der vorgängigen P-Nutzung durch PRISA bzw. KREPRO) in Frage.

Für die Bewertung sämtlicher Varianten wurden identische Systemgrenzen definiert (siehe Abbildung 6).

Bewertungskriterien der Entsorgungswege

Um die gewonnenen Erkenntnisse aus der Umfeldbeobachtung mit den Vorprojekten zu vergleichen, wurden für die Bewertung der Entsorgungswege identische Kriterien berücksichtigt:

- 1) Energiegewinnung/-verbrauch,
- 2) Kosten,
- 3) gewonnene Menge Phosphor,
- 4) Transportaufwand und zusätzlich
- 5) die CO₂-Bilanz der Prozesskette.

Diese Kriterien decken die drei Dimensionen der Vorgaben an die zukünftige Klärschlammplanung ab:

- 1) Mengendimension: Anteil des Phosphors im Abwasser des Kantons Zürich, der als Dünger bzw. Industrierohstoff verwertet werden kann (in %)
- 2) Ökologische Dimension: Menge an Energie, die gewonnen werden kann bzw. eingesetzt werden muss (in MJ/t EKS¹) sowie CO₂-Bilanz (g CO₂/t EKS)
- 3) Ökonomische Dimension: Kosten/Erträge (in CHF/t EKS)

Dadurch waren die Resultate einfach vermittelbar und nicht an eine (subjektive) Gewichtung der Kriterien geknüpft.

Sechs alternative Entsorgungswege im detaillierten Vergleich zum Referenzweg

Die folgenden sechs alternativen Klärschlamm Entsorgungswege (1–6) kommen im Vergleich mit dem Referenz-Entsorgungsweg Monoverbrennung mit Variante Zwischenlager (0) als Prozessketten in Frage (Abbildung 7). P-Rückgewinnungsverfahren sind an ihren Anwendungsorten in der Prozesskette platziert und mit dem – für die Klärschlamm Entsorgung notwendigen – Verbrennungs-/Oxidationsprozess mit Energienutzung/Mineralisierung und Schadstoffzerstörung kombiniert. In den Varianten 5 und 6 wurde als Alternative zur Monoverbrennung nur die KVA gewählt (Verbrennung im Zementwerk oder die Nassoxidation beeinflussen die Schlussfolgerungen nicht).

