TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
Vienna University of Technology

lebensministerium.at

Detaillierte Verfahrensbeschreibung, Datengrundlage und Ergebnisse

Ash Dec®

Inhaltsverzeichnis

Ash Dec® 6
1.1 Grundlagen allgemein 6
1.1.1 Prozessskizze Ash Dec® 6
1.1.2 Prozessskizze als STAN Modell 6
1.1.3 Verfahrensbeschreibung 7
1.2 Datengrundlage für Bewertung 9
1.2.1 Sachbilanz 9
1.2.2 Stoffflussanalyse 10
1.2.3 Charakteristik Endprodukt 11
1.2.4 Umsetzung 13
1.2.5 Flächenbedarf 14
1.2.6 Ökonomische Grundlagen 14
1.3 Ergebnis Ash Dec® Verfahren 15
1.3.1 Technologie Bewertung 15
1.3.2 Ökologische Bewertung (Systemgrenze Verfahren) 15
1.3.3 Ganzheitliche ökologische Bewertung Ash Dec 23
1.3.4 Ökonomische Bewertung 27
1.3.5 Literatur 33
1.4 Anhang 34
1.4.1 Stoffflussanalyse Ash Dec® 34
1.4.2 Stoffflussanalyse Gesamtprozess Ash Dec® 35

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prozessskizze Ash Dec® Drehrohrofen mit Ascheinput (Labormaßstab) 6
Abbildung 2: Prozessskizze ASH-DEC® Verfahren STAN-Modell 6
Abbildung 3: Prozessskizze ASH-DEC® Verfahren gesamte Prozesskette STAN-Modell 7
Abbildung 4:Verdampfungstemperatur Schwermetallchloride 8
Abbildung 5:Vereinfachte Darstellung Schwermetallentfrachtung 8
Abbildung 6: Entfrachtungsleistung Ash Dec® ausgewählter Schwermetalle 9
Abbildung 7: Ash Dec® Endprodukt Phoskraft® 13
Abbildung 8: Pilotanlage Ash Dec® Verfahren 13
Abbildung 9: P-Stoffflussanalyse Ash Dec® (2 signifikante Stellen) 16
Abbildung 10: Stoffflussanalyse P: Gesamte Prozesskette 16
Abbildung 11: Entfrachtungsleistung (Endprodukt:Klärschlammasche) 16
Abbildung 12: Ergebnis Güterflussanalyse Ash Dec® Szenario „SUSAN“ 17
Abbildung 13: Ergebnis Güterflussanalyse Ash Dec® Szenario „Kalte Asche“ 18
Abbildung 14: Ergebnis Güterflussanalyse Ash Dec® Szenario „Heiße Asche“ 18
Abbildung 15: Vergleich CO_2- bzw. SO_2-Äquivalente Ash Dec® Szenarien 19
Abbildung 16: CO_2-Äquivalente [kg bzw. g/kg $P_{rückg.}$] Ash Dec® Szenarien 21
Abbildung 17: Kumulierter Energieaufwand der verschiedenen Ash Dec® Szenarien 22

Abbildung 18: Zusammenfassung Parameter ökologische Bewertung (Systemgrenze Rückgewinnungsverfahren) ... 22
Abbildung 19: Einwohnerspezifischer kumulierter Energieaufwand in kg/EW*a für das Ash Dec® Verfahren ... 23
Abbildung 20: Ganzheitlicher kumulierter Energieaufwand Ash Dec in kWh/EW*a ... 24
Abbildung 21: Veränderung der gasförmigen Emissionen und des KEA in Relation Referenzsituation ... 24
Abbildung 22: P-und Schwermetallpfade in % bezogen auf Zulauf der Referenzkläranlage (Ash Dec®) ... 25
Abbildung 23: Nährstoffbezogene Schwermetallaufbringung Ash Dec® Endprodukt Vergleich Handelsdünger (SSP) und Klärschlammasche ... 26
Abbildung 24: Investitionskostenkurve Ash Dec® ... 27
Abbildung 25: Produktspezifische Kosten Ash Dec®, Variation Anlagengröße und Erlöse aus Endprodukt ... 28
Abbildung 26: Einwohnerspezifische Kosten Ash Dec®, Variation Anlagengröße und Erlöse aus Endprodukt ... 29
Abbildung 27: Vergleich produktspezifischer Kosten der Szenarien „Kalte und Heiße Asche“ ... 29
Abbildung 28: Kostenbetrachtung mit variierendem P-Gehalt in der Ausgangsasche ... 30
Abbildung 29: Kostenaufgliederung Ash Dec 30.000 t/a Szenario SUSAN (links) und Szenario Kalte Asche (rechts) ... 30
Abbildung 30: Kosten gesamte Prozesskette Ash Dec® Verfahren 30.000 t (ohne Erlöse als monetärer Wert) ... 31
Abbildung 31: Kosten gesamte Prozesskette Ash Dec® Verfahren 30.000 t (mit Erlöse als monetärer Wert) ... 32
Abbildung 32: Sensitivitätsanalyse Ash Dec® ... 32

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Chemikalien- und Sauerstoffbedarf unterschiedliche Datengrundlage ... 10
Tabelle 2: Energiebedarf (Strom und Gas) unterschiedliche Datengrundlage ... 10
Tabelle 3: Transferkoeffizienten Ash Dec® Prozess Brennen ... 10
Tabelle 4: Transferkoeffizienten Ash Dec® Rauchgasreinigung ... 11
Tabelle 5: Nährstoff-, (Schwer)-metallgehalte und org. Spurenstoffe Ash Dec® entfrachtete Asche .. 11
Tabelle 6: Nährstoffgehalte Ash Dec® Phoskraft® ... 12
Tabelle 7: Löslichkeit in % bezogen auf Pges der unterschiedlichen Ash Dec® Endprodukte ... 12
Tabelle 8: Flächenbedarf Ash Dec® Verfahren ... 14
Tabelle 9: Investitionskosten in Abhängigkeit des jährlichen Aschedurchsatzes (umgerechnet in EW) ... 14
Tabelle 10: Komplexität, Umsetzung und Rückgewinnungspotential Ash Dec® ... 15
Tabelle 11: Ressourcenbedarf Ash Dec® ... 17
Tabelle 12: Produkt- und einwohnerspezifischer Ressourcenbedarf Ash Dec® ... 17
Tabelle 13: Spezifischer Energiebedarf Ash Dec® ... 19
Tabelle 14: Indirekte SM-Emissionen Ash Dec® ... 21
Tabelle 15: Kumulierter Energieaufwand Ash Dec® ... 22
Tabelle 16: Einflussfaktoren ganzheitliche Bewertung Ash Dec ... 23
Tabelle 17: Transportwege Ash Dec ... 23
Tabelle 18: CO_2 bzw. SO_2-Äquivalente Prozesskette Ash Dec ... 24
Tabelle 19: Kumulierter Energieaufwand gesamte Prozesskette ... 24
Tabelle 20: Bewertung Ash Dec® Endprodukt ... 26
Tabelle 21: Jahreskosten Ash Dec® (Referenzkläranlage 30.000 t Asche) ... 28
Tabelle 22: Einsparungen und Erlöse Ash Dec® (Referenzkläranlage 30.000 t Asche) ... 28
Tabelle 23: Spezifische Kosten Ash Dec® (Referenzkläranlage 30.000 t Asche) ... 28
Tabelle 24: Jahreskosten gesamte Prozesskette Ash Dec® ... 31

Ash Dec®

1.1 Grundlagen allgemein

Entwickelt wurde dieses Verfahren von der Firma Ash Dec Umwelt AG (Hermann, 2008). Die erste Pilotanlage zur Rückgewinnung von Phosphor aus der Klärschlammasche wurde in Leoben, Österreich errichtet und produzierte bereits einen Pflanzendünger der unter dem Handelsnamen PhosKraft® vermarktet wurde. Das Ash Dec® (**Ash Dec**ontamination) Verfahren wurde von der finnischen Firma OUTOTEC übernommen. Grundprozess ist Entfrachtung von Klärschlammaschen durch einen thermochemischen Prozess. Über die Prozesse Mischen und Pelletieren, Brennen und Produktfertigung wird die Asche von den Schwermetallen entfrachtet und der darin enthaltene Phosphor in eine teils pflanzenverfügbare Form umgewandelt (Adam et al., 2009a + 2009b). Im großtechnischen Maßstab konnten Rückgewinnungsquoten bezogen auf die eingesetzte Asche von 98 % erzielt werden. Bezogen auf den Kläranlagenzulauf können bis zu 86 % des Phosphors rückgewonnen werden. Die Bewertung des Verfahrens erfolgt zum einen auf Basis der detaillierten Erkenntnisse aus dem SUSAN Projekt (unter Mitarbeit der TU-Wien) und zum anderen auf ausgearbeiteten Machbarkeitsstudien (Adam 2008; Mattenberger et al., 2008; Nowak, et al. 2010; Rechberger und Klonk, 2005; Rechberger et al., 2007; Hermann, 2008; Hermann, 2013)

1.1.1 Prozessskizze Ash Dec®

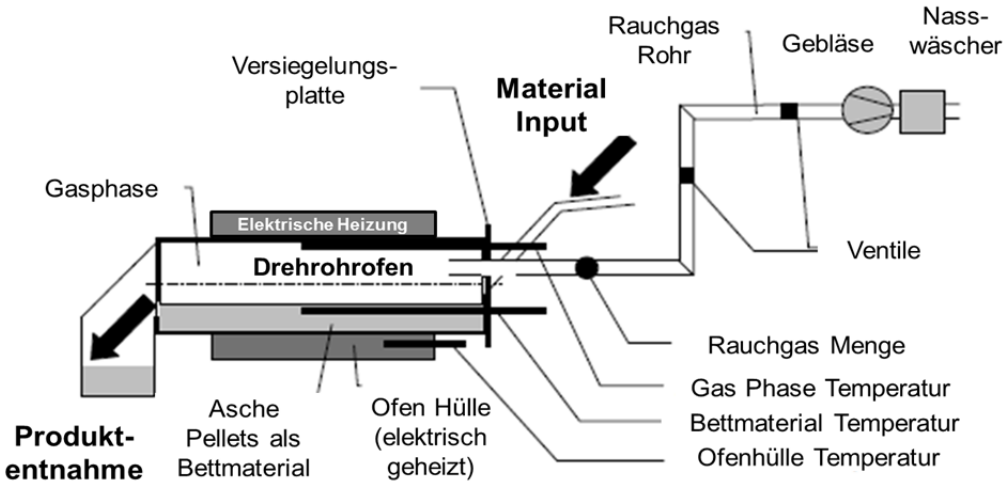


Abbildung 1: Prozessskizze Ash Dec® Drehrohrofen mit Ascheinput (Labormaßstab)

1.1.2 Prozessskizze als STAN Modell

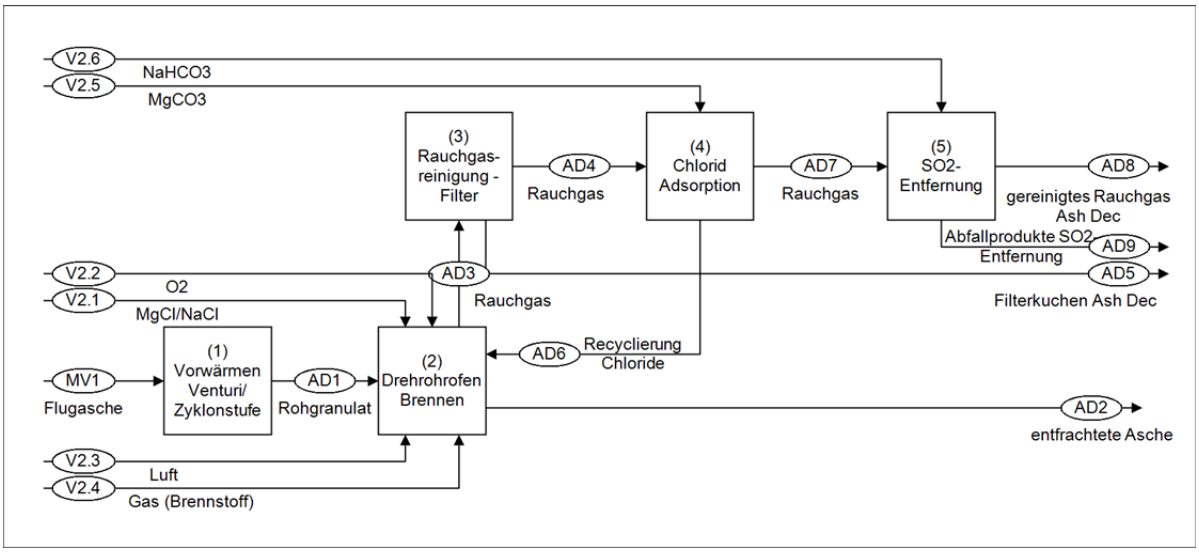


Abbildung 2: Prozessskizze ASH-DEC® Verfahren STAN-Modell

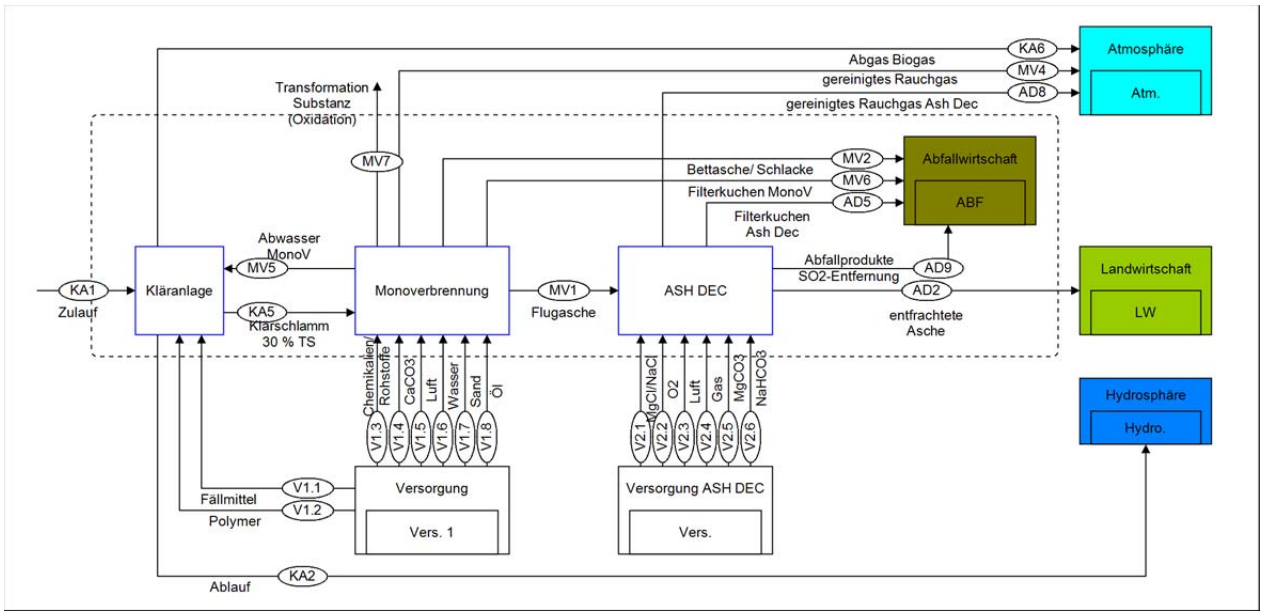


Abbildung 3: Prozessskizze ASH-DEC® Verfahren gesamte Prozesskette STAN-Modell

1.1.3 Verfahrensbeschreibung

Vorwärmen (1)

Vor dem eigentlichen Brennprozess muss die Asche vorgewärmt werden. Eine Möglichkeit besteht darin, die Asche vor der eigentlichen thermischen Behandlung in einer Venturi bzw. Zyklonstufe im Gegenstrom zum Abgas des Heaters auf knapp 600°C zu wärmen. Dies ist der Fall wenn das Ash Dec® Verfahren die kalte Asche angeliefert bekommt. Alternativ kann das Verfahren direkt mit einer Klärschlammverbrennungsanlage verbunden werden, wobei die heiße Asche mit Temperaturen von 800° übernommen werden kann. Damit entfällt das Vorwärmen, was einem zusätzlichen Energieaufwand entspricht.

Additivzugabe und Brennen (2)

Die vorgewärmte Asche wird in einem Wirbelschicht-Heater auf 1.050°C erhitzt und in das eigentliche Drehrohr zum Brennen der Asche gegeben. Dort erfolgt die Vermischung der Klärschlammasche mit den erforderlichen Additiven und Wasser. Additive sind Magnesium- und Natriumchlorid oder Soda. Diese Zusatzstoffe sind die wesentlichen Parameter um die Calcium- und Aluminiumverbindungen mit den vorliegenden Phosphaten in lösliche Phosphatverbindungen überzuführen und Schwermetalle im Brennprozess zu entfernen. Die Verdampfungstemperatur der Schwermetalle wird durch die Chloridzugabe teils deutlich beeinflusst und damit verringert. (Abbildung 4). Als Additive hat sich das Magnesiumchlorid (MgCl) durchgesetzt. Bei der Zugabe von Soda ($Na_2(CO_3)$) handelt es sich um eine Weiterentwicklung des unter dem Namen „Rhenania“ bekannten Verfahren zur Bildung von Calcium-Natrium-Phosphat. Für die Bewertung wird die Variante mit der MgCl-Zugabe berücksichtigt. Grundsätzlich kann durch die Zugabe von MgCl eine deutliche Entfrachtung sämtlicher betrachteter Schwermetalle nachgewiesen werden, während bei Soda in erster Linie Blei zu über 50 % und Cadmium zu über 80 % entfernt werden können (Hermann, 2013).

