

Ökobilanzielle Untersuchung der sauren Wäsche von KVA Flugasche in der Schweiz

Endbericht (Version 1.7)

Datum: 10.10.2011

Autoren: Michael E. Bösch, Mélanie Haupt, Stefanie Hellweg

ETH Zürich

Institut für Umweltingenieurwissenschaften

Gruppe für Ökologisches Systemdesign

Wolfgang-Pauli-Strasse 15

CH-8093 Zürich

*Tel: +41- 44- 633 43 37; email: hellweg@ifu.baug.ethz.ch

Aveny GmbH

Schwandenholzstrasse 212

8046 Zürich

email: michael.boesch@aveny.ch

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
1. Einleitung	5
2. Methodisches Vorgehen	5
2.1 Beschreibung der untersuchten Verfahren.....	5
2.2 Ökobilanz: Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen	6
3. Resultate	9
3.1 Umweltauswirkung Vergleich FLUWA, FLUREC, Verfestigung und UTD	9
3.2. Umweltauswirkung unter Berücksichtigung verschiedener KVA-FA mit FLUWA und FLUREC	11
4. Diskussion	13
4.1. FLUWA, FLUREC, Verfestigung und UTD im Vergleich	13
4.2. Einfluss verschiedener KVA-FA und H ₂ O ₂ -Dosierungen	15
5. Schlussfolgerungen	15
6. Anhang	17
A1. Systemmodellierung	17
A2. Sachbilanz	19
A3. Wirkungsabschätzung	20
A4 Sensitivitätsanalysen.....	22
A5 Umweltbetrachtung der sauren Flugaschenwäsche aus Sicht eines KVA Betreibers	23
A6 Bewertung der Flugascheverwertungsverfahren mit unterschiedlichen Wirkungsabschätzungsmethoden.....	24
A7 Zusatzuntersuchung FLUWA und FLUREC mit Flugasche aus 3 verschiedenen KVA	25
Referenzen	28

Zusammenfassung

Diese Studie untersucht den ökologischen Fussabdruck der sauren Wäsche von KVA Flugasche (FA). Hierzu werden zwei verschiedene Verfahren zur sauren Flugaschenwäsche modelliert und der Flugaschendeponierung in Schweizer Reststoffdeponien (RSD) und in Untertagedeponien (UTD) im Ausland gegenüber gestellt. Bei den in der Schweiz etablierten FLUWA Verfahren wird die FA mit dem sauren Quenchwasser aus der KVA Rauchgasreinigung gewaschen, wonach sie unverfestigt auf Schlackenkompartimenten abgelagert werden kann. Aus dem bei der sauren Flugaschenwäsche abgetrennten zinkhaltigen Hydroxidschlamm wird in Zinkhütten im Ausland Sekundärzink, Sekundärkadmium und Sekundärblei produziert. Ein neues Verfahren, FLUREC, gewinnt den Hauptteil des Zinks durch Elektrolyse direkt an der KVA zurück und erzeugt ein metallhaltiges Nebenprodukt, welches in Bleihütten verwertet werden kann. Bei der direkten Deponierung von FA in Reststoffdeponien ist zur Einhaltung der Eluatwerte eine vorgängige Verfestigung mit einem hydraulischen Bindemittel vorgeschrieben, während die FA bei der Untertagedeponierung im Ausland unverfestigt abgelagert werden kann. Als Bindemittel können Zement oder alternative Bindemittel verwendet werden.

Die Resultate zeigen bezüglich der Methode der ökologischen Knappheit, dass die Untertagedeponierung mit 3.05 Mio. UBP die höchste Umweltbelastung aufweist. Die Ablagerung auf der Reststoffdeponie ohne Bewertung der Langzeitemissionen über das Deponiesickerwasser verursacht 225'000 UBP bei Verwendung von 100% Zement zur Verfestigung und 129'000 UBP bei Verwendung von 50% Zement und 50% alternativen Bindemitteln. Das FLUWA Verfahren resultiert in einer Umweltgutschrift von 43'500 UBP, das FLUREC Verfahren in einer Umweltgutschrift von 708'000 UBP. Die Umweltbilanz des FLUWA und FLUREC Verfahres hängt stark vom Metallgehalt in der Flugasche sowie vom Wasserstoffperoxideinsatz und der damit erreichten Metallextraktionseffizienz ab. Bezüglich der Treibhausgasemissionen zeigt sich, dass die grösste Umweltbelastung der Deponierung verfestigter FA (361 kg CO₂-Äq. bei 100% Zement, 189 kg CO₂-Äq., bei 50% Zement, 50% alternativem Bindemittel) auf Reststoffdeponien zufällt. Die Untertagedeponierung weist mit 59 kg CO₂-Äq. die zweithöchsten klimarelevanten Emissionen auf, während das FLUWA Verfahren pro Tonne FA 40 kg CO₂-Äq. verursacht. Das FLUREC Verfahren resultiert in einer Umweltgutschrift von 23 kg CO₂-Äq. In dieser Studie wird davon ausgegangen, dass bei allen untersuchten Varianten eine Hg-Abscheidung im sauren Abwasser der Wäscher stattfindet.

Methode der ökologischen Knappheit Ökopunkte 2006

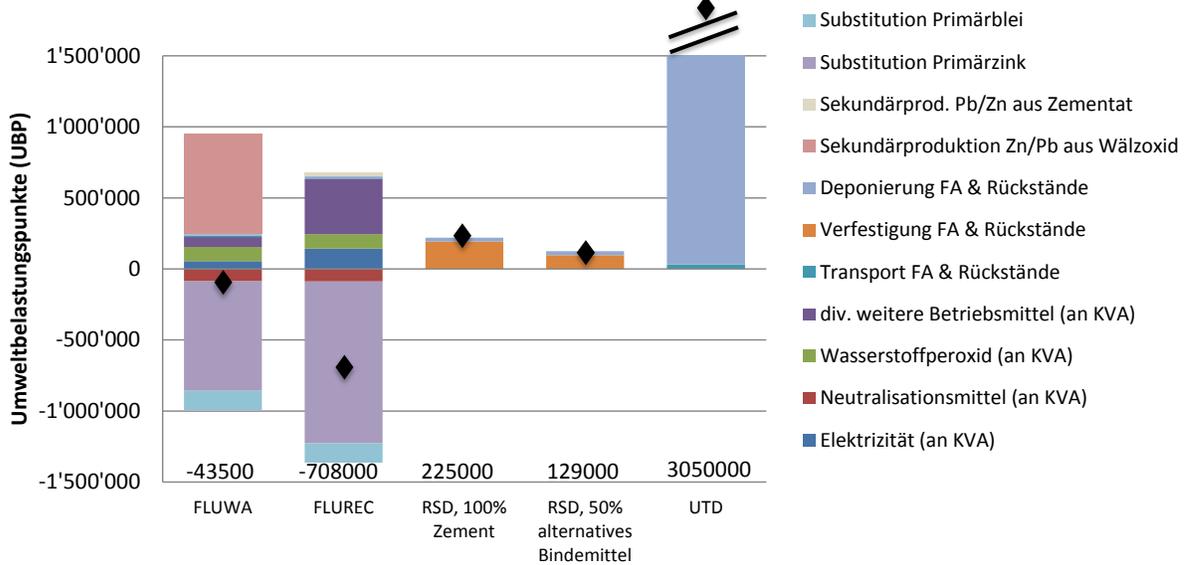


Abbildung 1: Umweltauswirkung der Flugaschebehandlungsverfahren, bewertet mit der Methode der ökologischen Knappheit – Ökopunkte 2006. Die funktionelle Einheit ist die Entsorgung einer Tonne Flugasche

Aus den Resultaten der Untersuchung können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

Die beiden saure Wäsche Verfahren (FLUWA/FLUREC) zeigen bei beiden Methoden (ökologische Knappheit bzw. carbon footprint) eine zumindest gleich/ähnlich gute oder bessere Umweltwirkung als die Ablagerungsverfahren (Neutralwäsche mit Verfestigung und UTD). Hierbei wird für die Metallrückgewinnung der Aufwand zur Sekundärmetallproduktion sowie eine entsprechende Einsparung an Primärmetallen bilanziert. Hierbei wird für die Metallrückgewinnung der Aufwand zur Sekundärmetallproduktion sowie eine entsprechende Einsparung an Primärmetallen bilanziert.

Dabei zeigt sich, dass die beiden sauren Wäscheverfahren FLUWA und FLUREC gemäss der Methode der ökologischen Knappheit (nicht jedoch bezüglich Carbon footprint) eine ökologisch attraktivere Art der Metallproduktion als die Primärmetallproduktion darstellt.

Mit der Zudosierung von H₂O₂ kann beim FLUWA-Verfahren eine weitere deutliche Cu- und Pb-Entfrachtung der abzulagernden gewaschenen Flugasche realisiert werden. Der zusätzliche Umweltaufwand durch das Verfahren mit H₂O₂ beträgt im Vergleich zum Umweltaufwand des gesamten Verfahrens 12% der UBP bzw. 36% der CO₂-Äq.. Wird das FLUREC Verfahren eingesetzt, ist eine H₂O₂-Dosierung grundsätzlich notwendig. Die damit verbundene direkte Metallrückgewinnung ohne den Wälzprozess führt hier zu einer deutlich geringeren Umweltbelastung.

Das Umweltverbesserungspotential, falls alle in der Schweiz anfallende KVA Flugasche ausgehend von der heutigen Situation mit saurer Flugaschenwäsche behandelt würde, beträgt je nach Verfahren 4'970-10'000 Tonnen CO₂-Äquivalente bzw. 543-596 Mio. Umweltbelastungspunkte.

Detaillierte Informationen zu einigen vor- und nachgeschalteten Teilprozessschritten der hier beschriebenen Verfahren sind nicht verfügbar. Um die Aussagekraft der Bewertung zu festigen, wird eine umfassendere Analyse dieser relevanten Detailprozesse empfohlen.

1. Einleitung

Im Jahre 2009 fielen in der Schweiz durch die Verbrennung von 3.5 Mio. Tonnen Abfall in Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA) 80'000 Tonnen Flugasche an [1, 2]. 39% oder 31'000 Tonnen, wurde verfestigt (hydraulisch gebunden) und in einer Reststoffdeponie abgelagert, während 22%, ca. 18'000 Tonnen, unverfestigt in Untertagedeponien unverfestigt nach Deutschland exportiert wurden [2]. 39% oder 31'000 Tonnen Flugasche wurden mithilfe der Flugaschenwäsche von Schwermetallen entfrachtet, wonach sie gemäss der Technischen Verordnung über Abfälle auf Schlackenkompartimenten abgelagert werden dürfen [3]. Die bei der Flugaschenwäsche abgeschiedenen Materialfraktionen können zur Wertstoffrückgewinnung dem Recycling zugeführt werden. Im Sinne der Schliessung von Stoffkreisläufen ist die Rückgewinnung der Wertstoffe der Deponierung vorzuziehen, was die revidierte TVA bereits für KVA Rostschlacke, jedoch nicht für Flugasche vorschreibt [3]. Bezüglich Flugasche wird in der TVA nur die Entsorgung, aber nicht die Rückgewinnung geregelt. Da die Wertstoffrückgewinnung Material- und Energieverbräuche sowie Transportaufwände mit sich zieht, stehen den Vorteilen der Schliessung der Materialkreisläufe auch zusätzliche Aufwände gegenüber. In dieser Studie soll der ökologische Fussabdruck der Flugaschenwäsche in zwei Varianten FLUWA und FLUREC gesamtheitlich untersucht und Vor- und Nachteile gegenüber der direkten Deponierung identifiziert werden.

2. Methodisches Vorgehen

2.1 Beschreibung der untersuchten Verfahren

Die saure Flugaschenwäsche in einer KVA nutzt das saure Quenchwasser aus der Rauchgasreinigung, um Schwermetalle aus der Flugasche zu lösen, während gleichzeitig die Alkalinität der FA der Neutralisation des Quenchwassers dient (siehe Prozess- und Massenflussdiagramm in Abbildung 2). Durch die Wäsche wird die Flugasche von Schwermetallen entfrachtet und kann, nach Abtrennung in einer Filtrationsstufe, zusammen mit der Schlacke als sauer gewaschener Filteraschekuchen ohne weitere Zuschlagstoffe unverfestigt auf einer Schlackendeponie resp. dem Schlackenkompartiment einer Reaktordeponie abgelagert werden. Durch die Alkalinität der FA können in der anschliessenden Abwasserbehandlung Neutralisationschemikalien eingespart werden. Das bei der Wäsche anfallende schwermetallhaltige Filtrat kann aufbereitet und die darin enthaltenen Wertstoffe zurückgewonnen werden.

