



BIOENERGIESYSTEME GmbH

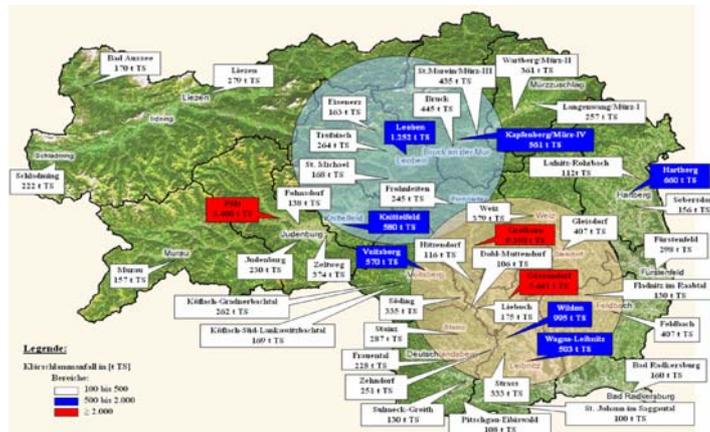
Forschung, Entwicklung und Planung von Anlagen zur Wärme- und Stromerzeugung aus Biomasse

Inffeldgasse 21b A-8010 GRAZ, AUSTRIA  
TEL.: +43 (0)316-481300; FAX: +43 (0)316-481300-4  
EMAIL: OFFICE@BIOS-BIOENERGY.AT  
HOMEPAGE: HTTP://BIOS-BIOENERGY.AT



# Untersuchung der Stoffflüsse und sinnvollen Verwertung von sowie Reststoffnutzung aus Klärschlamm in der Steiermark

## Endbericht



erstellt im Auftrag

des Amtes der Steiermärkischen Landesregierung Fachabteilung 19D-  
Abfall- und Stoffflusswirtschaft,  
8010 Graz, Bürgergasse 5a  
Mai 2007

**LEBENSRESSORT  
STEIERMARK**



Das Land  
Steiermark

→ FA19D  
Abfall- und Stoffflusswirtschaft

Mit freundlicher Unterstützung durch



Projektleiter: Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Ingwald Obernberger  
Dipl.-Ing. Klaus Supancic  
Sachbearbeiter: Dipl.-Ing. (FH) Andreas Polzer  
Auftraggeber: Amt der Steiermärkischen Landesregierung  
Fachabteilung 19D - Abfall- und Stoffflusswirtschaft  
A-8010 Graz, Bürgergasse 5a  
Tel: +43 (0) 316 / 877 - 2153  
Fax: +43 (0) 316 / 877 - 2416  
E-Mail: [fa19d@stmk.gv.at](mailto:fa19d@stmk.gv.at)  
Leiter: Hofrat Dipl.-Ing. Dr. Wilhelm Himmel  
Projektbegleitung: Mag. Dr. Ingrid Winter



[www.abfallwirtschaft.steiermark.at](http://www.abfallwirtschaft.steiermark.at)  
[www.nachhaltigkeit.steiermark.at](http://www.nachhaltigkeit.steiermark.at)  
[www.win.steiermark.at](http://www.win.steiermark.at)  
[www.gscheitfeiern.at](http://www.gscheitfeiern.at)

Mit freundlicher Unterstützung durch

ANDRITZ AG – **ANDRITZ**

ASH DEC Umwelt AG –



UEG Umwelt- und Entsorgungstechnik AG –



## Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Der jährliche Klärschlammanfall der Steiermark stieg seit dem Jahr 2000 durchschnittlich um 1,9 % pro Jahr an und betrug im Jahr 2004 (ohne die Verbandskläranlagen Gratkorn und Pöls) 24.981 Tonnen Trockensubstanz (t TS). Vergleiche des Klärschlammaufkommens mit Werten aus der Literatur ergaben eine gute Übereinstimmung.

Unter Einbeziehung der betrieblichen Klärschlammmengen der Verbandskläranlagen Gratkorn (10.080 t TS) und Pöls (3.300 t TS) würde das Klärschlammaufkommen 2004 um 35 % höher liegen. Da für beide Kläranlagen aber energetische (Gratkorn) bzw. stoffliche (Pöls) Verwertungsschienen existieren, kann davon ausgegangen werden, dass die in diesen Kläranlagen anfallenden Klärschlammmengen nicht für dezentrale Klärschlammverwertungsanlagen zur Verfügung stehen.

