



Amt für Natur und Umwelt  
Uffizi per la natura e l'ambiente  
Ufficio per la natura e l'ambiente



Variantenstudium  
Klärschlammabfuhr  
Kanton Graubünden 2011

# Impressum

## Herausgeber



Amt für Natur und Umwelt

Uffizi per la natura e l'ambiente

Ufficio per la natura e l'ambiente

## Bearbeitung durch

**ANU, Abeilung Siedlungswasser**

## Autor des Berichtes

**HOLINGER** AG  
Kasthoferstrasse 23, CH-3000 Bern 31

## **Veranlassung für das Variantenstudium**

Folgende Punkte haben das Amt für Natur und Umwelt dazu bewogen, ein Variantenstudium für die künftige Klärschlammensorgung in Auftrag zu geben:

- Der bisher gültige Klärschlammensorgungsplan datiert vom April 2000. Gemäss Art. 18 der Gewässerschutzverordnung passen ihn die Kantone in den fachlich gebotenen Zeitabständen den neuen Erfordernissen an.
- Der bisherige Klärschlammensorgungsplan beinhaltet zwei Entsorgungswege: Die Verwertung in der Landwirtschaft und die zentrale Trocknung mit anschliessender Verbrennung in der Zementindustrie.

Bis zum 30. September 2006 konnte Klärschlamm als Dünger in der Landwirtschaft eingesetzt werden. Ab diesem Zeitpunkt ist der Einsatz von Klärschlamm als Dünger untersagt (Chemikalien Risiko Reduktionsverordnung). Für die Entsorgung des in Bündner Abwasserreinigungsanlagen anfallenden Klärschlamms steht somit nur noch der Entsorgungsweg via Trocknung und Verbrennung offen.
- Für die Trocknung des Bündner Klärschlamms hat die Stadt Chur auf dem Areal der ARA Chur eine Trocknungsanlage (TRAC) erstellt. Diese ist seit 1999 in Betrieb und wurde nach rund 10 Jahren im Bereich der maschinellen Ausrüstung nochmals erneuert. Nach weiteren 5 bis 10 Jahren werden aufgrund des Alters und der aufgelaufenen Betriebsstunden, insbesondere im Bereich der maschinellen Ausrüstung Ersatz- resp. werterhaltende Massnahmen wieder anstehen. Die Stadt Chur als Eigentümerin der Anlage braucht eine Investitionssicherheit. Dies bedeutet, dass der Zeitpunkt für eine neue Form der Klärschlammensorgung und damit verbunden die Ausserbetriebnahme der TRAC möglichst frühzeitig bekannt sein muss.
- Die Rückgewinnung von Nährstoffen, insbesondere von Phosphor aus dem Klärschlamm wird intensiv diskutiert und in Pilotanlagen bereits getestet. Im Rahmen der Revision der technischen Verordnung über Abfälle wird diskutiert, ob die Rückgewinnung des Phosphors aus dem Klärschlamm vorgeschrieben werden soll.
- Verschiedene neue Verfahren zur Klärschlammverwertung werden entwickelt, so zum Beispiel das Verfahren der hydrothermalen Carbonatisierung (HTC).
- Es stellt sich die Frage, ob die bestehende Art der Klärschlammensorgung noch wirtschaftlich ist und den künftig geltenden Rahmenbedingungen entspricht. Wie schneidet die bestehende Lösung bezüglich Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz gegenüber anderen Entsorgungsformen ab?

## **Randbedingungen für das Variantenstudium**

Das Amt für Natur und Umwelt möchte an der zentralen Klärschlammensorgung für den gesamten Kanton festhalten. Weitere dezentrale Entsorgungsanlagen, wie die bereits vorhandene solaren Klärschlamm-trocknungsanlage der CADI, sollen nicht zugelassen werden.

Die zentrale Entsorgung hat im Raum des Churer Rheintals zu erfolgen, da in diesem Raum anteilmässig die grösste Menge Klärschlamm anfällt.

Die gesamte anfallende Klärschlammmenge im Kanton beträgt rund 4'500 Tonnen Trocken-substanz pro Jahr. Der Bau und Betrieb von Klärschlammensorgungsanlagen wird unwirtschaftlich, wenn diese Menge durch die Erstellung von dezentralen Anlagen gesplittet wird. In Fachkreisen wird wiederkehrend die Aufhebung des Verbots für den Einsatz von Klärschlamm als Dünger diskutiert. Das Amt für Natur und Umwelt geht davon aus, dass das Verbot nicht aufgehoben wird. Zudem wäre im Kanton Graubünden infolge mangelnder Akzeptanz der Einsatz von Klärschlamm als Dünger nur in sehr bescheidenem Rahmen möglich.