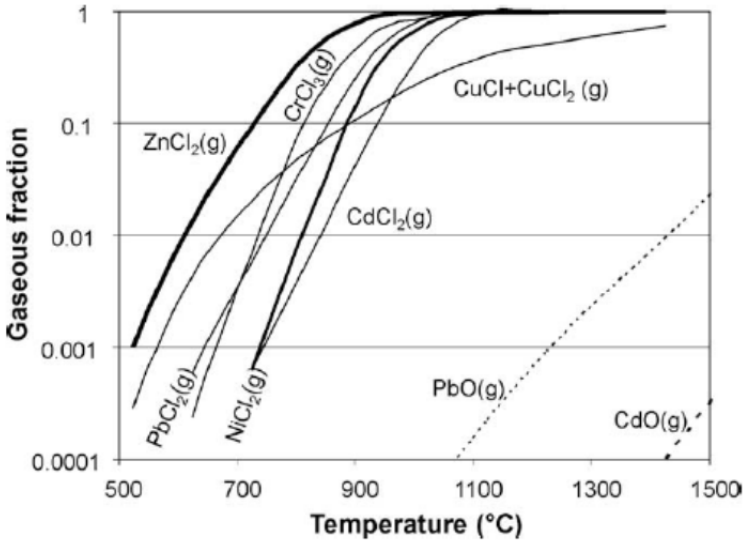


Abbildung 4:Verdampfungstemperatur Schwermetallchloride

Ziel der thermischen Behandlung ist die Überführung der Schwermetalle in die Dampfphase und eine Entfrachtung der Klärschlammasche.

Folgende Reaktionen sind für die Schwermetallentfrachtung verantwortlich:

1. Bildung von HCl oder Cl_2 in Abhängigkeit der Feuchtigkeit der Reaktionsatmosphäre. $CaCl_2 + H_2O \rightarrow CaO + 2HCl$ oder $CaCl_2 + ½ O_2 \rightarrow CaO + Cl_2$. HCl und Cl_2 diffundieren in die Partikel zu den Schwermetallverbindungen
2. Die Zwischenprodukte HCl und Cl_2 reagieren mit den Schwermetallkomponenten der Asche. Z.B. $2HCl + ZnO \rightarrow H_2O + ZnCl_2$ und $Cl_2 + ZnO \rightarrow ½ O_2 + ZnCl_2$
3. Schwermetallchloride können vom Matrixmaterial absorbierten werden oder reagieren damit, z.B. $ZnCl_2 + SiO_2 \rightarrow ZnSiO_3 + HCl$. Die Schwermetallkomponenten können auch direkt mit dem Matrixmaterial reagieren und formen dabei stabile Silikate und Aluminate. $ZnO + SiO_2 \rightarrow ZnSiO_3$ und $ZnO + Al_2O_3 \rightarrow ZnAl_2O_4$. Diese Reaktionen reduzieren die maximale Entfernung der Schwermetalle

Vereinfacht wird die Schwermetallentfrachtung (HM=Heavy-Metals) in Abbildung 5 dargestellt.

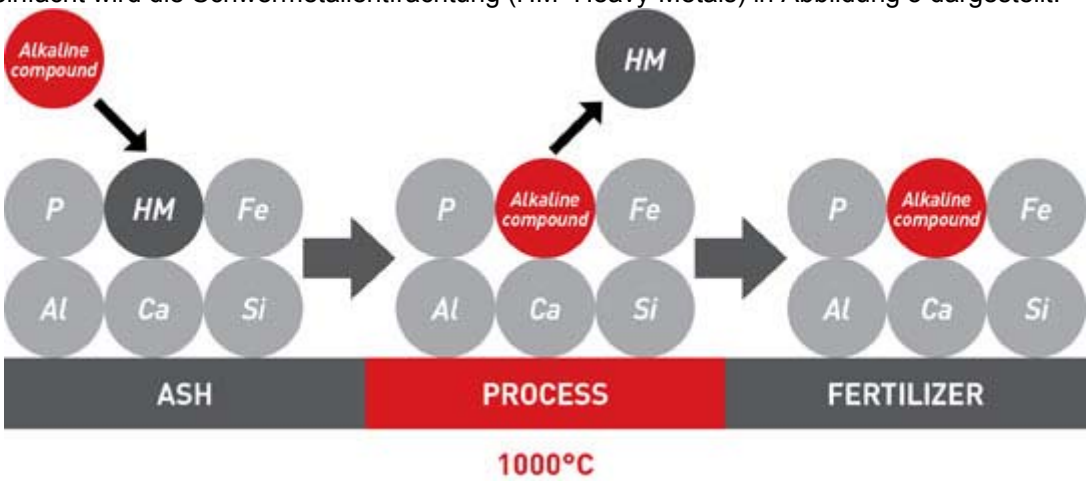


Abbildung 5:Vereinfachte Darstellung Schwermetallentfrachtung

Phosphor in der Asche ist in seiner ursprünglichen Form schlecht pflanzenverfügbar, kann aber durch die thermochemische Behandlung in eine verfügbare Form umgewandelt werden (Mattenberger et al., 2008; Nowak et al., 2010). In diesem Prozess werden 98 % der Asche als P-reiche Pellets ausgetragen. Nur 2 % (Rauchgas) wird über eine Rauchgasreinigung ausgetragen, in welcher sich die Schwermetalle anreichern. Bis zu 95 % der Schwermetalle Cd, Cu, Hg, Pb und Zn werden in das Rauchgas transferiert und anschließend in konzentrierter Form als Filterkuchen abgeschieden (Abbildung 6). Das Halbprodukt, die behandelte Asche, wird gekühlt und im Silo gelagert.

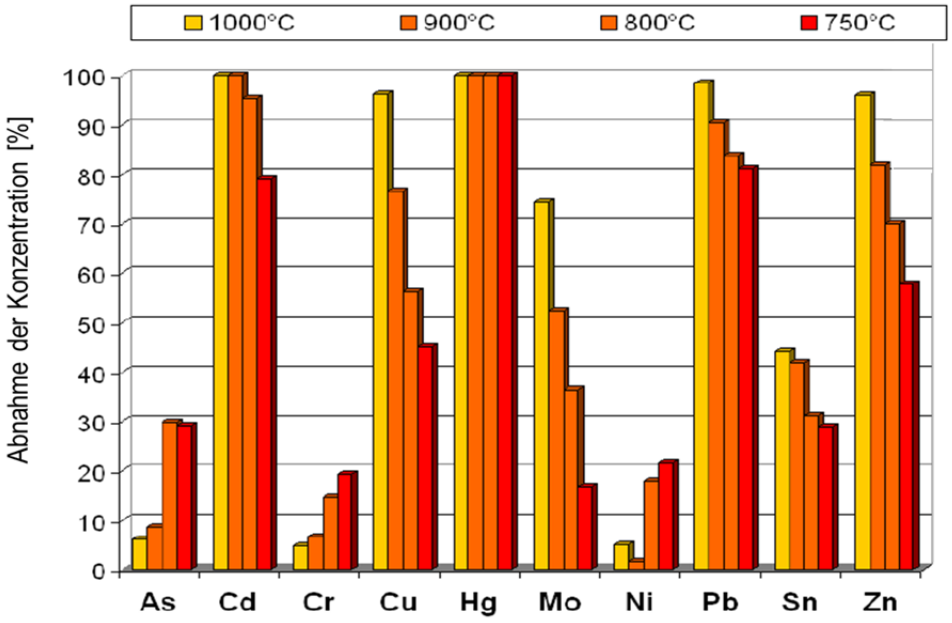


Abbildung 6: Entfrachtungsleistung Ash Dec® ausgewählter Schwermetalle

Rauchgasreinigung (3,4,5)

In der ursprünglichen Pilotanlage in Leoben wurden die entstehenden Rauchgase über eine Rauchgasreinigung, bestehend aus einer Gaswäsche bzw. Sprühabsorber, geleitet. Die Reinigung erfolgt über die Zugabe von Kalkhydrat. Als Abfallprodukte fallen Filterkuchen und Abwasser an, die weitere Behandlungsschritte benötigen. Das gereinigte Rauchgas wird als Abluft in die Atmosphäre emittiert.

In der aktuellsten Prozessführung werden die entstehenden Prozessgase zuerst gekühlt und die Schwermetallchloride in einem Filter als Pulver abgetrennt. Die überschüssig vorhandenen Chloride bleiben gasförmig und werden in einer zweifachen Reaktor-Filterkombination an Magnesiumcharbonat adsorbiert und wieder in den Drehrohrofen aufgegeben (Chlorid Recyclierung). Die Chloridverluste werden durch mineralisches NaCl aus dem Bergbau ausgeglichen. Nach dem Chloridrecycling wird das Abgas mit dem bereits gefilterten Abgas aus dem Heater zusammengeführt und in eine weitere finale Filterstufe geleitet. Dort werden Spuren an SO_2 an Natrium-Hydrogencarbonat adsorbiert.

Beim Konzept des integrierten Ash Dec® Verfahren werden die Rauchgase in die Rauchgasreinigungsanlage der Klärschlammverbrennungsanlage eingeleitet. Der zu behandelnde Rauchgasanteil des Ash Dec® Verfahrens an den Rauchgasen der Verbrennungsanlage liegt bei ca. 10 - 15 %.

Optional: Produktfertigung

Die thermochemisch behandelte Asche ist für sich noch kein Düngemittel. Ziel der Düngemittelfertigung ist die Herstellung eines Düngers mit handelsüblichen Nährstoffgehalten. Abhängig vom gewünschten Endprodukt werden die Nährstoffe Phosphor, Stickstoff und Kalium dazugegeben. Die Mischung wird zu Pellets geformt und der erzeugte Mehrwertpflanzendünger wird unter der Produktbezeichnung PhosKraft® vertrieben.

1.2 Datengrundlage für Bewertung

1.2.1 Sachbilanz

Für die Bewertung des Verfahrens liegen unterschiedliche Datensätze vor, die herangezogen werden können. Zum einen wurde das Verfahren im Rahmen des SUSAN Projektes detailliert untersucht und zum anderen liegen detaillierte Daten aus der persönlichen Mitteilung von Ludwig Hermann (Fa. Outotec) für verschiedenen Umsetzungsvarianten vor (++). Dargestellt werden die Ergebnisse einer Umsetzung des Verfahrens ohne direkten Anschluss an eine Verbrennung (kalte Asche) und die Implementierung einer Anlage direkt im Anschluss an den Verbrennungsprozess mit Übernahme der noch heißen Asche. Daraus

ergeben sich teils deutliche Unterschiede im speziellen hinsichtlich des Energiebedarfes (+). Aufgrund der integrativen Bauweise (heiße Asche) kann zur Rauchgasreinigung die bestehende Rauchgasreinigungsanlage der Verbrennungsanlage mitgenützt werden. Dies hat wiederum Einfluss auf den benötigten Chemikalienbedarf. Der Ressourcenbedarf wird auf Basis von einem kg Klärschlammasche (kg/kg Asche) dargestellt. Der Energiebedarf setzt sich zum einem aus dem Gasbedarf zur Wärmeerzeugung und dem elektrischen Energiebedarf für die Anlagenteile zusammen (++).

Ressource [kg/kg Asche]	Szenario SUSAN	Szenario „Kalte Asche“	Szenario „Heiße Asche“
MgCl	1,34	-	
NaCl	-	0,042	0,038
$NaHCO_3$	-	0,012	0,081
O_2	8	0,048	0,085

Tabelle 1: Chemikalien- und Sauerstoffbedarf unterschiedliche Datengrundlage

Energie	Szenario SUSAN	Szenario „Kalte Asche“	Szenario „Heiße Asche“
Gas [kWh/kg Asche]	0,93	0,58	0,31
Gas [kg/kg Asche]	0,06	0,056	0,030
Strom [kWh/kg Asche]	0,192	0,107	0,08

Tabelle 2: Energiebedarf (Strom und Gas) unterschiedliche Datengrundlage

1.2.2 Stoffflussanalyse

Transferkoeffizienten (TK) Thermochemischer Prozess

Auf Basis der umfangreichen Untersuchungen im SUSAN Projekt können detaillierte und vollständige Stoffflussanalysen für Phosphor und alle ausgewählten Schwermetalle erstellt werden (+). Bezüglich der SM Entfrachtung sind die Unsicherheiten in erster Linie auf die gewählten Temperaturen beim Brennen der Asche zurückzuführen (Abbildung 6).

TK	Entfrachtete Asche	Rauchgas	UL
P	98-99	1-2	1
As	90	10	1,5
Cd	8	92	1,5
Cr	90	10	1,5
Cu	10	90	1,5
Hg	1	99	1,5
Ni	90	10	1,5
Pb	10	90	1,5
Zn	20	80	1,5

Tabelle 3: Transferkoeffizienten Ash Dec® Prozess Brennen

TK Ash Dec® Rauchgasreinigung

Aufgrund fehlender Daten zur Leistung der Rauchgasreinigung aber auch im Hinblick auf eine mögliche Integration des Ash Dec® Verfahrens in eine bestehende Verbrennungsanlage wird die definierte Referenzrauchgasreinigung mit den bekannten Transferkoeffizienten angenommen. Schwermetalle, die beim Brennen in die Dampfphase übergehen, ändern durch die Reduktion der Temperatur ihren Aggregatzustand wieder zu fest und liegen pulverförmig vor (Filterstäube). Damit kann die Reinigungsleistung mit nahezu 100 % angenommen werden.

	Filterstaub	Gereinigtes Rauchgas	UL
P	99,7	0,3	1
As	89,6	5,9	1,5
Cd	94,9	5	1,5
Cr	99,1	0,3	1,5
Cu	99,9	0,1	1,5
Hg	96,3	3,5	1,5
Ni	99,6	0,1	1,5
Pb	99,1	0,8	1,5
Zn	99,6	0,3	1,5

Tabelle 4: Transferkoeffizienten Ash Dec® Rauchgasreinigung

1.2.3 Charakteristik Endprodukt

Bei den Ash Dec® Endprodukten muss grundsätzlich zwischen der entfrachteten Asche aus dem Prozess und dem Phoskraft® Produkt unterschieden werden. Das Phoskraft® Endprodukt entsteht, wenn die entfrachtete Asche zu handelüblichen NPK oder NP Düngern beigemischt wird. Für beide Endprodukte liegen Daten zu Nährstoffgehalten, Löslichkeiten und Düngerversuchen vor, die getrennt voneinander betrachtet werden.

1.2.3.1 Nährstoffe, (Schwer)-metalle und org. Spurenstoffe

Die Phosphor- und Schwermetallgehalte in der entfrachteten Asche sind stark von den Gehalten der Ausgangsasche abhängig (+). Die Nährstoff- und Schwermetallgehalte werden daher auf Basis der Referenzasche, der Güterflussanalyse und der bekannten Transferkoeffizienten ermittelt. Aluminium- und Eisengehalte sind in erster Linie vom eingesetzten Fällmittel zur P-Elimination in der Kläranlagen abhängig. Für eine entfrachtete Asche liegen weder Literaturdaten vor, noch werden Stoffflussanalysen für diese beiden Metalle durchgeführt. Deren Gehalt ist damit unbekannt (-). Aufgrund der vorangegangen thermischen Behandlung sind keine organischen Spurenstoffe oder pathogene Keime im Endprodukt nachweisbar (+).

Nährstoffe [g/kg TS]		Schwermetalle [mg/kg TS]		Org. Spurenstoffe [mg/kg TS]	
P	85	As	~10	AOX	-
N	-	Cd	~0,2	PAK	-
Mg	-	Cr	~80	PCDD/F	-
Ca	180	Cu	~50	LAS	-
K	45	Hg	0,00	NPE	-
Metalle [mg/kg TS]		Ni	~60	Bisphenole	-
Al	-	Pb	~10		
Fe	-	Zn	~350		

Tabelle 5: Nährstoff-, (Schwer)-metallgehalte und org. Spurenstoffe Ash Dec® entfrachtete Asche

Aus der entfrachteten Asche lassen sich durch Beimischen von Nährstoffen wie zusätzlichem Phosphor sowie Stickstoff und Kalium, handelsübliche PK bzw- NPK Dünger herstellen. Die Nährstoffkonzentrationen werden in Tabelle 6 dargestellt. Schwermetallgehalte liegen exemplarisch für ein Phoskraft® Endprodukt vor, welches aus der Klärschlammasche der Wirbelschichtfeuerungsanlage der Fernwärme Wien erzeugt wurde.