Für die Analyse der Schwermetallgehalte des Klärschlammes standen zwei Datensätze zur Verfügung, einerseits Messungen der FA 17C (1974-2003), andererseits Messwerte der Kläranlagenbetreiber, die an die FA 19A gemeldet wurden (1996-2005). Ein Vergleich der beiden Datensätze über einen Zeitraum zwischen 1996-2001 ergab, dass die Werte der FA 17C tendenziell über den an die FA 19A gemeldeten Messwerten liegen. Da die Analysen der FA 17C unter einheitlichen Bedingungen durchgeführt wurden, kann davon ausgegangen werden, dass diese Werte die tatsächlichen Schwermetallgehalte repräsentativer wiedergeben als jene der FA 19A. Da die Analysenwerte der FA 17C statistisch gesehen über den Betrachtungszeitraum konstant blieben, konnten die Daten auch zur Bewertung des aktuellen Schwermetallaufkommens herangezogen werden. Aufgrund der Zuordnung der Messwerte zu den untersuchten Kläranlagen konnten auch gewichtete Durchschnittsgehalte der Schwermetalle im kommunalen Klärschlamm in der Steiermark ermittelt werden.

Bezüglich Nährstoffgehalte standen Analysenwerte der FA 10B und der FA 19A zur Verfügung. Im Gegensatz zu den Daten für die Schwermetallkonzentrationen fehlte hier eine Zuordnung zu den untersuchten Kläranlagen. Damit war eine Gewichtung der Messwerte auf Basis von unterschiedlichen Klärschlammmengen nicht möglich.

Auf Anfrage konnten von der FA 19A auch Daten über den Trockensubstanzgehalt von kommunalen Klärschlämmen mit dazugehörigem Klärschlammaufkommen aus dem Jahre 2005 übermittelt werden. Die Auswertung ergab, dass der Trockensubstanzgehalt mit zunehmender Kläranlagengröße zunimmt. Einzig die Kläranlage Graz-Gössendorf als die mit Abstand größte kommunale Kläranlage der Steiermark weist einen sehr niedrigen Klärschlamm-trockensubstanzgehalt auf. Dieser ist damit begründet, dass der ausgefaulte Klärschlamm mit einem TS-Gehalt von 3,5 % direkt an die AEVG übergeben wird, die den Klärschlamm entwässert, trocknet und einer thermischen Verwertung zuführt. Der mengengewichtete Trockensubstanzgehalt auf Basis der übermittelten Daten liegt inklusive Graz-Gössendorf bei 8,2 %, ohne Graz-Gössendorf bei 13,1 %. Der statistische Mittelwert von 12,4 % wurde mit Werten aus der Literatur verglichen und kann als plausibel eingestuft werden. Berücksichtigt man alle Kläranlagen mit einem jährlichen Klärschlammaufkommen von mehr als 50 t TS pro Jahr (ohne Graz-Gössendorf), so liegt deren mengengewichteter Klärschlamm-trockensubstanzgehalt bei 19,2 %.

Trotz der umfangreichen, von der FA 19D zur Verfügung gestellten Daten waren einige, speziell für die Anlagenauslegung wichtige Parameter wie Aschegehalt und Heizwert von Klär-

schlamm, nicht mit ausreichender Datenbasis vorhanden. Es wurden daher Daten aus der Literatur, vorliegende Messwerte sowie Informationen von einschlägigen Institutionen und Firmen eingeholt. Sowohl beim Aschegehalt (25 bis 60% TS) als auch beim Heizwert (8 bis 16 MJ/kg TS) schwankten die Angaben deutlich. Für die Anlagenauslegung wurde schließlich auf Basis mehrere übereinstimmender Angaben ein Aschegehalt von 50% TS und ein Heizwert von 10 MJ/kg TS) festgelegt.

Die vorhandenen Messwerte für Schwermetall- und Nährstoffgehalte des kommunalen Klärschlammes in der Steiermark wurden mit Werten aus der Literatur verglichen und können als plausibel angesehen werden. Für die Berechnung der Schwermetallströme konnten die nach Klärschlammaufkommen gewichteten durchschnittlichen Schwermetallgehalte herangezogen werden, für die Ermittlung der Nährstoffströme mussten ungewichtete Mittelwerte verwendet werden.