Orange:
Energienutzungsprozesse
inkl. Mineralisierung und
Schadstoffzerstörung

Weiss:
P-Rückgewinnungsprozesse

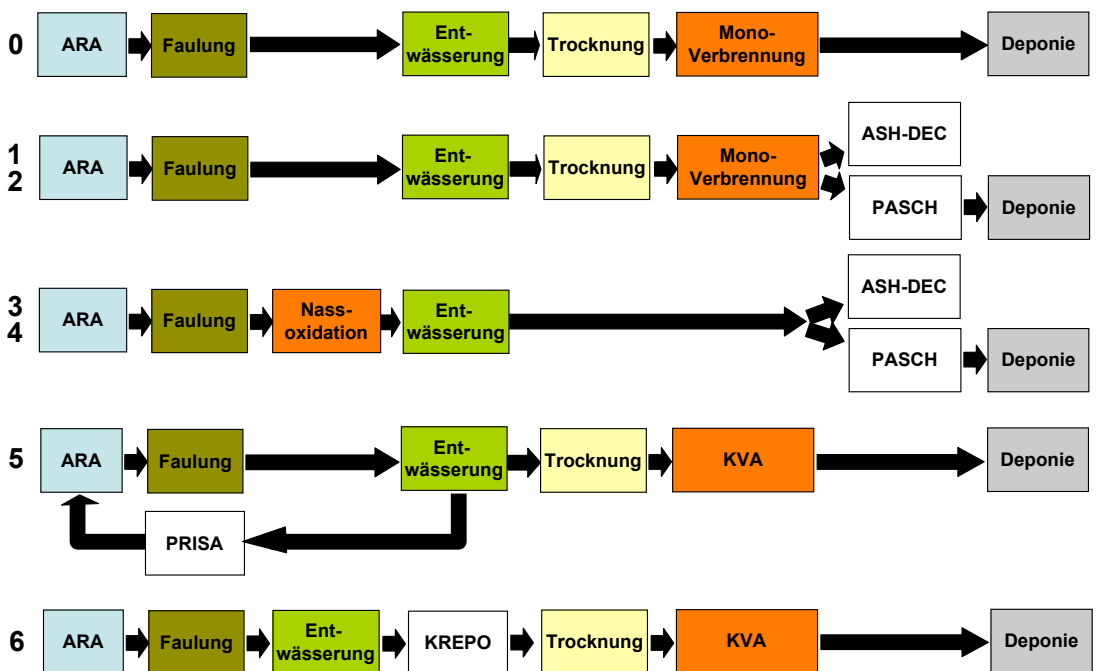


Abbildung 7: Alternative Klärschlamm Entsorgungswege 1–6 im Vergleich zum Referenz-Entsorgungsweg Monoverbrennung (mit Variante Zwischenlager) mit ganzen Prozessketten gemäss Systemgrenzenwahl (Bemerkung: Die Prozesse Faulung, Entwässerung und Trocknung sind in den verschiedenen Varianten nicht in identischem Ausmass von Bedarf) [5]

¹EKS = entwässerter Klärschlamm mit einer mittleren Trockensubstanz von 30 Gewichtsprozent

Resultate des Vergleichs der Entsorgungsvarianten im Überblick

Tabelle 3 zeigt die Resultate aus der umfangreichen Untersuchung der sechs alternativen Klärschlamm Entsorgungsvarianten.

Die Resultate ergaben Folgendes:

- KVA oder Zementwerk mit PRISA weisen inakzeptabel tiefe P-Recyclingraten auf.
- KVA (oder Zementwerk bzw. NassOx) mit KREPRO sind bei einem bescheidenem P-Recyclinggrad wirtschaftlich nicht vertretbar.
- Nassoxidation mit ASH DEC oder PASCH zeigt im Vergleich zur Monoverbrennung eine deutlich schlechtere Energie- bzw. CO₂-Bilanz bei identischen P-Recyclingraten und vergleichbaren Kosten.

EMS = Energienutzung
Mineralisierung
Schadstoffentfrachtung

P-RGW = Phosphorrückgewinnung

EKS = entwässerter Klärschlamm mit TS = 30%

Mg ≈ 1 Tonne

TS FS = Trockensubstanz Faulschlamm

	EMS vor P-RGW				EMS nach P-RGW	
	Monoverbrennung		Nassoxidation		PRISA	KREPRO
	mit ASH-DEC	mit PASCH	mit ASH-DEC	mit PASCH	mit KVA	
	1	2	3	4	5	6
Bewertungskriterien						
Energiebilanz (GJ/Mg EKS)	-1.4	-1.4	-2	-1.8	1.9	-0.6
Energie Transport (GJ/Mg EKS)	-0.06	-0.06	-0.04	-0.04	-0.03	-0.03
Kosten (CHF/Mg P)	4900	8700	3500	7300	-390	29000
P-RGW (Anteil von Zulaufmenge)	87	83	87	83	25	67
CO ₂ -Bilanz (g/kg TS FS)	-40	-130	350	270	-140	-140

Tabelle 3: Zusammenfassung der Endresultate für die sechs alternativen Klärschlamm Entsorgungsvarianten [5]

Schlussfolgerungen zu alternativen Klärschlamm Entsorgungswegen

Die umfangreichen Abklärungen zeigten, dass der Referenz-Entsorgungsweg Monoverbrennung mit (zukünftiger) P-Rückgewinnung aus der Asche

- die vorgegebenen Kriterien (Stand der Technik, P-Rückgewinnung, Energie- und CO₂-Vorgaben) am besten erfüllt und
- einige klare Vorteile (tiefe Zusatzbelastung der ARA, Reststoffdeponiekompatibilität, erprobte Technik) aufweist.