	Phoskraft® PK [g/kg TS]	Phoskraft ® NPK [g/kg TS]	Schwermetallgehalte [mg/kg TS]	
P	120	200	As	-
N	-	80	Cd	0
Mg	-	-	Cr	67
Ca	-	-	Cu	52
K	200	80	Hg	0
			Ni	40
			Pb	7
			Zn	168

Tabelle 6: Nährstoffgehalte Ash Dec® Phoskraft®

1.2.3.2 P-Löslichkeit und Pflanzenaufnahme

Wie bereits erwähnt muss bei der Betrachtung der Löslichkeit, Pflanzenverfügbarkeit und P-Aufnahme beim Ash Dec® Endprodukt zwischen dem mit zusätzlichen Nährstoffen vermischen Produkt (Phoskraft®) und der eigentlichen entfrachteten Asche unterschieden werden.

Entfrachtete Asche

Infolge der thermochemischen ($MgCl_2$ als Additiv) Aschebehandlung werden P-Verbindungen wie Whitlockit und $AlPO_4$ transformiert. Es kommt zum Aufbau von P-Verbindungen wie Stanfieldit, Chlorapatit und Farringtoniten die zuvor nicht in der Asche detektiert werden konnten. Dies ist eine mögliche Erklärung dafür warum die Löslichkeit von P in der thermisch entfrachteten Asche im Vergleich zu einer herkömmlichen Asche hinsichtlich der Zitronensäurelöslichkeit verbesserte werden kann.

Römer (2013) untersucht in einer aktuellen Studie die tatsächliche P-Aufnahme und damit die Düngewirkung verschiedener Recycling Endprodukte. In den Testreihen wurde die entfrachtete Asche ohne Nährstoffbeimengung eingesetzt. Die P-Aufnahme liegt für Sand- und Lösslehmböden im Bereich von 24 – 40 % gegenüber einem handelsüblichen Mineraldünger und ist damit mit einem Rohphosphat vergleichbar. Römer (2013) kommt zum Schluss, dass eine mit Chloriden erhitzte Asche zu Produkten führt, die deutlich hinter der Wirkung von SSP und TSP liegen. Diese Produkte werden als ungeeignet bzw. weitgehend ungeeignet eingestuft.

Phoskraft®

Die Pflanzenverfügbarkeit des PhosKraft® Produkts wurde in Labor-, Topfpflanzen- und Felduntersuchungen getestet. So zahlreich die Untersuchungshäufigkeit, so unterschiedlich sind die Ergebnisse. Die Löslichkeit mittels Zitronensäure liegt in der Rohasche bei zwischen 30 und 45 % und kann mit dem Ash Dec® Verfahren und der Nährstoffzugabe auf 90 - 100 % gesteigert werden. Bei Topfpflanzen- und Großfelduntersuchungen kann für den PhosKraft® Dünger eine Wirkung ähnlich dem handelsüblichen Tripelsuperphosphat nachgewiesen werden. Biomasse, Ernteerträge und der pflanzenverfügbare Phosphor (Pcal) im Boden können signifikant erhöht werden (Kuderna, 2008). Die Pflanzenverfügbarkeit auf sauren Böden(pH < 7) ist vergleichbar mit handelsüblichen Phosphatdüngern. Auf basischen Böden (pH > 7,5) können diese Ergebnisse nicht erreicht werden.

Exktraktionsmittel	Löslichkeit unbehandelte Asche	Löslichkeit Phoskraft (PK)	Löslichkeit Phoskraft (NPK)
Wasser	7	-	25
Zitronensäure	30-46	88	100
Ameisensäure	42	83	-
Mineralsäure	95	-	-
Ammoncitrat	41	-	70

Tabelle 7: Löslichkeit in % bezogen auf Pges der unterschiedlichen Ash Dec® Endprodukte

1.2.3.3 Eignung als Sekundärdünger

Phoskraft® erfüllt die Anforderungen der Düngemittelverordnung und ist in Europa zugelassener Dünger. Die entstehenden Pellets können in Big Bags abgepackt und direkt auf die landwirtschaftliche Fläche

aufgebracht werden. Das Endprodukt ist laut Herstellerangaben staubfrei, kann gelagert werden und direkt in der Landwirtschaft ausgebracht werden (Abbildung 7) (+). Die entfrachtete Asche ohne weitere Aufbereitung schneidet bei Topfversuchen auf gleichem Niveau wie eine unbehandelte Klärschlammasche ab (Römer, 2013). Auch ohne weiteren Prozessschritt werden in diesem Fall Pellets hergestellt, die abgepackt und direkt auf die landwirtschaftliche Fläche aufgebracht werden könnten.

Abbildung 7: Ash Dec® Endprodukt Phoskraft®

1.2.3.4 Zu berücksichtigende Abfallstoffe aus dem Ash Dec® Verfahren

Die in der Rauchgasreinigung in der Stufe Gewebefilter anfallenden Filterstäube müssen untertägig abgelagert werden (+). Aufgrund der hohen Schwermetallkonzentrationen wäre auch eine Verwertung der Filterstäube als Sekundärrohstoff in Kupfer- oder Zinkhütten anzudenken. Bei der Bewertung wird davon ausgegangen, dass die Filterstäube sachgerecht untertägig deponiert werden. Möglich ist auch Abwasser, welches bei der Rauchgasreinigung anfällt und einer chemisch-physikalischen Abwasserreinigung zugeführt werden muss.

1.2.4 Umsetzung

Das Ash Dec® Verfahren wurde bisher einzig als Anlage im Pilotmaßstab in Leoben (Österreich) umgesetzt, die aber derzeit nicht mehr in Betrieb ist (+). Informationen zufolge ist derzeit eine großtechnische Anlage in Norddeutschland geplant.

Abbildung 8: Pilotanlage Ash Dec® Verfahren

1.2.5 Flächenbedarf

Laut Auskunft des Anlagenherstellers (Ludwig Hermann) liegt der Flächenbedarf für das Ash Dec® Verfahren mit einem Aschedurchsatz von 15.000 t/a bei 500 – 1.000 m² (-). Inwieweit der Flächenbedarf bei direkter Integration in einer Verbrennungsanlage reduziert werden kann ist nicht bekannt.

Anlagenteile	Flächenbedarf
Ash Dec ® 15.000 t	500-1.000 m²

Tabelle 8: Flächenbedarf Ash Dec® Verfahren

1.2.6 Ökonomische Grundlagen

Die Investitionskosten für das Ash Dec® Verfahren können aus Tabelle 9 entnommen werden. Datengrundlage sind die Kostenkalkulationen aus dem SUSAN Projekt. Die angenommenen Investitionskosten können anhand der Investitionskosten aus der Machbarkeitsstudie von Ludwig Hermann mit rund 15 Mio. € für eine Anlage mit einem Aschedurchsatz von 15.000 t/a abgeglichen werden (Kosten für die beiden Szenarien Asche kalt und heiß sind bekannt). Die Nutzungsdauer der Anlage wird auf 12,5 Jahr berechnet. Die Anlage läuft vollautomatisch, muss aber vom ständig anwesenden Mitarbeitern überwacht werden, weshalb der Personalaufwand mit 5 MA/a festgelegt wird. Der Wartungsaufwand wird mit 3 % der Investitionskosten festgelegt. Chemikalien- und Energiekosten können aus den Güterfluss- bzw. Energieflussanalysen abgeleitet werden. Die Erlöse aus dem Verkauf des Endproduktes werden auf Basis der Nährstoffkomponenten berechnet.

Aschedurchsatz [t/a]	Einwohnerwerte [EW in Mio.]	Investitionskosten Szenario Asche kalt [Mio. €]	Investitionskosten Szenario Asche heiß [Mio. €]
5.000	0,58	10,0	7,0
10.000	~1,2	12,0	9,0
20.000	~2,3	16,0	13,0
30.000	~3,5	19,0	16,0
50.000	~5,8	23,5	20,5

Tabelle 9: Investitionskosten in Abhängigkeit des jährlichen Aschedurchsatzes (umgerechnet in EW)

1.3 Ergebnis Ash Dec® Verfahren

1.3.1 Technologie Bewertung

Das Ash Dec® Verfahren ist eine Technologie, die an zentralen Standorten zur Rückgewinnung von P aus der Klärschlammasche und weiterer P-reicher Aschen eingesetzt werden kann. Hinsichtlich der Komplexität, kann der thermochemische Prozess mit nachgeschalteter erforderlicher Rauchgasreinigung als sehr komplex eingestuft werden. Dieser technologische Ansatz wurde als Pilotanlage errichtet und bereits ein handelsfähiger Dünger erzeugt. Eine großtechnische Anlage ist in Planung. Aufgrund des Einsatzes nach der Monoverbrennung, hat diese Technologie keinen Einfluss auf die Prozesse der Abwasserreinigung bzw. ist auch keine Veränderung der weiterführenden Prozesse notwendig. Das Rückgewinnungspotential der Technologie ist sehr hoch (98-100 %) und liegt damit bezogen auf den Kläranlagenzulauf bei rund 85 %.

Ash Dec® Verfahren	
Entwicklungsstand	Pilotanlage (eingestellt) Großtechnisch (in Planung)
Komplexität Technologie	Thermochemische Aschebehandlung mit Rauchgasreinigung
Implementierung	Klärschlammasche
Wartungsaufwand	mäßig
Veränderung Schlammbehandlung	keine
Effektivität des Verfahrens	~98-100 %
Potential bezogen auf KA-Zulauf	85 %
Qualitativer Ressourcenaufwand	NaCl, $MgCO_3$, $NaHCO_3$, $MgCl_2$, O_2, Energie (Elektrizität, Erdgas)
Abfallstoffe	Filterstäube, Abwasser (alte Ausbauvariante)
Negative Effekte auf Abwasserreinigung	keine

Tabelle 10: Komplexität, Umsetzung und Rückgewinnungspotential Ash Dec®

1.3.2 Ökologische Bewertung (Systemgrenze Verfahren)

1.3.2.1 Stoffflussanalyse P

Das Ash Dec® Verfahren hat im Vergleich zu Rückgewinnungsverfahren aus dem Schlammwasser oder dem Klärschlamm keinen Einfluss auf den Abwasserreinigungsprozess. Die Wiederfindungsrate des Phosphors aus der Flugasche in der entfrachteten Asche liegt bei > 98 %. Das P-Rückgewinnungspotential bezogen auf den Kläranlagenzulauf liegt bei 85 % und damit bei 56.000 kg P/a. Hinsichtlich der Masse entspricht die entfrachtete Asche in etwa dem Masseninput aus der Flugasche, womit auch der P-Gehalt bei einer ähnlichen Konzentration wie in der Flugasche liegt (ca. 8,5 %).

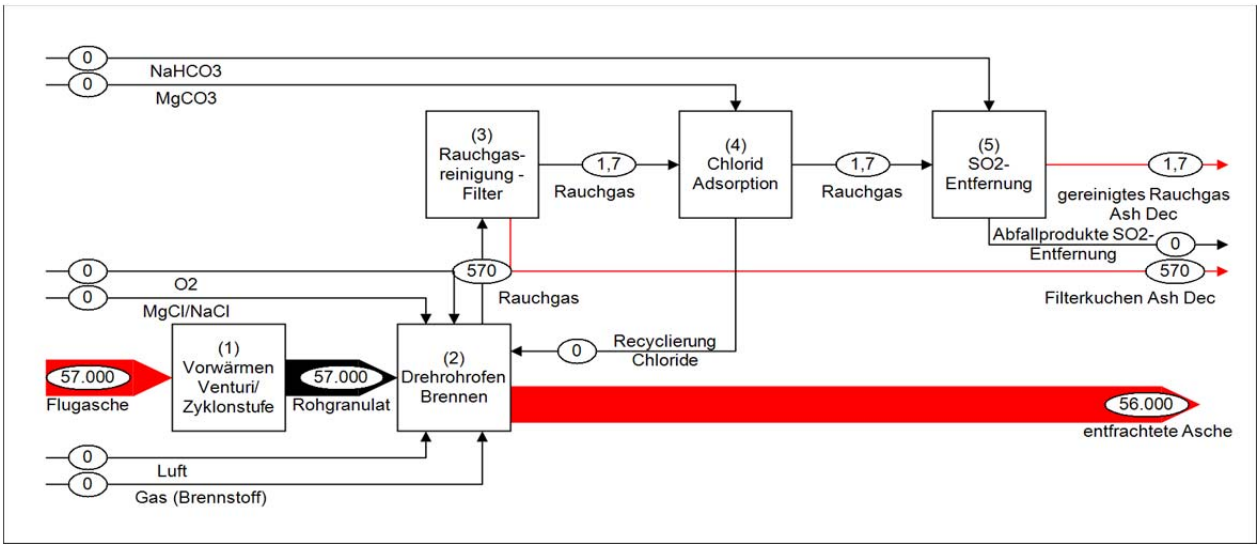


Abbildung 9: P-Stoffflussanalyse Ash Dec® (2 signifikante Stellen)

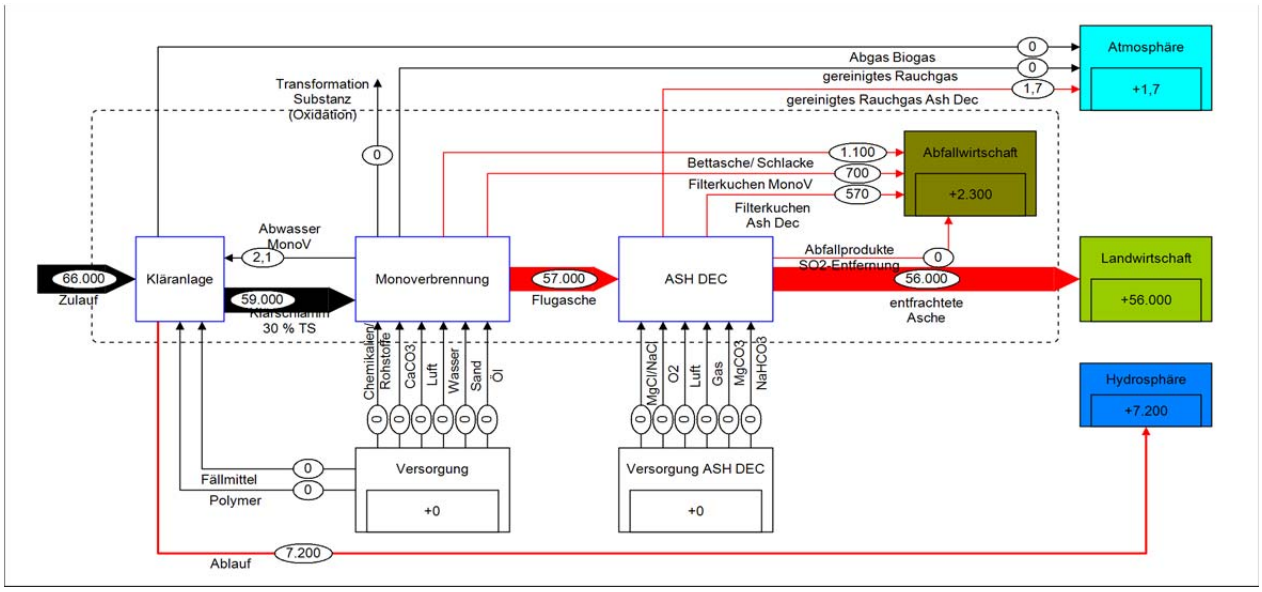


Abbildung 10: Stoffflussanalyse P: Gesamte Prozesskette

1.3.2.2 Stoffflussanalyse SM und Entfrachtungsleistung

Auf Basis der Stoffflussanalyse für die Schwermetalle und der in Kapitel 1.2.2 erhobenen Transferkoeffizienten für den Prozess „Brennen Drehrohrofen“ kann gleichzeitig die Entfrachtungsleistung dieser Technologie in Bezug auf die Klärschlammasche ermittelt werden. Bereits in der Verbrennung erfolgt eine vollständige Zerstörung der organischen Spurenstoffe.

Parameter	Zulauf KA [kg/a]	Endprodukt [kg/a]	Rückgewinnung bzw. Entfrachtung [%]
P	**56.700**	**56.200**	**99**
As	8,0	7,1	10
Cd	2,2	0,17	92
Cr	65	60	8
Cu	380	38	90
Hg	0,05	0,0	99,99
Ni	50,2	45	10
Pb	83,0	8,3	90
Zn	1305	260	80

Abbildung 11: Entfrachtungsleistung (Endprodukt:Klärschlammasche)

1.3.2.3 Ergebnisse Güterflussanalyse

Der Gesamt-Ressourcenbedarf sowie der produkt-bzw. einwohnerspezifische Ressourcenbedarf für den Einsatz des Ash Dec® Verfahren auf Basis der Referenzkläranlage kann aus den folgenden Tabellen entnommen werden. Aufgrund veränderter Prozessführung sind für die verschiedenen Szenarien sowohl deutliche Unterschiede bei der Auswahl der Chemikalien als auch bei der eingesetzten Menge festzustellen. Die anfallen Filterstaubfracht liegt bei allen Szenarien im Bereich von 43 t. Im Falle des Szenarios SUSAN fallen bei einem Input von 1 t Flugasche ein Endprodukt mit einer Fracht von rund 1,1 t an. Im Falle der Referenzklärschlammaschefracht von 670 t/a entspricht dies rund 740 t entfrachteter Asche pro Jahr. Aus den Daten der beiden anderen Szenarios geht keine solche Zunahme der Outputfracht hervor.