Beim FLUWA-Verfahren fällt bei der Aufbereitung des Filtrates in der Abwasseraufbereitung ein zinkhaltiger Hydroxidschlamm an, welcher im Ausland zu Zinkoxid aufbereitet und für die Produktion von Sekundärzink verwendet werden kann [4] (Abbildung 2). Beim FLUREC-Verfahren wird dem schwermetallhaltigen Filtrat vor der Abwasserbehandlungsanlage Zinkpulver zugegeben, was zu einer Abscheidung des enthaltenen Bleis, Cadmiums und Kupfers in metallischer Form führt. Aus diesem metallhaltigen Rückstand kann Blei, Kupfer, Cadmium und Zink zurückgewonnen werden. Das zinkhaltige Filtrat wird an der KVA in weiteren Prozessstufen aufbereitet. Über eine Solventextraktion wird eine Zinksulfatlösung produziert, welche das Ausgangsmaterial für die Zinkelektrolyse darstellt. In der Zinkelektrolyse wird mit elektrischer Energie Zink auf einer Aluminiumkathode abgeschieden, das in Form von Zinkplatten als Reinstmetall (Zn >99.99%) abgetrennt werden kann [5]. In der Abwasseraufbereitung fällt ein Restmetallschlamm an, welcher dem Ofen rückgeführt werden kann und danach mit der Schlacke ausgetragen wird (Abbildung 2).

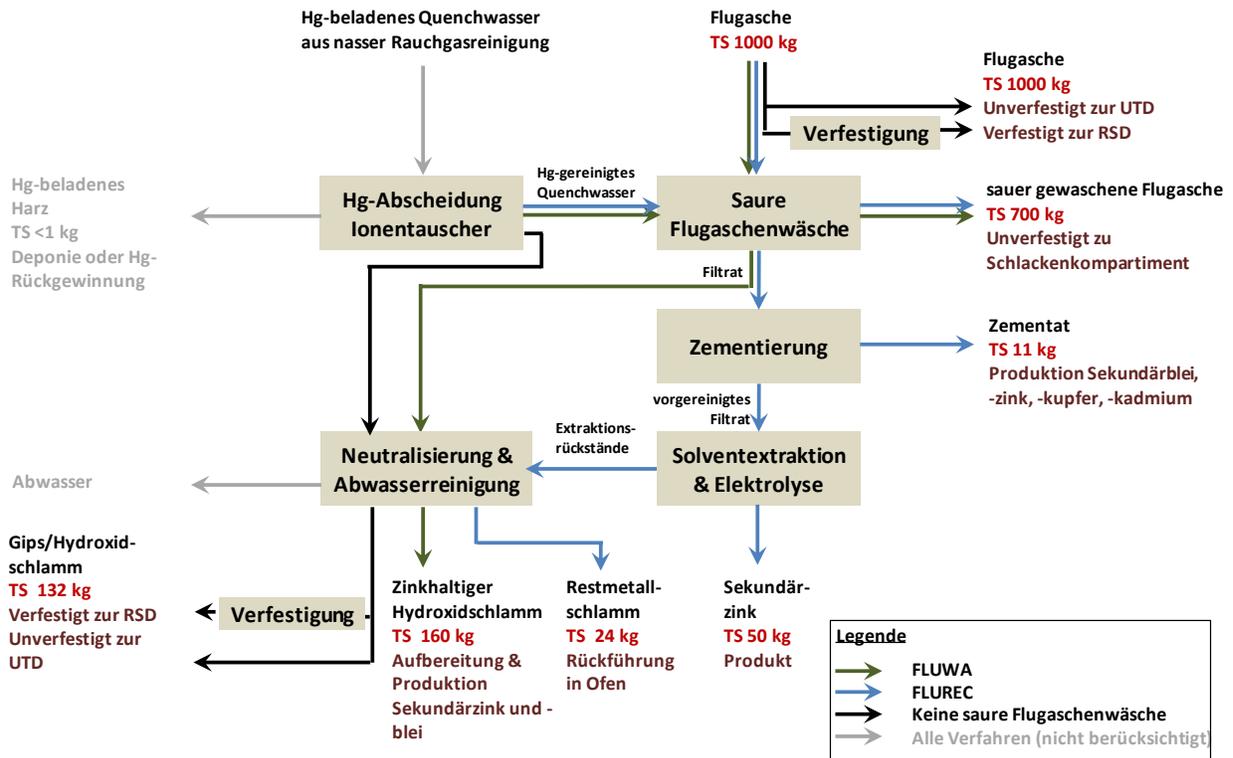


Abbildung 2: Prozessdiagramm und Massenflüsse der Flugaschenbehandlung an der KVA (basierend auf [4, 5]). UTD: Untertagedeponie, RSD: Reststoffdeponie

Flugasche, welche nicht an der KVA sauer gewaschen wird, kann ohne Wertstoffrückgewinnung entweder in verfestigter Form in Reststoffdeponien oder unverfestigt in Untertagedeponien abgelagert werden. Für die bei der Reststoffdeponierung notwendige Verfestigung wird ein hydraulisches Bindemittel verwendet, wobei Zement oder auch alternative Bindemittel wie Holzasche eingesetzt werden können. Für die Deponierung der Flugasche in Untertagedeponien ist keine Verfestigung vorgeschrieben. Da die Schweiz keine Untertagedeponien besitzt, wird die Flugasche nach Deutschland transportiert, wo sie in durch den Bergbau entstandenen, unterirdischen Hohlräumen abgelagert wird. In der Abwasserreinigung der KVA, welche keine saure Flugaschenwäsche betreiben, fällt ein Gips/Hydroxidschlamm an, welcher ebenso wie die Flugasche, verfestigt in Reststoffdeponien oder unverfestigt in Untertagedeponien abgelagert wird. In dieser Studie wird davon ausgegangen, dass bei allen untersuchten Verfahren eine Hg-Abscheidung im sauren Abwasser der Wäscher stattfindet (Abbildung 2).

2.2 Ökobilanz: Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen

Die Umweltauswirkung der sauren Flugaschenwäsche wird mit der Ökobilanzmethode [6, 7] untersucht. Die Studie bezieht sich auf die Situation in der Schweiz und vergleicht fünf Szenarien zur Flugaschebehandlung resp. -entsorgung:

1. FLUWA: saure Flugaschenwäsche mit Zink- und Bleirückgewinnung aus Hydroxidschlamm im Ausland

2. FLUREC: saure Flugaschenwäsche mit integrierter Zinkrückgewinnung, sowie Blei- und Zinkrückgewinnung aus dem metallhaltigen Zementat
3. Deponierung der Flugasche ohne Wertstoffrückgewinnung, verfestigt auf einer Schweizer Reststoffdeponie (100% verfestigt mit Zement)
4. Deponierung der Flugasche ohne Wertstoffrückgewinnung, verfestigt auf einer Schweizer Reststoffdeponie (50% verfestigt mit Zement, 50% mit alternativen hydraulischen Bindemitteln)
5. Deponierung der Flugasche ohne Wertstoffrückgewinnung in einer Untertagedeponie im Ausland

Als funktionelle Einheit wird die Behandlung resp. Entsorgung einer Tonne Flugasche in einer KVA gewählt. Die Systemgrenze umfasst alle Aufwände, welche zur Behandlung bzw. Ablagerung der Flugasche und zur Rückgewinnung der Wertstoffe notwendig sind. Für rückgewonnene resp. eingesparte Materialien wird der Aufwand, welcher bei der Primärproduktion dieser Materialien angefallen wäre, gutgeschrieben. Aufwände an der KVA, welche unabhängig vom Flugaschebehandlungsverfahren (d.h. der obigen Szenarien) anfallen, werden nicht berücksichtigt. Beim FLUREC Verfahren nimmt eine KVA zur Prozessoptimierung zusätzlich zur eigenen Flugasche noch Fremdasche an. Aus Konsistenzgründen wurde die Annahme von Fremdasche nicht berücksichtigt, d.h. alle Aufwände und Erträge wurden auf eine Tonne eigene Flugasche umgerechnet. Ein Szenario mit Berücksichtigung der Fremdasche wird im Anhang A5 aufgezeigt.

Die Systemgrenzen sind in Abbildung 3 dargestellt, die quantitativen Annahmen zu den Szenarien in Anhang A1 und A2 beschrieben.

Die Allokation wird nach dem Verfahren der Systemerweiterung vorgenommen (Gutschriftenverfahren) [7]. Alle Gutschriften werden separat ausgewiesen, so dass den Resultaten auch entnommen werden kann, welche Ergebnisse sich bezüglich des Cut-off Allokationsverfahrens ergeben hätten. Zur Berechnung der Sachbilanzen wurde die Ökobilanzdatenbank ecoinvent v2.1 verwendet [8]. Die Sickerwasseremissionen aus den Deponien wurden anhand eines Stoffflussmodelles von ecoinvent berücksichtigt [9]. Hierbei wird angenommen, dass nur die Reststoff- und die Schlackendeponie zu Emissionen führen, während die Untertagedeponie vollständig wasserundurchlässig ist. In dieser Studie werden zwei unterschiedliche zeitliche Systemgrenzen, Kurzzeit und Langzeit, untersucht. Die Kurzzeitbetrachtung umfasst Sickerwasseremissionen über die nächsten 100 Jahre, die Langzeitbetrachtung berücksichtigt alle Emissionen bis zur nächsten Eiszeit (~60'000 Jahre) [9]. Die Wirkungsabschätzung wird mit den Methoden Carbon footprint (Klimawandel / Climate Change, IPCC 2007' [10] sowie der Schweizer ‚Methode der ökologischen Knappheit – Ökofaktoren 2006' [11] durchgeführt. Da beide Methoden keine Langzeitemissionen ins Grundwasser bewerten, sind diese nicht in den Umweltwirkungsresultaten enthalten. Die Emissionen werden jedoch als Massenflüsse im Anhang A2 aufgeführt.