Diese Erkenntnisse gelten trotz der Feststellung, dass Energienutzungspotenziale von KVA-Abwärme in der Monoverbrennung nicht so gross sind wie in früheren Studien geschätzt.

Fortsetzung Schlussfolgerung:

Folgende alternative Entsorgungswege werden deshalb bei der Verfahrenswahl in den Vorprojekten nicht mehr in Betracht gezogen:

- Klärschlamm-Nassoxidation mit nachgeschalteter thermochemischer oder nasschemischer P-Rückgewinnung
- Nassoxidation mit vorgeschalteter P-Rückgewinnung aus Abwasser oder Klärschlamm mittels Fällung oder Kristallisationsprozessen
- Thermische Behandlung des Klärschlammes in KVA oder in Zementwerken

Bio-P

Die Phosphorelimination mittels biologischer Verfahren (luxury P-uptake), auch Bio-P genannt, weist gegenüber der klassischen chemischen P-Fällung diverse Vorteile auf. Dazu gehören die Ersparnis an Fällmitteln – und damit keine zusätzliche Belastung des Abwassers und Klärschlammes mit Schwermetallen und Salzen – sowie die Reduktion der Schlammengen. Hingegen treten oft betriebliche Probleme auf (Schwimm- und Blähschlamm) und zusätzliches Beckenvolumen ist erforderlich (anaerobe Zone). Ohne zusätzliche Fällung können die im Kanton Zürich geltenden strengen Einleitungsbedingungen für Phosphor und ungelöste Stoffe in der Regel nicht eingehalten werden. Die technischen Möglichkeiten eines Teil-Bio-P-Betriebs sollten aber, speziell im Hinblick auf die P-Rückgewinnung, zukünftig vermehrt berücksichtigt werden.

Nassoxidation

Die Nassoxidation ist ein altbekanntes chemisches Verfahren, bei dem Flüssigkeiten bzw. Schlämme oxidativ behandelt werden. Im Falle von Klärschlämmen wird teilentwässertem pumpfähiger Klärschlamm (8 bis max. 11 % TS) bei 250 °C und rund 85 bar in flüssiger Phase mit reinem Sauerstoff oxidiert. Übrig bleiben ein mineralisierter, stabilisierter Rückstand (P-haltig), Abgas und organisch hochbelastetes Abwasser. In der Nassoxidation wird die gleiche Wärmemenge wie bei einer Verbrennung frei. Hier geht jedoch keine Verdampfungswärme verloren, da die Reaktion in wässriger Phase unter Druck geschieht. Somit können im Prozess selber mehr Wärme und Strom als bei einer Monoverbrennung gewonnen werden. Wenn aber die graue Energie für die Herstellung von Reinsauerstoff berücksichtigt wird, ist die Energiebilanz negativ und sogar schlechter als die Oxidation in Verbrennungsprozessen.

Obwohl verschiedene Varianten des Verfahrens seit Jahrzehnten bekannt und entwickelt worden sind, sind bis heute noch keine langjährigen Erfahrungen mit Grossanlagen für kommunalen Klärschlamm im Massstab einer Anlage für den Kanton Zürich vorhanden. Dies bedeutet auch, dass keine gesicherten Daten zum Bau und Betrieb verfügbar sind.

Drei Jahre Betriebserfahrung in einer kleineren Anlage für Klärschlamm in Orbe, Schweiz, zeigen zudem, dass zielkritische Reststoffdeponiegrenzwerte, wie beispielsweise DOC und Ammonium-N, nicht eingehalten werden können und somit eine allfällige Zwischenlagerung des P-haltigen Rückstands für den Kanton Zürich ausgeschlossen wäre. Auch ist die grosse organische Belastung des Abwassers eine Herausforderung für eine Abwasserreinigungsanlage, die für einen Standort erforderlich wäre. Bei kommunalem Klärschlamm als Abfallinput ist die Gefahr für eine abrasive Belastung der Anlagenteile (Wärmetauscher, Ventile, Pumpen etc.) und Verschmutzungsprobleme (Ablagerungen) im Wärmetauscher gross. Dies kann die Energiebilanz und die Kosten der Anlage negativ belasten. Für spezielle Industrieschlämme gibt es gute und langjährige Erfahrungen.