## Untersuchte Varianten

Folgende Entsorgungsvarianten wurden im Rahmen des Variantenstudiums untersucht:

- Variante 1: Trocknung TRAC, Verbrennung Holcim
- Variante 2: Trocknung an neuem Standort, Verbrennung Holcim
- Variante 3: Verbrennung in der KVA des GEVAG
- Variante 4: Monoverbrennung in Graubünden
- Variante 5: Monoverbrennung in einer bestehenden Anlage ausserkantonal
- Variante 6: Export ins Ausland
- Variante 7: Hydrothermale Carbonisierung (HTC), Monoverbrennung ausserkantonal

Mit diesem breiten Fächer an Varianten sollen alle heute denkbaren Formen der Entsorgung abgedeckt werden.

## Resultate

In folgender Tabelle werden die Resultate komprimiert dargestellt. Detailliertere Angaben sind dem Bericht zu entnehmen:

Variante	Investitionen CHF in Mio.	Entsorgungskosten CHF pro Tonne Schlamm (TS = 30%)	Primärenergie- Bilanz GJ - Eq	CO <sub>2</sub> -Bilanz CO <sub>2</sub> - Eq	P-Rückgewinnung aus Asche möglich
1	Werterhalt	201	+ 10'700	+ 2'800	nein
2	15.0	207	+ 33'000	+ 4'100	nein
3	Kapazität der KVA des GEVAG nicht ausreichend				
4	13.2	176	- 14'500	- 500	ja
5	1.0	143	- 15'400	- 500	ja
6	Nicht zulässig				
7	10.6	174	+ 16'500	+ 1'100	ja

Erläuterungen:

- Investitionskosten:  
Kosten für die Realisierung der Variante

- Entsorgungskosten:  
Vollkostenrechnung inkl. Amortisation der Investitionen. Ohne Transportkosten von den einzelnen ARA zum Sammelpunkt im Churer Rheintal.
- Primärenergie-Bilanz:  
Eine positive Primär-Energiebilanz bedeutet, dass insgesamt mehr Energie bei der Entsorgung des Klärschlammes gewonnen werden kann, als hineingesteckt werden muss. Die Primärenergie berücksichtigt auch den Aufwand für die Gewinnung der Energie (z.B. Braunkohle: Abbau und Transport der Kohle bis zum Verbrennungsplatz).
- CO<sub>2</sub>-Bilanz:  
Die Verbrennung von regenerativen Energieträgern wird positiv bewertet. Die Verbrennung von fossilen Energieträgern erscheint mit negativem Vorzeichen (Die Substitution von Braunkohle durch Klärschlamm in der Zementherstellung wirkt sich z.B. positiv auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz aus).
- P-Rückgewinnung aus Asche möglich:  
Die Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm befindet sich noch im Entwicklungsstadium. Am vielversprechendsten hat sich bisher die Rückgewinnung des Phosphors aus Asche erwiesen. Dies bedingt eine Monoverbrennung des Klärschlammes.

Da die Trocknungsanlage der Stadt Chur amortisiert ist, fallen die heutigen Entsorgungskosten tiefer aus als in obiger Tabelle ausgewiesen. Im Jahre 2011 betragen die Entsorgungskosten CHF 132.34 pro Tonne Klärschlamm. Langfristig ist für die Entsorgung via Trocknungsanlage Chur und Verbrennung in der Holcim Untervaz mit Entsorgungskosten von CHF 201 pro Tonne Klärschlamm zu rechnen.