Drehrohr [kg/a]	SUSAN	Kalte Asche	Heiße Asche
$MgCl_2$	134.300	-	-
NaCl	-	28.200	25.500
O_2	-	32.200	57.100
Rauchgasreinigung [kg/a]			
$Ca(OH)_2$	114.200		
$MgCO_3$	-	51.000	54.400
$NaHCO_3$	-	8.100	5.400
Reststoffe [kg/a]			
Filterstaub bzw. -kuchen	43.700	43.700	43.000

Tabelle 11: Ressourcenbedarf Ash Dec®

SUSAN	Produktspez. [kg $P_{rückg.}$]	Einwohnerspez. [EW*a]
MgCl2	2,39	1,34
$Ca(OH)_2$	2,03	1,14
Szenario kalte Asche		
NaCl	0,50	0,28
O_2	0,57	0,32
$MgCO_3$	0,91	0,51
$NaHCO_3$	0,14	0,08
Szenario kalte Asche		
NaCl	0,45	0,26
O_2	1,02	0,57
$MgCO_3$	0,97	0,54
$NaHCO_3$	0,09	0,05

Tabelle 12: Produkt- und einwohnerspezifischer Ressourcenbedarf Ash Dec®

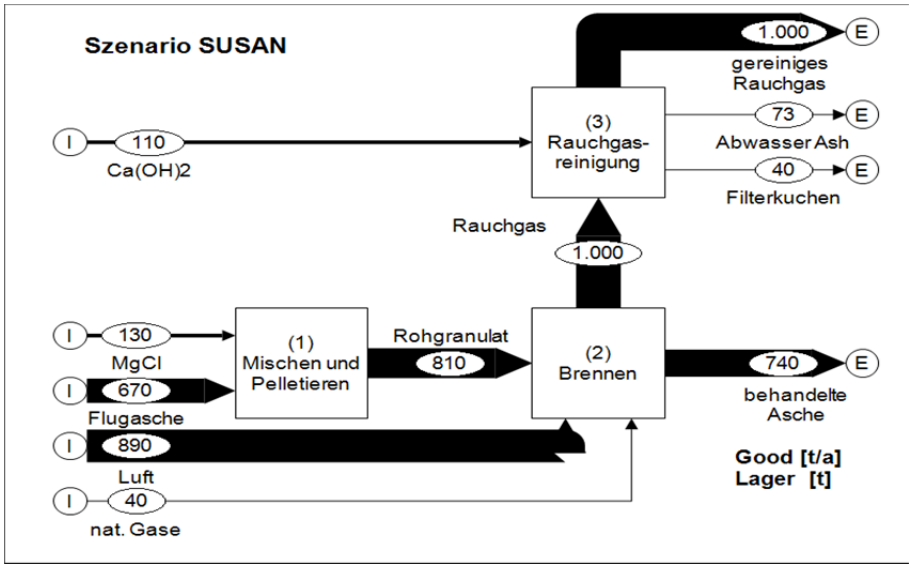


Abbildung 12: Ergebnis Güterflussanalyse Ash Dec® Szenario „SUSAN“

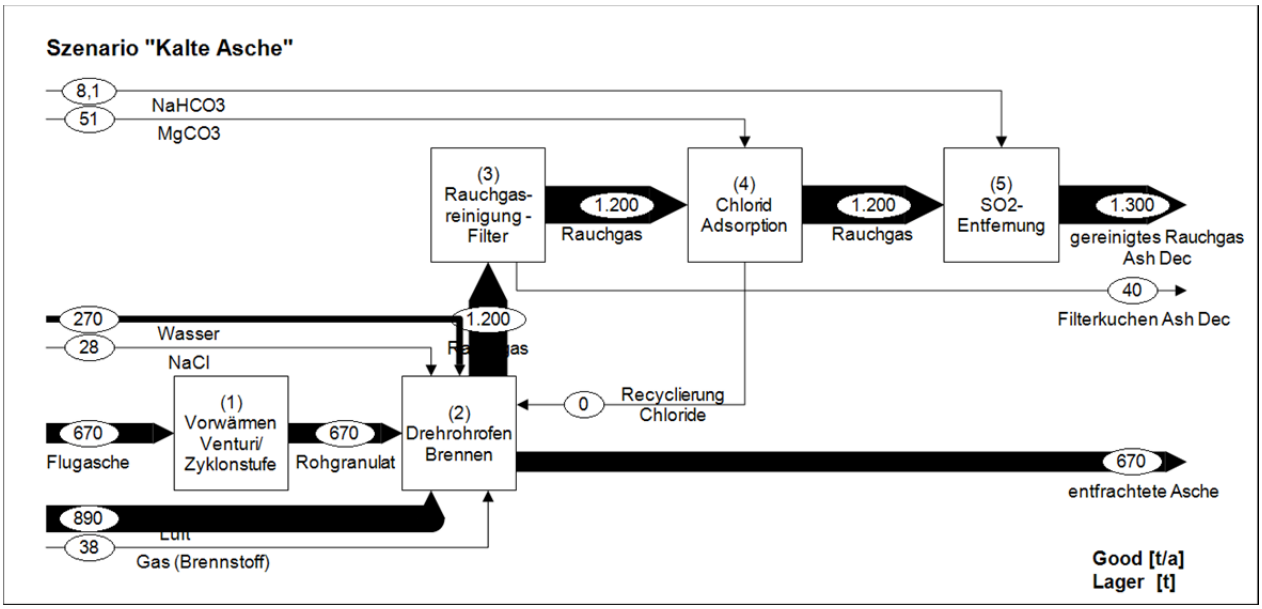


Abbildung 13: Ergebnis Güterflussanalyse Ash Dec® Szenario „Kalte Asche“

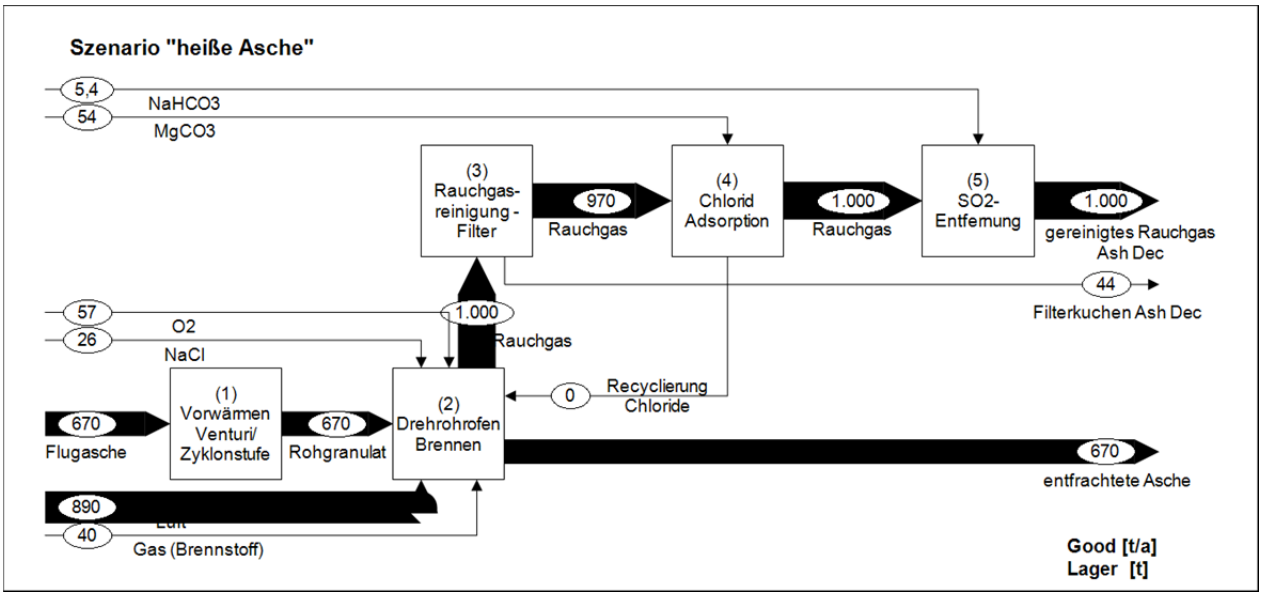


Abbildung 14: Ergebnis Güterflussanalyse Ash Dec® Szenario „Heiße Asche“

1.3.2.4 Ergebnisse Energieflussanalyse

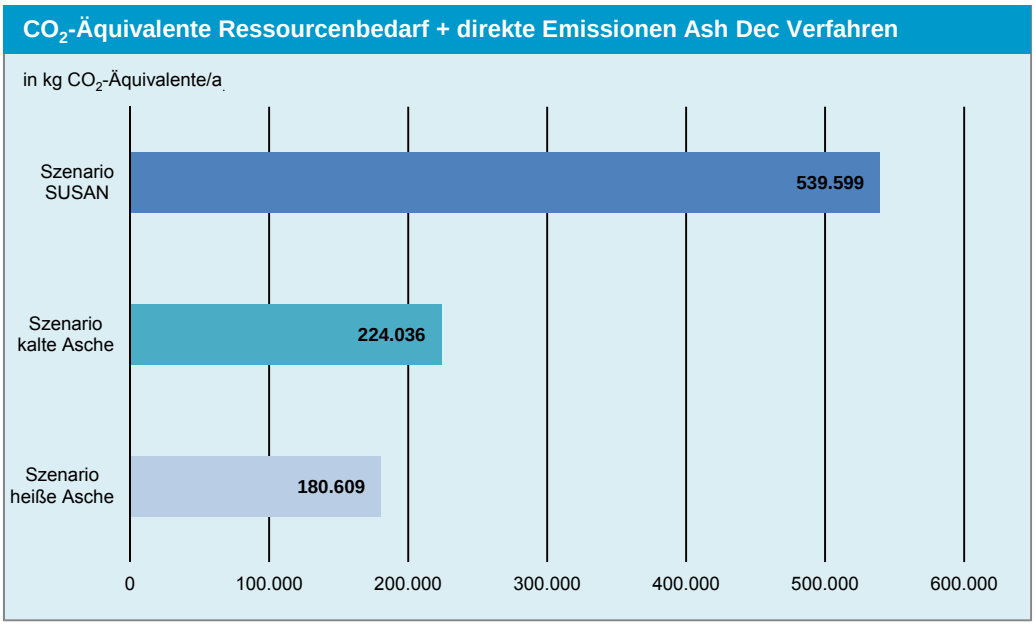
Auf Basis der Herstellerangaben bzw. den Daten aus dem SUSAN Projekt kann für die Referenzkläranlage mit Referenzverbrennung ein elektrischer Energiebedarf von rund 72.000 - 130.000 kWh ermittelt werden. Im Falle einer Integration der Ash Dec® Anlage direkt im Anschluss an eine Verbrennungsanlage kann der Strombedarf auf rund 54.000 kWh/a reduziert werden. Beim Gasbedarf schwanken die Angaben von 390.000 kWh/a für das Szenario „Kalte Asche“, 210.000 kWh/a für das Szenario „Heiße Asche“ bis 630.000 kWh/a (siehe SUSAN-Bericht) (Tabelle 13).

Gas	Produktspez. [kWh $P_{rückg.}$]	Einwohnerspez. [EW*a]
Szenario Kalte Asche	6,93	3,9
Szenario Heiße Asche	3,71	2,1
SUSAN Daten	11,12	6,3
Strom	**Produktspez. [kWh $P_{rückg.}$]**	**Einwohnerspez. [EW*a]**
Szenario Kalte Asche	1,28	0,54
Szenario Heiße Asche	0,96	0,72
SUSAN Daten	2,30	1,30

Tabelle 13: Spezifischer Energiebedarf Ash Dec®

1.3.2.5 Ergebnis indirekte gasförmige Emissionen

Auf Basis der drei Szenarien für die definierte Referenzkläranlage, der Ergebnisse der Güterflussanalyse und der indirekten Emissionen der notwendigen Ressourcen (GEMIS-Datenbank) kann folgender jährlicher Ausstoß an CO_2- bzw. SO_2-Äquivalenten ermittelt werden.



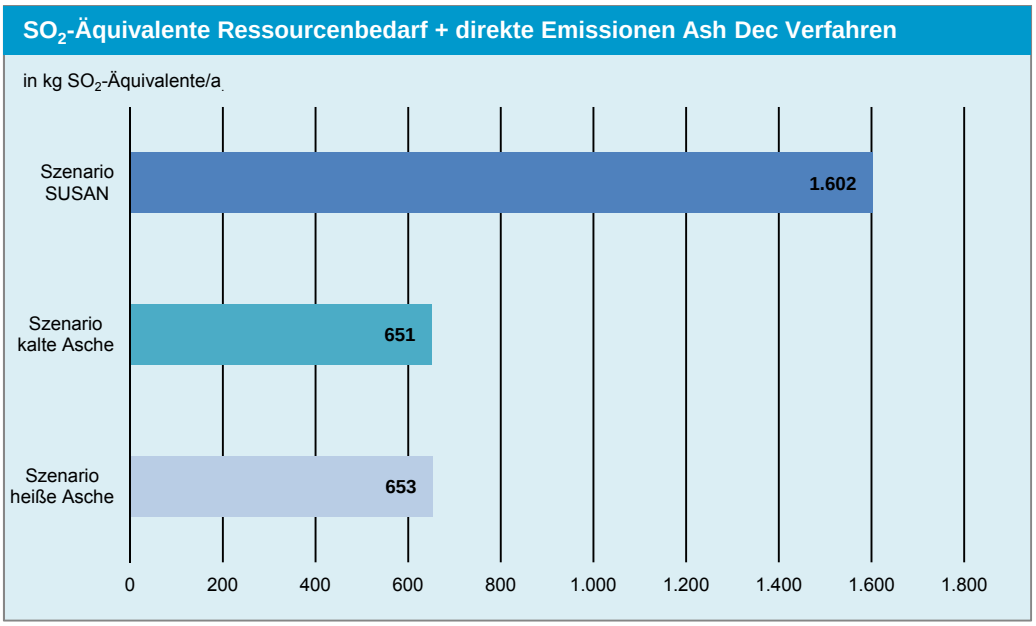
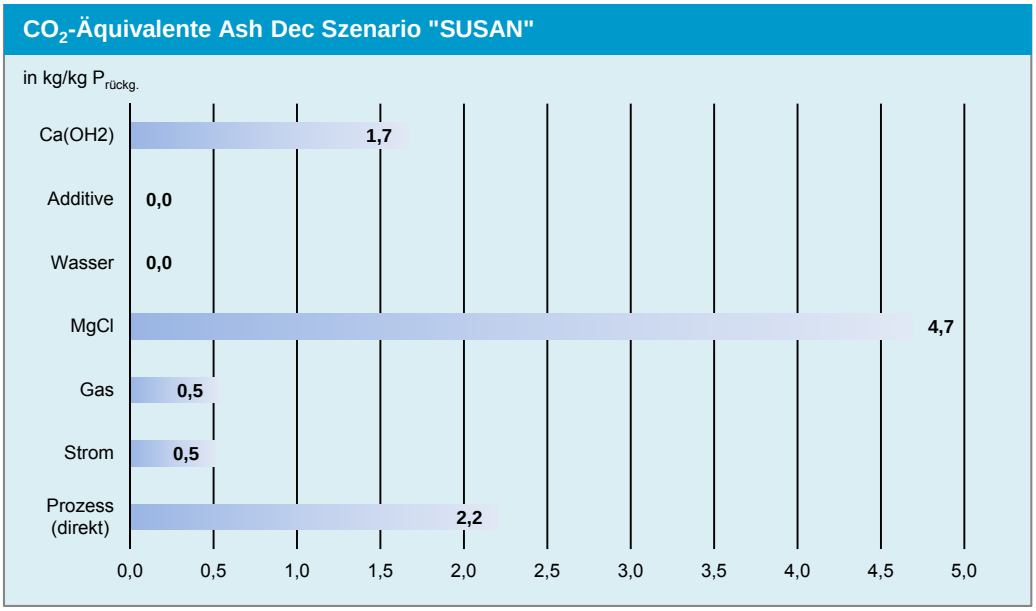
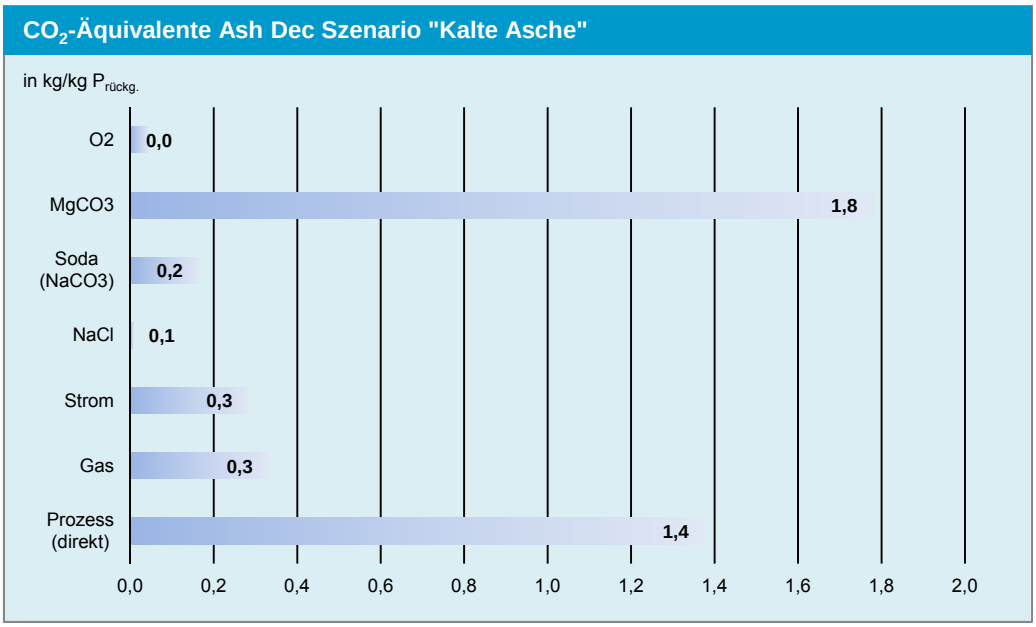


Abbildung 15: Vergleich CO_2- bzw. SO_2-Äquivalente Ash Dec® Szenarien

Die Emissionen bezogen auf 1 kg $P_{rückg.}$ werden anhand der jährlichen Emissionen und der rückgewonnen P-Fracht von 56.200 kg/a errechnet und sind aus Abbildung 16 zu entnehmen. Aus dem Prozess sind direkte gasförmige Emissionen aus der Verbrennung des Erdgases zu berücksichtigten.





