



Detaillierte Verfahrensbeschreibung, Datengrundlage und Ergebnisse

**Direkte landwirtschaftliche
Verwertung
Monoverbrennungsasche**



Inhaltsverzeichnis

Direkte Klärschlammascheverwertung	5
1.1 Grundlagen allgemein	5
1.1.1 Prozessskizze direkte Ascheverwertung	5
1.2 Datengrundlage für Bewertung.....	6
1.2.1 Stoffflussanalyse.....	6
1.2.2 Charakteristik Endprodukt	6
1.2.3 Umsetzung.....	7
1.2.4 Flächenbedarf.....	7
1.2.5 Ökonomische Grundlagen.....	7
1.3 Ergebnis direkte Ascheverwertung.....	8
1.3.1 Technologie Bewertung.....	8
1.3.2 Ökologische Bewertung (Systemgrenze Verfahren)	8
1.3.3 Ganzheitliche ökologische Bewertung direkte landwirtschaftliche Ascheverwertung	9
1.3.4 Literatur.....	15
1.4 Anhang	16
1.4.1 Stoffflussanalyse Gesamtprozess direkte Ascheverwertung	16

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prozessskizze direkte Ascheverwertung STAN-Modell	5
Abbildung 2: Klärschlammaschen: Eisenasche (links), Aluminiumasche (rechts).....	7
Abbildung 3: Stoffflussanalyse P: Gesamte Prozesskette (2 signifikante Stellen).....	8
Abbildung 4: Ergebnis Güterflussanalyse unbehandelte Asche (2 signifikante Stellen).....	9
Abbildung 5: Einwohnerspezifischer kumulierter Energieaufwand in kg/EW*a für die direkte Ascheverwertung.....	10
Abbildung 6: Ganzheitlicher kumulierter Energieaufwand direkte Ascheverwertung in kWh/EW*a	10
Abbildung 7: Veränderung der gasförmigen Emissionen und des KEA in Relation Referenzsituation	11
Abbildung 8: P- und Schwermetallpfade in % bezogen auf Zulauf der Referenzkläranlage (unbehandelte Asche)	11
Abbildung 9: Schwermetallgehalte bezogen auf mit Klärschlammasche, Vergleich Handelsdünger (SSP).....	12
Abbildung 10: Nährstoffbezogene Schwermetallaufbringung mit Klärschlammasche, Vergleich Handelsdünger (SSP).....	12
Abbildung 11: Kosten gesamte Prozesskette direkte Ascheverwertung (Erlöse aus dem Verkauf der P-reichen Asche).....	14
Abbildung 12: Kosten gesamte Prozesskette direkte Ascheverwertung (ohne Erlöse aus dem Verkauf der Asche)	14

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Klassifizierung der Klärschlammaschen nach Petzet und Cornel, 2010.....	6
Tabelle 2: Nährstoff-, (Schwer)-metallgehalte Klärschlammasche	6
Tabelle 3: Löslichkeit in % bezogen auf P _{ges} der Klärschlammasche.....	7



Tabelle 4: Komplexität, Umsetzung und Rückgewinnungspotential direkte Ascheverwertung	8
Tabelle 5: Einflussfaktoren ganzheitliche Bewertung direkte Ascheverwertung.....	9
Tabelle 6: Transportwege unbehandelte Asche.....	9
Tabelle 7: CO ₂ bzw. SO ₂ -Äquivalente Prozesskette direkte Ascheverwertung	10
Tabelle 8: Kumulierter Energieaufwand gesamte Prozesskette	10
Tabelle 9: Bewertung unbehandelte Asche.....	13
Tabelle 10: Jahreskosten gesamte Prozesskette unbehandelte Asche	14

Direkte Klärschlammascheverwertung

1.1 Grundlagen allgemein

Die thermische Behandlung von Klärschlamm werden folgende Ziele erreicht:

- Energetische Nutzung des Energiegehalts
- Volums- und Massereduktion durch verdampfen des Wasseranteils und Oxidation der organischen Substanz
- Inertisierung und Hygienisierung
- Anreicherung der Pflanzennährstoffe Phosphor (5,5 – 11 % P), Calcium, Magnesium und Kalium
- Quecksilberentfrachtung (bis zu 95 % im Rauchgas)

Gleichzeitig werden die Schwermetalle As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb und Zn in der Asche angereichert. Stickstoff wird vollständig oxidiert und gelangt über das Rauchgas in die Atmosphäre.

Die thermische Behandlung von Klärschlamm bei ca. 850 °C bedingt eine annähernd vollständige Zerstörung der organischen Substanz. Der Aschegehalt eines Klärschlammes liegt im Bereich von ist abhängig vom Gehalt an anorganischer Substanz und somit von der vorangegangenen Behandlung in der Kläranlage.