Die Auswertung der Massenströme ergab einen jährlichen Ausstoß an Schwermetallen mit dem kommunalen Klärschlamm in der Steiermark von rund 34 t. Das jährliche Nährstoffaufkommen beträgt rund 4.650 t. Davon wurden über die Verwertungsschienen Landwirtschaft und Landschaftsbau 20 t Schwermetalle und 2.700 t Nährstoffe direkt auf Böden aufgebracht. Der Gehalt an P in der Klärschlamm Trockensubstanz ist mit 2,4 % im Vergleich zu Gehalten aus Klärschlamm großer Kläranlagen relativ gering. Die Ursache dafür liegt in der Art der bei kleineren Kläranlagen vorwiegend eingesetzten Entwässerung mittels Kammerfilterpressen, die die Zugabe von großen Mengen Kalk (bis zu 15 % der Frischsubstanz) notwendig macht. Dadurch werden die Gehalte aller anderen Elemente im Klärschlamm durch Verdünnung reduziert. Bei Großanlagen werden meist Siebbandpressen eingesetzt, die ohne Zugabe von Kalk betrieben werden können. Derzeit läuft in vielen Kläranlagen die Umstellung von Kammerfilterpressen auf Dekanter, die ebenfalls ohne Kalkzugabe betrieben werden können. Es ist daher in den nächsten Jahren zu erwarten, dass der Phosphorgehalt im kommunalen Klärschlamm in der Steiermark ansteigt.

Mithilfe der vorhandenen Daten über das Klärschlammaufkommen von 2000-2004 konnten weiter die potenziellen Standorte für zwei Klärschlammverwertungsanlagen definiert werden. Es sind dies Graz-Gössendorf mit dem Einzugsgebieten West-, Süd- und Oststeiermark und einem Klärschlammaufkommen von rund 12.800 t TS/a (unter Berücksichtigung von Kläranlagen mit einem jährlichen kommunalen Klärschlammaufkommen >100 t TS) und Leoben mit den Einzugsgebieten oberes Murtal und Mürztal und einem Klärschlammaufkommen von rund 5.900 t TS/a (unter Berücksichtigung von Kläranlagen mit einem jährlichen kommunalen Klärschlammaufkommen > 100 t TS). Die Auswahl erfolgte einerseits nach sinnvollen Einzugsgebieten (West-, Süd- und Oststeiermark für Graz-Gössendorf sowie Mur-, Mürz- und Palten-Liesingtal bis Liezen für Leoben) sowie andererseits aufgrund der Tatsache, dass die Kläranlagen an diesen beiden Standorten das größte kommunale Klärschlammaufkommen pro Jahr in der Steiermark aufweisen. Das nutzbare Klärschlammpotenzial könnte durch Einbeziehung kleinerer Kläranlagen (< 100 t TS/A) noch weiter gesteigert werden (Graz-Gössendorf um rund 10%, Leoben und etwa 4 %). Die mengengewichteten Klärschlamm Trockensubstanzgehalte in diesen beiden Einzugsgebieten liegen bei 23,3 (ohne Graz-Gössendorf) bzw. 25,3%. Da auch die arithmetischen Mittelwerte in diesem Bereich liegen, wurde für die Anlagenauslegung von einem mittleren Trockensubstanzgehalt von 25% ausgegangen.

Diese Standorte stellen nur eine vorläufige Auswahl dar, da detaillierte Informationen über geeignete Standorte (verfügbare Fläche für die Klärschlammverwertungsanlage, mögliche

Synergieeffekte durch gemeinsame Nutzung von Ressourcen und Personal, Qualität des anfallenden Klärschlammes) im Rahmen dieser Studie nicht genauer untersucht und bewertet werden konnten.

Das geplante Klärschlammverwertungskonzept besteht aus drei wesentlichen Abschnitten, einer Klärschlamm-trocknung, einer Klärschlammverbrennung und einer Klärschlamm-aschenverwertung. Für die Klärschlamm-trocknung kommen prinzipiell drei Trocknungsarten in Frage. Es sind dies Konvektionstrockner (Band- und Trommeltrockner), Kontakt-trockner (Wirbelschicht-trockner, Dünnschicht-trockner, Schnecken-trockner) sowie solare Trocknungsanlagen. Solare Trocknungsanlagen stellen dabei eine Besonderheit dar, weil sie Sonnenenergie nach dem Prinzip eines Glashauses zur Trocknung verwenden und damit den Bedarf an zusätzlich notwendiger Wärmezufuhr reduzieren, aber sehr große Flächen erfordern.