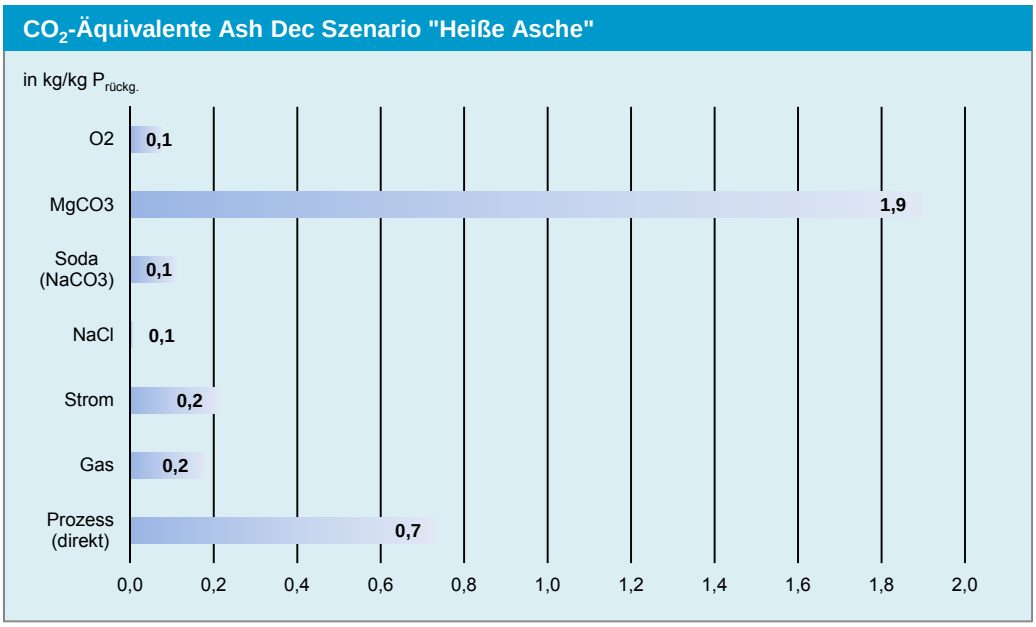


Abbildung 16: CO_2-Äquivalente [kg bzw. g/kg $P_{rückg.}$] Ash Dec® Szenarien

1.3.2.6 Direkte Schwermetallemissionen Ash Dec®

Schwermetalle während des Brennprozesses im Drehrohrofen in die Gasphase übergehen werden zum überwiegenden Anteil im Filterstaub zurückgehalten. Der Anteil der über das gereinigte Rauchgas in die Atmosphäre gelangt ist nur mit sehr hohen Unsicherheiten zu quantifizieren. Die Fracht die tatsächlich emittiert wird ist vom Schwermetallgehalt in der Ausgangsasche, der Entfrachtungsleistung und dem Wirkungsgrad der Rauchgasreinigung abhängig. Alle drei Faktoren sind bereits mit einer gewissen Unsicherheit behaftet, welche sich auf die direkten Schwermetallemissionen in die Atmosphäre aufsummieren. Die hier dargestellten Ergebnisse basieren auf der Annahme der Referenzkläraschlammasche und der Anwendung der bereits definierten Transferkoeffizienten für die einzelnen Prozessschritte im Ash Dec® Verfahren.

1.3.2.7 Indirekte Schwermetallemissionen Ash Dec®

Die indirekten Schwermetallemissionen werden analog zu den Gasemissionen auf Basis der Güterflussanalyse und der GEMIS-Datenbank ermittelt.

Indirekt Emissionen	Szenario „SUSAN“		Szenario „Kalte Asche“		Szenario „Heiße Asche“	
	Atmosphäre [g/a]	Hydrosphäre [mg/a]	Atmosphäre [g/a]	Hydrosphäre [mg/a]	Atmosphäre [g/a]	Hydrosphäre [mg/a]
As	0,13	0,00008	0,10	0,0001	0,11	0,0001
Cd	0,08	0,00002	0,04	0,00028	0,04	0,00024
Cr	0,42	0,00002	0,26	0,00028	0,21	0,00024
Cu	-	-	-			
Hg	-	0,00001	-	0,00014		0,00012
Ni	0,94	-	0,47	-	0,49	
Pb	2,64	0,00013	1,64	0,0018	1,25	0,0016
Zn	-	-				
AOX	-					
PAK	0,00007	-				
PCDD/F	0,000001	-				

Tabelle 14: Indirekte SM-Emissionen Ash Dec®

1.3.2.8 Kumulierter Energieaufwand (KEA)

Der kumulierte Energieaufwand wird analog zu den Gasemissionen auf Basis der Güter- und Energieflussanalyse und der GEMIS-Datenbank ermittelt.

KEA	[kWh]	[kWh/EW*a]	[kWh/kg $P_{rückg.}$]
Szenario SUSAN	2.022.900	20,2	36,0
Szenario Kalte Asche	1.451.600	14,5	25,8
Szenario Heiße Asche	1.008.605	10,1	18,0

Tabelle 15: Kumulierter Energieaufwand Ash Dec®

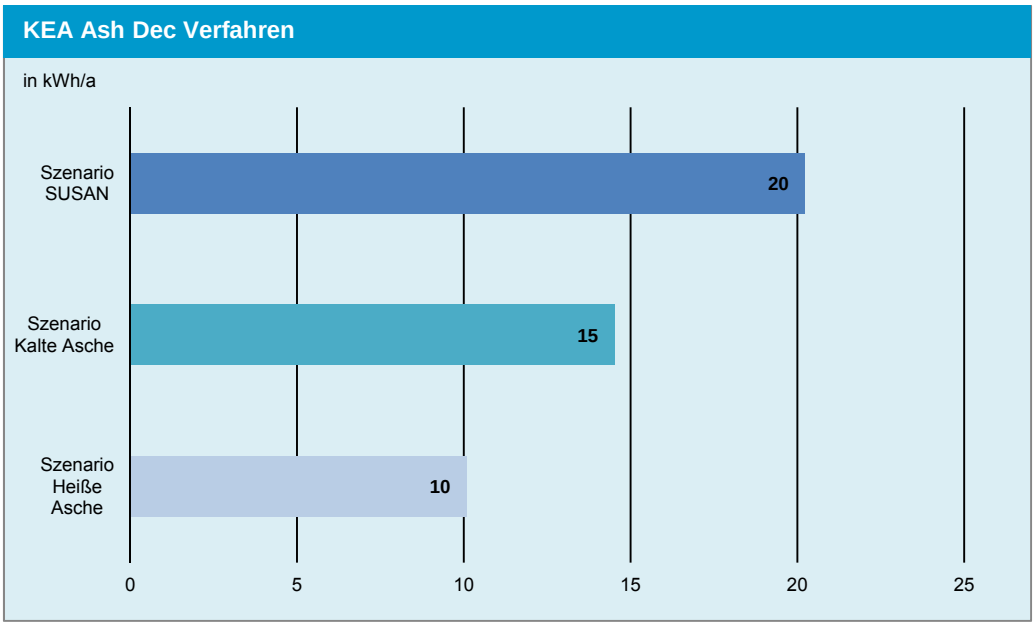


Abbildung 17: Kumulierter Energieaufwand der verschiedenen Ash Dec® Szenarien

Abbildung 18 zeigt zusammenfassend die Ergebnisse jener Parameter die in die ökologische Bewertung des Rückgewinnungsverfahrens einfließen. .

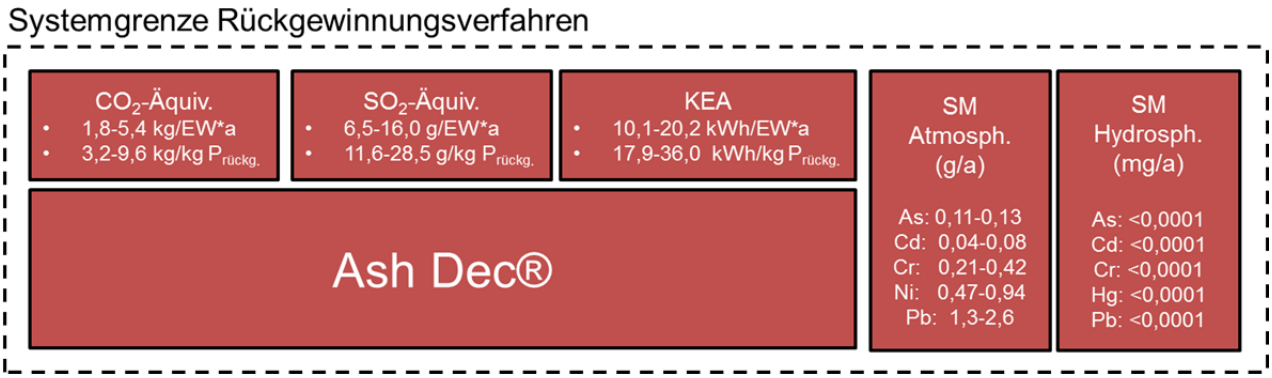


Abbildung 18: Zusammenfassung Parameter ökologische Bewertung (Systemgrenze Rückgewinnungsverfahren)

1.3.3 Ganzheitliche ökologische Bewertung Ash Dec

Da das Ash Dec® Verfahren im Anschluss an die Monoverbrennung ansetzt, hat diese Technologie keinen Einfluss auf den Abwasserreinigungsprozess und damit nachfolgende Prozesse die im Rahmen der ganzheitlichen Bewertung berücksichtigt werden. Folgende Faktoren und deren Einfluss auf weitere Prozesse werden berücksichtigt:

Faktor	Einfluss auf
Ascheannahme	Keine Entsorgung bzw. Deponierung notwendig, Erlöse aus der Ascheannahme
Ressourcenaufwand Ash Dec®	Indirekte Emissionen, Kosten
Endprodukt entfrachtete Asche	Kosten (Erlöse aus dem Verkauf), Gutschrift ökologische Bewertung

Tabelle 16: Einflussfaktoren ganzheitliche Bewertung Ash Dec

Berücksichtigung Transport

Die anfallenden Filterstäube aus dem Ash Dec Prozess müssen Untertägig abgelagert werden. Ansonsten können die Transportwege auf Basis der Referenzsituation angenommen werden (Tabelle 17).

Transportwege	[t/a]	[tkm]	[€/EW*a]
Klärschlamm – MonoV	4.975	696.500	0,97
Flugasche - Rückgewinnung	672	26.900	0,04
Bettasche - Reststoffdeponie	45	4.500	0,01
Filterkuchen MonoV- Untertagedeponie	32	32.000	0,05
Filterstaub bzw. Kuchen Ash Dec – Untertagedeponie	44	43.700	0,06
Gesamt Transport		**803.500**	**1,14**

Tabelle 17: Transportwege Ash Dec

1.3.3.1 Ergebnis Gasemissionen

Im Vergleich zur Referenzsituation ist vor allem für das Szenario eine deutliche Steigerung der CO2-Emissionen von rund + 130% zu rechnen. Hauptgrund dafür sind neben dem MgCl-Einsatz die direkten Emissionen aus der Verbrennung des Gases. Für die Szenarien „Kalte Asche“ und „Heiße Asche“ sind moderate zusätzliche CO_2- Emissionen + 41 bzw. + 29 % zu erwarten. Interessant verhält es sich mit den SO_2-Emissionen. Für die Szenarien „Kalte Asche“ und „Heiße Asche“ kann bei Betrachtung der gesamten Prozesskette sogar eine Reduktion ermittelt werden. Hauptgrund dafür sind die hohen Einsparungen infolge der P-Dünger Substitution (Tabelle 18).

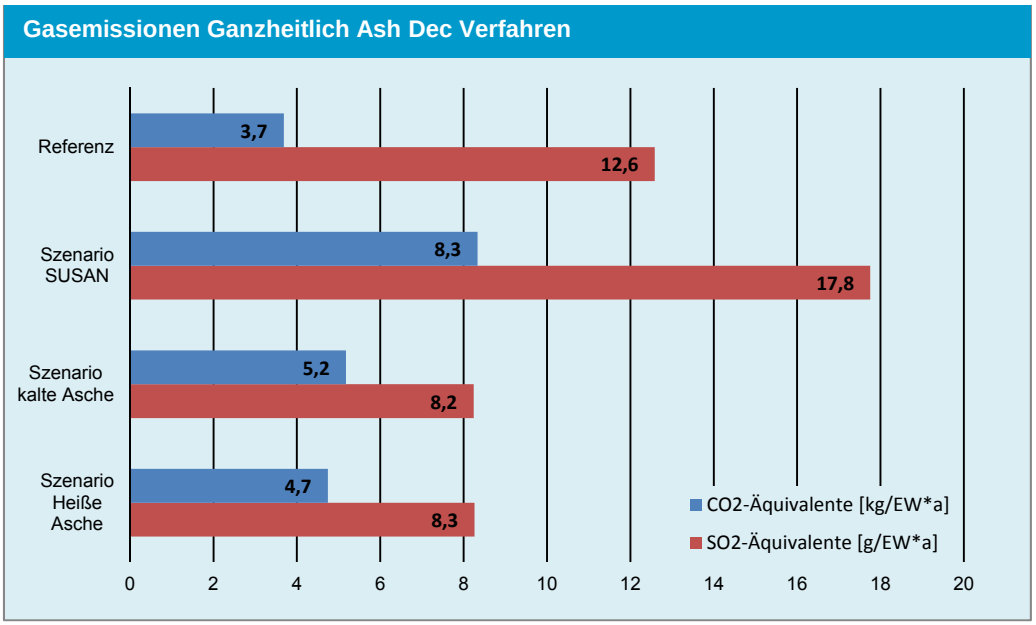


*Abbildung 19: Einwohnerspezifischer kumulierter Energieaufwand in kg/EW*a für das Ash Dec® Verfahren*

CO_2-Äquivalente [kg/a]	SUSAN	Kalte Asche	Heiße Asche
Ash Dec	736.200	517.900	474.400
Referenz	367.700	367.700	367.700
Δ	+ 126 %	+ 41 %	+ 29 %
SO_2-Äquivalente [kg/a]			
Ash Dec	1.016	824	826
Referenz	1.250	0,005	
Δ	+41 %	-35 %	-34 %

Tabelle 18: CO_2 bzw. SO_2-Äquivalente Prozesskette Ash Dec

1.3.3.2 Ergebnis kumulierter Energieaufwand

KEA [kWh/a]	SUSAN	Kalte Asche	Heiße Asche
Ash Dec	2.576.700	2.292.300	1.850.800
Referenz	1.131.700	1.131.700	1.131.700
Δ	+ 131 %	+ 103 %	+ 64 %

Tabelle 19: Kumulierter Energieaufwand gesamte Prozesskette

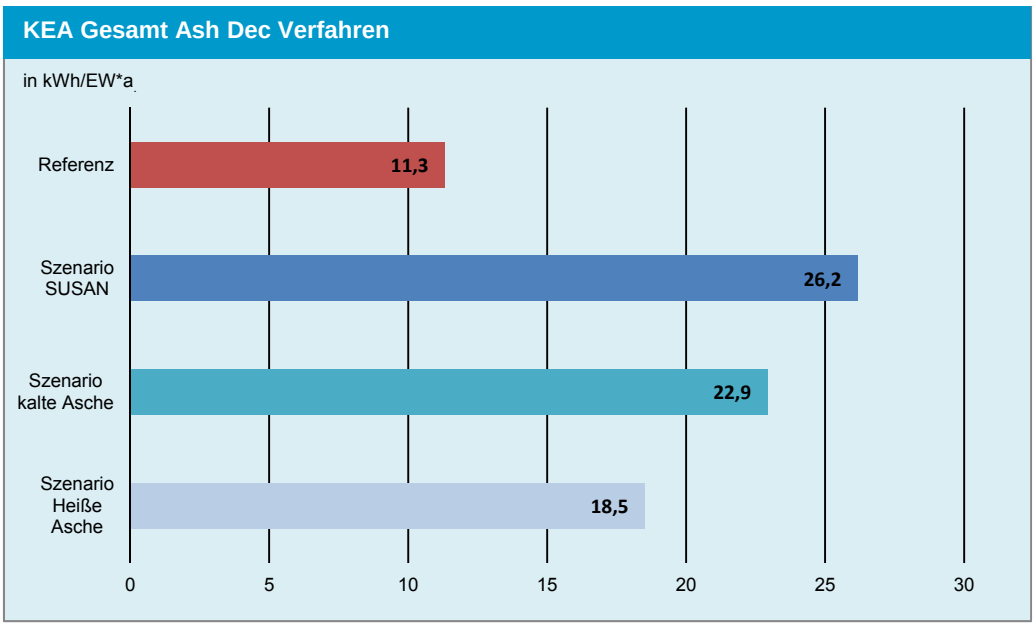


*Abbildung 20: Ganzheitlicher kumulierter Energieaufwand Ash Dec in kWh/EW*a*

In Abbildung 23 werden die ökologisch relevanten Bewertungsparameter CO_2- und SO_2-Emissionen sowie der kumulierte Energieaufwand in Relation zur Referenzsituation zusammenfassend bezogen auf EW*a dargestellt. Die ökologische Bewertung verdeutlicht, dass infolge der Implementierung des Ash Dec® Verfahrens geringe bzw. moderate Steigerungen der CO_2 bzw. SO_2-Emissionen zu erwarten sind.