## Schlussfolgerungen

Aus dem Variantenstudium können folgende Schlüsse gezogen werden:

- Mit den heutigen Randbedingungen ist die bestehende Entsorgung des Klärschlammes via Trocknungsanlage Chur und Verbrennung in der Holcim, Untervaz kurz- bis mittelfristig die wirtschaftlich günstigste Variante.
- Die Erstellung einer neuen Trocknungsanlage an einem anderen Standort, wo ungenutzte Wärmeenergie zur Trocknung des Klärschlammes genutzt werden kann, wäre bezüglich Primärenergie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz der heutigen Lösung vorzuziehen. Diese Variante ist jedoch unwirtschaftlich. Es müssen grosse Investitionen getätigt werden und die Entsorgungskosten sind höher als bei der bestehenden Anlage. Diese Variante ist nicht weiterzuverfolgen.
- Die Verbrennung des Klärschlammes in der Kehrichtverbrennungsanlage des GEVAG in Trimmis ist aus Kapazitätsgründen nicht möglich.
- Der Bau einer Monoverbrennungsanlage für den Bündner Klärschlamm ist unwirtschaftlich. Diese Variante ist nicht weiterzuverfolgen.

- Die Monoverbrennung des Bündner Klärschlamm in einer bestehenden, ausserkantonalen Anlage ist langfristig die wirtschaftlichste Variante. Bezuglich Primärenergie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz schneidet diese Variante aber schlecht ab.
- Ein Export ins Ausland ist aufgrund der heutigen Gesetzesbestimmung nicht zulässig.
- Die Hydrothermale Carbonisierung (HTC) kann langfristig als vielversprechende Variante taxiert werden. Bezuglich Primärenergie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz schneidet diese Variante gut ab. Das Verfahren hat die Marktreife noch nicht erlangt.

Wird bei der Revision der Technischen Verordnung über Abfälle die Phosphorrückgewinnung vorgeschrieben, so wäre eine Trocknung mit anschliessender Verbrennung in einem Zementwerk nicht mehr möglich, ausser es würde ein Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor aus dem getrockneten Klärschlamm entwickelt.

Sollte die Phosphorrückgewinnung vorgeschrieben werden, so wäre dies sicherlich mit einer Übergangsfrist verbunden. In dieser Übergangsfrist könnte auf Basis des Variantenstudiums ein neuer Entsorgungsweg realisiert werden.

## Beschluss

Aufgrund der Resultate des Variantenstudiums Klärschlammensorgung des Kantons Graubünden beschliesst das Amt für Natur und Umwelt:

- Der Klärschlammensorgungsplan vom April 2000 wird vorderhand nicht angepasst. Der im Entsorgungsplan enthaltene Einsatz des Klärschlamm als Dünger ist nicht mehr zulässig.
- Unter Vorbehalt von Gesetzesanpassungen soll der Bündner Klärschlamm kurz- bis mittelfristig wie bisher in der Trocknungsanlage der Stadt Chur (TRAC) getrocknet und im Zementwerk der Holcim in Untervaz verbrannt werden.
- Wird die Phosphorrückgewinnung gesetzlich verankert, erfolgt eine Neubeurteilung auf Basis des Variantenstudiums.
- Das Amt für Natur und Umwelt verfolgt weiterhin die Entwicklung von neuen Verfahren zur Klärschlammensorgung. Gelangen Verfahren zur Marktreife, so werden diese geprüft und zur Umsetzung erwogen.

Mit dem „Variantenstudium Klärschlammensorgung Graubünden“ wurde die Grundlage gelegt, damit auf künftige Veränderungen der Gesetzgebung und auf technische Entwicklungen zeit- und fachgerecht reagiert werden kann.