Die Auswahl des Trocknungsverfahrens wird durch die Art der eingesetzten Klärschlammverbrennungstechnologie beeinflusst. Die gängigsten Verfahren stellen Etagenöfen, Wirbelschichtfeuerungen, Zyklonfeuerungen oder Kombinationsfeuerungen dar, die mit Klärschlamm mit einem Trockensubstanzgehalt von 55% (Wirbelschichtfeuerungen) bis etwa 94% (Zyklonfeuerungen) betrieben werden können. Die Klärschlamm-aschenverwertung stellt ein von der Firma ASH DEC Umwelt AG (ASH DEC) entwickeltes Verfahren zur Klärschlamm-aschenverwertung dar, das auf einer thermochemischen Behandlung der Klärschlamm-asche beruht, und sich im Wesentlichen in die Teile Aschenaufbereitung, thermische Behandlung der Asche inklusive Rauchgasreinigung und Düngemittelherstellung gliedert.

Die Asche wird dabei mit (Erd-)Alkalichloriden versetzt und anschließend einer thermischen Behandlung in einem Drehrohrofen bei rund 1.000°C unter oxidierender Atmosphäre unterzogen. Dabei werden relevante Mengen der in der Asche enthaltenen Schwermetalle in Chloride übergeführt und verdampft, welche in einer anschließenden Rauchgasreinigungsstufe in konzentrierter Form abgeschieden und so von den Aschen abgetrennt werden. Ein gewünschter Nebeneffekt der thermischen Behandlung ist die vollständige Zerstörung von gegebenenfalls in der Asche enthaltenen organischen Schadstoffen durch vollständige Verbrennung. Das Produkt aus Aufbereitung und thermischer Behandlung ist ein schwermetallarmer Rohstoff, der relevante Nährstoffmengen P, Ca, Mg und K enthält.

Auf Basis der beiden definierten Einzugsgebiete wurden die zu erwartenden Klärschlammverwertungspotenziale im Rahmen des in der Steiermark geplanten dezentralen Klärschlammverwertungskonzepts ermittelt. Da Kläranlagen, die bereits jetzt ihre Klärschlämme thermisch verwerten (allen voran Graz-Gössendorf, aber auch einige andere kleinere Kläranlagen) oder über andere vertraglich fixierte Verwertungsschienen (z.B. Kompostierung) verfügen, für das geplante Verwertungskonzept kurzfristig nicht zur Verfügung stehen, wurde ein derzeit als realistisch betrachtetes Verwertungspotenzial von 12.000 t TS/a an kommunalem Klärschlamm in der Steiermark definiert. Davon fallen 8.000 t TS pro Jahr auf das Einzugsgebiet Graz und weitere 4.000 t TS pro Jahr auf das Einzugsgebiet Leoben. Bei einem Aschegehalt von 50% TS bedeutet dies einen jährlichen Ascheanfall von 6.000 t, was den minimalen Durchsatz für die geplante Klärschlamm-ascheaufbereitungsanlage darstellt. Eine Aufteilung der Aschebehandlungskapazitäten auf mehr als einem Standort ist daher nicht sinnvoll.

Auf Basis dieser Rahmenbedingungen wurden zwei Konzeptvarianten erstellt. Variante 1 sieht nur einen Standort mit einer kompletten Anlage für einen Jahresdurchsatz an kommunalem Klärschlamm von 12.000 t TS, bestehend aus Klärschlamm-trocknung, Klär-

schlammverbrennung und Klärschlammascheaufbereitung vor. Variante 2 umfasst je einen Standort in den definierten Einzugsgebieten mit kombinierter Klärschlamm-trocknungs- und Klärschlammverbrennungsanlage (Klärschlamm-durchsatz Einzugsgebiet Graz 8.000 t TS/a, Einzugsgebiet Leoben 4.000 t TS/a), wobei an einem dieser beiden Standorte (vorzugsweise an jenem mit dem größeren Klärschlamm-durchsatz für Trocknung und Verbrennung) auch die Ascheaufbereitungsanlage errichtet werden soll.