1.1.1 Prozessskizze direkte Ascheverwertung

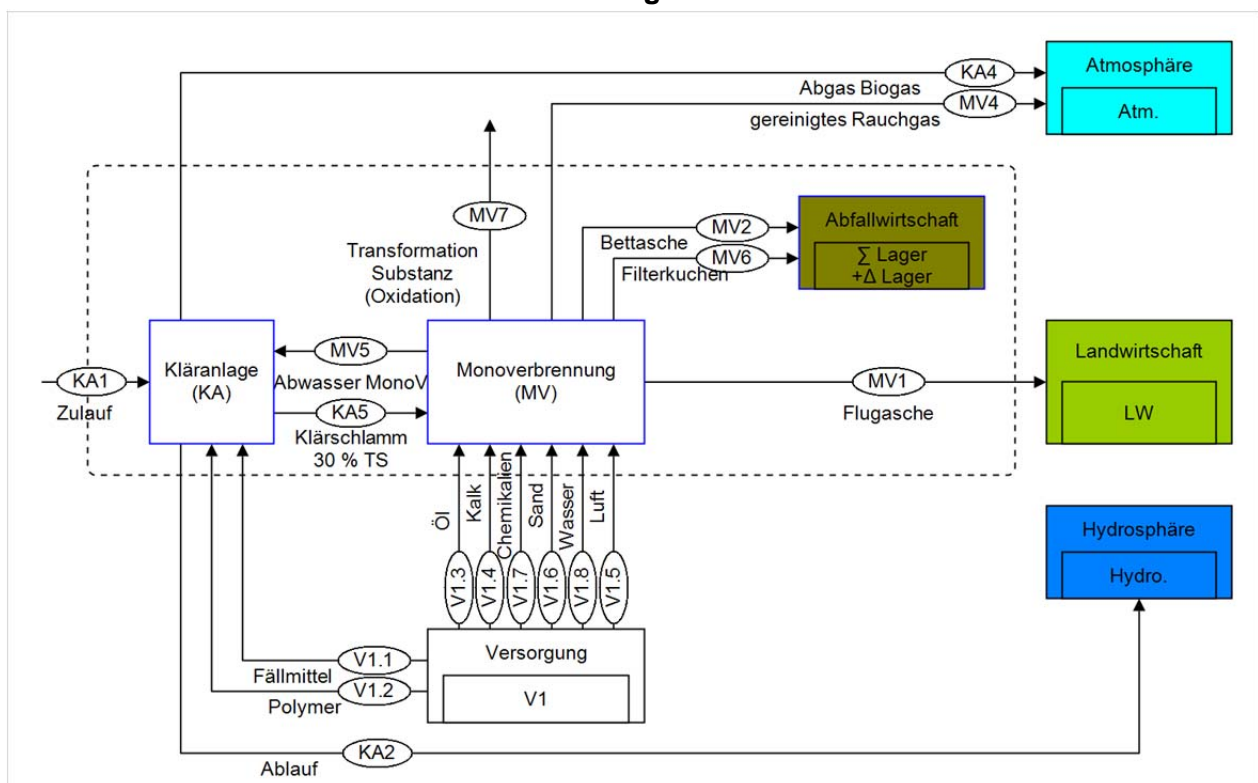


Abbildung 1: Prozessskizze direkte Ascheverwertung STAN-Modell

1.2 Datengrundlage für Bewertung

1.2.1 Stoffflussanalyse

Siehe Referenzsituation

1.2.2 Charakteristik Endprodukt

1.2.2.1 Grundlegende Klassifizierung von Aschen (Schaum, 2007).

Grundsätzlich werden Klärschlammaschen nach deren Gehalt an Eisen und Aluminium klassifizieren. Der Gehalt ist stark abhängig vom eingesetzten Fällmittel bei der Abwasserreinigung. Neben der Aluminiumzugabe durch Fällmittel sind Zeolithe in den Waschmitteln eine bedeutende Quelle für Al im Klärschlamm und weiterer Folge in der Klärschlammasche (Schaum, 2007).

Input	Aschebestandteile	Al-Gehalt	Fe-Gehalt	Klassifizierung	Aschefärbung
Gemisch Al-Phosphate und CaP	CaP Quarz	>35 % Al_2O_3	<10 % (Fe_2O_3)	Aluminiumasche	gräulich
Gemisch Fe-Phosphate und CaP	CaP Hämatit	-	>10 % (Fe_2O_3)	Eisenasche	rot-bräunlich
BioP Klärschlamm	CaP Anorthit	-	-	-	-

Tabelle 1: Klassifizierung der Klärschlammaschen nach Petzet und Cornel, 2010

Röntgendiffraktometrische Untersuchungen an Klärschlammaschen zeigen vor allem kristallinen Strukturen wie Quarz, Hämatit (Fe_2O_3), Whitlockit und Anorthit. Unabhängig des eingesetzten Fällmittels (Eisen oder Aluminium) werden bei der Verbrennung Calciumphosphat gebildet. Calciumphosphate sind in der Asche sowohl als Whitlockit ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) als auch als Hydroxylapatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$) nachweisbar (Schirmer, 1998; Kull et al., 2006). Die Untersuchungen zeigen zudem, dass die Entstehung dieser Verbindungen stark von den Verbrennungsbedingungen abhängig ist.

Im Hinblick auf die Rückgewinnung von Phosphor aus der Asche muss die Löslichkeit von Calciumphosphat ausschließlich im sauren Bereich berücksichtigt werden.

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

Die Phosphor und Schwermetallgehalte in der 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. Aufgrund der vorangegangenen thermischen Behandlung sind keine organischen Spurenstoffe oder pathogene Keime im Endprodukt nachweisbar (+). Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse einer Literaturstudie verschiedenen Klärschlammaschen:

(1) Petzet und Cornel (2010), (2) Schaum (2007), (3) Faulstich et al. (2007), (4) Adam et al. (2008), (5) Werther et al (1997), (6) Montag et al. (2011) (7) Stubenvoll (2002)

Quelle	n	P	Ca	Mg	K	As	Cd	mg Cd/ kg P_2O_5	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
g/kg TS						mg/kg TS								
(1)	15	68	107	11	11	18	3	22	132	904	-	74	134	2485
(2)	15	70	152	13	-	-	-	-	-	907	-	-	-	2485
(3)	15	58	103	121	58	-	5	-	418	954	-	139	134	2481
(4)	7	93	107	13	12	17	3	16	103	947	-	58	153	1889
(5)	2	67	73	11	-	15	-	-	145	145	-	34	290	701
(6)	2	55	107	17	-	-	4	35	181	676	-	87	87	3080
(7)	1	-	117	15	1	12	10	-	108	-	1	87	378	2738
Mittelwert		69	110	28	20	15	5		181	755	1	80	196	2265
Min		55	73	11	1	12	3		103	145	1	34	87	701
Max		93	152	121	58	18	10		418	954	1	139	378	3080

Tabelle 2: Nährstoff-, (Schwer)-metallgehalte Klärschlammasche

1.2.2.3 P-Löslichkeit und Pflanzenaufnahme

Die in der Klärschlammasche vorliegenden P-Verbindungen sind nicht wasserlöslich. Mit Zitronensäure und Ameisensäure kann rund 30 % des gesamten Phosphors extrahiert werden. Betrachtet man nur die



Löslichkeitsparameter kann eine unbehandelte Klärschlammasche mit einem Rohphosphat verglichen werden. Die P Aufnahme der Pflanze aus der Asche liegt im Vergleich zu einem handelsüblichen SSP bei nur rund $20 \pm 10\%$ und kann damit nach Römer (2013) als ungeeignet eingestuft werden.