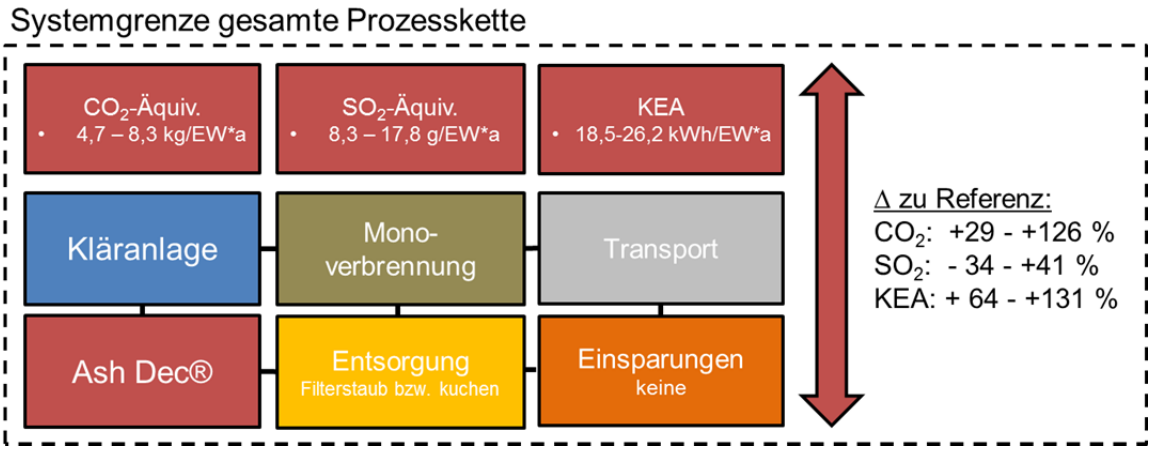


Abbildung 21: Veränderung der gasförmigen Emissionen und des KEA in Relation Referenzsituation

1.3.3.3 Ergebnisse Stoffflussanalyse Schwermetalle und organische Spurenstoffe

Auf Basis der Stoffflussanalysen können die Pfade von P und den ausgewählten Schwermetallen zu den Zielprozessen nachvollzogen werden (Abbildung 22). Im Vergleich zur Referenzsituation sind sehr gering erhöhten Schwermetallfrachten Atmosphäre möglich, aber keine erhöhten Emissionen in die Hydrosphäre zu erwarten. Im Falle einer Ausbringung des Endproduktes nimmt die P- und Schwermetallfracht in die Landwirtschaft im Ausmaß der rückgewonnen P-Fracht bzw. der SM-Fracht im Endprodukt zu. Deutlich wird, dass einzelnen Schwermetalle wie As, Cr und Ni nur ungenügend aus der Asche entfernt werden können und damit auf die landwirtschaftlichen Flächen gelangt. Die weiteren Schwermetalle können jedoch während des Prozesses sehr gut in die Gasphase transferiert und im Anschluss an die Rauchgasreinigung konzentriert abgelagert werden (Zielpfad Deponie). Organische Spurenstoffe sind im Endprodukt nicht nachweisbar, womit auch keine Spurenstoffe über das Endprodukt in die Landwirtschaft gelangen.

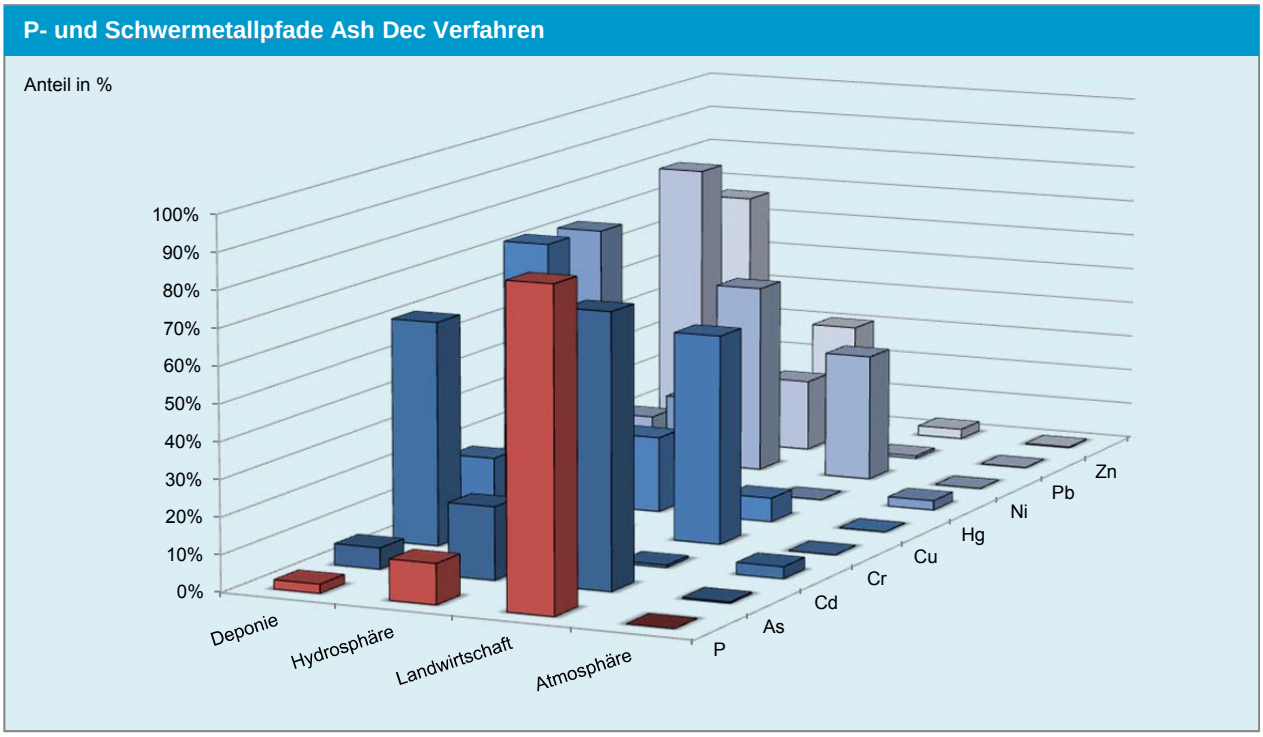


Abbildung 22: P-und Schwermetallpfade in % bezogen auf Zulauf der Referenzkläranlage (Ash Dec®)

1.3.3.4 Ergebnis Endprodukt

Endprodukt aus dem Ash Dec® Prozess ist eine von Schwermetallen entfrachtete Asche. Die Schwermetallgehalte für Cd, Cu, Pb, Zn können größtenteils entfernt werden. Allerdings können As, Cr und Ni nur unzureichend entfernt werden und sind deshalb in erhöhten Konzentrationen im Endprodukt nachweisbar. Anzumerken ist, dass im Endprodukt keine Cr(VI) nachweisbar ist. In Abbildung 23 werden die Schwermetallgehalte bezogen auf den P-Gehalt dargestellt. Verglichen werden die Referenzklärschlammasche, die entfrachtete Asche und ein handelsüblicher SSP-Dünger. Die Schwermetallgehalt im in der entfrachteten Asche liegen generell unter den geforderten Grenzwerten der Düngemittelverordnung. Bezogen auf den Hauptnähstoff Phosphor liegen die Schwermetallkonzentrationen teils über jenen eines handelsüblichen Mineraldüngers (SSP). Dies gilt vor allem für Kupfer, Nickel und Zink.

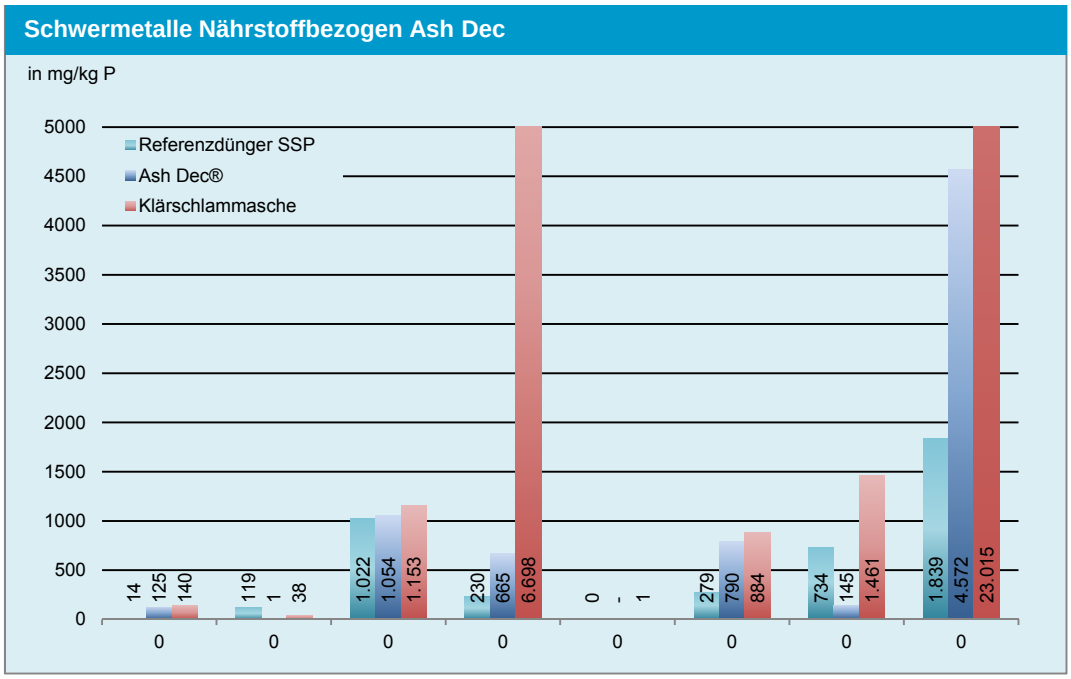


Abbildung 23: Nährstoffbezogene Schwermetallaufbringung Ash Dec® Endprodukt Vergleich Handelsdünger (SSP) und Klärschlammasche

Bewertung Endprodukt	Ash Dec®	SSP
Löslichkeit	Mäßig	Sehr Gut
Düngewirksamkeit	Schlecht/Mäßig	Sehr Gut
Monetäre Wert [€/t Endprodukt]	271	230
Anorganische Verunreinigungen		
SM:P [mg Cd/kg P]	0,7	118
Schadeinheit [SE/kg P]	0,08	1,26
Referenzbodenmethode [*limitierendes Element)	1.200 (Ni*)	1.450 (Cd*)
Tolerierbare Menge bezogen auf Cd	21	-
Organische Verunreinigungen		
Keine organische Spurenstoffe	5[2]	5
Keine hygienischen Bedenken	5[2]	5
Handhabung		
Einfache Lagerung möglich	5	5
Direkter Einsatz in LW möglich	5	5

Tabelle 20: Bewertung Ash Dec® Endprodukt

Das Cd:P Verhältnis ist mit 0,7 mg Cd/kg P äußerst gering und liegt deutlich unter jenem eines handelsüblichen Düngers (SSP). Das Schadeinheitenmodell und die Referenzbodenmethode verdeutlichen jedoch, dass im Vergleich zu anderen Endprodukten noch hohe Gehalte an Schwermetallen im Endprodukt nachweisbar sind. Theoretisch kann die entfrachtete Asche rund 1.200 Jahre aufgebracht werden bis die tolerierbare Konzentration des ersten begrenzenden Schwermetalls erreicht wird. In diesem Fall ist Nickel das limitierende Element. Bei der Betrachtung der maximal tolerierbaren Menge bezogen auf den Cd, könnte das Endprodukt im Vergleich zum SSP um den Faktor 21 mal häufiger ausgebracht werden. Organische Spurenstoffe bzw. hygienische Bedenken sind aufgrund der Prozessführung nicht möglich (+[2]). Es werden Pellets erzeugt, die problemlos gelagert werden können oder direkt mithilfe moderner Ausbringungsgeräte in der Landwirtschaft ausgebracht werden.

1.3.4 Ökonomische Bewertung

1.3.4.1 Up- and Downscaling Investitionskosten Ash Dec®

Wesentliche Voraussetzung für größenabhängige Kostenkalkulationen ist die Annahme und Festlegung von Up- und Downscalingfaktoren. Auf Basis der vorliegenden Investitionskosten für das Ash Dec® Verfahren unterschiedlicher Größenordnung wird eine Beziehung zum jährlichen Aschedurchsatz und den entsprechenden Kosten hergestellt. Die Datengrundlage für die Investitionskurve stammen aus den EU-Projekt SUSAN und werden durch die persönliche Mitteilung von Hermann Ludwig gestützt. Die Unsicherheit der Daten liegt bei rund +/-1 Mio. €.

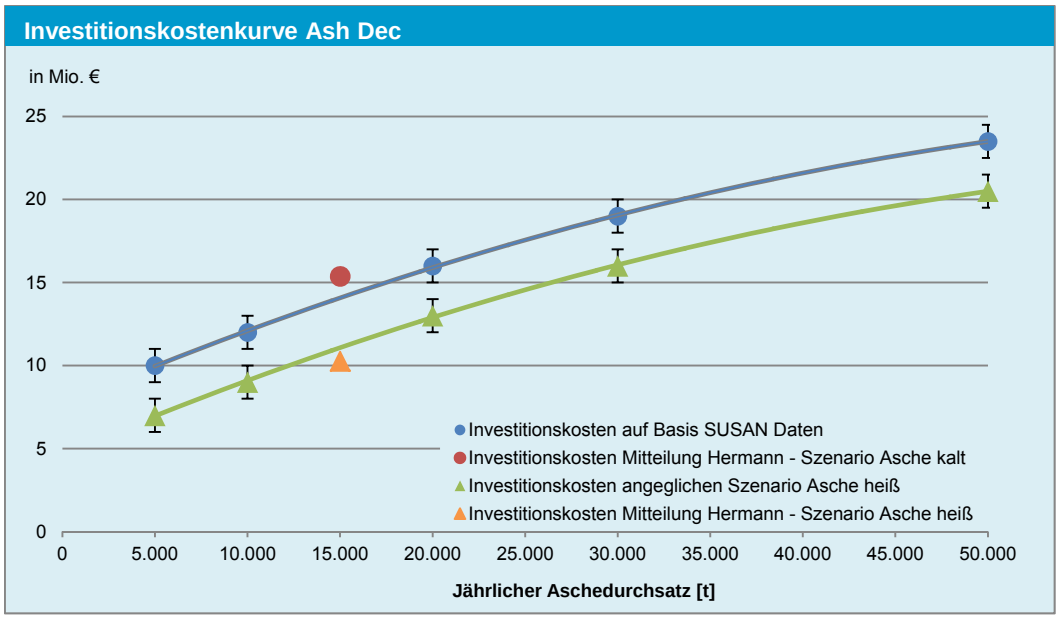


Abbildung 24: Investitionskostenkurve Ash Dec®

Abbildung 24 verdeutlich, dass die Investitionskosten nicht proportional zum jährlichen Aschedurchsatz steigen. Das bedeutet, dass z.B. die Investitionskosten für eine Anlage mit 5.000 t/a bei rund 10 Mio. € liegen, während bei einer Anlage mit vierfachen Durchsatz die Investitionskosten um nur ca. 50 % steigen.