Nach Festlegung der Anlagengrößen wurden von 3 österreichischen Anbietern Richtpreisangebote für Klärschlamm-trocknungs- und Klärschlammverbrennungsanlagen eingeholt, um mögliche Ausführungsvarianten für das Verwertungskonzept zu ermitteln. Durch die Auswahl der Anbieter (ALDAVIA Bioenergy GmbH, ANDRITZ AG und KALOGEO Anlagenbau GmbH) konnten drei verschiedene Trocknungs- und Verbrennungstechnologien genauer untersucht werden.

ALDAVIA arbeitet mit Schnecken-trocknern, in denen der Klärschlamm auf etwa 65 % Trockensubstanzgehalt getrocknet wird, bevor dieser in eine Kombination aus Flugstrom- und Rostfeuerung verbrannt wird. Die Reinigung der Trockner-abluft erfolgt über einen Biofilter. Der Klärschlamm wird über eine spezielle Mischeinrichtung, die den Einsatz von maximal drei verschiedenen Brennstoffen ermöglicht, auf ein Schleuderrad aufgegeben, das den Brennstoff ohne Zugabe von Luft in den Feuerraum einschleudert. In der Flugphase beginnt bereits die Trocknungs- und Entgasungsphase des Brennstoffs, sodass bei Auftreffen auf dem Rost die Klärschlamm-teilchen bereits getrocknet sind und somit gleichmäßige Bedingungen am Brennstoffbett herrschen. Das entstehende Rauchgas (zur Entstickung wird in der Sekundärverbrennungszone Harnstoff eingedüst) wird in einem Thermoölkessel auf etwa 320°C abgekühlt und dann einer Rauchgasreinigung, bestehend aus Trockensorption (Trockensorptionsmittel Sorbalit) und Wäscher, zugeführt. Das im Thermoölkessel auf etwa 290°C erhitzte Thermoöl dient als Wärmeträger für den Schnecken-trockner. Beim festgelegten Heizwert von 10 MJ/kg TS (Eingangstrockensubstanzgehalt 25%) ist kein energieautarker Betrieb der Anlagen möglich. Neben dem geringen Heizwert trägt auch der relativ niedrige Wirkungsgrad der Anlage (rund 66%) zum hohen Erdgasverbrauch während des Betriebes (rund 773.000 Nm<sup>3</sup>/a oder 7.730 MWh/a) bei. Der elektrische Energiebedarf der von ALDAVIA konzipierten Anlage ist niedriger (2.240 MWh/a) als jener der anderen Anbieter. ALDAVIA hat nach eigenen Angaben zwei Referenzanlagen in Europa errichtet.

Das von ANDRITZ AG entwickelte Konzept sieht die Trocknung in einem Trommel-trockner vor, wo der Klärschlamm auf einen Trockensubstanzgehalt von 90 bis 95% getrocknet wird. Die Trocknerluft wird aufbereitet (kondensiert) und danach wieder im Rauchgaswärmetauscher erwärmt. Ein Teilstrom wird dabei abgezweigt und über einen Biofilter abgeführt. Der Klärschlamm wird anschließend in einer Zyklonfeuerung bei etwa 750°C bis 850°C verbrannt. Zur Reduktion von Stickoxidemissionen wird Harnstoff in die Sekundärverbrennungszone (Nachbrennkammer) eingeblasen. In der Nachbrennkammer wird das Rauchgas für mindestens zwei Sekunden auf über 850°C gehalten, um organische Schadstoffe sicher zu zerstören. Durch die Geometrie der Zyklonfeuerung wird bereits ein Großteil (> 93%) der anfallenden Asche in der Feuerung abgeschieden. Der aus der Zyklonbrennkammer ausgetragene Flugstaub wird dann in der Rauchgasreinigung abgeschieden. Die Wärmeübertragung erfolgt über einen Rauchgas/Luft-Wärmetauscher, in dem die für die Trocknung verwendete Luft auf etwa 400°C bis 450°C aufgeheizt und das Rauchgas auf etwa 200 °C abgekühlt wird. Anschließend wird das Rauchgas in einer mehrstufigen Rauchgasreinigung (Trockensorption unter Eindüsung von Kalkhydrat und