Phosphor kann aus der Asche nur mittels starker mineralischer Säuren wie Salz-, Schwefel-, Phosphorsäure in Lösung gebracht werden. Diese Methode wird zur Rücklösung von P in nasschemischen P-Rückgewinnungsverfahren angewendet.

Extraktionsmittel	Kratz (2008)	Rohphosphate
Wasser	0,01	0
Zitronensäure	36	19-20
Ameisensäure	28	40-60
Mineralsäure	-	75
Neutrales Ammoncitrat	35	
Alkalisches Ammoncitrat	29	

Tabelle 3: Löslichkeit in % bezogen auf P_{ges} der Klärschlammasche

1.2.2.4 Eignung als Sekundärdünger

Für Aschen mit Schwermetallgehalten unterhalb der gesetzlich vorgegebenen Grenzwerte, wäre eine direkte landwirtschaftliche Verwertung möglich. Kritisch zu beäugen sind die Eigenschaften der Klärschlammasche, vor allem im Hinblick auf die Verfügbarkeit des Phosphors. Des Weiteren kann der pH-Wert im stark basischen Bereich liegen. Die Wasser- bzw. Zitronensäurelöslichkeit unbehandelter Klärschlammasche liegt bei < 1 bzw. $< 30\%$ (Kratz, 2008). Mittels Aufbereitung durch saure Aufschlüsse kann eine Verbesserung der Wasserlöslichkeit, im speziellen bei Al-Aschen erzielt werden. Durch weitere Erhöhung der Schwefelsäuremenge können für Al-Aschen Aufschlussgrade $> 90\%$ angepeilt werden. Eisenhaltige Aschen eignen sich deutlich schlechter für eine Verbesserung der Pflanzenverfügbarkeit mittels eines sauren Aufschlusses.



Abbildung 2: Klärschlammaschen: Eisenasche (links), Aluminiumasche (rechts)

1.2.3 Umsetzung

unbekannt

1.2.4 Flächenbedarf

Keiner

1.2.5 Ökonomische Grundlagen

Kosten entstehen nur durch den Transport der Asche in die Landwirtschaft.

1.3 Ergebnis direkte Ascheverwertung

1.3.1 Technologie Bewertung

Direkte landwirtschaftliche Ascheverwertung	
Entwicklungsstand	-
Komplexität Technologie	-
Implementierung	Klärschlammasche
Wartungsaufwand	-
Veränderung Schlammbehandlung	Keine
Effektivität des „Verfahrens“	100%
Potential bezogen auf KA-Zulauf	86 %
Qualitativer Ressourcenaufwand	keiner
Abfallstoffe	keine
Negative Effekte auf Abwasserreinigung	keine

Tabelle 4: Komplexität, Umsetzung und Rückgewinnungspotential direkte Ascheverwertung

1.3.2 Ökologische Bewertung (Systemgrenze Verfahren)

1.3.2.1 Stoffflussanalyse P

Wird die Klärschlammasche direkt aufgebracht, hat dies im Vergleich zum Rückgewinnungsverfahren aus dem Schlammwasser oder dem Klärschlamm keinen Einfluss auf den Abwasserreinigungsprozess. Bezogen auf den Stofffluss Klärschlammasche entspricht dies einer 100 %igen P-Nutzung. Das P-Rückgewinnungspotential bezogen auf den Kläranlagenzulauf liegt bei 86 % bei damit bei 56.700 kg/a. Der P-Gehalt in der Flugasche liegt bei rund 8,5 %.

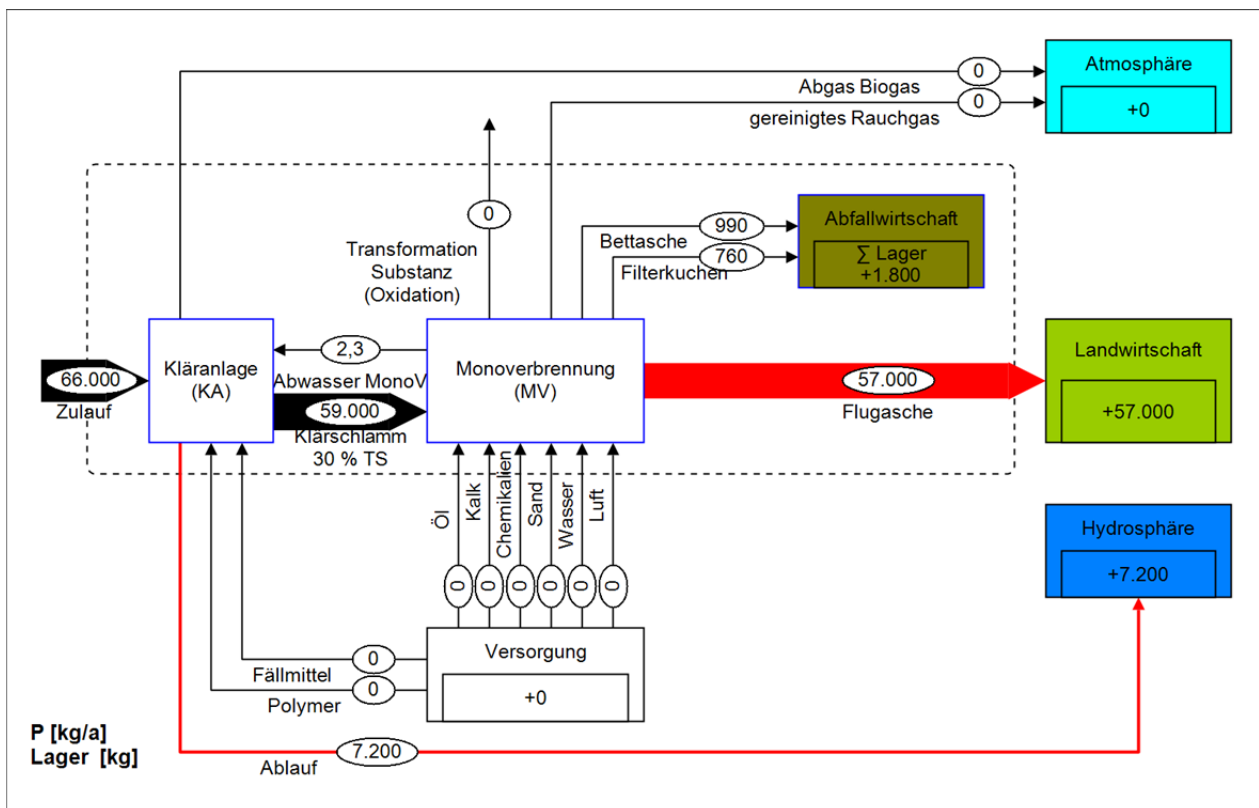


Abbildung 3: Stoffflussanalyse P: Gesamte Prozesskette (2 signifikante Stellen)