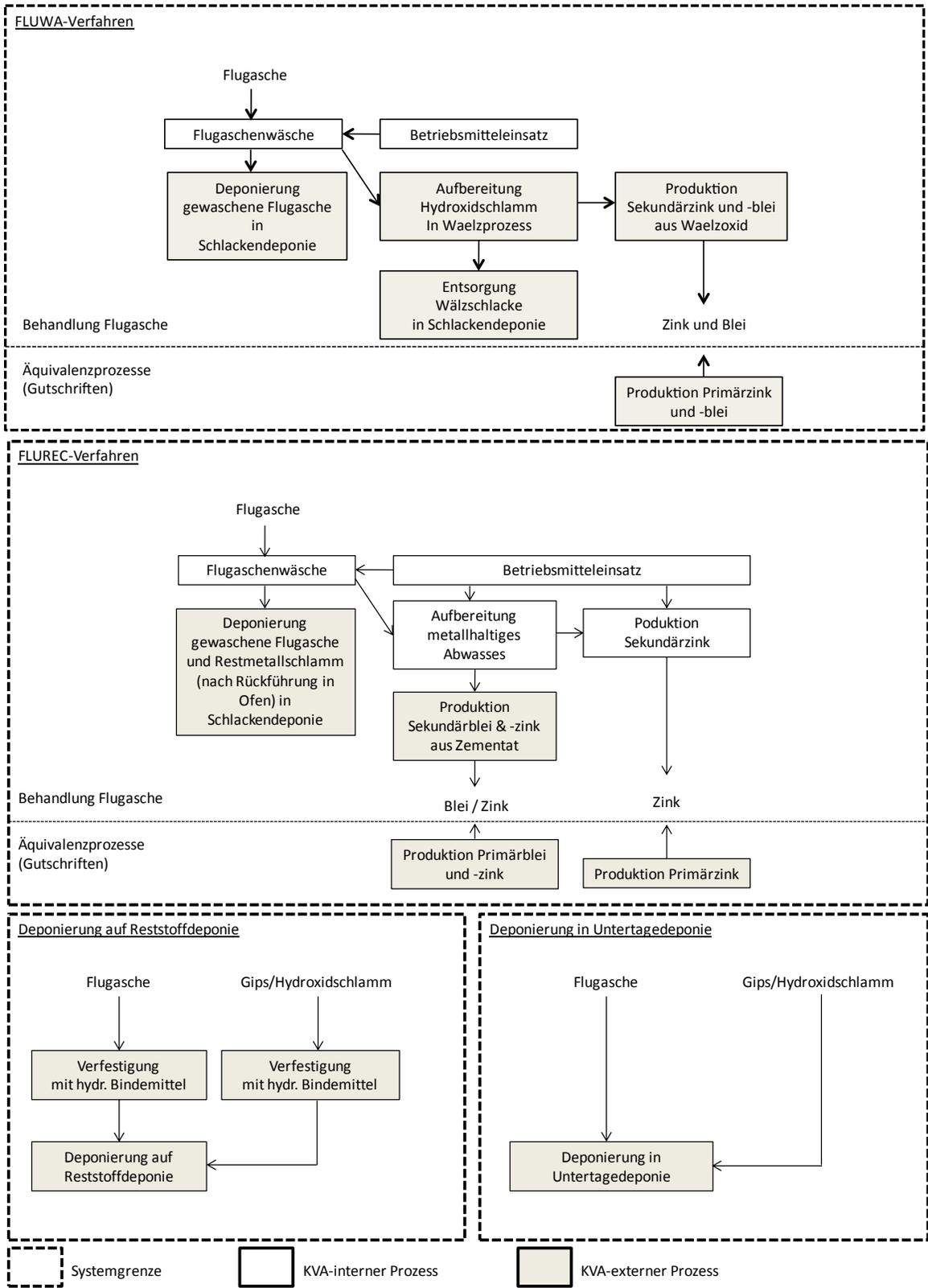


Abbildung 3: Systemgrenzen der untersuchten Szenarien FLUWA-Verfahren, FLUREC-Verfahren, Flugaschendeponierung auf Reststoffdeponie und in Untertagedeponie

3. Resultate

3.1 Umweltauswirkung Vergleich FLUWA, FLUREC, Verfestigung und UTD

Die Resultate der untersuchten Behandlungsverfahren für die untersuchten Wirkungskategorien Carbon footprint und der Methode der ökologischen Knappheit sind in Abbildung 4 und 5 dargestellt. Bezüglich Treibhausgasemissionen weisen v.a. die Verbräuche von Wasserstoffperoxid und weiteren Betriebsmitteln, sowie beim FLUWA Verfahren zusätzlich die Sekundärproduktion von Zink und Blei im Ausland, die grössten Aufwände auf. Die hohen Treibhausgasemissionen bei der Sekundärzinkproduktion werden hauptsächlich in der Aufbereitung des zinkhaltigen Hydroxidschlammes zu Wälzoxid verursacht, welche in einem fossil befeuerten Wälzofen stattfindet. Beim FLUREC Verfahren hingegen wird das Zink direkt durch Elektrolyse zurückgewonnen und benötigt hauptsächlich Elektrizität, deren Produktion in der Schweiz nur geringe Treibhausgase emittiert. Neben dem zurückgewonnenen Zink wirkt sich die Einsparung von Neutralisationsmittels an der KVA positiv auf das Resultat der Flugaschenwäsche auf. Die Rückgewinnung von Blei und Zink aus dem metallhaltigen Nebenprodukt hat nur beschränkt Einfluss auf die gesamten Treibhausgasemissionen des FLUREC-Verfahrens. Bei der Deponierung verfestigter Flugasche in Reststoffdeponien dominieren die Treibhausemissionen zur Zementherstellung. Wird ein alternatives hydraulisches Bindemittel anstatt Zement verwendet, fällt die Bilanz beträchtlich besser aus (siehe Anhang A4 für eine Betrachtung verschiedener hydraulischer Bindemittel). Die Treibhausgasemissionen bei der Untertagedeponierung entstehen durch die Aufwände zur Deponierung der Flugasche und von Gips/Hydroxidschlamm aus der KVA-Abwasserreinigung.

In der Bewertung mit der Methode der ökologischen Knappheit – Ökopunkte 2006 dominieren beim FLUWA-Verfahren die Aufwände zur Produktion von Sekundärzink und -blei, wobei hauptsächlich der Wälzprozess sowie der Elektrizitätsverbrauch im Ausland zur Verarbeitung des Zinkoxids zu Zink relevant sind. Die grösste Gutschrift entsteht durch das zurückgewonnene Zink. Beim FLUREC-Verfahren stellen die Verbräuche an Wasserstoffperoxid und weiteren Betriebsmitteln an der KVA die bedeutendsten Umweltauswirkungen dar. Bei der Reststoffdeponierung dominiert die Zementherstellung zur Flugasche-Verfestigung, sowohl bei ausschliesslicher Verwendung von Zement wie auch bei einer 50% Substitution mit alternativen Bindemitteln. Die Untertagedeponierung weist sehr hohe Umweltbelastungspunkte auf, was dadurch begründet ist, dass die Methode der ökologischen Knappheit 2006 die Untertagedeponierung von Sonderabfall an sich sehr stark bewertet.

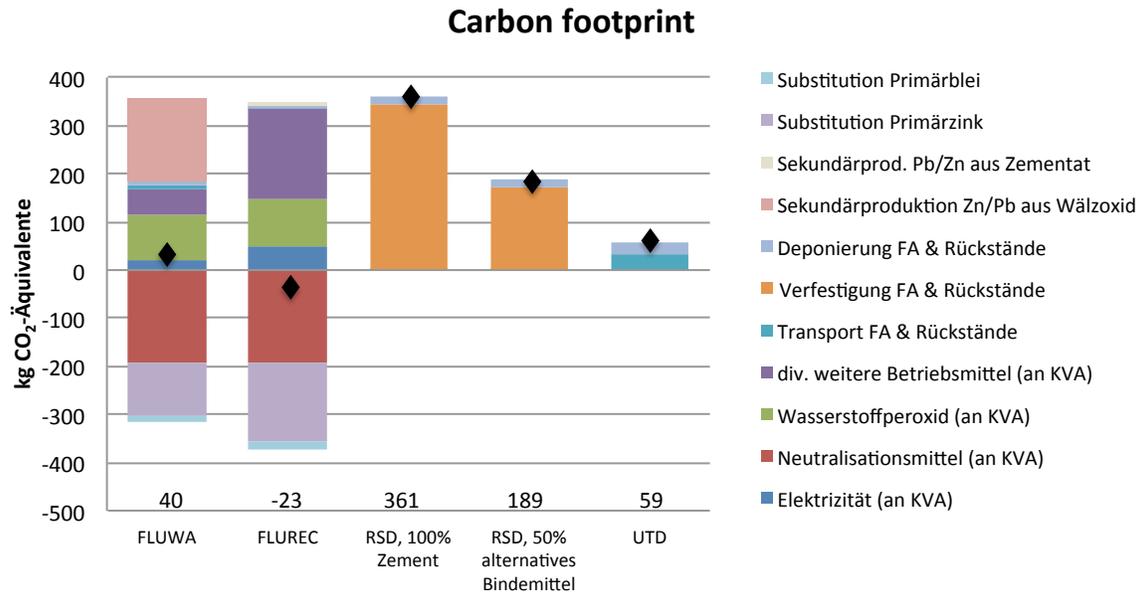


Abbildung 4: Umweltauswirkung der Flugaschebehandlungsverfahren nach der Carbon footprint Methode, welche die Emissionen treibhausrelevanter Gase bewertet. Die funktionelle Einheit ist die Entsorgung einer Tonne Flugasche

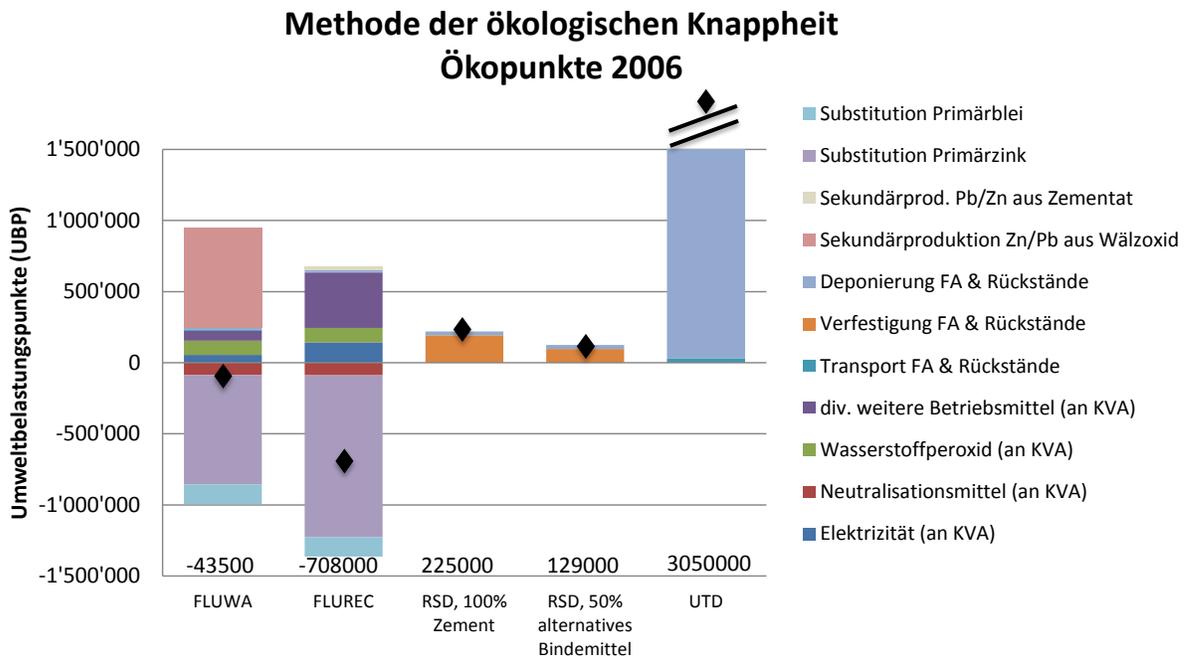


Abbildung 5: Umweltauswirkung der Flugaschebehandlungsverfahren, bewertet mit der Methode der ökologischen Knappheit – Ökopunkte 2006. Die funktionelle Einheit ist die Entsorgung einer Tonne Flugasche

Anhand der momentanen Situation der Flugaschebehandlung in der Schweiz und den Resultaten dieser Studie wird das Umweltpotential der sauren Flugaschenwäscheverfahren FLUWA und FLUREC abgeschätzt (Tabelle 1).