Aktivkohle in einen Reaktor mit anschließendem Gewebefilter) gereinigt. Durch den geringen Wassergehalt des Brennstoffs und der geringeren Rauchgastemperatur nach der Wärmerückgewinnung im Vergleich zu ALDAVIA liegt der Anlagenwirkungsgrad bei knapp 83 %. Aufgrund des geringen festgelegten Heizwertes des Klärschlammes (10 MJ/kg TS, Eingangstrockensubstanzgehalt 25%) reicht die bei der Verbrennung gewonnene Wärmeenergie allerdings nicht aus, um den Klärschlamm energieautark zu trocknen. Es werden daher pro Jahr zusätzlich etwa 316.300 Nm<sup>3</sup> (3.163 MWh/a) Erdgas benötigt. Steigt der Heizwert über 12 MJ/kg TS bei gleich bleibenden Eingangstrockensubstanzgehalt an, kann die von der ANDRITZ AG konzipierte Anlage energieautark betrieben werden. Durch die teilweise Rückgewinnung der bei der Kondensation der Trocknerabluft frei werdenden Wärme, kann allerdings ein großer Teil der bei der Trocknung eingesetzten Energie als Niedertemperaturwärme optional genutzt werden. Aufgrund des niedrigen Temperaturniveaus (80°C) ist eine direkte Nutzung der Wärme in der Anlage nicht möglich, die Wärme kann aber an entsprechende Verbraucher (z.B. Fernwärmenetz) verkauft werden. Für eine wirtschaftlich sinnvolle Nutzung der Niedertemperaturwärme sollte ein Wärmeabnehmer mit konstantem Wärmebedarf in der Nähe des Standortes verfügbar sein. Durch die komplexe Anlagentechnik (Kreislaufführung von getrocknetem Klärschlamm zur Optimierung des Trocknungsvorgangs und teilweise Kreislaufführung der Trocknerluft) ist der elektrische Energiebedarf der Anlage relativ hoch (4.725 MWh/a). Die ANDRITZ AG hat bisher eine Referenzanlage in Österreich (Eferding) errichtet.

KALOGEO setzt bei der Trocknung auf Sonnenenergie bzw. anderer „kalter“ Trocknungsverfahren. Mithilfe einer solaren Trocknungsanlage (alternativ können Bandtrockner, Umlufttrockner oder Kältetrockner eingesetzt werden) wird der Klärschlamm auf etwa 60% Trockensubstanzgehalt getrocknet. Der Klärschlamm wird dabei mittels Radlader in die Trocknungshallen eingebracht und anschließend über automatische Wende- und Transportvorrichtungen gleichmäßig verteilt. Nach Erreichung des gewünschten Trockensubstanzgehalts (Trocknungszeiten liegen im Durchschnitt bei etwa 10 Tagen) wird der Klärschlamm entweder automatisch oder mittels Radlader ausgetragen und der Verbrennungsanlage zugeführt. Der Vorteil des geringeren Energiebedarfs durch Mitnutzung von Sonnenenergie sowie der Wegfall einer Trocknungsabluftreinigung (durch die großen Mengen an umgewälzter Luft in den Trocknungshallen wird die Trocknungsluft so verdünnt, dass keine Reinigung über Biofilter o.ä. notwendig ist) ist mit dem Nachteil des großen Platzbedarfs von Solartrocknungsanlagen abzuwiegen. Für die im Klärschlammverwertungskonzept festgelegte Durchsatzmenge von 12.000 t TS pro Jahr ist bereits annähernd 1 ha Grundfläche notwendig. Durch Einsatz von Abwärme kann der Platzbedarf aber auf weniger als die Hälfte reduziert werden.

Der getrocknete Klärschlamm wird in einer Wirbelschichtfeuerung verbrannt. Die Verbrennung ist zweistufig aufgebaut. Direkt in der Wirbelschicht wird der Klärschlamm unter Sauerstoffmangel bei etwa 700°C vergast (Primärverbrennungszone), in der anschließenden Nachbrennkammer erfolgt bei Temperaturen von über 850°C die vollständige Verbrennung der noch im Rauchgas vorhandenen organischen Komponenten. Durch die niedrigen Temperaturen und die gute Luftführung im Wirbelschichtreaktor sind keine besonderen Maßnahmen zur Entstickung des Rauchgases notwendig (Anmerkung: hierbei handelt es sich um eine Herstellerangabe, die von den Autoren der Studie nicht bestätigt werden kann und sicherlich vom vorgeschriebenen NO<sub>x</sub>-Grenzwert abhängt). Das Rauchgas wird im an die Nachbrennkammer anschließenden Thermoölkessel und nachfolgenden Thermoöleconomiser auf etwa 200 °C