1.3.2.2 Ergebnisse Güterflussanalyse

Der Bedarf an Ressourcen beschränkt sich auf die Monoverbrennungsanlage (Siehe Bericht P-Recycling aus dem Abwasser, Kapitel Referenzsituation). Auf Basis der Referenzsituation fallen rund 670 t/a Klärschlammasche an.

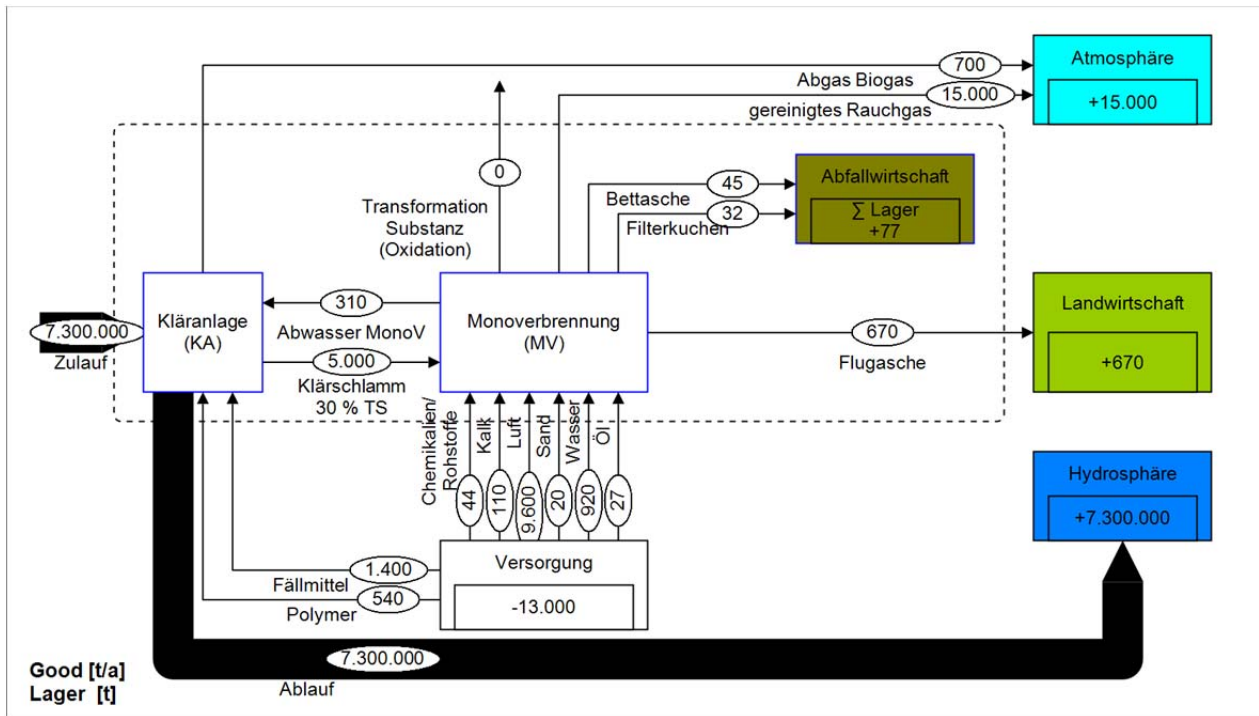


Abbildung 4: Ergebnis Güterflussanalyse unbehandelte Asche (2 signifikante Stellen)

1.3.3 Ganzheitliche ökologische Bewertung direkte landwirtschaftliche Ascheverwertung

Das Szenario der direkten Ascheanwendung in der Landwirtschaft wird nur ganzheitlich betrachtet, da keine gesonderten vorangegangenen Prozesse notwendig sind.

Faktor	Einfluss auf
Deponie	Die Deponierung der Asche entfällt -> Einfluss auf Emissionen
Verwertung Landwirtschaft	Eventuell Erlöse, verschiedenen Szenarien

Tabelle 5: Einflussfaktoren ganzheitliche Bewertung direkte Ascheverwertung

Berücksichtigung Transport

Filterkuchen aus der Monoverbrennung müssen Untertägig abgelagert werden. Die Bettasche kann auf einer Deponie abgelagert werden. Die Transportwege können auf Basis der Referenzsituation angenommen werden (Tabelle 6).

Transportwege	[t/a]	[tkm]	[€EW*a]
Klärschlamm – MonoV	4.975	696.500	0,98
Flugasche - Landwirtschaft	672	26.900	0,04
Bettasche - Reststoffdeponie	45	4.500	0,01
Filterkuchen MonoV- Untertagedeponie	32	32.000	0,04
Gesamt Transport		759.900	1,06

Tabelle 6: Transportwege unbehandelte Asche

1.3.3.1 Ergebnis Gasemissionen

Der gewichtigste Anteil für die Reduktion der Gasemissionen ist auf die Gutschrift für den in der Asche enthaltenen Phosphor zurückzuführen. Ein geringer Anteil der reduzierten Emissionen ist auch auf den Bereich Abfallwirtschaft (Deponien) zurückzuführen, da die anfallende Klärschlammasche nicht mehr abgelagert wird. Insgesamt können dadurch die CO₂-Emissionen um 21 % und die SO₂-Emissionen um 41 % reduziert (Abbildung 5)