Amt für Natur und Umwelt  
Der Amtsleiter

*Remo Fehr*

# Variantenstudie Phase 1

## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	7
1 Ausgangslage und Auftrag .....	10
1.1 Situation .....	10
1.2 Aufgabenstellung .....	10
1.3 Zeithorizont .....	11
2 Methodik .....	12
2.1 Systemgrenzen .....	12
2.2 Bilanzierung .....	12
2.2.1 Massenbilanz .....	12
2.2.2 Endenergieflussdiagramm .....	12
2.2.2.1 Energieinhalt Klärschlamm .....	13
2.2.2.2 Thermische Energie .....	13
2.2.2.3 Prozessenergie .....	13
2.2.3 Primärenergiebilanzen .....	14
2.2.4 CO <sub>2</sub> -Bilanz .....	15
2.3 Abschätzung der Vergleichskosten .....	15
3 Beschrieb der betrachteten Varianten .....	18
3.1 Gesetzliche Grundlagen .....	18
3.2 Auslegungsdaten .....	18
3.3 Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm .....	19
3.4 Übersicht der Varianten .....	21
3.5 Mögliche Standorte .....	23
3.5.1 Chur .....	24
3.5.2 Domat/Ems .....	24
3.5.3 Trimmis .....	24
3.5.4 Untervaz .....	25
3.6 Variante 1: Trocknung in Chur und Verbrennung in Untervaz .....	26
3.6.1 Beschreibung .....	26
3.6.2 Anlagen .....	26
3.6.3 Transporte .....	27
3.6.4 Endenergiefluss .....	27
3.6.5 Primärenergie- und CO <sub>2</sub> -Bilanz .....	28
3.6.6 Kosten Klärschlammensorgung .....	28
3.7 Variante 2: Verbrennung in Untervaz / Trocknung an neuem Standort .....	30
3.7.1 Beschreibung .....	30
3.7.2 Anlagen .....	31
3.7.3 Transporte .....	31
3.7.4 Endenergiefluss .....	32
3.7.5 Primärenergie- und CO <sub>2</sub> -Bilanz .....	33
3.7.6 Kosten Klärschlammensorgung .....	33
3.8 Variante 3: Co-Verbrennung in der KVA GEVAG .....	35
3.8.1 Beschreibung .....	35
3.9 Variante 4: Eigenständige Monoverbrennung in GR .....	36
3.9.1 Beschreibung .....	36
3.9.2 Anlagen .....	37
3.9.3 Transporte .....	37

3.9.4	Endenergiestrom .....	38
3.9.5	Primärenergie- und CO <sub>2</sub> -Bilanz .....	39
3.9.6	Kosten Klärschlammverarbeitung .....	39
3.9.7	Deponierung .....	40
3.10	Variante 5: Ausserkantonale Verwertung in einer Monoverbrennung .....	41
3.10.1	Variante 5 a): Export des Klärschlammes zur KVA Bazenheid (Monoverbrennung)...	41
3.10.2	Variante 5 b): Export des Klärschlammes nach Zürich Werdhölzli (Monoverbrennung)	42
3.10.3	Beschreibung .....	42
3.10.4	Transporte .....	43
3.10.5	Endenergiestrom .....	43
3.10.6	Primärenergie- und CO <sub>2</sub> -Bilanz .....	44
3.10.7	Kosten Klärschlammverarbeitung .....	44
3.11	Variante 6: Export ins Ausland .....	46
3.12	Variante 7: Anbietervariante: HTC .....	47
3.12.1	Der HTC-Prozess .....	47
3.12.2	Beschreibung .....	48
3.12.3	Transporte .....	49
3.12.4	Endenergiestrom .....	50
3.12.5	Primärenergie- und CO <sub>2</sub> -Bilanz .....	50
3.12.6	Vergleich Trocknung - HTC-Prozess .....	51
3.12.7	Ausblick .....	52
3.12.8	Kosten Klärschlammverarbeitung .....	53
4	Szenarienvergleich .....	54
4.1	Beurteilungskriterien .....	54
4.1.1	Investitionskosten .....	54
4.1.2	Schlammverarbeitungskosten pro Tonne Klärschlamm (30%) .....	54
4.1.3	Entsorgungssicherheit .....	55
4.1.4	Komplexität Verfahren .....	55
4.1.5	Energie- und CO <sub>2</sub> -Bilanz .....	55
4.1.6	Transporte .....	56
4.1.7	Phosphorrückgewinnung .....	56
4.1.8	Abwasserbehandlung .....	57
4.1.9	Technologische Risiken .....	57
4.2	Beurteilung .....	57
4.3	Weiteres Vorgehen .....	61

## Anhang

- Anhang 1 Kostenberechnungen
- Anhang 2 Energiebilanzen
- Anhang 3 Report Quantis: Energie und CO<sub>2</sub>-Bilanzen

## Zusammenfassung

Die bestehende Klärschlammertrocknung in Chur (TRAC) wurde 1998 in Betrieb genommen und ist mittlerweile abgeschrieben, funktioniert aber noch einwandfrei. Vor diesem Hintergrund klärt diese Variantenstudie, wie die Klärschlammertsorgung im Kanton Graubünden langfristig aussehen könnte. Die Studie ist in zwei Phasen gegliedert, wobei in einer ersten ein breites Spektrum an Varianten beurteilt wird, während in der zweiten Phase nur noch die favorisierten Varianten tiefer untersucht werden. Folgende zu untersuchende Varianten wurden vom ANU (Amt für Natur und Umwelt) für die erste Phase vorgegeben:

- Variante 1: Status Quo mit Trocknung in Chur und Verbrennung im Zementwerk
- Variante 2: Trocknung an einem neuen Standort und Verbrennung im Zementwerk
  - a) in Untervaz mit Abwärme aus der Holcim AG
  - b) in Trimmis mit Abwärme aus der KVA GEVAG
  - c) in Domat/Ems mit Abwärme aus dem Holzkraftwerk Axpo Tegra
- Variante 3: Entsorgung direkt in der KVA GEVAG in Trimmis
- Variante 4: Neue, eigenständige Monoverbrennung im Graubünden
  - a) in Chur auf dem Gelände der ARA Chur
  - b) in Trimmis integriert in den Betrieb der GEVAG
  - c) in Domat/Ems bei der Axpo Tegra
- Variante 5: Export des Klärschlammes in eine Monoverbrennung in der Schweiz
  - a) Monoverbrennung des ZAB (Zweckverband Abfallverwertung Bazenheid)
  - b) Neue Monoverbrennung in Zürich beim Klärwerk Werdhölzli
- Variante 6: Export ins Ausland, Verbrennung in einem Kohlekraftwerk
- Variante 7: Hydrothermale Carbonisierung (HTC) des Klärschlammes

Die Varianten 3 und 6 können bereits nach ersten Abklärungen ausgeschlossen werden. Für Variante 3, die eine Co-Verbrennung des Klärschlammes in der KVA GEVAG vorsieht, ist die Kapazität in Trimmis zu klein und eine Aufteilung des Klärschlammes in zwei unterschiedliche Entsorgungswege kommt nicht in Frage. Variante 6, die den Klärschlamm im Ausland entsorgt, kommt ebenfalls nicht in Frage, da der Bund keine längerfristige Bewilligung für den Export von Klärschlamm erteilen wird.

Ein wichtiger Aspekt bei der Frage nach dem künftigen Weg der Klärschlammertsorgung ist die angekündigte Revision der Technischen Verordnung über Abfälle (TVA). Eine Rückgewinnung des Phosphors aus dem Klärschlamm steht bei der anstehenden Revision im Zentrum. Falls die P-Rückgewinnung gesetzlich in der TVA verankert wird, sind, in Anbetracht der heutigen technischen Verfahren, nur noch Monoverbrennungen als Entsorgungsweg gangbar. Heute wird Phosphor noch nicht in industriellem Massstab zurückgewonnen.

Durch die separate Deponierung der Klärschlammmasche aus Monoverbrennungen ist eine P-Rückgewinnung zu einem späteren Zeitpunkt, nach heutigem Kenntnis stand, möglich.

Die übrigen Varianten werden in diesem Bericht genauer betrachtet und anhand von mehreren Kriterien beurteilt. Nicht berücksichtigt werden gesellschaftliche Kriterien wie politische Machbarkeit oder Akzeptanz bei der Bevölkerung. In nachfolgender Tabelle sind die Investitionskosten, die Entsorgungskosten pro Tonne Klärschlamm, die Möglichkeit der P-Rückgewinnung und die Primärenergiebilanz dargestellt. In der Primärenergiebilanz werden die eingesetzte Energie und die in der Klärschlammverwertung produzierte, nutzbare Energie durch standardisierte Umrechnungsfaktoren in Primärenergie-Equivalente umgerechnet und bilanziert. Ein positiver Wert in dieser Energiebilanz weist darauf hin, dass mehr Primärenergie-Equivalente aus der Klärschlammverwertung gewonnen werden können, als eingesetzt werden müssen.

	Neuinvestitionen [CHF]	Kosten pro Tonne Klärschlamm (30%) [CHF]	P- Rückgewinnung	Primärener- giebilanz GJ-Eq/a
Variante 1 Trocknung Chur	6'648'340	201 / 128*	nicht möglich	10'707
a) Trocknung Untervaz	15'022'500	241	nicht möglich	33'044
Variante 2 b) Trocknung Trimmis	15'022'500	207	nicht möglich	33'011
c) Trocknung Domat/Ems	13'313'875	213	nicht möglich	32'721
Variante 4 a) Monoverbrennung in Chur	13'208'700	176	möglich	-14'545
b) Monoverbrennung in Trimmis	13'170'500	185	möglich	-14'731
c) Monoverbrennung in Domat/Ems	15'970'500	207	möglich	-14'731
Variante 5 a) Monoverbrennung in Bazenheid	1'003'800	143	möglich	-15'414
b) Monoverbrennung in Zürich	1'003'800	164	möglich	-15'539
Variante 7 Hydrothermale Carbonisierung	10'569'200	174	möglich	16'488