Tabelle 1: Potential der sauren Flugaschenwäsche in der Schweiz
Potential der Flugaschenwäsche in der Schweiz

	Menge (t/a)	Anteil (%)	kg CO ₂ -Äq	UBP
<i>Aktuelle Situation</i>				
FLUWA	31,200	39%	1,257,360	-1.36E+09
Reststoffdeponie	31,200	39%	5,896,800	4.02E+09
Untertagedeponie	17,600	22%	1,038,400	5.37E+11
Total	80,000	100%	8,192,560	5.39.E+11
<i>Umweltwirkung bei Behandlung mit Verfahren x</i>				
FLUWA	80,000	100%	3,224,000	-3.48E+09
FLUREC	80,000	100%	-1,808,000	-5.66E+10
Reduktion der Umweltauswirkung, wenn die gesamte Menge an Flugasche in der Schweiz mit Verfahren x behandelt würde				
Potential FLUWA			-4.97E+06	-5.43E+11
Potential FLUREC			-1.00E+07	-5.96E+11

3.2. Umweltauswirkung unter Berücksichtigung verschiedener KVA-FA mit FLUWA und FLUREC

Im Rahmen dieser Zusatzuntersuchungen wurden 3 weitere Schweizer KVAs ausgewählt, deren FA-Zusammensetzung die typische Spannungsbreite an Schwermetallgehalten von Schweizer KVA-FA aufweisen. Die wesentlichen Unterschiede sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Schwermetallgehalte in den untersuchten Flugaschen und Extraktionseffizienzen mit/ohne Einsatz von H₂O₂

Gehalt in FA [mg/kg TS]	KVA 1 Hauptstudie		KVA 1		KVA 2		KVA 3	
Cd	700		490		310		280	
Cu	2400		1800		1400		2300	
Pb	15200		13200		5900		6800	
Zn	62600		52400		35200		25300	
Extraktion [%]	Ohne H ₂ O ₂	25 L/h H ₂ O ₂	Ohne H ₂ O ₂	25 L/h H ₂ O ₂	Ohne H ₂ O ₂	60 L/h H ₂ O ₂	Ohne H ₂ O ₂	15 L/h H ₂ O ₂
Cd	-	92	82	99	97	99	98	100
Cu	-	25	1	51	1	7	1	75
Pb	-	55	22	71	4	31	40	88
Zn	-	70	74	72	76	75	71	76

KVA 1, 2 und 3 unterscheiden sich primär in den relevanten Schwermetallgehalten und den spezifischen Extraktionseffizienzen. KVA 1 weist hohe Schwermetallgehalte auf. Der Einfluss von H₂O₂ ist hier mit einer geringen Dosierung von 25L/h für Kupfer und Blei bereits sehr effektiv und führt zu hohen Extraktionsausbeuten. KVA 2 und KVA 3 weisen deutlich tiefere Schwermetallgehalte auf. Bei KVA 2 führt

ein hoher Einsatz von H₂O₂ (60 L/h) lediglich zu einer geringeren Steigerung der Extraktionsausbeuten für Kupfer und Blei. Bei der KVA 3 führt eine vergleichbare H₂O₂-Dosierung wie bei KVA 1 zu ähnlich guten Extraktionsausbeuten mit dem einzigen Unterschied, dass die Gesamtgehalte in den FA der KVA 3 einen deutlich tieferen Inputgehalt an Blei aufweist. Durch die Berücksichtigung dieser verschiedenen FA und deren chemischer Reaktivität sollte die Variabilität der Schweizer FA mit in diese Untersuchung einbezogen werden.

Die Umweltauswirkungen sind in den folgenden Abbildungen 6 und 7 für die Methode Carbon Footprint sowie der Methode der Ökologischen Knappheit dargestellt (mit H₂O₂ Einsatz gemäss Tabelle 2; Anhang A7 enthält die Resultate ohne H₂O₂-Einsatz).

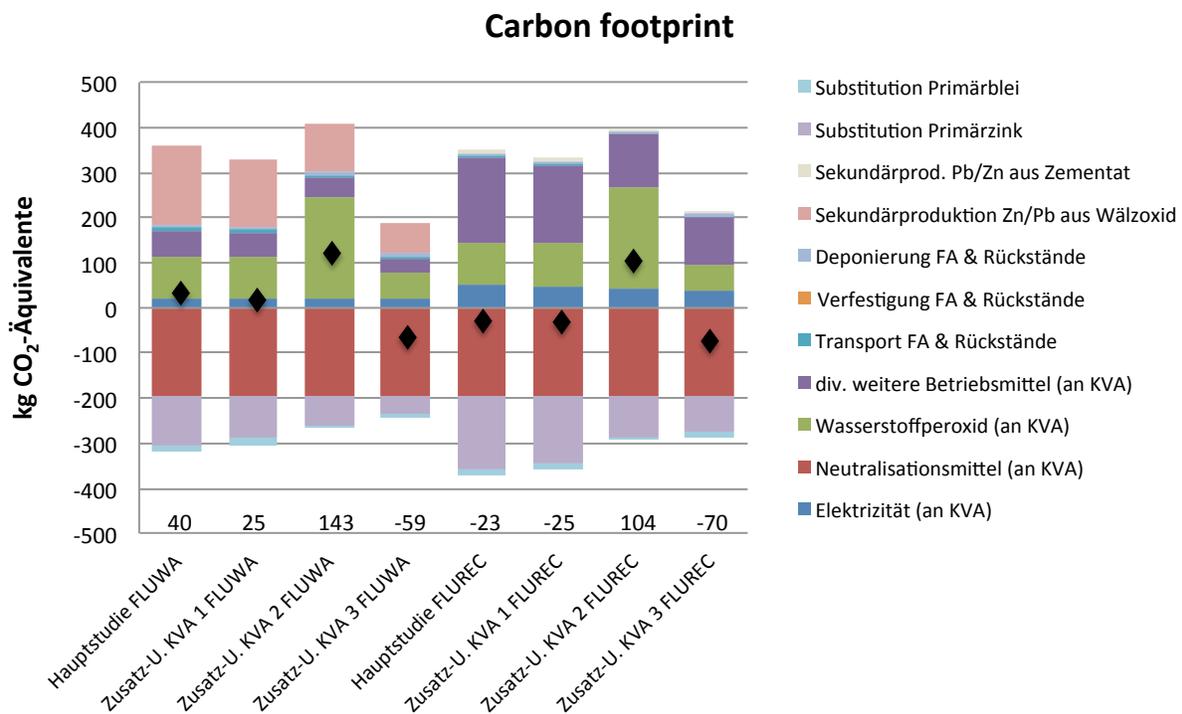


Abbildung 6: Umweltauswirkung der Flugaschebehandlungsverfahren FLUWA und FLUREC mit unterschiedlichen Flugaschezusammensetzungen und H₂O₂-Einsatz gemäss Tabelle 2. Bewertung der Behandlung einer Tonne Flugasche mit der Carbon footprint Methode

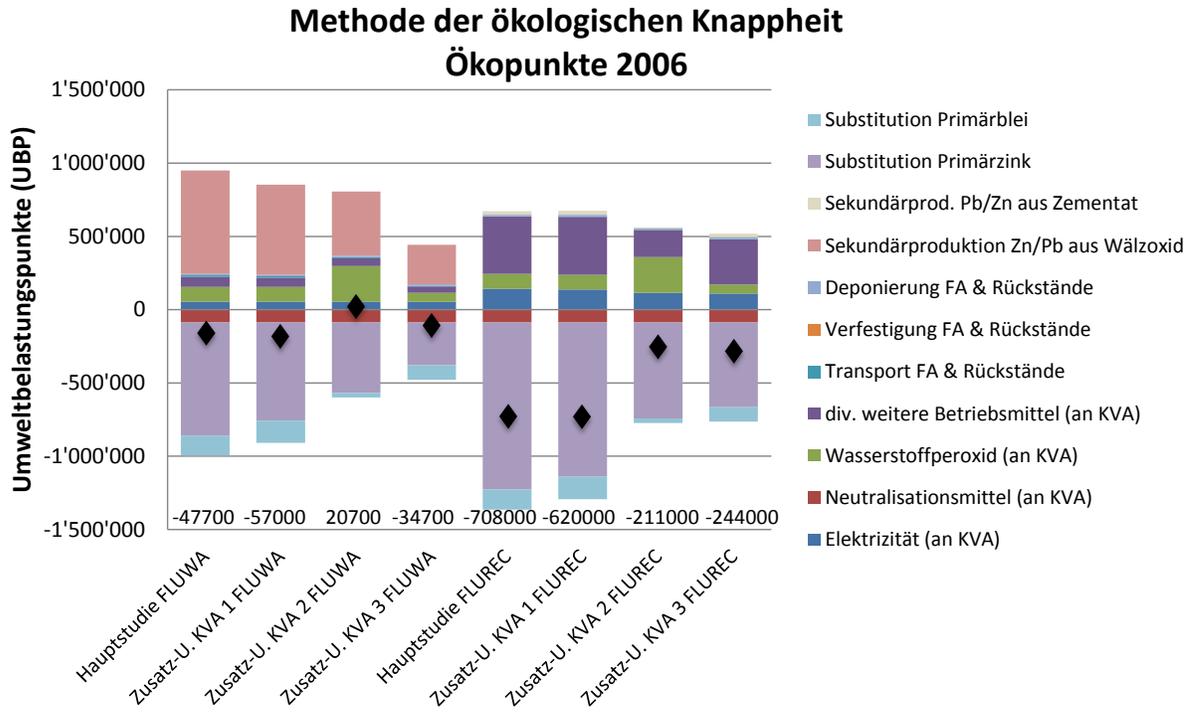


Abbildung 7: Umweltauswirkung der Flugaschebehandlungsverfahren FLUWA und FLUREC mit unterschiedlichen Flugaschezusammensetzungen und H₂O₂-Einsatz gemäss Tabelle 2. Bewertung der Behandlung einer Tonne Flugasche mit der Methode der Ökologischen Knappheit

4. Diskussion

4.1. FLUWA, FLUREC, Verfestigung und UTD im Vergleich

Diese Studie untersucht die Umweltwirkung der sauren Wäsche von KVA Flugasche in der Schweiz mit der Ökobilanzmethode. Hierzu werden die zwei Flugaschewäscheverfahren FLUWA und FLUREC bewertet und mit der Deponierung in Reststoffdeponien und Untertagedeponien verglichen. Die Datengrundlage dieser Studie stammt für alle an der KVA anfallenden Prozesse von einem Anbieter des Verfahrens zur sauren Flugaschenwäsche [12, 13]. Als Hintergrunddaten wurde die ecoinvent Datenbank verwendet [8]. Im Folgenden sollen die relevantesten Annahmen und Sensitivitäten in dieser Studie besprochen werden.

Der beim FLUWA-Verfahren anfallende zinkhaltige Hydroxidschlamm kann in unterschiedlichen Prozessketten zu Sekundärzink, Sekundärblei und Sekundärkadmium verarbeitet werden. Diese Studie modelliert den Wälzprozess [14] zur Aufbereitung des Hydroxidschlammes zu Wälzoxid, welches anschliessend in Metallhütten zu Zink und Blei reduziert wird. Der Prozess zur Kadmiumrückgewinnung konnte aufgrund Datenmangel nicht modelliert werden. Als alternativer Prozess zur Metallrückgewinnung stand der Citron Oxyreducer Prozess [15] zur Verfügung, jedoch wird dieses Verfahren aus wirtschaftlichen Gründen nicht mehr betrieben.

Das FLUREC Verfahren ermöglicht die elektrolytische Herstellung von Sekundärzink an der KVA, was Elektrizität, aber keine fossilen Brennstoffe benötigt. Die Umweltwirkung ist somit abhängig vom berücksichtigten Elektrizitätsmix. In dieser Studie wird der Schweizer Strommix verwendet. Als

Sensitivitätsanalyse wird Europäischer Strommix verwendet, was die saure Flugaschenwäsche in Europa approximiert (Anhang A4). Die Resultate zeigen eine höhere Umweltbelastung bei Verwendung des Europäischen Elektrizitätsmixes, wobei das FLUREC-Verfahren auch in Europa eine geringere Umweltauswirkung gegenüber der FLUWA mit externer Zinkaufbereitung über den fossil befeuerten Wälzprozess aufweist.

Beim FLUREC Verfahren fällt ein mit Blei-, Zink-, Kadmium und Kupfer angereichertes Zementat an, welches zur Wertstoffrückgewinnung aufbereitet wird. Diese Studie berücksichtigt die Aufbereitung des Zementats zur Blei- und Zinkrückgewinnung. Dieses Resultat muss allerdings mit Vorsicht behandelt werden, da die Modellierung der Wertstoffrückgewinnung aus dem Zementat noch Lücken aufweisen kann. Mögliche notwendige Aufbereitungsschritte vor der Verwendung des Zementats in der Bleihütte, sowie die Rückgewinnung weiterer Wertstoffe im Zementat (Kadmium, Kupfer) konnten aufgrund Datenmangels nicht modelliert werden.