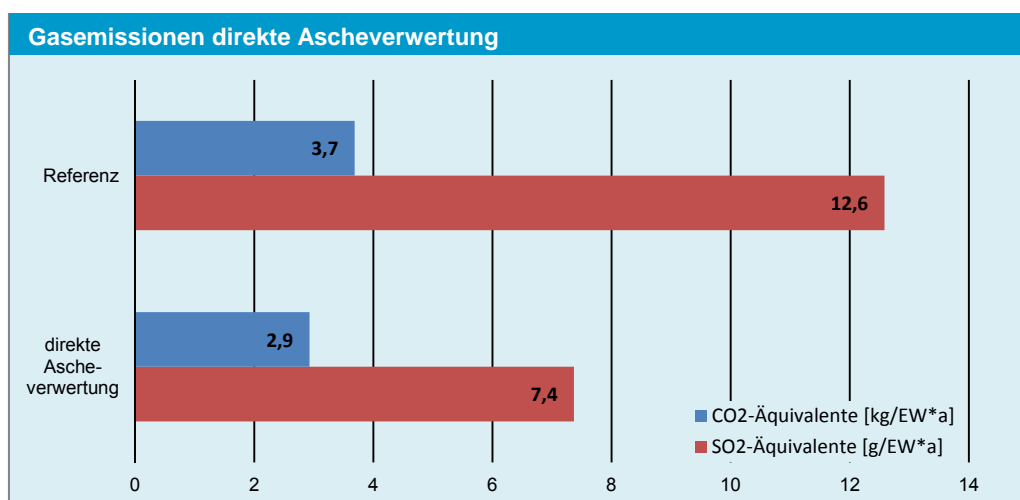


Abbildung 5: Einwohnerspezifischer kumulierter Energieaufwand in kg/EW*a für die direkte Ascheverwertung

CO ₂ -Äquivalente [kg/a]	
Direkte Ascheverwertung	292.700
Referenz	368.600
Δ	-21 %
SO ₂ -Äquivalente [kg/a]	
Direkte Ascheverwertung	740
Referenz	1.260
Δ	-41 %

Tabelle 7: CO₂ bzw. SO₂-Äquivalente Prozesskette direkte Ascheverwertung

1.3.3.2 Ergebnis kumulierter Energieaufwand

KEA [kWh/a]	
Direkte Ascheverwertung	828.700
Referenz	1.131.700
Δ	- 27 %

Tabelle 8: Kumulierter Energieaufwand gesamte Prozesskette

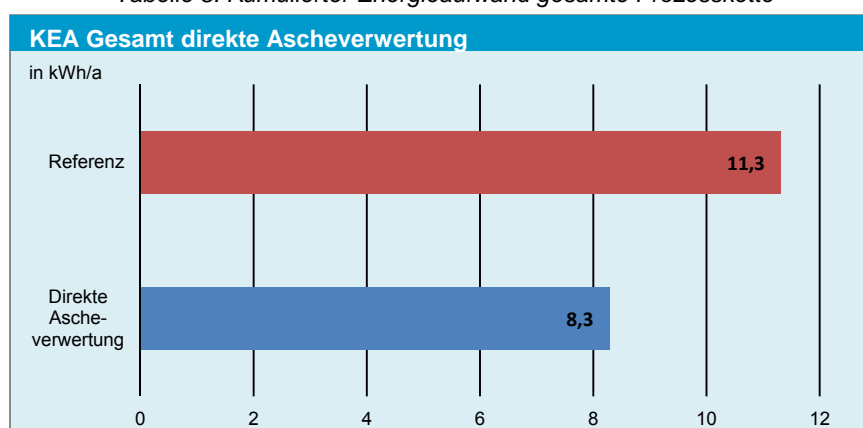


Abbildung 6: Ganzheitlicher kumulierter Energieaufwand direkte Ascheverwertung in kWh/EW*a

In Abbildung 7 werden die ökologisch relevanten Bewertungsparameter CO₂- und SO₂-Emissionen sowie der kumulierte Energieaufwand in Relation zur Referenzsituation zusammenfassend bezogen auf EW*a dargestellt. Die ökologische Bewertung verdeutlicht, dass durch die direkte Ascheverwertung in der Landwirtschaft eine erkennbare Reduktion der Gasemissionen und des kumulierten Energieaufwandes zu erwarten ist.

Systemgrenze gesamte Prozesskette

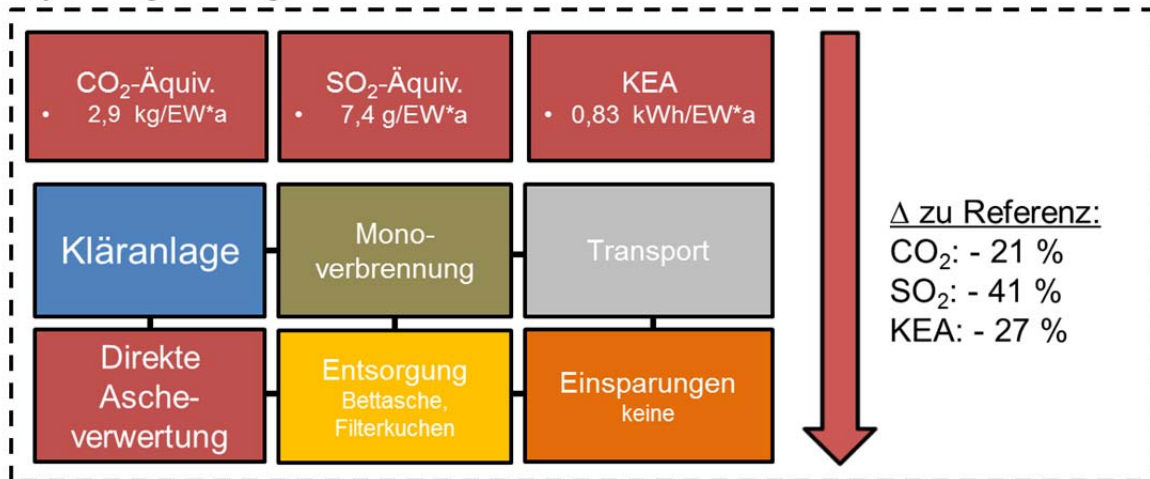


Abbildung 7: Veränderung der gasförmigen Emissionen und des KEA in Relation Referenzsituation

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 8). Die Schwermetallfrachten in die Atmosphäre und Hydrosphäre entsprechen den Frachten der Referenzsituation. Im Falle einer Ausbringung des Endproduktes nimmt die P- und Schwermetallfracht in die Landwirtschaft im Ausmaß der P-Fracht bzw. der SM-Fracht im Endprodukt zu. Das heißt, dass alle Schwermetalle in der Klärschlammasche auf die landwirtschaftlichen Flächen gelangen. Organische Spurenstoffe sind im Endprodukt nicht nachweisbar, womit auch keine Spurenstoffe über das Endprodukt in die Landwirtschaft gelangen.