\* Die Entsorgungskosten betragen 2010 128 CHF/t KS. 201 CHF/t KS ist der Vergleichspreis, der auch die Abschreibungskosten der Anlagenkosten enthält

Im Vergleich der Varianten 1 und 2 (Trocknung an verschiedenen Standorten) weisen alle Untervarianten der Variante 2 bessere Energiebilanzen auf. Grund dafür ist die Nutzung von unterschiedlichen Abwärmequellen zur Deckung des Wärmebedarfs der Trocknung, während in Chur die Wärme mit einem Gasbrenner bereitgestellt werden muss. Trotzdem weist auch die Variante 1 eine positive Primärenergiebilanz auf, da bei der Verbrennung im Zementwerk der Klärschlamm als Energieträger eingesetzt wird und direkt Braunkohle substituiert. Die Investitionskosten für die Neubauten einer Trocknung sind deutlich höher als eine umfassende Sanierung der heutigen Trocknung in Chur. Auch fallen die Entsorgungskosten in Variante 1 etwas tiefer aus. Aufgrund dieser Fakten ist, falls der Weg mit Klärschlamm-trocknung und anschliessender Verbrennung im Zementwerk weitergegangen werden soll, die Variante 1 mit dem Standort Chur zu favorisieren.

Eine neue Monoverbrennung im Kanton Graubünden (Variante 4) ist mit hohen Investitionskosten verbunden. Die negativen Primärenergiebilanzen kommen aufgrund des hohen Wassergehaltes im entwässerten Klärschlamm zustande. In der Verbrennung wird ein Grossteil des Energiegehalts des Klärschlamm für die Verdampfung verbraucht, wodurch die nutzbare Energie im Vergleich zu Variante 1 oder 2 deutlich kleiner wird. Die kantonal jährlich anfallenden 15'000 t Klärschlamm (Trockensubstanzgehalt von 30%) liegen zudem an der unteren Jahresmenge, für wel-

che überhaupt Systeme für Klärschlammmonoverbrennungen erhältlich sind. In Anbetracht der freien Kapazitäten in der bestehenden Monoverbrennung in Bazenheid SG, oder der entstehenden neuen Monoverbrennung in Zürich macht es wenig Sinn im Kanton Graubünden eine eigenständige Monoverbrennung zu erstellen.

Wird der Transport per Bahn gemacht, haben die nötigen Transportkilometer keinen grossen Einfluss auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz. Die Kosten für einen Export des Klärschlamm zu einer ausserkantonalen Anlage sind ausserdem kurz- und langfristig tiefer als die Amortisation einer innerkantonalen Kleinverbrennung. Wird der Klärschlamm einer Monoverbrennung zugeführt ist also Variante 5 zu favorisieren. Aufgrund des tieferen Entsorgungspreises ist der Standort Bazenheid dem Standort Zürich vorzuziehen (dies allerdings erst nach ersten Abklärungen).

Die Technologie der hydrothermalen Carbonisierung von Klärschlamm (Variante 7) ist ein interessantes Verfahren, das im Vergleich zu einer Trocknung deutlich weniger thermische und elektrische Energie verbraucht. Das Verfahren steckt heute allerdings noch in der Pilotierungsphase. Ende 2011 existiert noch keine Anlage die im industriellen Massstab Klärschlamm verarbeitet. Erfahrungen stammen einzig aus Laborversuchen und typähnlichen Pilotanlagen. Ein weiterer ungewisser Punkt ist die Entsorgung der entstehenden Klärschlammkohle, für welche in dieser Studie vorerst die Verbrennung in einer bestehenden Monoverbrennung vorgesehen wird. Möglicherweise entstehen für die Verwertung der Klärschlammkohle künftig lukrativere Lösungen. Im Verlauf der nächsten Jahre wird sich weisen, ob die hydrothermale Carbonisierung ein wirtschaftliches Verfahren für die Verarbeitung von Klärschlamm werden könnte.