1.3.4.2 Jahreskosten

Die Kostenkalkulation wird auf Basis der Daten der Machbarkeitsstudie von Ludwig Hermann auf eine 30.000 t Anlage ohne direkte Verwertung der heißen Asche hochgerechnet. Die Investitionskosten für diese Ausbaugröße liegt im Bereich von 19 ± 1 Mio. €. Eine detaillierte Aufgliederung der Kosten für die einzelnen Anlagenteile ist nicht möglich. Wartungskosten werden mit 3 % der Investitionskosten festgelegt. Der Personalaufwand bei dieser Ausbaugröße mit 5 MA/Jahr angenommen werden. Die Kosten für die Betriebsmittel werden auf Basis des Sachbilanz ermittelt.

Jahreskosten	Menge [t bzw. kWH]	Preis/Einheit	€/a
Kapitalkosten			**1.960.000**
Wartung + Reparaturen			570.000
NaCl	1.260	80 €/t	100.800
$MgCO_3$	2.280	100 €/t	228.000
$NaHCO_3$	360	240 €/t	86.400
O_2	1.140	80 €/t	115.200
Gas	17.400.000	0,035 €/kWh	609.000
Energie	3.210.000	0,1 €/kWh	321.000
Sonstiges	-	-	-
Entsorgung	1.950	50 €/t	97.500
Betriebskosten			**2.378.000**

Gesamt	**4.340.000**

Tabelle 21: Jahreskosten Ash Dec® (Referenzkläranlage 30.000 t Asche)

Einsparungen/Erlöse	Menge (kg)	Preis/Einheit	€/a
Ascheannahme	30.000	50 €/t	1.500.000
Verkauf Endprodukt (Var. 1)	30.000	1 €/t	30.000
Verkauf Endprodukt (Var. 2)	30.000	270	8.100.000
Gesamt Variante 1			**2.810.000**
Gesamt Variante 2			**-5.261.000**

Tabelle 22: Einsparungen und Erlöse Ash Dec® (Referenzkläranlage 30.000 t Asche)

Spezifische Kosten		
€/kg $P_{rückgewonnen}$	1,8-2,2	
€/EW*a	1,3-2,3	
€/E*a	2,6-4,6	
Spezifische Kosten (nach Erlösen)	**Variante 1**	**Variante 2**
€/kg $P_{rückgewonnen}$	1,8	-2,1
€/EW*a	1,2	-1,5
€/E*a	2,4	-3,0

Tabelle 23: Spezifische Kosten Ash Dec® (Referenzkläranlage 30.000 t Asche)

1.3.4.3 Variantenrechnung

Wie bereits erwähnt liegen unterschiedliche Datensätze hinsichtlich der Investitionskosten aber auch des Ressourcenbedarf vor. Abbildung 24 zeigt anhand der Linien die Kostenentwicklung für die verschiedenen Anlagengrößen (Datengrundlage Machbarkeitsstudien Hermann). Blau dargestellt sind die Kosten im Falle des Endproduktverkaufs zu einem Preis von 1 €/t bzw. schwarz zu einem Preis von 270 €/t. Die roten Punkte stellen die Kosten dar, die auf Basis der SUSAN Daten berechnet wurden.

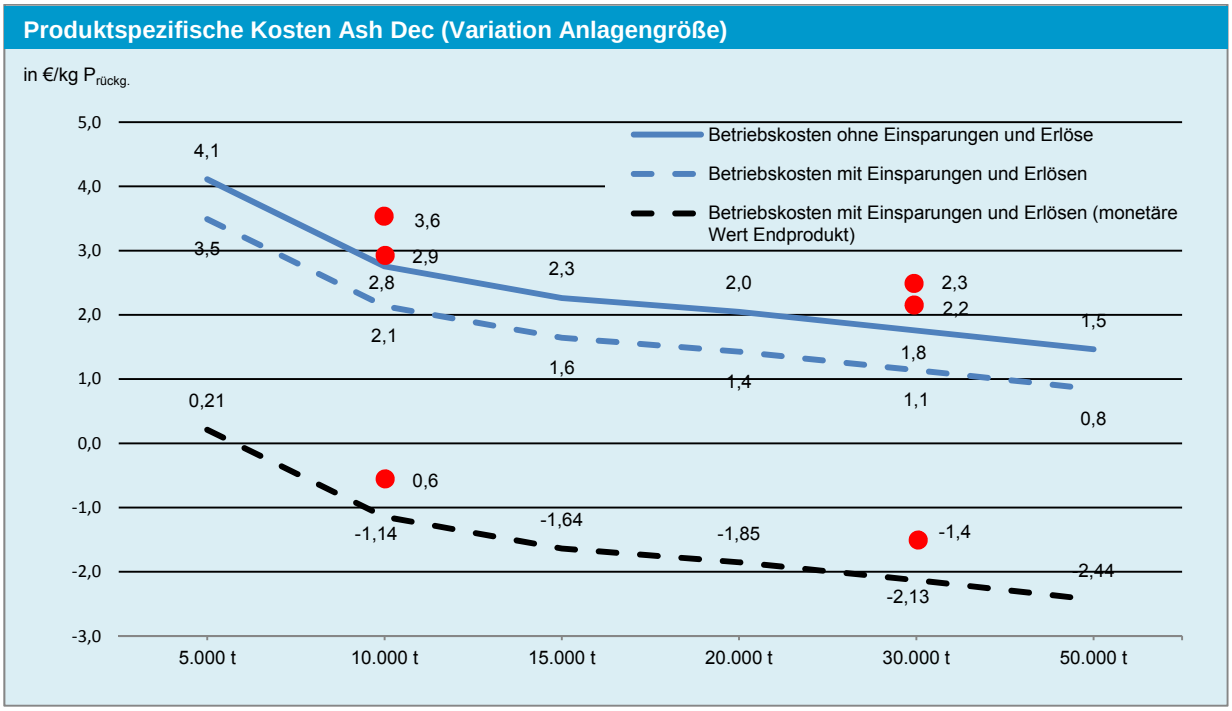


Abbildung 25: Produktspezifische Kosten Ash Dec®, Variation Anlagengröße und Erlöse aus Endprodukt

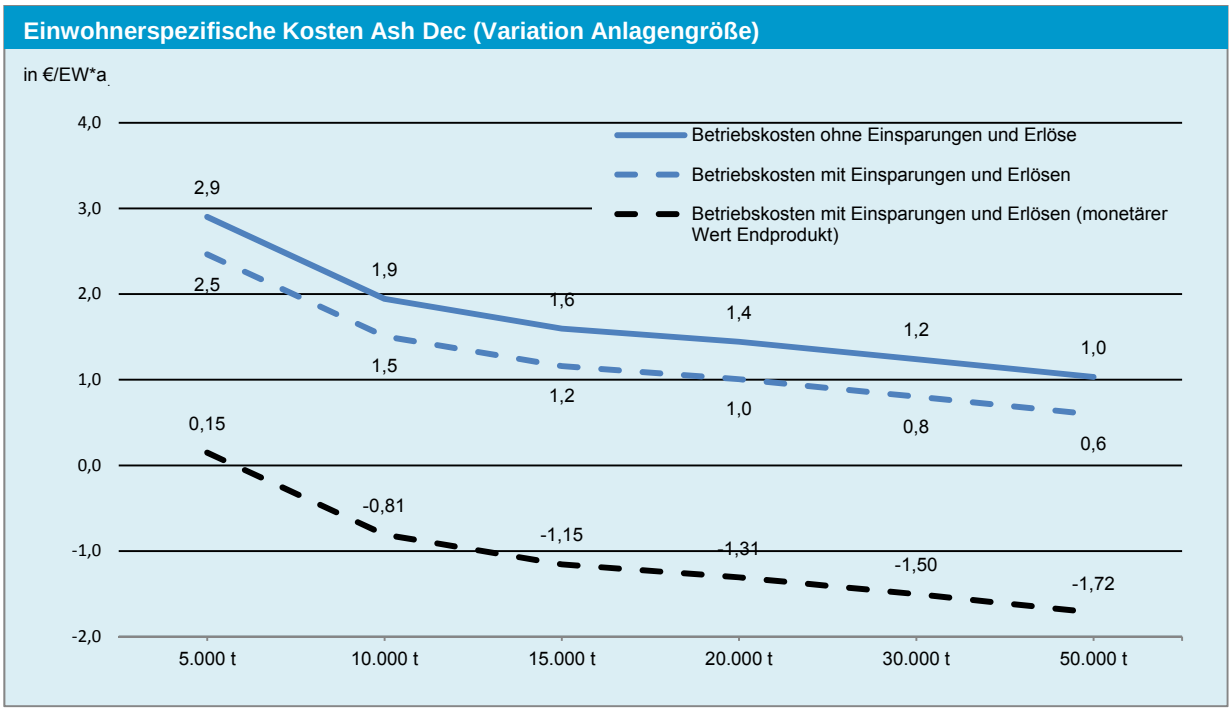


Abbildung 26: Einwohnerspezifische Kosten Ash Dec®, Variation Anlagengröße und Erlöse aus Endprodukt

Neben der Neuerrichtung eines Ash Dec® Verfahrens in nicht unmittelbarer Nähe zu einer Verbrennungsanlage (Szenario „Kalte Asche“, kann dieses Verfahren auch direkt in eine Verbrennungsanlage implementierte werden (Szenario „Heiße Asche“). Daraus ergeben sich veränderte Kosten zum einen aus Möglichkeit der Einleitung der entstehenden Rauchgase in eine bestehende Rauchgasreinigung und dem damit nicht erforderlichen Neubau und zum anderen aus dem variierenden Rohstoffbedarf (Abbildung 27).

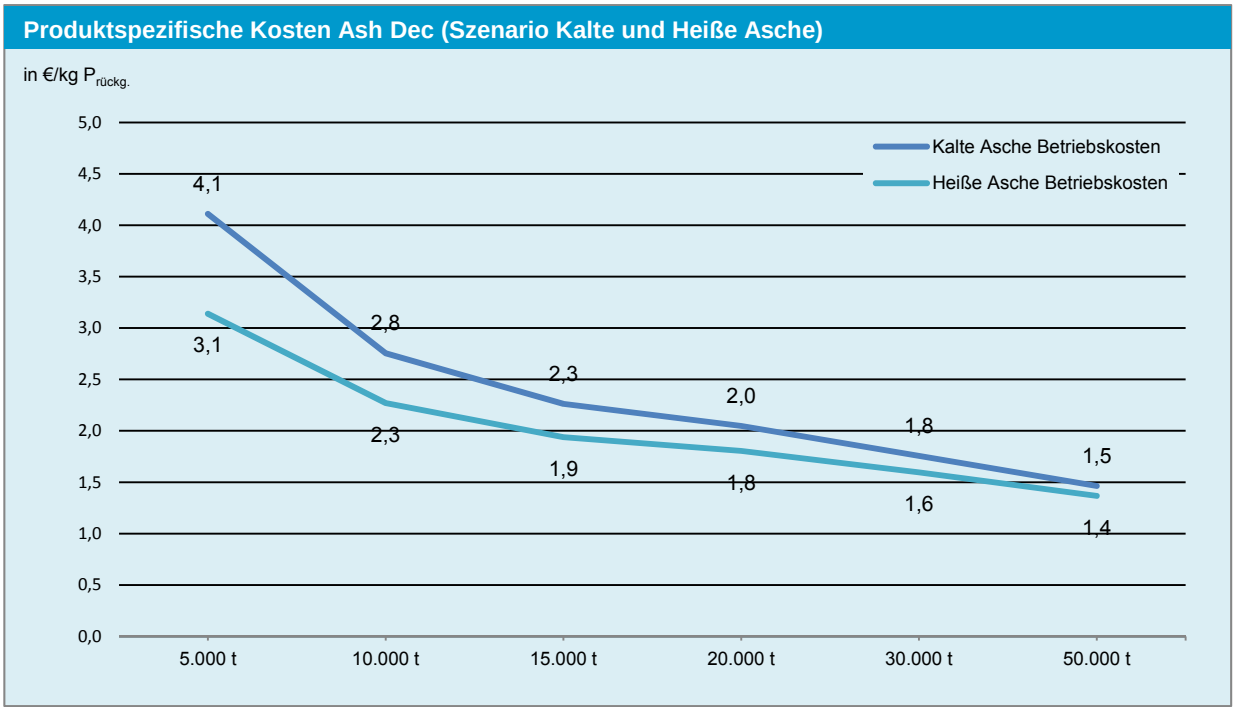


Abbildung 27: Vergleich produktspezifischer Kosten der Szenarien „Kalte und Heiße Asche“

1.3.4.4 Kostenanalyse auf Basis variierender P-Gehalte in der Asche

Anzumerken ist, dass die Kostenberechnungen auf Basis einer Referenzklärschlammasche mit einem relativ hohen P-Gehalt von 8,4 % durchgeführt wurden. In der folgenden Kostenbetrachtung werden die Kosten für Aschen mit einem P-Gehalt von 4 %, 6 %, 8,4 % und 10 % ermitteln. Datengrundlage ist wie bisher die

Machbarkeitsstudie für eine 30.000 t Anlage. Die roten Ballons zeigen, dass mit abnehmendem P-Gehalt in der Asche die Kosten ohne Berücksichtigung der Einsparungen und Erlöse steigen. Die einwohnerspezifischen Kosten bleiben konstant. Werden mögliche Einsparungen und Erlöse miteinberechnet ergibt sich das Bild (grüne Blasen), dass mit zunehmendem P-Gehalt in der Asche mehr Gewinn erwirtschaftet werden kann. Deutlich wird aber auch, dass wenn Aschen mit einem Gehalt von 4 - 5% eingesetzt werden, die Wirtschaftlichkeit nicht mehr gegeben sein kann.

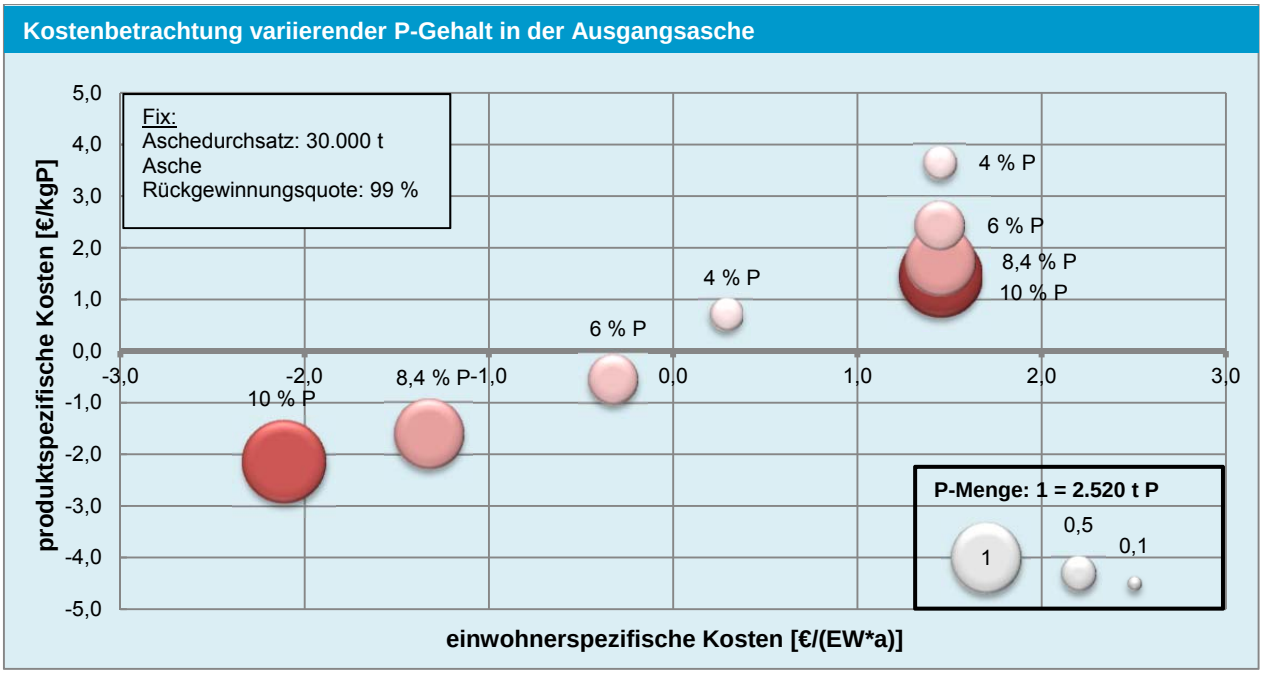


Abbildung 28: Kostenbetrachtung mit variierendem P-Gehalt in der Ausgangsasche

1.3.4.5 Kostenaufgliederung

Abbildung 29 zeigt die deutlich voneinander abweichende Kostenaufgliederung aufgrund der unterschiedlichen Datengrundlage. Das Ash Dec® Verfahren ein Verfahren komplexes Anlagenteilen wie z.B. Drehrohr die sehr kostenintensiv sind. Dadurch liegt der Anteil der Kapitalkosten im Bereich von 33 – 45 %. Im Vergleich dazu liegen die Kapitalkosten von z.B. nasschemischen Rückgewinnungsverfahren aus der Asche bei maximal 5 %. Grund dafür sind die einfachen Anlagenlagenteile wie Reaktionsbehälter, Pumpen. Das bedeutet, dass die Anlagengröße im Falle des Ash Dec® Verfahren ein wesentlicher Faktor für die Gesamtkosten ist.