abgekühlt. Das Thermoöl wird dabei auf etwa 240 °C erhitzt und zur Unterstützung der solaren Trocknung verwendet. Das abgekühlte Rauchgas wird mittels Trockensorption (Eindüngung von Kalkhydrat und Aktivkohle) und Keramikfilter gereinigt. Vor der Trockensorption ist ein Multizyklon vorgesehen, um die Asche vom Rauchgas abzutrennen. Somit können 95% der Klärschlamm-Asche vor der Rauchgasreinigung als Zyklonflugasche ausgeschleust werden. Der Rest fällt gemeinsam mit den Trockensorptionsmitteln als Flugasche an. Beide Fraktionen werden gemeinsam in der Klärschlammverwertungsanlage weiterverarbeitet. Durch den zusätzlichen Energieeintrag durch Sonnenenergie bei der Trocknung reicht die bei der Verbrennung anfallende Wärmeenergie aus, um die Anlage energieautark zu betreiben. Da der Energieeintrag durch Sonnenenergie aber witterungsbedingten und saisonalen Schwankungen unterliegt, ist für den ganzjährigen Betrieb der Einsatz von Erdgas (160.000 Nm<sup>3</sup> pro Jahr oder 1.600 MWh/a) notwendig. In Zeiträumen mit starker Sonneneinstrahlung kann aber auch Wärme (3.754 MWh/a) ausgekoppelt und verkauft werden. KALOGEO betreibt eine Referenzanlage in Österreich (Bad Vöslau).

Die beiden Konzeptvarianten weisen hinsichtlich Stoff- und Energiebilanz nur vereinzelt Unterschiede auf. Variante 1 bietet Vorteile beim elektrischen Energiebedarf und etwas geringeren Personalaufwand. Weiters sind die Investitionskosten für eine Anlage niedriger als für zwei Anlagen mit derselben Kapazität. Variante 2 bietet hingegen Vorteile bei den Transportkosten, da zwei Anlieferungsstellen für den Klärschlamm vorhanden sind und anschließend nur mehr Asche (mit einer Massenreduktion im Vergleich zu Klärschlamm mit 25% TS um mehr als 87 %) von einem Standort zum Standort der Klärschlamm-Ascheaufbereitung transportiert werden muss. Ausgedrückt in transportierten Tonnen und Kilometern müssen bei Variante 1 2,6 Mio. t\*km und bei Variante 2 1,9 Mio. t\*km zurückgelegt werden. Da die Transportkosten neben der transportierten Tonnage auch von der Distanz und den Transportmitteln (Container, Mulden) abhängen, war es im Rahmen dieser Studie nicht möglich, die Unterschiede in den Transportkosten beider Varianten genau zu quantifizieren.

Eine generelle Verbesserung der Wirtschaftlichkeit kann durch einen höheren Heizwert erreicht werden. Da der Aschegehalt meist nicht beeinflusst werden kann, sollte vor allem der Trockensubstanzgehalt der angelieferten Klärschlämme so hoch wie möglich sein. Hier könnten dezentrale Trocknungsanlagen, die direkt an Standorten mit ungenutzten Wärmepotenzialen wie Biogasanlagen, Kläranlagen oder Industriebetrieben betrieben werden und den Klärschlamm vortrocknen, die Energiebilanz und damit die Wirtschaftlichkeit der Klärschlammverbrennungsanlagen entscheidend verbessern. Je nach eingesetzter Trocknungstechnologie kann bereits Abwärme ab einer Temperatur von 60°C eingesetzt werden.

Die Wirtschaftlichkeit der Klärschlamm-trocknungs- und Klärschlammverbrennungsanlagen hängt neben dem Heizwert des Klärschlammes in großem Maße von den erzielbaren Entsorgungsbeiträgen für den Klärschlamm ab. Abhängig von der Verwertungs- bzw. Entsorgungsschiene liegen die Entsorgungskosten zwischen 35 (thermische Verwertung von getrocknetem Klärschlamm mit >80% TS im Zementwerk) und 150 €/t FS (thermische Entsorgung von Klärschlamm mit niedrigem Trockensubstanzgehalt). Die Entsorgungsbeiträge für die thermische Verwertung außerhalb der Zementindustrie liegen laut durchgeführten Recherchen zwischen 55 und 75 €/t FS. Es ist anzunehmen, dass die erzielbaren Entsorgungsbeiträge für die Annahme von entwässertem Klärschlamm im Rahmen des in dieser Studie vorgestellten Klärschlammverwertungskonzeptes ebenfalls in diesem Bereich liegen würden.