Als Abschluss der ersten Phase ergibt sich folgendes Fazit:

- Die heutige Ungewissheit bezüglich der künftigen Gesetzgebung für die P-Rückgewinnung lässt keine klare Entscheidung zu.
- Die hydrothermale Carbonisierung kann eine vielversprechende Technologie für die Zukunft sein. Hingegen sind die Erfahrungen mit der Carbonisierung von Klärschlamm bis heute noch zu knapp, als dass sofort auf diese Technologie gesetzt werden kann.
- Die TRAC in Chur kann weitere 5-10 Jahre kostengünstig betrieben werden, ohne dass bedeutende Neuinvestitionen anfallen.

**Aufgrund dieser Befunde kann der Entscheid, wie die künftige Klärschlamm-entsorgung im Kanton Graubünden erfolgen soll, nicht zum jetzigen Zeitpunkt getroffen werden.**

Ein Entscheid kann im Verlauf der nächsten 5 Jahre getroffen werden, wenn zu den oben genannten Punkten genauere Fakten vorhanden sind.

Als deutlich favorisierte Varianten gehen aus diesem Bericht die Varianten 1 (Beibehaltung TRAC), 5 (Abgabe an ausserkantonale Monoverbrennung) und 7 (Hydrothermale Carbonisierung) hervor. In einer zweiten Phase (Vertiefungsphase) werden diese Varianten genauer untersucht.

# 1 Ausgangslage und Auftrag

## 1.1 Situation

Der grösste Teil (>90%) des anfallenden Klärschlammes des Kantons Graubünden wird heute zentral in der Trocknungsanlage Chur (TRAC) behandelt und in einem Zementwerk der Holcim AG in Untervaz verbrannt.

Die Stadt Chur als Eigentümerin und Betreiberin der TRAC will Klarheit über die Zukunft der über 10-jährigen Anlage. Die ehemaligen Investitionskosten von gut 11 Millionen CHF sind seit kurzem abgeschrieben. Der Wirbelschichttrockner als Kernkomponente wurde 2008 ersetzt, hingegen ist die Lebensdauer von diversen weiteren Anlageteilen erreicht.

Bevor weitere langfristige Investitionen in die TRAC getätigt werden, muss der zukünftige Weg der Klärschlammverwertung im Kanton Graubünden abgeklärt werden. Mehrere Verfahren an verschiedenen Standorten kommen für die künftige Klärschlammverwertung infrage. Eine grosse Rolle bei der Beurteilung des künftigen Entsorgungsweges spielt die Möglichkeit zur Rückgewinnung von Phosphor und der im Zusammenhang stehenden Gesetzesrevision auf Bundesebene.

## 1.2 Aufgabenstellung

Der Klärschlamm-Entsorgungsplan Graubünden stammt aus dem Jahr 2000 und muss in naher Zukunft angepasst und aktualisiert werden. Mit der Variantenstudie Klärschlammverwertung Graubünden soll die Grundlage für diesen Bericht erarbeitet werden. Die zu beurteilenden Varianten sind im Pflichtenheft der Ausschreibung dieses Auftrags definiert. Bei den zu beurteilenden Varianten handelt es sich um folgende Verfahren:

- Status Quo: Trocknung in Chur
- Trocknung an neuem Standort
- Entsorgung in der KVA GEVAG, Trimmis
- Eigenständige Monoverbrennung im Kanton Graubünden
- Export in eine ausserkantonale Monoverbrennung
- Export ins Ausland
- Anbietervariante (Hydrothermale Carbonisierung)

Das Vorgehen besteht aus zwei Phasen:

- ***Phase 1***
  - Evaluation und Grobbeurteilung der möglichen Entsorgungswege: Darstellung, Gewichtung und Vergleich von Machbarkeit, Wirtschaftlichkeit, Entsorgungssicherheit, sowie CO<sub>2</sub>- und Energiebilanzen.
  - Qualitative Beurteilung der aufgeführten Kriterien. Ausgearbeitet wird ein Vorschlag welche Varianten zur weiteren Beurteilung in der Phase 2 weitergezogen werden.
  - Entscheid durch das Amt für Natur und Umwelt Graubünden (ANU) welche Varianten in der Phase 2 genauer untersucht werden.
  