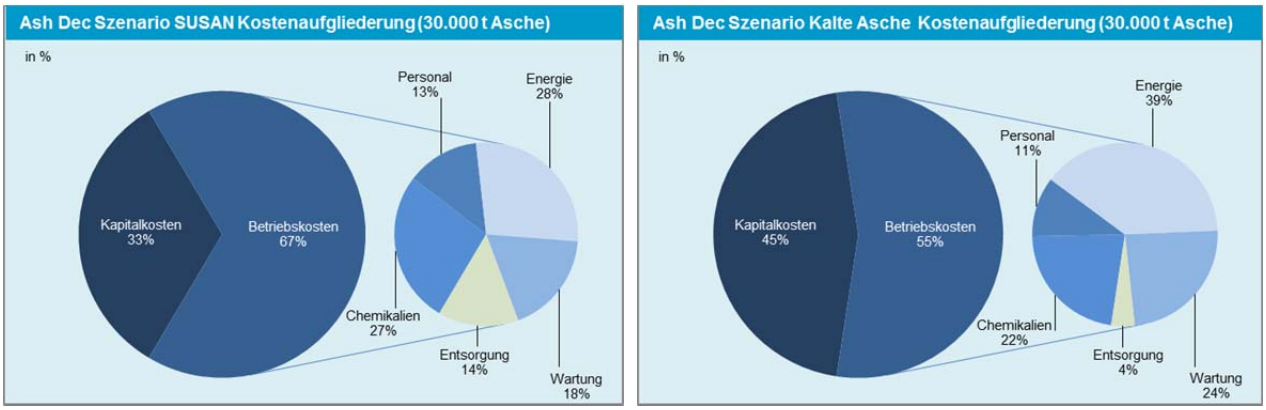


Abbildung 29: Kostenaufgliederung Ash Dec 30.000 t/a Szenario SUSAN (links) und Szenario Kalte Asche (rechts)

1.3.4.6 Amortisation

Anhand der Kapitalwertmethode (Jahreskosten ohne Kapitalkosten abzüglich sämtlicher Einsparungen bzw. Erlöse) wird für die 30.000 t Anlage eine mögliche Amortisationszeit errechnet. Diese ist sehr stark abhängig von den möglichen Erlösen aus dem Verkauf der entfrachteten Asche. Wird mit einem Erlös von nur 1€/t

Asche kalkuliert stellt sich keine Amortisation der Anlage ein. Wird als Erlös der monetäre Wert des Produktes angesetzt, so ist eine Amortisation bereits nach 3 Jahren möglich.

1.3.4.7 Kosten gesamte Prozesskette

Wie bereits bei den vorangegangenen Kostenkalkulationen zeigt sich, dass die möglichen Erlöse einen starken Einfluss auf die Gesamtkosten und damit auf die Kosten bei Betrachtung der gesamten Prozesskette haben (Tabelle 23). Unter der Voraussetzung, dass nur die Ascheannahme und der Verkauf des Produktes um 1 €/t entfrachteter Asche, bei den Erlösen berücksichtigt wird, liegen die Kosten abhängig vom Szenario rund 17 – 28 % über den Kosten der Referenzsituation. Neben den Kosten für das Rückgewinnungsverfahren wirken sich auch die höheren Kosten für die erforderliche Monoverbrennung negativ auf die Gesamtkosten aus. Wird allerdings der monetäre Wert des Endproduktes berücksichtigt, so liegen die Kosten geringfügig unter bzw. nur leicht über den Kosten der Referenzsituation (-4 - +7 %).

Kostenstellen (Kosten in €/EW*a)	SUSAN	Kalte Asche	Heiße Asche
Kläranlage			
Abwasserreinigung	4,50	4,50	4,50
Schlammbeh. inkl. Entwässerung	1,50	1,50	1,50
Kosten Kläranlage	6,00	6,00	6,00
Rückgewinnungsverfahren	2,16	1,21	1,10
Entsorgung Filterkuchen Ash Dec	0,03	0,03	0,03
Monoverbrennung	5,22	5,22	5,22
Entsorgung			
Bettasche (MonoV)	0,01	0,01	0,01
Filterkuchen (MonoV)	0,06	0,06	0,06
Transport			
Schlamm zu Verbrennung	0,98	0,98	0,98
Asche zu Rückgewinnung	0,04	0,04	0,04
Bettaschasche zu Deponie	0,01	0,01	0,01
Filterkuchen (MonoV + Ash Dec) zu Untertagedeponie	0,07	0,07	0,07
Summe Kosten (gerundet)	14,60	13,6	13,5
Einsparungen und Erlöse			
Aschannahme	0,43	0,43	0,43
Erlös Endprodukt (Var.1)	0,00	0,00	0,00
Erlös Endprodukt (Var.1)	2,31	2,31	2,31
Summe Einsparungen und Erlöse		0,43 bzw. 2,31	
Gesamtkosten	11,9-14,2	10,8-13,2	10,7-13,0
Δ zu Referenz	**+7-28%**	**-2-+18%**	**-4-+17%**

Tabelle 24: Jahreskosten gesamte Prozesskette Ash Dec®

Kläranlage	MonoV	Ash Dec®	Entsorgung Bettasche, Filterkuchen	Transport	Einsparungen Ascheannahme, Verkauf Endprodukt
6,0 €	5,2 €	1,1-2,1 €	0,2 €	1,1 €	0,4 €
Gesamt: 13,0-14,2 €/EW*a					
Vergleich zur Referenz: Δ absolut: + 1,9-3,1 €/EW*a; Δ %: + 17-28 %					

Abbildung 30: Kosten gesamte Prozesskette Ash Dec® Verfahren 30.000 t (ohne Erlöse als monetärer Wert)

Kläranlage	MonoV	Ash Dec®	Entsorgung Bettasche, Filterkuchen	Transport	Einsparungen Ascheannahme, Verkauf Endprodukt
6,0 €	5,2 €	1,1-2,1 €	0,2 €	1,1 €	2,9 €
Gesamt: 10,7-11,9€/EW*a					
Vergleich zur Referenz: Δ absolut: - 0,4-+0,8€/EW*a; Δ %: -4- +7%					

Abbildung 31: Kosten gesamte Prozesskette Ash Dec® Verfahren 30.000 t (mit Erlöse als monetärer Wert)

1.3.4.8 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse in Abbildung 32 verdeutlicht, dass die Preisänderung für Rohstoffe (+20 %) keinen wesentlichen Einfluss auf die Gesamtkosten dieses Verfahrens haben. Auch die höheren Investitionskosten haben maximal eine Preissteigerung von 8 % zur Folge. Deutlich höher ist der Einfluss des P-Gehaltes in der Asche. Liegt dieser bei 75 bzw. 50 % der Referenzasche ist eine Zunahme der produktspezifischen Kosten von 33 bzw. 100 % zu erwarten.

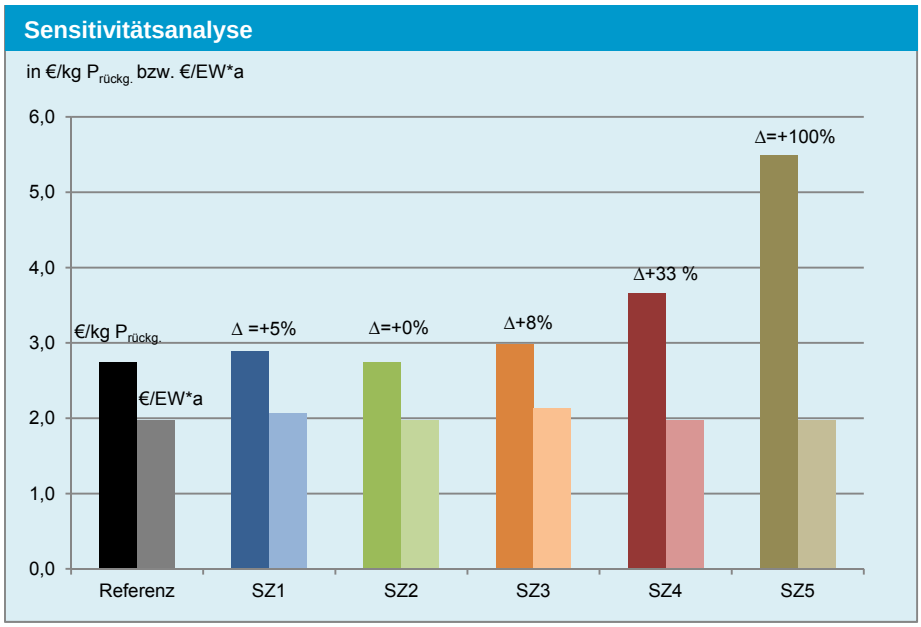


Abbildung 32: Sensitivitätsanalyse Ash Dec®

1.3.5 Literatur

Kuderna, M. (2008) ASH DEC Präsentation Phoskraft_Wirkung. Susan Projekt. Phoskraft® Renewable P-Fertilizer 25. Juni 2008 Wien

Adam, C. (2008) Optionen der landwirtschaftlichen Verwertung von P aus der Abwasserreinung: Technische Möglichkeiten. Präsentation aus Braunschweiger Nährstofftage, 10.-11.11.2008. Julius Kühn-Institut Braunschweig.

Adam, C. (2009) SUSAN - Sustainable and safe re-use of municipal sewage sludge for nutrient recovery. Specific Targeted Research Project (STREP), Sub-priority: “Global Change and Ecosystems”. Final Activity Report.

Adam, C., Vogel, C., Wellendorf, S., Schick, J., Kratz, S., Schnug, E. (2009a) Phosphorus recovery by thermochemical treatment of sewage sludge ash - Results of the European FP6-project SUSAN. Ashley, K., Mavinic, D. and Koch, F. (eds), pp. 417-430, IWA Publishing, Vancouver, British Columbia, Canada.

Adam, C., Peplinski, B., Michaelis, M., Kley, G., Simon, F.-G. (2009b) Thermochemical treatment of sewage sludge ashes for phosphorus recovery. Waste management 29, pp. 1122 - 1128.

Hermann, L. (2008) ASH-DEC Firmenpräsentation. P- und Mehrnährstoffdünger aus Klärschlamm; Industrial Process and Pilot Plant; Agriculture and Fertilizers, Analysis, Lesson, Solution; PhosKraft - Renewable P-Fertilizer. Wien.

Hermann, L. (2013) persönliche Mitteilung, Datengrundlage Machbarkeitstudien Ash Dec mit variiender Ausbaugröße und integration in Verbrennungsprozess.

Lederer, J., Rechberger, H. (2010) Comparative goal oriented assessment of conventional and alternative sewage sludge treatment options. Waste Management 30, pp. 1043 - 1056.

Mattenberger, H., Fraissler, G., Brunner, T., Herk, P., Hermann, L., Obernberger, I. (2008) Sewage sludge ash to phosphorus fertiliser: Variables influencing heavy metal removal during thermochemical treatment. Waste Management 28, pp. 2709-2722.

Nowak, B., Perutka, L., Aschenbrenner, P., Kraus, P., Winter, F. (2010) Sewage Sludge Ash To Phosphate Fertilizer By Thermochemical Treatment. Papers and Proceedings “ISWA World Congress 2010 on Urban Development and Sustainability”, 15.-18. Nov. 2010, Hamburg.

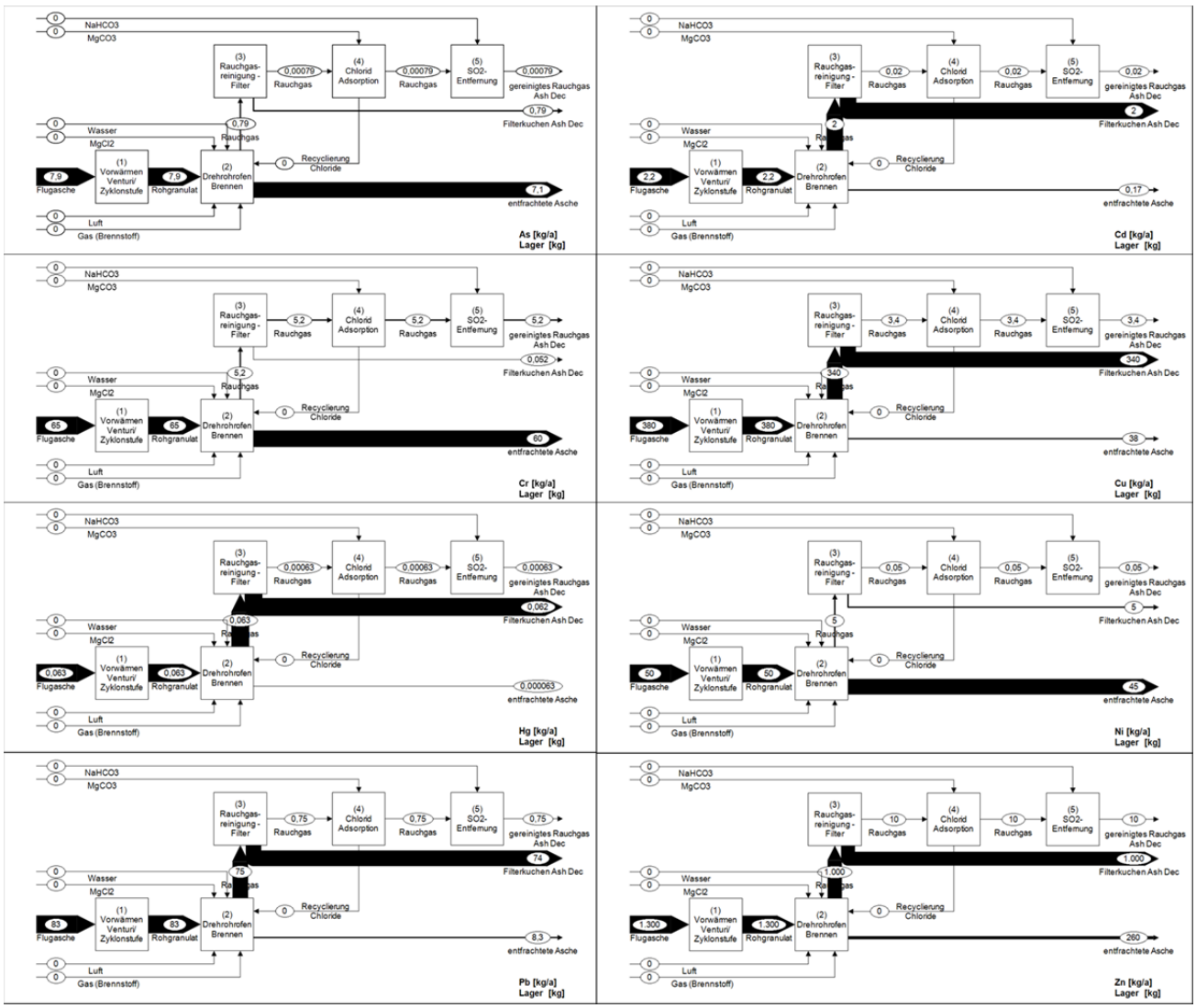
Rechberger, H., Klonk, J. (2005) SUSAN - Sustainable and Safe Re-use of municipal sewage sludge for nutrient recovery. Deliverable D07. Report on description and characterisation of selected sewage sludge management options. Institute of Water Quality, Resources and Waste Management. Vienna University of Technology. Vienna.

Rechberger, H., Klonk, J., Lederer, J. (2007) SUSAN - Sustainable and Safe Re-use of municipal sewage sludge for nutrient recovery. Deliverable D14. Report on ecological assessment of sewage sludge management options. Institute of Water Quality, Resources and Waste Management. Vienna University of Technology. Vienna.

Römer, W. (2013) Phosphor-Düngewirkung von P-Recyclingprodukten. Korrespondenz Abwasser, Abfall. Vol. 60 (3), pp. 202-215.

1.4 Anhang

1.4.1 Stoffflussanalyse Ash Dec®



1.4.2 Stoffflussanalyse Gesamtprozess Ash Dec®