Als Bindemittel zur Verfestigung von Flugasche auf Reststoffdeponien kommen Zement oder alternative hydraulisch aktive Materialien wie Holzasche in Frage [16]. Für alternative Bindemittel, welche selbst ein Abfallprodukt darstellen, wird im Gegensatz zum energieintensiven Zement kein Produktionsaufwand belastet. Aufgrund des wegfallenden Produktionsaufwandes verbessert die Verwendung alternativer Bindemittel die Umweltauswirkung der Deponierung auf Reststoffdeponien. Anhang A4 untersucht die Sensitivität der Umweltbelastung bei der Verwendung verschiedener Zementsorten sowie eines alternativen hydraulischen Bindemittels. Da keine Daten über das aktuelle Mengenverhältnis verwendeter Bindemittel vorhanden waren, werden in dieser Studie zwei Szenarien betrachtet, eines mit Verwendung von 100% Zement und eines, in dem ein Verhältnis von 50% durchschnittlichem Schweizer Zement und 50% alternativen Bindemittels angenommen wird. Weiter wird in dieser Studie davon ausgegangen, dass das Auslageverhalten verfestigter Flugasche auf der Reststoffdeponie nicht von der Wahl des Bindemittels abhängt.

Die Annahmen zum Verhalten der Flugasche in der Deponie sowie der zeitliche Betrachtungsrahmen, spielen eine bedeutende Rolle bezüglich der potentiellen Sickerwasseremissionen. Bei der Untertagedeponierung wird in dieser Studie, analog zu ecoinvent Modellierung, von einer Nullemission ausgegangen [9]. Die Modelle der Reststoffdeponie sowie des Schlackenkompartiments berücksichtigen eine gewisse Auslaugung, welche vor allem über lange Zeiträume zu beträchtlichen Massenflüssen ins Grundwasser führt (siehe Anhang A2) [9]. Es sollte berücksichtigt werden, dass die Sickerwasseremissionsmodelle mit grossen Unsicherheiten behaftet sind. Da die Bewertungsmethode Carbon footprint nur klimarelevante Emissionen berücksichtigt und die Methode der ökologischen Knappheit 2006 Langzeitemissionen ins Grundwasser nicht bewertet, sind diese in den Umweltbewertungen in dieser Studie nicht abgebildet. Grundsätzlich hat die Auswahl der Wirkungsabschätzungsmethode einen bedeutenden Einfluss auf die Resultate, da sich die Methoden bezüglich der berücksichtigten Umweltaspekte selbst sowie deren relativen Bewertung unterscheiden (siehe Anhang A6). Neben den modellierten Sickerwasseremissionen spielt für die Umweltbilanz der FLUWA und FLUREC Verfahren die Metallkonzentration und Extraktionseffizienz aus der Flugasche sowie der Betriebsmittelverbrauch eine bedeutende Rolle (siehe auch Anhang A7). Hierbei ist besonders der Verbrauch von Wasserstoffperoxid zu erwähnen, welcher aufgrund der energieintensiven Herstellung einen substantiellen Einfluss auf das Gesamtumweltauswirkung der Verfahren hat. Die Wahl des Transportmittels kann je nach Verfahren und abhängig der betrachteten Bewertungsmethode einen

bedeutenden Einfluss auf das Gesamtergebnis aufweisen (siehe Anhang A4). Grundsätzlich ist der Bahntransport dem Lastwagentransport vorzuziehen.

Prozesse aus der Rauchgasreinigung, welche unabhängig des gewählten Flugaschebehandlungsverfahrens stattfinden, z.B. die Reinigung des sauren Quenchwassers von Quecksilber oder die Schwermetallabtrennung in der Abwasserreinigung mit Ionenaustauscherharzen, sind in dieser Studie nicht berücksichtigt. Die Aufbereitung oder Entsorgung dieser Prozessresiduen hat einen Einfluss auf die Gesamtumweltbilanz einer KVA, sind jedoch nicht relevant für einen Vergleich verschiedener Verfahren zur Flugaschebehandlung. Weiter wird beim FLUREC Verfahren auch Fremdasche mitbehandelt, welche von anderen KVA angeliefert wird. In Anhang A5 werden die untersuchten Szenarien aus Sicht eines KVA-Betreibers modelliert, worin diese Prozesse berücksichtigt sind.

4.2. Einfluss verschiedener KVA-FA und H₂O₂-Dosierungen

Bezüglich Carbon footprint weist das FLUWA Verfahren für die Zink- und Bleirückgewinnung aus Flugasche eine höhere Umweltauswirkung aus als die entsprechende Primärmetallherstellung, welche als Substitut gutgeschrieben wird. Aus diesem Grund schneidet das FLUWA Verfahren bei tieferen Metallgehalten in der Flugasche besser ab. In allen untersuchten Flugasche-Szenarien sind umweltrelevantesten Prozesse der Wasserstoffperoxideinsatz sowie die Energiebereitstellung für die Aufbereitung des abgetrennten Metallhydroxidschlammes im Wälzprozess. Im Gegensatz zum FLUWA Verfahren wirkt sich beim FLUREC Verfahren ein hoher Gehalt an rückgewinnbaren Metallen resp. eine hohe Extraktionseffizienz positiv auf die Umweltbilanz aus. Ausser in einem untersuchten Fall, in welchem bei tiefem Metallgehalt hohe Wasserperoxidverbräuche notwendig sind (Szenario ‚Zusatz-U. KVA 2 FLUREC‘), resultiert das FLUREC Verfahren immer in einer Umweltgutschrift. Die Methode der ökologischen Knappheit bewertet die Umweltauswirkung der Flugaschenwäsche sowie der Zink- und Bleirückgewinnung sowohl beim FLUWA wie beim FLUREC Verfahren niedriger als die Primärzinkproduktion. Dies hat zur Folge, dass beide Verfahren mit ansteigendem Zink- und Bleigehalt in der Flugasche positivere Umweltauswirkungen ausweisen. Mit der Zudosierung von H₂O₂ kann beim FLUWA-Verfahren eine weitere deutliche Cu- und Pb-Entfrachtung der abzulagernden gewaschenen Flugasche realisiert werden. Der zusätzliche Umweltaufwand durch das FLUWA Verfahren mit H₂O₂ beträgt im Vergleich zum Umweltaufwand des gesamten Verfahrens 12% der UBP für die Hauptstudie (resp. 13%, 43%, 16% für die Zusatzuntersuchungen) bzw. 36% der CO₂-Äq. für die Hauptstudie (resp. 40%, 127%, 44% für die Zusatzuntersuchungen) (Abbildungen 6 und 7).

5. Schlussfolgerungen

Die Resultate dieser Studie legen dar, dass die saure Wäsche von KVA-Flugasche sich aus Umweltgesichtspunkten grundsätzlich lohnt. Bei beiden Verfahren kommt dem Wasserstoffperoxideinsatz zur Metallextraktion hohe Umweltrelevanz zu. Die verwendeten Umweltbewertungsmethoden unterscheiden sich jedoch stark in der Bewertung der Aufwände und Erträge der einzelnen Flugaschebehandlungsverfahren. Als vorteilhaftestes Verfahren bewertet sowohl der Carbon footprint wie auch die Methode der ökologischen Knappheit das FLUREC-Verfahren. Im Vergleich zum FLUREC-Verfahren weist das FLUWA-Verfahren bedeutende zusätzliche Aufwände für die Aufbereitung des zinkhaltigen Hydroxidschlammes zur Sekundärzinkproduktion auf.

Bei der Deponierung auf der Reststoffdeponie spielt die Wahl des Bindemittels zur Verfestigung der Flugasche die bedeutendste Rolle. Werden alternative Bindemittel an Stelle von Zement verwendet, so reduziert sich die Umweltbelastung erheblich.

Das Potential für die Schweiz, wenn alle anfallende Flugasche sauer gewaschen würde, beträgt je nach gewähltem Verfahren (FLUWA oder FLUREC) zur Reduktion der klimawirksamen Gase 4'970-10'000 Tonnen CO₂-Äquivalente bzw. eine Reduktion der Umweltbelastung von 543-596 Mio. UBP.

Aufgrund beschränkter Datenverfügbarkeit für einige Prozesse konnten nicht alle Verfahrenswege präzise und vollständig abgebildet werden. Eine verbesserte Datenlage ist wünschenswert vor allem bezüglich der Aufbereitung des metallhaltigen Nebenprodukts, welches beim FLUREC-Verfahren anfällt, der verschiedenen Aufbereitungsverfahren des zinkhaltigen Hydroxidschlammes beim FLUWA-Verfahren, sowie des Einsatzes verschiedener hydraulischer Bindemittel zur Verfestigung der Flugasche in Reststoffdeponien.

Mit der Zudosierung von H₂O₂ kann beim FLUWA-Verfahren eine weitere deutliche Cu- und Pb-Entfrachtung der abzulagernden gewaschenen Flugasche realisiert werden. Der zusätzliche Umweltaufwand durch das Verfahren mit H₂O₂ beträgt im Vergleich zum Umweltaufwand des gesamten Verfahrens 12% der UBP bzw. 36% der CO₂-Äq.. Wird das FLUREC Verfahren eingesetzt, ist eine H₂O₂-Dosierung grundsätzlich notwendig. Die damit verbundene direkte Metallrückgewinnung ohne den Wälzprozess führt hier zu einer deutlich geringeren Umweltbelastung.

Die Datenlage zur Modellierung der Flugaschebehandlungs- resp. Entsorgungsverfahren weist teilweise Lücken auf. Zur Verfestigung von Flugasche können Zement oder alternative Bindemittel verwendet werden. Da keine Daten über die eingesetzten Mengen vorlagen, wurden zwei Szenarien gerechnet, eines mit 100% Zement und eines, in welchem 50% des Zements durch ein alternatives Bindemittel ersetzt wird. Unsicherheiten bestehen auch in der Umweltauswirkung der Produktion von Sekundärzink und -blei aus dem Hydroxidschlamm im FLUWA-Verfahren sowie aus dem metallhaltigen Nebenprodukt im FLUREC-Verfahren. Die Rückgewinnung der in geringerer Konzentration im Zementat enthaltenen Schwermetalle Cadmium und Kupfer konnte aufgrund Datenmangel nicht berücksichtigt werden. Grosse Unsicherheit weisen auch die Emissionsmodelle der Deponien auf, da das Emissionsverhalten stark von der lokalen Umwelt abhängt sowie, da vor allem für die Langzeitbetrachtung keine empirischen Daten zur Verfügung stehen.

6. Anhang

A1. Systemmodellierung

Szenario 1: FLUWA

- Deponierung der gewaschenen Flugasche in Schlackenkompartiment, Transport 100 km per Bahn
- (Alternative:) Rückführung in Ofen, dann Austrag mit Schlacke zu Schlackenkompartiment, Transport per Bahn, 100 km CH
- Zn-haltiger Hydroxidschlamm
 - Aufbereitung im Ausland mit Wälzprozess zu Wälzoxid mit 78%iger Rückgewinnung des Zinks und Bleis, Transport per Bahn, 100km CH, 500km Deutschland
 - Deponierung Wälzschlacke in Schlackendeponie, Transport per Bahn 100km Deutschland
- Produktion Sekundärzink und -blei aus Wälzoxid, welches in der Metallhütte primäres Zinkkonzentrat resp. Bleikonzentrat (Erz) ersetzt. Transport Wälzoxid 500km per Bahn in Deutschland

Szenario 2: FLUREC

- Gewaschene Asche
 - Deponierung in Schlackenkompartiment, Transport per Bahn, 100 km CH
- Restmetallschlamm
 - Rückführung in Ofen, dann Austrag mit Schlacke zu Schlackenkompartiment, Transport per Bahn, 100 km CH
- Sekundärzinkproduktion aus Zinkoxid durch Elektrolyse an KVA
- Sekundärblei- und zinkproduktion aus Zementat
 - Aufbereitung im Ausland mit Wälzprozess zu Wälzoxid mit 78%iger Rückgewinnung des Zinks und Bleis, Transport per Bahn, 100km CH, 500km Deutschland
 - Produktion Sekundärzink und -blei, welches in der Metallhütte primäres Zinkkonzentrat resp. Bleikonzentrat (Erz) ersetzt. Transport 500km per Bahn in Deutschland

Szenario 3: Deponierung verfestigter Flugasche auf Schweizer Reststoffdeponie (100% Zement)