Die weitere Aufbereitung der Klärschlamm-Aschen in der Klärschlamm-Ascheverwertungsanlage ist aufgrund des für eine derartige Anlage relativ geringen Durchsatzes aber vor allem

aufgrund des geringen Phosphorgehaltes im Klärschlamm respektive den Klärschlammaschen als derzeit wirtschaftlich schwierig zu betrachten. Für eine Verbesserung des wirtschaftlichen Ergebnisses sollten Aschen mit höheren Phosphorgehalten eingesetzt werden, um einerseits den Durchsatz und damit die spezifischen Kosten zu reduzieren, und andererseits den durchschnittlichen Phosphorgehalt in den aufzubereitenden Aschen zu erhöhen. Im Gegensatz zur Klärschlamm-trocknung kann nur hochwertige Energie im thermischen Prozess der Ascheverwertungsanlage genutzt werden. Hinsichtlich Standortauswahl ist daher die Verfügbarkeit von alternativen Brennstoffen (Biogas oder Faulgas) wichtig.

Bei Umsetzung des in dieser Studie vorgeschlagenen Klärschlammverwertungskonzeptes bleiben rund 90% des im Klärschlamm enthaltenen Phosphors in der behandelten Klärschlammasche. Im Gegensatz dazu kann ein Großteil der Schwermetalle aus den Aschen weitgehend entfernt werden. Neben Hg, das vollständig aus den Klärschlammaschen entfernt werden kann, werden Cd und Pb zu 96 % bzw. 93 % entfrachtet. Die mengenmäßig am häufigsten im Klärschlamm vorkommenden Schwermetalle Zn und Cu werden zu 68,5 bzw. 87 % aus den Klärschlammaschen ausgeschleust.

Unter der Annahme, dass die gesamte Menge an Klärschlamm, die derzeit über die Verwertungsschienen Landwirtschaft und Landschaftsbau (insgesamt 15.420 t TS pro Jahr) direkt auf Böden aufgebracht wird, in Zukunft über das vorgestellte Klärschlammverwertungskonzept behandelt wird, können damit insgesamt rund 14 t an Schwermetallen aus dem Kreislauf ausgeschleust werden. Hinsichtlich des Ersatzes von Kunstdüngern können bei einem jährlichen Klärschlamm-durchsatz von 12.000 t TS 587 t  $P_2O_5$ , das sind 7,2 % des jährlich in der Steiermark umgesetzten Phosphordüngers, substituiert werden. Bei voller Ausnutzung des Klärschlammaufkommens in den beiden definierten Einzugsgebieten von 20.298 t TS/a (unter Miteinbeziehung von Kläranlagen mit einem Klärschlammaufkommen von 50 bis 100 t TS pro Jahr) und Verwertung dieser Menge über das vorgestellte Klärschlammkonzept in der Steiermark könnten jährlich 993 t  $P_2O_5$  oder 12,2% der jährlich in der Steiermark eingesetzten P-Kunstdüngermenge substituiert werden.

Die Abscheidung von Schwermetallen aus den Klärschlämmen im Rahmen des vorgestellten dezentralen Klärschlammverwertungskonzeptes birgt daher ein großes Potenzial zur Verringerung der Schadstoffbelastung der Steiermärkischen Böden und des Grundwassers und schont die zur Neige gehenden Rohphosphatlager. Das geprüfte technische Konzept der Klärschlammverbrennung und Klärschlammaschenaufbereitung ist daher als ökologisch sehr positiv zu bewerten.

Hinsichtlich der weiteren Vorgangsweise wird empfohlen, mit den Betreibern der definierten Einzugsgebiete Kontakt aufzunehmen, um genauere Informationen über die Qualität des Klärschlammes (Trockensubstanzgehalt, insbesondere Heizwert und Aschengehalt in der Trockensubstanz) und die Rahmenbedingungen vor Ort (zur Verfügung stehende Fläche, Verfügbarkeit von Abwärme oder Faulgas, Wille zur Zusammenarbeit) zu erhalten.

In diesem Zusammenhang sind auch Standorte mit Biogasanlagen zu prüfen, da sich hier vor allem hinsichtlich der Nutzung von Abwärme und Biogas zur Reaktorbeheizung erhebliche Synergieeffekte ergeben könnten.