P-Rückgewinnung ohne Zwischenlagerung direkt aus Asche der geplanten Monoverbrennungsanlagen in Sicht? Konzeptstudie ASH DEC

In einer weiteren Konzeptstudie wurde untersucht, ob es sich allenfalls schon lohnen könnte, Phosphor aus der Asche der Monoverbrennung an einem der geplanten Standorte direkt zu nutzen statt in Reststoffdeponiekompartimenten für die spätere Nutzung zwischenzulagern.

Im Gesamtkonzept sollte der Anlagenverbund zwischen der geplanten Monoverbrennungsanlage und der ASH DEC-Anlage so mit der vorhandenen Infrastruktur verbunden werden, dass im Idealfall sämtliche Stoffströme, die das Anlagengelände verlassen, als Wertstoffströme anfallen (Abbildung 8).

Dazu wurden erste Orientierungswerte für Stoff- und Energiebilanzen, Kosten und Platzbedarf ausgearbeitet. Zudem wurden standortabhängige Schnittstellen zur geplanten Monoverbrennungsanlage und im Falle eines KVA-Standorts zur benachbarten KVA definiert, die zu einem energie- und stoffstromoptimierten Verfahrenskonzept führen (Schnittstellendefinition). Darauf aufbauend wurden weitere Vorschläge für Optimierungs- oder Synergiepotentiale erarbeitet:

- Prüfung einer Kooperation mit weiteren Klärschlammasche-Lieferanten
- Konzept für integrierte Behandlung von KVA-Asche, insbesondere aus der Flugaschenwäsche
- Zu erwartende Kosteneinsparpotenziale bei höheren Kapazitäten

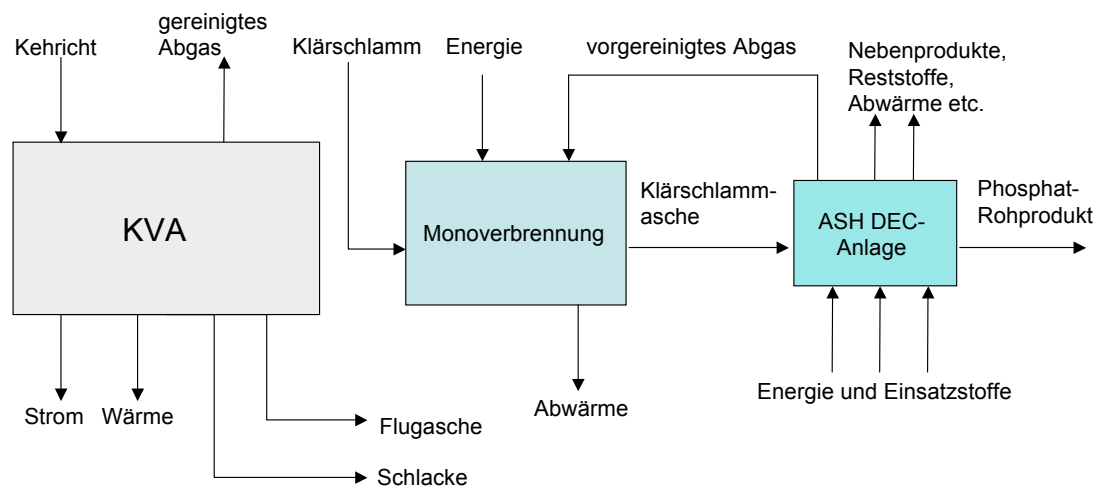


Abbildung 8: Übersicht Anlagenverbund zwischen einer Monoverbrennungsanlage an einem KVA-Standort und der ASH DEC-Anlage zur P-Rückgewinnung [6]

Ein kosteneffizienter Einsatz des ASH DEC-Verfahrens hängt auch von den Rahmenbedingungen am jeweiligen Standort ab. Dies gilt beispielsweise für die Kosten zur Bereitstellung des Chloridträgers in Form von Frischware (z.B. als Calciumchlorid) oder in Form von zurückgewonnenem und gereinigtem chloridhaltigem Produkt aus der Abgasreinigung.