- Flugasche
 - Verfestigung mit 100% Zement und Deponierung auf Schweizer Reststoffdeponie, Transport per Bahn, 100km CH
- Gips/Hydroxidschlamm aus Abwasserreinigung
 - Verfestigung mit 100% Zement und Deponierung auf Schweizer Reststoffdeponie, Transport per Bahn, 100km CH

Szenario 4: Deponierung verfestigter Flugasche auf Schweizer Reststoffdeponie (50% alternatives Bindemittel)

- Flugasche

- Verfestigung mit 50% Zement/50% alternativem Bindemittel und Deponierung auf Schweizer Reststoffdeponie, Transport per Bahn, 100km CH
- Gips/Hydroxidschlamm aus Abwasserreinigung
 - Verfestigung mit 50% Zement/50% alternativem Bindemittel und Deponierung auf Schweizer Reststoffdeponie, Transport per Bahn, 100km CH

Szenario 5: Deponierung unverfestigter Flugasche in Untertagedeponie im Ausland

- Flugasche
 - Untertagedeponie im Ausland, Transport per Bahn, 100km CH, 500km Deutschland
- Gips/Hydroxidschlamm aus Abwasserreinigung
 - Untertagedeponie im Ausland, Transport per Bahn, 100km CH, 500km Deutschland

A2. Sachbilanz

Tabelle A2.1: Sachbilanz der untersuchten Flugascheverwertungsverfahren

Name	ecoinvent process	FLUWA	FLUREC	Reststoff- deponie (100% Zement)	Reststoff- deponie (50% alt. Bindemittel)	Untertage- deponie	Einheit
Betriebsmittel KVA (saure Flugaschenwäsche)	Operating materials at plant						
Elektrische Energie	electricity, medium voltage, consumer mix, at grid CH	146.3	387.0				kWh
Brannkalk (Neutralisationsmittel)	quicklime, milled, packed, at plant	-197.5	-197.5				kg
Wasserstoffperoxid	hydrogen peroxide, 50% in H2O, at plant	84.5	84.5				kg
Salzsäure	hydrochloric acid, 30% in H2O, at plant	33.2	38.6				kg
Schwefelsäure	sulphuric acid, liquid, at plant		19.5				kg
Natriumhydroxid	sodium hydroxide, 50% in H2O, production mix, at plant	24.1	125.0				kg
Organik (Lösungsmittel+Komplexbildner)	solvents, organic, unspecified, at plant		0.4				kg
Zinkpulver	zinc, primary, at regional storage		7.3				kg
Deponierung gewaschene Asche in Schlackekompartiment							
Transport Bahn CH (KVA -> Schlackekompartiment)	transport, freight, rail (CH)		70.0				tkm
Deponierung Schlackekompartiment	process-specific burdens, slag compartment	700.0	700.0				kg
Deponierung Schlackekompartiment, Infrastruktur	slag compartment	0.0	0.0				p
Aufbereitung zinkhaltiger Hydroxidschlamm in Wälzprozess Betriebsmittel							
Transport Bahn CH (KVA -> Wälzofen)	transport, freight, rail (CH)		17.5				tkm
Transport Bahn DE (KVA -> Wälzofen)	transport, freight, rail (DE)		188.2				tkm
Wasser	tap water, at user		117.2				kg
Erdgas	natural gas, high pressure, at consumer		29.0				kg
Diesel	light fuel oil, at consumer		0.03				kg
Elektrische Energie	electricity, medium voltage, production UCTE, at grid		19.5				kWh
Koks	hard coal coke, at plant		34.8				kg
Natriumkarbonat	sodium carbonate from ammonium chloride production, at plant		0.001				kg
Natriumhydroxid	sodium hydroxide, 50% in H2O, production mix, at plant		0.005				kg
Salzsäure	hydrochloric acid, 30% in H2O, at plant		0.04				kg
Brannkalk	quicklime, milled, packed, at plant		0.2				kg
Deponierung Wälzschlacke (Schlackenkompartiment)	process-specific burdens, slag compartment		134.8				kg
Deponierung Wälzschlacke (Schlackenkompartiment)	slag compartment		2.5E-07				p
Emissionen							
Staub	particulates		5.2E-04				kg
Blei	lead		1.3E-04				kg
Cadmium	cadmium		3.9E-05				kg
Kohlendioxid	carbon dioxide		9.2E+01				kg
Schwefeldioxid	sulfur dioxide		6.5E-02				kg
Chlorwasserstoff	hydrogen chloride		1.7E-04				kg
Fluorwasserstoff	hydrogen fluoride		3.3E-04				kg
Dioxine	dioxin, 1,2,3,7,8,9,-hexachlorodibenzo-		1.8E-12				kg
Quecksilber	mercury		3.5E-07				kg
Stickstoffdioxid	nitrogen dioxide		2.7E-02				kg
Sekundärzink und -bleiherstellung aus Wälzoxid							
Transport Bahn DE (Wälzofen -> Zinkhütte)	transport, freight, rail (DE)		0.8				tkm
Produktion Sekundärzink	zinc, primary, at regional storage (mit Wälzoxid anstatt Zinkkonzentrat)		32.7				kg
Produktion Sekundärblei	lead, primary, at regional storage (mit Wälzoxid anstatt Bleikonzentrat)		32.7				kg
Deponierung Restmetallschlamm							
Transport Bahn CH (KVA -> Schlackekompartiment)	transport, freight, rail (CH)		4.4				tkm
Deponierung Schlackekompartiment	process-specific burdens, slag compartment		43.7				kg
Deponierung Schlackekompartiment, Infrastruktur	slag compartment		7.9E-08				p
Sekundärblei und -zinkproduktion aus Zementat							
Transport Bahn CH (KVA -> Bleihütte)	transport, freight, rail (CH)		2.7				tkm
Transport Bahn DE (KVA -> Bleihütte)	transport, freight, rail (DE)		13.4				tkm
Produktion Sekundärblei	lead, primary, at regional storage (mit Zementat anstatt Bleikonzentrat)		8.2				kg
Produktion Sekundärzink	zinc, primary, at regional storage (mit Zementat anstatt Zinkkonzentrat)		1.0				kg
Deponierung verfestigte Flugasche und Gips/Hydroxidschlamm in Reststoffdeponie							
Produktion hydraulisches Bindemittel	cement, unspecified, at plant			453.6	228.8		kg
Transport Bahn CH (KVA resp. Zementwerk -> Reststoffdeponie)	transport, freight, rail (CH)			158.8	158.8		tkm
Deponierung Reststoffdeponie	process-specific burdens, residual material landfill			1587.6	1587.6		kg
Deponierung Reststoffdeponie, Infrastruktur	Residual material landfill facility			3.3E-06	3.3E-06		p
Deponierung Flugasche und Gips/Hydroxidschlamm in Untertagedeponie							
Transport Bahn CH (KVA -> Untertagedeponie)	transport, freight, rail (CH)					113.2	tkm
Transport Bahn DE (KVA -> Untertagedeponie)	transport, freight, rail (DE)					566.0	tkm
Deponierung Untertagedeponie	disposal, hazardous waste, 0% water, to underground deposit (ohne Stahlbox, mit LDPE Plastik 4.27kg/t FA)					1132.0	kg

Tabelle A2.2: Sickerwasseremissionen pro Tonne Flugasche während Kurzzeit und Langzeitbetrachtung

Sickerwasseremissionen der Flugaschendeponierung, Kurzzeit (100 Jahre)

		FLUWA	FLUREC	RSD, 100% Zement	RSD, 50% alternatives Bindemittel	UTD
Zn	kg	3.0E-04	3.0E-04	1.1E-03	1.1E-03	0
Ca	kg	3.4E-01	3.4E-01	2.4E-02	2.4E-02	0
Al	kg	3.5E-05	3.5E-05	1.8E-02	1.8E-02	0
Mg	kg	1.0E-02	1.0E-02	1.6E-03	1.6E-03	0
Mn	kg	8.4E-06	8.4E-06	7.0E-06	7.0E-06	0
Fe	kg	6.8E-05	6.8E-05	1.1E-04	1.1E-04	0
Cd	kg	2.5E-06	2.5E-06	5.5E-06	5.5E-06	0
Pb	kg	4.8E-05	4.8E-05	1.1E-04	1.1E-04	0
Ni	kg	3.9E-05	3.9E-05	7.5E-05	7.5E-05	0
Cu	kg	2.0E-05	2.0E-05	1.2E-04	1.2E-04	0
S	kg	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0

Sickerwasseremissionen der Flugaschendeponierung, Langzeit (60'000 Jahre)

Zn	kg	1.0E+01	1.0E+01	6.4E-01	6.4E-01	0
Ca	kg	7.7E+01	7.7E+01	1.5E+01	1.5E+01	0
Al	kg	2.2E+00	2.2E+00	1.1E+01	1.1E+01	0
Mg	kg	2.6E+00	2.6E+00	9.7E-01	9.7E-01	0
Mn	kg	1.6E-01	1.6E-01	4.2E-03	4.2E-03	0
Fe	kg	4.3E+00	4.3E+00	6.4E-02	6.4E-02	0
Cd	kg	4.8E-03	4.8E-03	3.3E-03	3.3E-03	0
Pb	kg	2.6E+00	2.6E+00	6.8E-02	6.8E-02	0
Ni	kg	6.3E-02	6.3E-02	4.5E-02	4.5E-02	0
Cu	kg	5.8E-01	5.8E-01	7.0E-02	7.0E-02	0
S	kg	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0

A3. Wirkungsabschätzung

Tabelle A3.1: Wirkungsabschätzung mit der Methode Carbon footprint

**Carbon footprint (IPCC GWP 2007, 100a)
[kg CO₂-Äquivalente]**

	FLUWA	FLUREC	RSD, 100% Zement	RSD, 50% alternatives Bindemittel	UTD
Elektrizität (an KVA)	19	51			
Neutralisationsmittel (an KVA)	-194	-194			
Wasserstoffperoxid (an KVA)	95	95			
div. weitere Betriebsmittel (an KVA)	55	189			
Transport FA & Rückstände	9	1		2	34
Verfestigung FA & Rückstände			344	172	
Deponierung FA & Rückstände	6	6	15	15	25
Sekundärproduktion Zn/Pb aus Wälzoxid	174				
Sekundärprod. Pb/Zn aus Zementat			7		
Substitution Primärzink	-109	-164			
Substitution Primärblei	-14	-14			
Total	40	-23	361	189	59

Tabelle A3.2: Wirkungsabschätzung mit der Methode der Ökologischen Knappheit – Ökopunkte 2006

**Methode der ökologischen Knappheit - Ökopunkte 2006
[Umweltbelastungspunkte (UBP)]**

	FLUWA	FLUREC	RSD, 100% Zement	RSD, 50% alternatives Bindemittel	UTD
Elektrizität (an KVA)	5.41E+04	1.43E+05			
Neutralisationsmittel (an KVA)	-8.72E+04	-8.78E+04			
Wasserstoffperoxid (an KVA)	1.01E+05	1.01E+05			
div. weitere Betriebsmittel (an KVA)	6.91E+04	3.90E+05			
Transport FA & Rückstände	1.08E+04	3.06E+03	5.E+02	5.E+02	3.E+04
Verfestigung FA & Rückstände			1.92E+05	9.62E+04	
Deponierung FA & Rückstände	1.00E+04	1.06E+04	2.76E+04	2.76E+04	3.05E+07
Sekundärproduktion Zn/Pb aus Wälzoxid	7.06E+05				
Sekundärprod. Pb/Zn aus Zementat		2.36E+04			
Substitution Primärzink	-7.71E+05	-1.14E+06			
Substitution Primärblei	-1.36E+05	-1.36E+05			
Total	-4.35E+04	-7.08E+05	2.25E+05	1.29E+05	3.05E+07

A4 Sensitivitätsanalysen

Funktionelle Einheit ist die Verwertung resp. Entsorgung einer Tonne Flugasche

Transport

Tabelle A4.1: Einfluss des Transportmittels auf die Umweltbelastung (Funktionelle Einheit: 1 Tonne Flugasche)