P- und Schwermetallpfade unbehandelte Asche

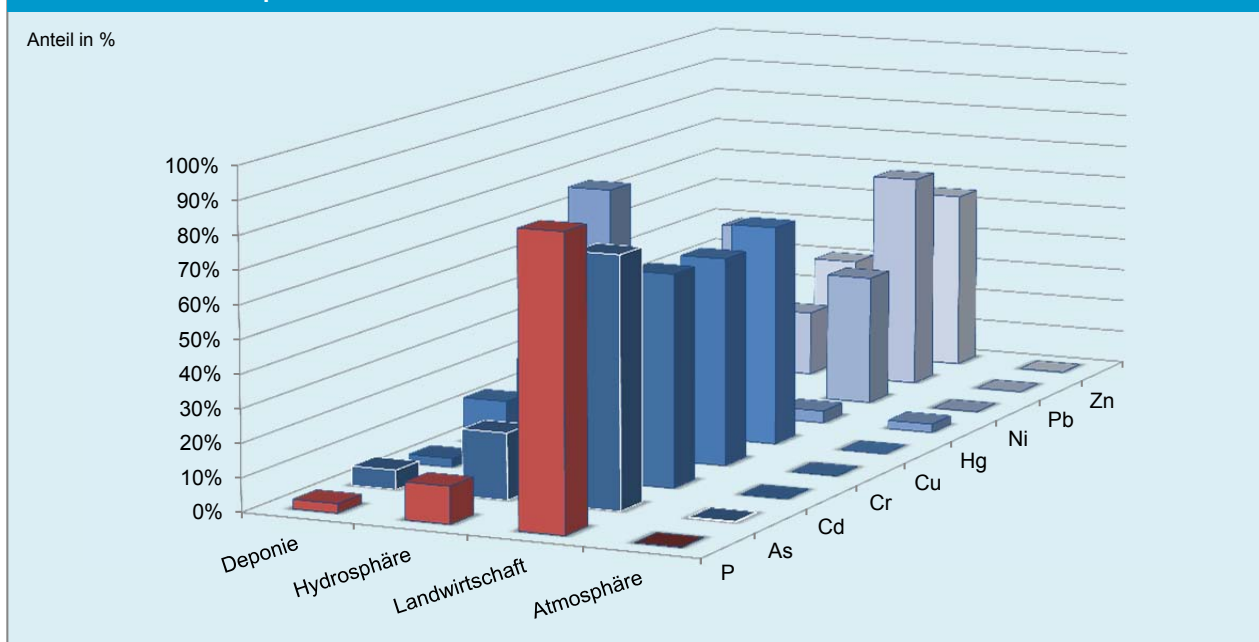


Abbildung 8: P- und Schwermetallpfade in % bezogen auf Zulauf der Referenzkläranlage (unbehandelte Asche)

1.3.3.4 Ergebnis Endprodukt

Abbildung 9 zeigt die Gegenüberstellung der Schwermetallgehalte für die Referenzklärschlammasche und den handelsüblichen SSP Dünger unter Berücksichtigung der Schwermetallgrenzwerte laut Düngemittelverordnung für mineralische Düngemittel mit mehr als 5 % P₂O₅. Dabei wird deutlich dass z.B. die Referenzklärschlammasche nur die Grenzwerte für Blei überschreitet. Auch bei Betrachtung der Schwermetallgehalte in Tabelle 2 wird ersichtlich, dass zahlreiche andere Aschen die Grenzwerte einhalten.

Der Cadmiumgrenzwert wird auf den P-Gehalt bezogen. Der Grenzwert liegt bei 75 mg Cd/kg P_2O_5 bzw. 32,7 mg Cd/kg P. Bei der Nährstoffbezogenen gegenüberstellung wird deutlich, dass die Klärschlammasche diese Grenzwerte gerade noch, aber z.B. ein SSP-Dünger bereits überschreitet. Abbildung 10 zeigt außerdem am Beispiel der Referenzklärschlammasche, dass die Cu und Zn-Gehalte deutlich über dem eines SSP liegen. As, Ni und Pb liegen ebenfalls deutlich um den Faktor 2-10 darüber, während sich Cr und Ni auf ähnlichem Niveau befindet.