Es wurden drei Verfahrensvarianten einer ASH DEC-Anlage untersucht, die sich im Wesentlichen in der Abgasreinigung und im Chloridrecycling unterscheiden.

- In der Variante 1 wird eine trockene Abgasreinigung mit Chloridrecycling vorausgesetzt.
- Bei Variante 2 wird das saure Waschwasser aus der nassen Abgasreinigung für die anschließende Flugasche-Schlackewäsche der KVA verwendet.
- In Variante 3 wird aufkonzentrierte Salzsäure aus einer nassen Abgasreinigung wieder in den ASH DEC-Prozess zurückgeführt (Säure-Recycling).

Die Resultate der Berechnungen für die drei Varianten sind in den folgenden drei Abbildungen zusammengefasst. Abbildung 9 zeigt für die drei Varianten den erforderlichen Energieeinsatz pro t EKS im Vergleich zu den geschätzten Gesamtkosten für die ASH DEC-Anlage. Daraus wird ersichtlich, dass für Variante 1 bei tiefem Energiebedarf die tiefsten Gesamtkosten erwartet werden. Der Vergleich der berechneten CO₂-Bilanzen ist in Abbildung 10 dargestellt. Die grösste spezifische CO₂-Emission wird für Variante 3 geschätzt. Die Emissionen für Variante 1 und 2 sind praktisch identisch. Mit einer Modifikation der Variante 1 (Einspareffekt durch Vorwärmung der Aschemischung mittels Wärmetauscher) könnten die Emissionen bzw. der Energieverbrauch noch weiter gesenkt werden.

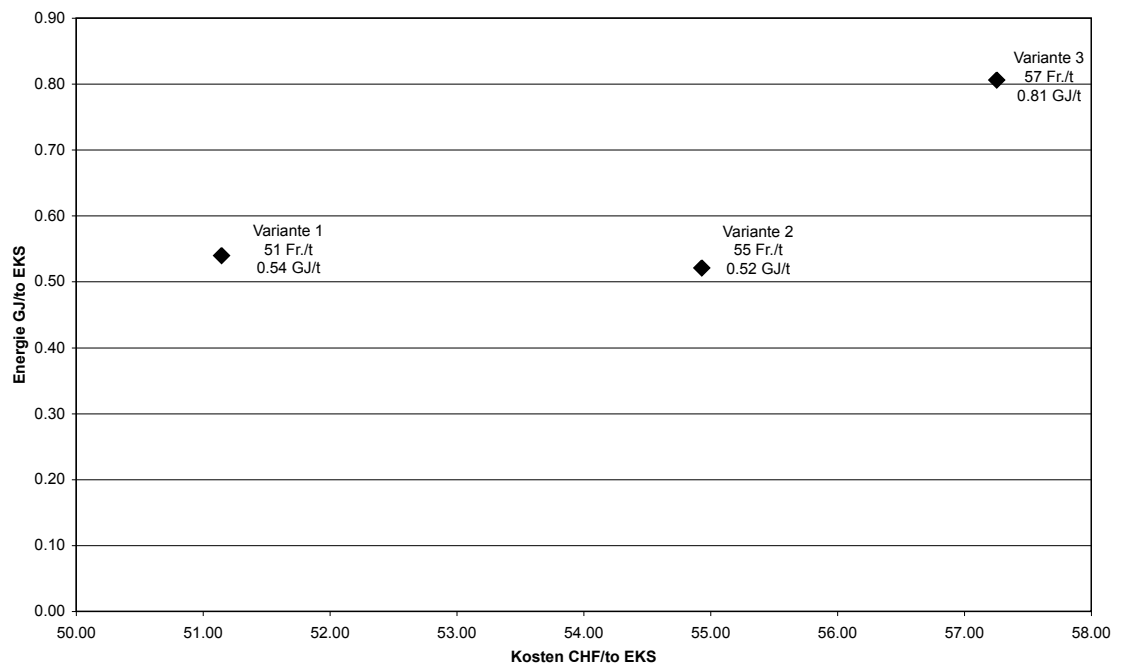


Abbildung 9: Resultate für die drei Varianten im Überblick: Kosten und Energieverbrauch [6]