		FLUWA	FLUREC	RSD, 100% Zement	RSD, 50% alternatives Bindemittel	UTD
				100% Zement	50% alt. Bindemittel	
<i>Transport mit Bahn</i>						
Carbon footprint	kg CO ₂ -Äq.	40	-23	361	189	59
Methode der ökol. Knappheit 2006	UBP	-4.35E+04	-7.08E+05	2.25E+05	1.29E+05	3.05E+07
<i>Transport mit Lastwagen</i>						
Carbon footprint	kg CO ₂ -Äq.	67	-13	375	203	101
Methode der ökol. Knappheit 2006	UBP	-1.88E+04	-7.50E+00	2.38E+05	1.42E+05	3.05E+07

Elektrizitätsmix

Tabelle A4.2: Einfluss des Elektrizitätsmixes an der KVA auf die Umweltbelastung (Funktionelle Einheit: 1 Tonne Flugasche)

		FLUWA	FLUREC	RSD, 100% Zement	RSD, 50% alternatives Bindemittel	UTD
				100% Zement	50% alt. Bindemittel	
<i>Elektrizitätsmix CH</i>						
Carbon footprint	kg CO ₂ -Äq.	40	-23	361	189	59
Methode der ökol. Knappheit 2006	UBP	-4.35E+04	-7.08E+05	2.25E+05	1.29E+05	3.05E+07
<i>Elektrizitätsmix UCTE (Europa)</i>						
Carbon footprint	kg CO ₂ -Äq.	99	132	361	189	59
Methode der ökol. Knappheit 2006	UBP	-1.91E+04	-6.44E+05	2.25E+05	1.29E+05	3.05E+07

Verfestigung Flugasche mit verschiedenen hydraulischem Bindemitteln

Die Zementsorten unterscheiden sich hauptsächlich durch den Anteil Klinker im Zement. Das alternative hydraulische Bindemittel Holzasche ist selbst ein Abfallprodukt, weshalb keine Produktionsaufwände verrechnet werden. Es wird für angenommen, dass sich die Bindemittel hinsichtlich Auslaugverhalten der verfestigten Flugasche, sowie benötigter Menge pro Tonne Flugasche nicht unterscheiden.

Tabelle A4.3: Einfluss des hydraulischen Bindemittels zur Verfestigung der Flugasche auf die Umweltbelastung (Funktionelle Einheit: 1 Tonne Flugasche)

		Zement CH	CEM I	CEM II - L	CEM II - S	CEM III	CH, 50% alt. hydr. Bindemittel
		Produktions- durchschnitt	Portland Zement	Portland Kalkstein Z.	Portland Hüttensand Z.	Hüttensand Z.	
Carbon footprint	kg CO ₂ -Äq.	361	389	342	336	218	189
Methode der ökol. Knappheit 2006	UBP	2.25E+05	2.40E+05	2.15E+05	2.14E+05	1.57E+05	1.29E+05

A5 Umweltbetrachtung der sauren Flugaschenwäsche aus Sicht eines KVA Betreibers

Um die Umweltbelastung der Flugaschebehandlung aus Sicht eines KVA Betreibers abzubilden, werden alle Aufwände berücksichtigt, welche durch die Behandlung der Flugasche und des sauren Quenchwassers anfallen. Dies umfasst, im Gegensatz zur Differenzbetrachtung in der Hauptstudie, die gesamten anfallenden Betriebsmittelverbräuche. Zudem wird berücksichtigt, dass beim FLUREC-Verfahren Fremdasche (Flugasche aus einer externen KVA) behandelt wird. Die Fremdasche bewirkt einen tieferen Verbrauch an Neutralisationsmittel für das Quenchwasser sowie eine höhere Wertstoffrückgewinnung. Im Falle FLUREC führt dies zu erhöhten Betriebsmittelaufwänden bei der Behandlung der gesamten Flugaschenmenge. Zudem wird der Deponierungsaufwand der angenommenen Fremdasche verändert, da sie statt in Reststoff- oder Untertagedeponien nun mit der gewaschenen eigenen Flugasche auf Schlackekompartimenten abgelagert werden kann.

Tabelle A5.1: Flugaschenverwertungsverfahren aus Sicht eines KVA Betreibers, bewertet mit der Wirkungsabschätzungsmethode Carbon footprint

**Carbon footprint (IPCC GWP 2007, 100a)
[kg CO₂-Äquivalente]**

	FLUWA	FLUREC*	RSD, 100% Zement	RSD, 50% alternatives Bindemittel	UTD
Elektrizität (an KVA)	65	141	46	46	46
Neutralisationsmittel (an KVA)	237	68	431	431	431
Wasserstoffperoxid (an KVA)	95	178			
div. weitere Betriebsmittel (an KVA)	87	385	33	33	33
Transport FA & Rückstände	10	5	5	5	34
Verfestigung FA & Rückstände			341	171	0
Deponierung FA & Rückstände	5	9	13	13	25
Sekundärproduktion Zink aus Wälzoxid	173				
Sekundärprod. Pb/Zn aus Zementat		15			
Substitution Primärzink	-109	-306			
Substitution Primärblei	-14	-25			
Total	550	470	869	699	569
<i>Gutschrift Reststoffdeponierung Fremdasche</i>		-240			
<i>Gutschrift Untertagedeponierung Fremdasche</i>		-52			
Total (mit Reststoffdeponie-Gutschrift)		229			
Total (mit Untertagedeponie-Gutschrift)		418			

*FLUREC mit Annahme von Fremdasche: 0.88 t Fremdasche pro 1 t Eigenasche

Tabelle A5.2: Flugaschenverwertungsverfahren aus Sicht eines KVA Betreibers, bewertet mit der Wirkungsabschätzungsmethode der ökologischen Knappheit

**Methode der ökologischen Knappheit - Ökopunkte 2006
[Umweltbelastungspunkte (UBP)]**

	FLUWA	FLUREC*	RSD, 100% Zement	RSD, 50% alternatives Bindemittel	UTD
Elektrizität (an KVA)	1.84E+05	3.97E+05	1.30E+05	1.30E+05	1.30E+05
Neutralisationsmittel (an KVA)	1.08E+05	3.08E+04	1.95E+05	1.95E+05	1.95E+05
Wasserstoffperoxid (an KVA)	1.01E+05	1.01E+05			
div. weitere Betriebsmittel (an KVA)	1.10E+05	7.70E+05	4.06E+04	4.06E+04	4.06E+04
Transport FA & Rückstände	1.07E+04	6.82E+03	5.99E+03	5.99E+03	3.07E+04
Verfestigung FA & Rückstände			1.92E+05	9.62E+04	0.00E+00
Deponierung FA & Rückstände	3.72E+04	5.05E+04	5.24E+04	5.24E+04	3.05E+07
Sekundärproduktion Zink aus Wälzoxid	7.04E+05	0.00E+00			
Sekundärprod. Pb/Zn aus Zementat		3.79E+04			
Substitution Primärzink	-7.71E+05	-2.13E+06			
Substitution Primärblei	-1.36E+05	-2.54E+05			
Total	3.47E+05	-9.91E+05	6.16E+05	5.20E+05	3.09E+07
<i>Gutschrift Reststoffdeponierung Fremdasche</i>		-1.77E+05			
<i>Gutschrift Untertagedeponierung Fremdasche</i>		-2.67E+07			
Total (mit Reststoffdeponie-Gutschrift)		-1.17E+06			
Total (mit Untertagedeponie-Gutschrift)		-2.77E+07			

*FLUREC mit Annahme von Fremdasche: 0.88 t Fremdasche pro 1 t Eigenasche

A6 Bewertung der Flugascheverwertungsverfahren mit unterschiedlichen Wirkungsabschätzungsmethoden

Tabelle A6.1: Bewertung der untersuchten Flugascheverwertungsverfahren mit unterschiedlichen Wirkungsabschätzungsmethoden

Wirkungsabschätzungsmethode

Wirkungsabschätzung	Einheit	FLUWA	FLUREC	RSD, 100% alternatives		UTD
				Zement	Bindemittel	
Carbon footprint (IPCC GWP 2007, 100a)		40.3	-22.6	361.0	189.0	59.0
Methode der ökologischen Knappheit - Ökopunkte 2006	Points	-4.4E+04	-7.1E+05	2.3E+05	1.3E+05	3.1E+07
Cumulative Exergy Demand, non-renewable	MJ eq	2954	5084	2254	1427	1302
EDIP 2003	Pt	39.7	40.0	3.0	2.8	60.5
Ecological Footprint	Pt	408.0	642.0	1040.0	555.0	377.0
ReCiPe (H), Endpoint	kg CFC-11 e	18.80	13.10	23.60	13.20	9.82
ReCiPe (H), Human toxicity (Kurzzeit)	kg 1,4-Dbeq	-76.2	-231.0	10.9	5.9	3.7
ReCiPe (H), Human toxicity (Langzeit)	kg 1,4-Dbeq	921.0	739.0	47.0	36.4	26.5
ReCiPe (H), Terrestrial acidification	kg SO2 eq	-0.06	-0.62	0.59	0.34	0.21
ReCiPe (H), Freshwater eutrophication	kg P eq	-0.05	-0.04	0.02	0.01	0.04
Rangfolge Wirkungsabschätzung						
Carbon footprint (IPCC GWP 2007, 100a)	-	2	1	5	4	3
Methode der ökologischen Knappheit - Ökopunkte 2006	-	2	1	4	3	5
Cumulative Exergy Demand, non-renewable	-	4	5	3	2	1
EDIP 2003	-	3	4	2	1	5
Ecological Footprint	-	2	4	5	3	1
ReCiPe (H), Endpoint	-	4	2	5	3	1
ReCiPe (H), Human toxicity (Kurzzeit)	-	2	1	5	4	3
ReCiPe (H), Human toxicity (Langzeit)	-	5	4	3	2	1
ReCiPe (H), Terrestrial acidification	-	2	1	5	4	3
ReCiPe (H), Freshwater eutrophication	-	1	2	4	3	5

A7 Zusatzuntersuchung FLUWA und FLUREC mit Flugasche aus 3 verschiedenen KVA

Die folgenden Tabellen zeigen die Flugaschezusammensetzung, die Extraktionseffizienzen bei entsprechendem Wasserstoffperoxideinsatz sowie die Wirkungsabschätzung für Carbon footprint und der Methode der ökologischen Knappheit.

Tabelle A7.1: Flugaschenzusammensetzung der Flugasche in der Hauptstudie sowie in den Zusatzuntersuchungen

	Flugaschenzusammensetzung (mg/kg TS)			
	Hauptstudie	Zusatz-U. KVA 1	Zusatz-U. KVA 2	Zusatz-U. KVA 3
Zn	62569	52354	36197	25291
Ca	138713	161221	183360	241685
Al	27414	37278	39341	25291
Mg	9328	8562	8357	7392
Mn	564	506	418	315
Fe	13156	12685	7548	10897
Cd	705	486	311	272
Pb	15186	13178	5890	6834
Ni	300	124	60	64
Cu	2391	1825	1382	2327

Tabelle A7.2: Metallextraktionseffizienz bei optimiertem Wasserstoffperoxideinsatz in der Hauptstudie und den Zusatzuntersuchungen

Effizienz Extraktion FLUWA/FLUREC (%) bei optimiertem H₂O₂ Einsatz

	Hauptstudie	Zusatz-U. KVA 1	Zusatz-U. KVA 2	Zusatz-U. KVA 3
Zn	70	72	75	65
Ca	30	32	59	64
Al	20	90	90	85
Mg	70	56	58	57
Mn	45	54	99	58
Fe	0	8	3	0
Cd	92	99	99	100
Pb	55	71	31	88
Ni	10	28	17	24
Cu	25	55	6	99
H ₂ O ₂ (l/h)	25	25	60	15

Tabelle A7.3: Wirkungsabschätzung der FLUWA und FLUREC Verfahren mit Flugaschen aus der Hauptstudie und der Zusatzuntersuchungen, bewertet mit der Methode Carbon footprint