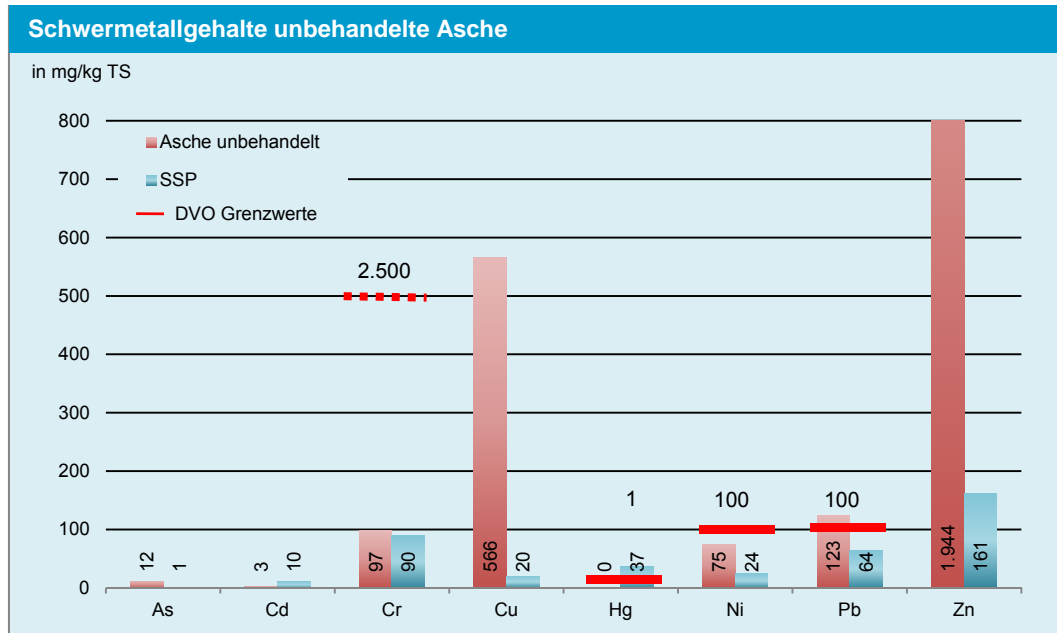


Abbildung 9: Schwermetallgehalte bezogen auf mit Klärschlammasche, Vergleich Handelsdünger (SSP)

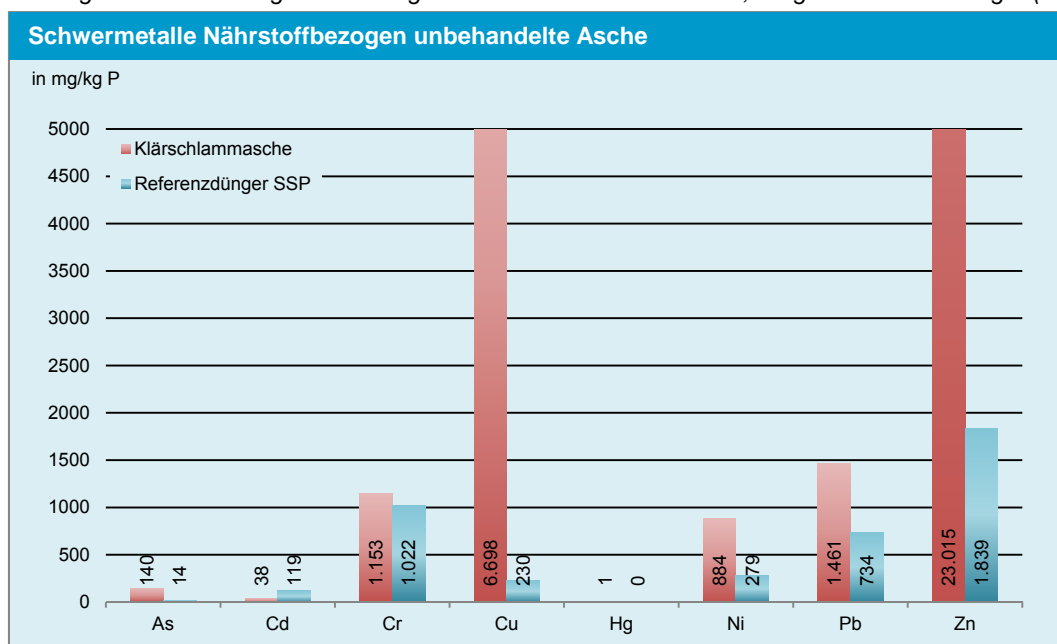


Abbildung 10: Nährstoffbezogene Schwermetallaufbringung mit Klärschlammasche, Vergleich Handelsdünger (SSP)

Bewertung Endprodukt	Unbehandelte Asche	SSP
Löslichkeit	Mäßig/Schlecht	Sehr Gut
Düngewirksamkeit	Mäßig/Schlecht	Sehr Gut
Monetäre Wert [€/t Endprodukt]	223	230
Anorganische Verunreinigungen		



SM:P [mg Cd/kg P]	37,9	118
Schadeinheit [SE/kg P]	0,35	1,26
Referenzbodenmethode [*limitierendes Element)	1.100 (Ni*)	1.450 (Cd*)
Tolerierbare Menge bezogen auf Cd	1,76	-
Organische Verunreinigungen		
Org. Spurenstoffe	5 ²	5
Hygiene	5 ²	5
Handling		
Lagerbarkeit	5	5
Direkter Einsatz	1	5

Tabelle 9: Bewertung unbehandelte Asche

Auffallende ist, dass der monetäre Wert der Klärschlammasche, errechnet auf Basis der Nährinhaltsstoffe auf ähnlichem Niveau wie ein handelsüblicher SSP liegt. Das Cd:P Verhältnis ist mit 37,9 mg Cd/kg P im Vergleich zu vielen anderen Endprodukten äußerst hoch, liegt aber immer noch bei nur 1/3 eines handelsüblichen Düngers (SSP). Das Schadeinheitenmodell und die Referenzbodenmethode verdeutlichen weiters, dass im Vergleich zu anderen Endprodukten in der Asche deutlich höhere Gehalte an Schwermetallen nachweisbar sind. Theoretisch kann die Asche rund 1.100 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 die Asche im Vergleich zum SSP um den Faktor 1,8 mal häufiger ausgebracht werden. Organische Spurenstoffe bzw. hygienische Bedenken sind aufgrund der thermischen Behandlung sehr unwahrscheinlich (+²). Die inerte Asche kann problemlos gelagert werden. Eine direkte Ausbringung in der Landwirtschaft ist aufgrund der pulverförmigen Konsistenz mit modernen Ausbringungsgeräten in der Landwirtschaft nicht möglich. Ein weiterer Prozessschritt ist auf jeden Fall notwendig.

1.3.3.5 Kosten gesamte Prozesskette

Anhand von drei Szenarien werden die Kosten für die gesamte Prozesskette dargestellt. Szenario 1 beschreibt die Situation, dass die Asche aufgrund der Nährstoffgehalte von den Landwirten dankbar entgegengenommen wird und keine Kosten für die landwirtschaftliche Verwertung anfallen. In Szenario 2 wird angenommen, dass Kosten bei der landwirtschaftlichen Verwertung Kosten pro Tonne Asche in der Höhe der Entsorgungskosten auf einer Deponie anfallen (Kosten: 0,38 €/EW*a). Szenario 3 berücksichtigt den monetären Wert des Endproduktes aufgrund dessen Nährstoffgehaltes. Dieses Szenario tritt ein, wenn z.B. die Industrie oder der Landwirt bereit ist, den tatsächlichen (Markt-)Preis für die Nährstoffe zu bezahlen (Erlös: 1,5 /EW*a).