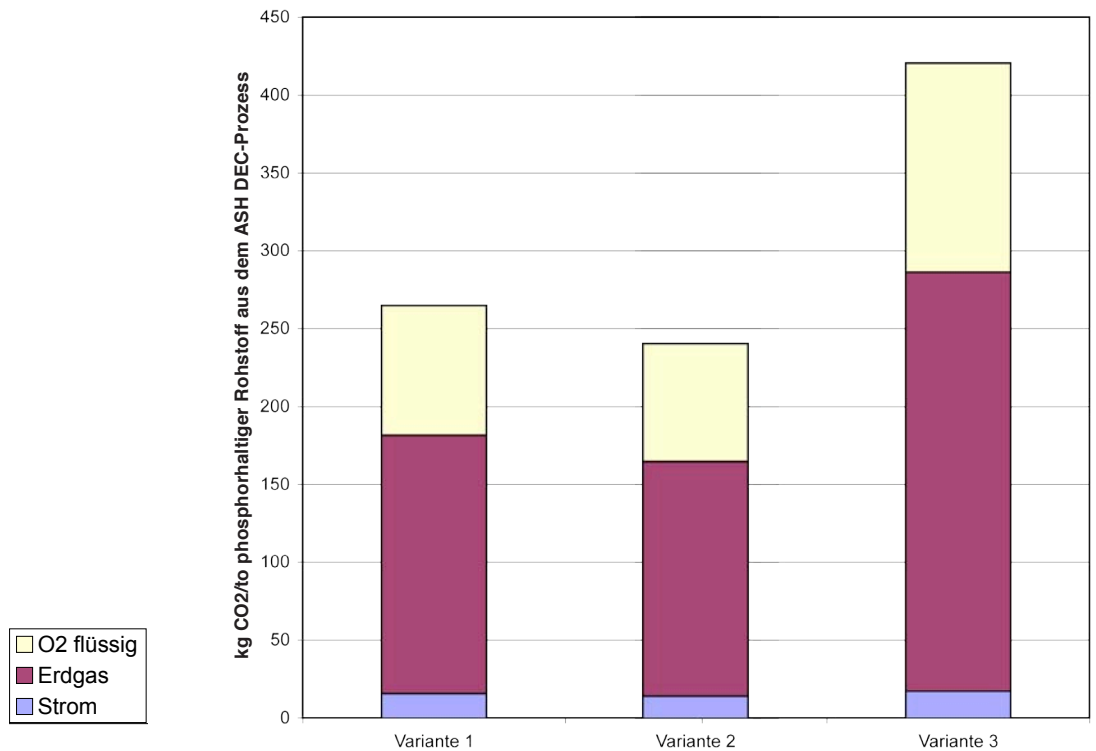


Abbildung 10: CO₂-Bilanzen für die drei Varianten [6]