**Carbon footprint (IPCC GWP 2007, 100a)
[kg CO₂-Äquivalente]**

	Hauptstudie FLUWA	Zusatz-U. KVA 1 FLUWA	Zusatz-U. KVA 2 FLUWA	Zusatz-U. KVA 3 FLUWA	Hauptstudie FLUREC	Zusatz-U. KVA 1 FLUREC	Zusatz-U. KVA 2 FLUREC	Zusatz-U. KVA 3 FLUREC
Elektrizität (an KVA)	19	19	19	19	51	49	41	39
Neutralisationsmittel (an KVA)	-194	-194	-194	-194	-194	-194	-194	-194
Wasserstoffperoxid (an KVA)	95	95	228	57	95	95	228	57
div. weitere Betriebsmittel (an KVA)	55	50	42	34	189	174	116	105
Transport FA & Rückstände	9	8	6	4	1	1	1	1
Verfestigung FA & Rückstände								
Deponierung FA & Rückstände	6	6	6	6	6	6	6	6
Sekundärproduktion Zn/Pb aus Wälzoxid	174	151	107	67				
Sekundärprod. Pb/Zn aus Zementat					8	9	2	8
Substitution Primärzink	-109	-95	-68	-41	-164	-149	-93	-82
Substitution Primärblei	-14	-15	-3	-10	-14	-15	-3	-10
Total	40	25	143	-59	-23	-25	103	-70

Tabelle A7.4: Wirkungsabschätzung der FLUWA und FLUREC Verfahren mit Flugaschen aus der Hauptstudie und der Zusatzuntersuchungen, bewertet mit der Methode der ökologischen Knappheit

**Methode der ökologischen Knappheit - Ökopunkte 2006
[Umweltbelastungspunkte (UBP)]**

	Hauptstudie FLUWA	Zusatz-U. KVA 1 FLUWA	Zusatz-U. KVA 2 FLUWA	Zusatz-U. KVA 3 FLUWA	Hauptstudie FLUREC	Zusatz-U. KVA 1 FLUREC	Zusatz-U. KVA 2 FLUREC	Zusatz-U. KVA 3 FLUREC
Elektrizität (an KVA)	5.41E+04	5.41E+04	5.41E+04	5.41E+04	1.43E+05	1.37E+05	1.15E+05	1.10E+05
Neutralisationsmittel (an KVA)	-8.78E+04	-8.78E+04	-8.78E+04	-8.78E+04	-8.78E+04	-8.78E+04	-8.78E+04	-8.78E+04
Wasserstoffperoxid (an KVA)	1.01E+05	1.01E+05	2.43E+05	6.07E+04	1.01E+05	1.01E+05	2.43E+05	6.07E+04
div. weitere Betriebsmittel (an KVA)	6.85E+04	6.34E+04	5.32E+04	4.30E+04	3.90E+05	3.96E+05	1.85E+05	3.09E+05
Transport FA & Rückstände	1.08E+04	9.71E+03	7.64E+03	5.68E+03	3.04E+03	3.09E+03	2.83E+03	3.07E+03
Verfestigung FA & Rückstände								
Deponierung FA & Rückstände	1.00E+04	1.00E+04	9.92E+03	9.84E+03	1.06E+04	1.06E+04	1.06E+04	1.06E+04
Sekundärproduktion Zn/Pb aus Wälzoxid	7.06E+05	6.15E+05	4.38E+05	2.70E+05				
Sekundärprod. Pb/Zn aus Zementat					2.36E+04	2.75E+04	5.42E+03	2.57E+04
Substitution Primärzink	-7.71E+05	-6.69E+05	-4.81E+05	-2.92E+05	-1.14E+06	-1.05E+06	-6.56E+05	-5.78E+05
Substitution Primärblei	-1.36E+05	-1.53E+05	-2.99E+04	-9.77E+04	-1.36E+05	-1.53E+05	-2.99E+04	-9.77E+04
Total	-4.35E+04	-5.70E+04	2.07E+05	-3.47E+04	-7.08E+05	-6.20E+05	-2.11E+05	-2.44E+05

Tabelle A7.5: Effizienz der Metallextraktion in den Zusatzuntersuchungen ohne Wasserstoffperoxideinsatz

Effizienz Extraktion FLUWA/FLUREC (%) ohne H₂O₂ Einsatz

	Hauptstudie	Zusatz-U. KVA 1 (ohne H ₂ O ₂)	Zusatz-U. KVA 1 KVA 2 (ohne H ₂ O ₂)	Zusatz-U. KVA 1 KVA 2 (ohne H ₂ O ₂)
Zn	k. A.	75	75	57
Ca	k. A.	36	60	66
Al	k. A.	91	90	86
Mg	k. A.	60	55	54
Mn	k. A.	48	98	60
Fe	k. A.	16	17	37
Cd	k. A.	83	97	98
Pb	k. A.	26	0	39
Ni	k. A.	22	6	33
Cu	k. A.	88	97	95
H ₂ O ₂ (l/h)	0	0	0	0

Tabelle A7.6: Wirkungsabschätzung der FLUWA und FLUREC Verfahren mit/ohne Wasserstoffperoxideinsatz mit Flugaschen aus den Zusatzuntersuchungen, bewertet mit der Methode Carbon footprint

**Carbon footprint (IPCC GWP 2007, 100a)
[kg CO₂-Äquivalente]**

	Zusatz-U. KVA 1 FLUWA (mit H ₂ O ₂)	Zusatz-U. KVA 1 FLUWA (ohne H ₂ O ₂)	Zusatz-U. KVA 2 FLUWA (mit H ₂ O ₂)	Zusatz-U. KVA 2 FLUWA (ohne H ₂ O ₂)	Zusatz-U. KVA 3 FLUWA (mit H ₂ O ₂)	Zusatz-U. KVA 3 FLUWA (ohne H ₂ O ₂)
Elektrizität (an KVA)	19	19	19	19	19	19
Neutralisationsmittel (an KVA)	-194	-194	-194	-194	-194	-194
Wasserstoffperoxid (an KVA)	95	0	228	0	57	0
div. weitere Betriebsmittel (an KVA)	50	50	42	42	34	34
Transport FA & Rückstände	8	8	6	6	4	4
Verfestigung FA & Rückstände						
Deponierung FA & Rückstände	6	6	6	6	6	6
Sekundärproduktion Zn/Pb aus Wälzoxid	151	154	107	106	67	57
Sekundärprod. Pb/Zn aus Zementat						
Substitution Primärzink	-95	-99	-68	-68	-41	-39
Substitution Primärblei	-15	-6	-3	0	-10	-4
Total	25	-60	143	-83	-59	-115

Tabelle A7.7: Wirkungsabschätzung der FLUWA und FLUREC Verfahren mit/ohne Wasserstoffperoxideinsatz mit Flugaschen aus den Zusatzuntersuchungen, bewertet mit der Methode der ökologischen Knappheit

**Methode der ökologischen Knappheit - Ökopunkte 2006
[Umweltbelastungspunkte (UBP)]**

	Zusatz-U. KVA 1 FLUWA (mit H ₂ O ₂)	Zusatz-U. KVA 1 FLUWA (ohne H ₂ O ₂)	Zusatz-U. KVA 2 FLUWA (mit H ₂ O ₂)	Zusatz-U. KVA 2 FLUWA (ohne H ₂ O ₂)	Zusatz-U. KVA 3 FLUWA (mit H ₂ O ₂)	Zusatz-U. KVA 3 FLUWA (ohne H ₂ O ₂)
Elektrizität (an KVA)	5.41E+04	5.41E+04	5.41E+04	5.41E+04	5.41E+04	5.41E+04
Neutralisationsmittel (an KVA)	-8.78E+04	-8.78E+04	-8.78E+04	-8.78E+04	-8.78E+04	-8.78E+04
Wasserstoffperoxid (an KVA)	1.01E+05	0.00E+00	2.43E+05	0.00E+00	6.07E+04	0.00E+00
div. weitere Betriebsmittel (an KVA)	6.34E+04	6.34E+04	5.32E+04	5.32E+04	4.30E+04	4.30E+04
Transport FA & Rückstände	9.71E+03	9.71E+03	7.64E+03	7.64E+03	5.68E+03	5.68E+03
Verfestigung FA & Rückstände						
Deponierung FA & Rückstände	1.00E+04	1.03E+04	9.92E+03	1.00E+04	9.84E+03	9.92E+03
Sekundärproduktion Zn/Pb aus Wälzoxid	6.15E+05	6.36E+05	4.38E+05	4.37E+05	2.70E+05	2.34E+05
Sekundärprod. Pb/Zn aus Zementat						
Substitution Primärzink	-6.69E+05	-6.97E+05	-4.81E+05	-4.81E+05	-2.92E+05	-2.56E+05
Substitution Primärblei	-1.53E+05	-5.60E+04	-2.99E+04	0.00E+00	-9.77E+04	-4.33E+04
Total	-5.70E+04	-6.74E+04	2.07E+05	-6.77E+03	-3.47E+04	-4.03E+04

Referenzen

1. VBSA, *Homepage VBSA - Abfallmengen 2009*: http://www.vbsa.ch/htm/abfallmengen.htm?this_year=2009. 2010, Verband der Betreiber Schweizerischer Abfallverwertungsanlagen (VBSA).
2. Frey, B., *Totalrevision TVA - Aktueller Stand, offene Fragen, Fahrplan*, in *Abfallwirtschaft in Städten und Gemeinden*, Bundesamt für Umwelt (BAFU): Bern.
3. BAFU, *Technische Verordnung über Abfälle (TVA) (Stand 1.1.2010)*. 1990, Bundesamt für Umwelt: Bern.
4. Bühler, A. and S. Schlumberger, *Schwermetalle aus der Flugasche zurückgewinnen: Saure Flugaschenwäsche - FLUWA Verfahren, ein zukunftsweisendes Verfahren in der Abfallverbrennung*, in *KVA-Rückstände in der Schweiz - Der Rohstoff mit Mehrwert*. 2010, Bundesamt für Umwelt (BAFU): Bern.
5. Schlumberger, S., *Neue Technologien und Möglichkeiten der Behandlung von Rauchgasreinigungsrückständen im Sinne eines nachhaltigen Ressourcenmanagements*, in *KVA-Rückstände in der Schweiz - Der Rohstoff mit Mehrwert*. 2010, Bundesamt für Umwelt (BAFU): Bern.
6. ISO 14040: 2006, *International Standard ISO 14040: Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework*. 2006, International Organisation for Standardization: Geneva.
7. ISO 14044: 2006, *International Standard ISO 14044: Environmental Management - Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines*. 2006, International Organisation for Standardization: Geneva.
8. ecoinvent-center, *ecoinvent database v2.1*. 2009, Swiss Centre for Life Cycle Inventories: Dübendorf, Switzerland.
9. Doka, G., *Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services - Part III, ecoinvent report Nr. 13*. 2003, Swiss Center for Life Cycle Inventories: Dübendorf, Switzerland.
10. IPCC, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, in *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, S. Solomon, et al., Editors. 2007, Cambridge University Press: Cambridge.
11. Frischknecht, R., R. Steiner, and N. Jungbluth, *Oekobilanzen: Methode der oekologischen Knappheit - Oekofaktoren 2006*. 2006, Oebu - Netzwerk fuer nachhaltiges Bauen: Zurich.
12. BSH, *Betriebsmittelverbräuche Flugaschenbehandlung*. 2010, BSH Umweltservice AG: Sursee.
13. Schlumberger, S., *Flugaschebehandlungsverfahren*, M.E. Bösch, Editor. 6.6.2010.
14. Befesa, *Umwelterklärung 2008*. 2008, Befesa Zinc Freiberg GmbH & Co. KG: Freiberg.
15. Citron, *Homepage der Citron AG*: www.citron.ch. 2010, Citron AG.
16. Kommunale Infrastruktur, *Stellungnahme zur Revision der Verordnung über den Verkehr mit Abfällen (VeVA) und der technischen Verordnung über Abfälle (TVA)*. 2009, Schweizerischer Städteverband - Kommunale Infrastruktur: Bern.
17. Schlumberger, S., *Projekt Einfluss der Wasserstoffperoxidzugabe auf die Extraktionsausbeuten ausgewählter Schwermetalle bei der sauren Flugaschenextraktion aus KVA-Filteraschen - Abschlussbericht*. 2011, BSH Umweltservice AG: Sursee.
18. Schlumberger, S., *Auswirkung des Wasserstoffperoxideinsatzes auf die Effizienz der sauren Flugaschenextraktion*, M.E. Bösch, Editor. 27.6.2011.