Im Fall von Szenario 1 sind im Vergleich zu der Referenzsituation zusätzliche Kosten von rund 11 % zu erwarten. Grund dafür ist die erforderliche Monoverbrennung des Klärschlammes, deren Kosten im Vergleich zu einer Mitverbrennung deutlich höher sind. Fallen Kosten für die Verwertung der Asche in der Landwirtschaft (Szenario 2) an, liegen die Gesamtkosten im Vergleich zur Referenz um rund 14 % höher und nur geringfügig höher als bei Szenario 1. Werden die Nährstoffe in der Asche als Wertstoff betrachtet und deren tatsächlicher monetäre Wert angerechnet, so können die zusätzlichen Kosten der Monoverbrennung, ausgeglichen werden (Szenario 3: -2 %)

Kostenstellen (Kosten in €/EW*a)	Szenario1 Keine Entsorgungskosten	Szenario1 Entsorgungskosten wie Deponie	Szenario3 Erlöse aus Verkauf
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			
Monoverbrennung	5,22	5,22	5,22
Entsorgung			
Bettasche (MonoV)	0,02	0,02	0,02
Filterkuchen (MonoV)	0,06	0,06	0,06
Flugasche Kosten Verwertung	0,00	0,38	0,00
Transport			
Schlamm zu Verbrennung	0,98	0,98	0,98
Asche zu Landwirtschaft	0,04	0,04	0,04
Bettaschasche zu Deponie	0,01	0,01	0,01
Filterkuchen zu Untertagedeponie	0,04	0,04	0,04
Summe Kosten (gerundet)	12,37	12,37	12,37
Einsparungen und Erlöse			
Erlös Endprodukt	0,00	0,00	1,50
Summe Einsparungen und Erlöse	0,00	0,00	1,50
Gesamtkosten	12,37	12,71	10,87
Δ zu Referenz	+11%	+14%	-2%

Tabelle 10: Jahreskosten gesamte Prozesskette unbehandelte Asche

Kläranlage	MonoV	Direkte Asche- verwertung	Entsorgung Bettasche, Filterkuchen	Transport	Einsparungen Verkauf Asche
6,0 €	5,2 €	0,0 €	0,2 €	1,0 €	1,5 €
Gesamt: 10,9 €/EW*a					
Vergleich zur Referenz: Δ absolut: + - 0,3 €/EW*a; Δ %: - 2 %					

Abbildung 11: Kosten gesamte Prozesskette direkte Ascheverwertung (Erlöse aus dem Verkauf der P-reichen Asche)

Kläranlage	MonoV	Direkte Asche- verwertung	Entsorgung Bettasche, Filterkuchen, Asche zu Landwirtschaft	Transport	Einsparungen
6,0 €	5,2 €	0,0 €	0,5 €	1,0 €	0,0 €
Gesamt: 12,7 €/EW*a					
Vergleich zur Referenz: Δ absolut: + - 1,6 €/EW*a; Δ %: + 14 %					

Abbildung 12: Kosten gesamte Prozesskette direkte Ascheverwertung (ohne Erlöse aus dem Verkauf der Asche)



1.3.4 Literatur

- Adam, C., Kley, G., Simon, F.-G., Lehmann, A. (2008) Recovery of nutrients from sewage sludge – Results of the European research-project SUSAN. *Water Practice & Technology* 3 (1), pp. Art1.
- Faulstich, M., Urban, A., Bilitewski, B. (2007) Charakteristik Endprodukt, 12. Fachtagung. Schriftenreihe des Fachgebietes Abfalltechnik Universität Kassel. Kassel.
- Kratz, S., Schnug, E. (2008) Agronomische Bewertung von Phosphat-Düngern. Vortrag. Ressourcen schonender Einsatz von Phosphor in der Landwirtschaft, Symposium am 10./11.11.2008 in Braunschweig.
- Montag, D., Pinnekamp, J., Heil, J., Gajic, D., Rath, W., Dittrich, C., Pfennig, A., Kröckel, J., Dott, W., Zimmermann, J., Doetsch, P., Van Norden, H., Grömping, M., Seyfried, A. (2011) Rückgewinnung von Pflanzennährstoffen, insbesondere Phosphor aus der Asche von Klärschlamm. Schlussbericht zur BMBF/BMU Förderinitiative "Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe, insbesondere Phosphor"
- Petzet, S., Cornel, P. (2010) Neue Wege des Phosphorrecyclings aus Klärschlammaschen, *Korrespondenz Abwasser, Abfall* (57), Nr. 4, pp. 357-365
- Petzet, S., Cornel, P. (2011) Towards a complete recycling of phosphorus in wastewater treatment – options in Germany. *Water Science and Technology*, Vol. 64 (1), pp. 29-35.
- Römer, W. (2013) Phosphor-Düngewirkung von P-Recyclingprodukten. *Korrespondenz Abwasser, Abfall*. Vol. 60 (3), pp. 202-215.
- Schaum, C. (2007) Verfahren für eine zukünftige Klärschlammbehandlung - Klärschlammkonditionierung und Rückgewinnung von P aus Klärschlammasche (Process for future sewage sludge treatment - sewage sludge conditioning and phosphorus recovery from sewage sludge ash). Dissertation, FB 13, TU Darmstadt, 2007. Germany.
- Stubenvoll, J., Böhmer, S., Szednyj, I. (2002) Stand der Technik bei Abfallverbrennungsanlagen. Studie im Auftrag des Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft
- Werther, J., Ogada, T. (1997) Sewage sludge combustion. *Progress in Energy and Combustion Science* 25, pp. 55 - 116

1.4 Anhang

1.4.1 Stoffflussanalyse Gesamtprozess direkte Ascheverwertung