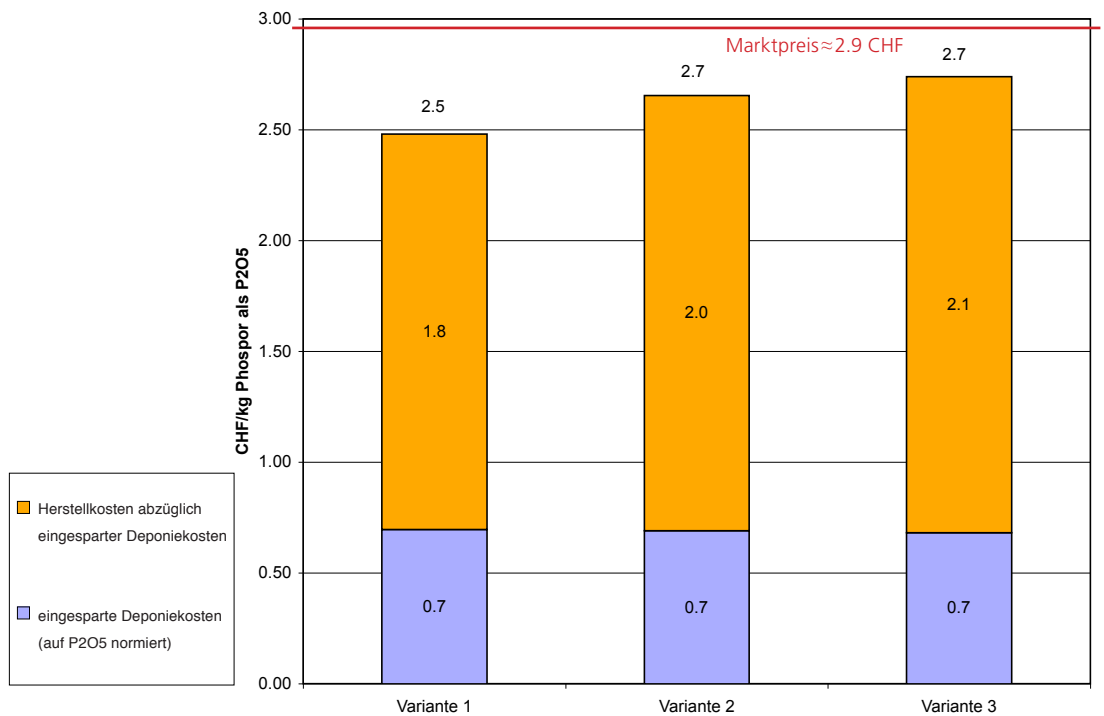


Abbildung 11: Herstellungskosten abzüglich eingesparter Deponiekosten pro kg Phosphor als P₂O₅ (Kosten auf eine Stelle nach dem Komma gerundet) [6]

Abbildung 11 zeigt die Herstellungskosten pro kg Phosphor (als P₂O₅ berechnet). Werden die durch das Verfahren eingesparten Deponiekosten berücksichtigt, reduzieren sich die Herstellungskosten entsprechend (z.B. für Variante 1 von CHF 2,84 auf CHF 1,79). Der Vergleich mit dem aktuellen Preis von phosphathaltigen Mineraldüngern (Granuphos P18 bei Landi aus Landshut, Schweiz, im Sommer 2009) von CHF 2,86/kg P₂O₅ zeigt, dass man für die Varianten 1-3 mit Herstellungskosten abzüglich der Deponiekosten von CHF 1,8 bis 2,1/kg P₂O₅ (deutlich) unter dem aktuellen Marktpreis liegt.

Zu berücksichtigen ist allerdings, dass es sich hierbei um ein verkaufsfertiges Endprodukt mit einem Phosphatgehalt von 18 Gew.-% handelt, während sich die berechneten Werte der Studie der Varianten 1-3 auf ein pulverförmiges Phosphat-Rohprodukt mit 14 Gew.-% P_2O_5 beziehen. Die Kosten für eine Konfektionierung und Herstellung eines marktfähigen Endprodukts wurden im Rahmen der vorliegenden Konzeptskizze noch nicht errechnet.

Folgende Rahmenbedingungen beeinflussen den kostengünstigen Einsatz einer ASH DEC-Anlage im Kanton Zürich entscheidend:

- Anlagendurchsatz
- Energieverbrauch
- P-Gehalt in der Klärschlammasche (hat Einfluss auf Mindestqualität und damit auf den Preis und die generelle Verkaufsfähigkeit eines marktfähigen Düngers)
- Ni-Gehalt im Dünger

Erste Abschätzungen zu einem Upscaling um Faktor 2 zeigen pro Tonne produzierten Phosphats mögliche Kosteneinsparungen von knapp 20 %, bei Faktor 4 sogar von fast 40 %. Zudem ist eine weitere deutliche Reduktion beim Energieverbrauch des Verfahrens realistisch und zu erwarten.

Der Ni-Gehalt im Dünger ist eine wichtige Richtgrösse für den Chloridverbrauch. Deshalb ist der geltende Schwermetallgrenzwert für Dünger bzw. der Ni-Gehalt von Fällmitteln der ARA von grosser Tragweite.

Die Konzeptstudie lieferte erste interessante Resultate. Doch erst eine genauere Abklärung im Rahmen einer detaillierteren Projektierung erlaubt eine exaktere Quantifizierung und verlässlichere Bewertung der Verfahrensvarianten 1-3 in Kombination mit dem definitiv gewählten Monoverbrennungsstandort. Dabei sind auch einige wichtige Annahmen (Hilfsmittelverbrauch und -preise, Kostenneutralität beim Materialaustausch zwischen KVA/Monoverbrennung und ASH DEC-Anlage etc.) und die Machbarkeit von technischen Verfahrenskonzepten (z.B. trockene Abgasreinigung bei sehr hohen Chlorgehalten) nochmals kritisch zu überprüfen.

Die Anlagengrenze der untersuchten Varianten endet mit der Lagerung und dem Abtransport des pulverförmigen P-Rohprodukts ohne weitere Qualitätskontrolle. Durch eine Konfektionierung und/oder durch Zumischen weiterer Düngerkomponenten können Produkte mit einer höheren Wertschöpfung erzeugt werden. Ob dies am selben Standort oder im Verbund mit einer externen Weiterverarbeitung geschieht, ist in einer weiterführenden Projektierungsphase zu untersuchen.

Schlussfolgerungen zur P-Rückgewinnung ohne Zwischenlager

Die Ergebnisse der vorliegenden Konzeptstudie lassen vermuten, dass es sich lohnt, die Rahmenbedingungen für die direkte Rückgewinnung des Phosphors aus der Monoverbrennungsasche genauer zu studieren.

Eine vertiefte Studie, die Unsicherheiten berücksichtigt, wird zeigen müssen, ob die Einbindung einer ASH DEC-Anlage in den Anlagenverbund mit der geplanten Monoverbrennungsanlage an den möglichen Standorten bereits unter aktuellen Rahmenbedingungen (Kosten, Dünger- und Deponiepreise etc.) sinnvoll ist.

Zusätzlich gilt es nochmals vertiefter abzuklären, inwiefern nasschemische Verfahren (Säureaufschluss der Asche) als Variante für die P-Rückgewinnung aus Asche in Frage kommen.

Es ist folgerichtig, diese Untersuchungen parallel zu den nächsten Planungsschritten für die Monoverbrennung weiterzuführen.

Auskunft

Baudirektion Kanton Zürich
AWEL Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft
Postfach
8090 Zürich
043 259 39 49
awel@bd.zh.ch
www.abfall.zh.ch

Literaturverzeichnis

- [1] AWEL (2007). Planung der Klärschlamm Entsorgung im Kanton Zürich 2007-2020 (nicht veröffentlicht).

- [2] Montag, D. (2008). Phosphorrückgewinnung bei der Abwasserreinigung – Entwicklung eines Verfahrens zur Integration in kommunale Kläranlagen. Dissertation ISA. Aachen, RWTH.

- [3] Pinnekamp et al. (2002). Randbedingung einer Phosphat-Rückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm. In ATV-DVWK – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (Hrsg): ATV-DVWK- Bundestagung 18.-19. Sept. 2002 in Weimar, S. 255-262.

- [4] Hermann, L. (2009). Rückgewinnung von Phosphor aus der Abwasserreinigung. Eine Bestandesaufnahme (nicht veröffentlicht).

- [5] Nättorp, A. & Lüscher, C. (2009). Projekt Umfeldbeobachtung Klärschlamm Entsorgung Kanton Zürich 2009 – Bewertung von Alternativverfahren zur Monoverbrennung unter Berücksichtigung der Phosphorrückgewinnung. Fachhochschule Nordwestschweiz, im Auftrag des AWEL (nicht veröffentlicht).

- [6] Berner, P. & Kuhn, C. (2008). Bericht Konzeptskizze ASH DEC-Verfahren, Trevis AG im Auftrag des AWEL (nicht veröffentlicht).