- ***Phase 2***
  - Vertiefte Untersuchung und Konkretisierung der vom ANU favorisierten Varianten.
  - Begründete Empfehlung wie die Klärschlammensorgung im Kanton Graubünden in Zukunft aussehen kann.

Der Entscheid, mit welcher Variante in Zukunft der Klärschlamm im Graubünden entsorgt wird, erfolgt durch die politischen Behörden im Kanton und das ANU. Die Variantenstudie soll für diese Entscheidung die Grundlage liefern.

### 1.3 **Zeithorizont**

Aufgrund der heutigen Situation im Zusammenhang mit der bestehenden TRAC wird der Zeithorizont für den Übergang auf ein künftiges Entsorgungsszenario mit 10 bis maximal 15 Jahren angenommen. Die Entscheidungsgrundlage sollte demnach in etwa 5 Jahren vorliegen. Es wird nicht ausgeschlossen, dass vor allem günstige finanzielle Aspekte unter Einhaltung der umwelttechnischen Belange auch die frühere Einführung eines bestimmten Szenariums möglich wäre.

## 2 Methodik

### 2.1 Systemgrenzen

Für die Beurteilung der untersuchten Varianten wird davon ausgegangen, dass der entwässerte Klärschlamm an einem zentralen Ort (heute in Chur) anfällt. Der Transport des anfallenden Klärschlamm aus den ARAs des ganzen Kantons zum Sammelort (heute Chur) wird daher nicht berücksichtigt.

Die Systemgrenze beinhaltet den gesamten Weg des Klärschlamm vom Sammelort Chur bis hin zur Deponierung der Verbrennungsasche.

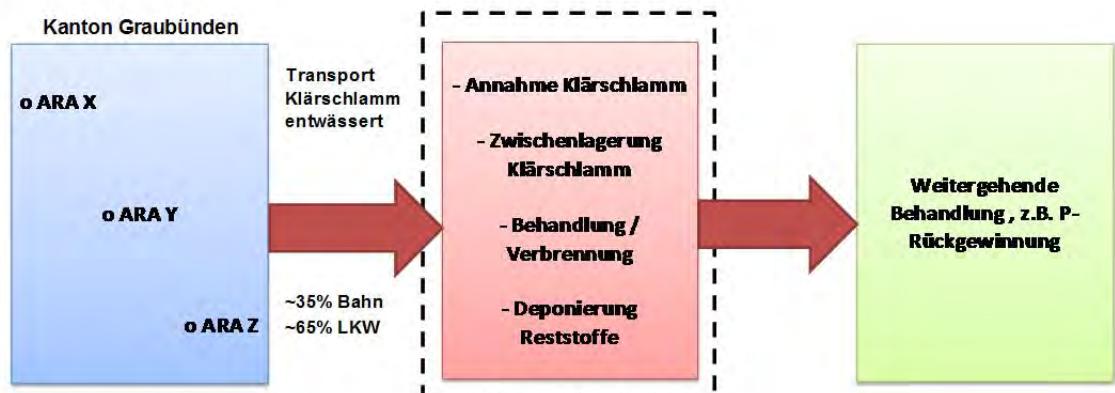


Abbildung 1: Systemgrenzen

### 2.2 Bilanzierung

Für jede Variante werden eine Massenbilanz, ein Endenergieflussdiagramm, sowie eine Primärenergie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz erstellt. Für die Verdeutlichung werden die Sachverhalte mit Diagrammen illustriert. Die Primärenergie- und CO<sub>2</sub>-Bilanzen beruhen auf der Auswertung der Firma Quantis und befinden sich detailliert im **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..**

Für die Beurteilung der Varianten ist es entscheidend, ob diese Nutzenergie auch effektiv genutzt wird und einen anderen Energieträger substituiert oder ob die Nutzenergie ungenutzt als Wärme an die Umgebung abgegeben wird. In diesem Bericht wird, um die Varianten besser vergleichbar zu machen, diese Energie bei sämtlichen Varianten als nutzbar deklariert. Die Nutzungsmöglichkeiten der entstehenden Energie in den einzelnen Varianten werden jeweils separat deklariert.

#### 2.2.1 Massenbilanz

Die Massenbilanz wird in einer Grafik (Massenflussschema) dargestellt und zeigt schematisch die Prozessschritte und die Massenflüsse des Klärschlammes.

#### 2.2.2 Endenergieflussdiagramm

Das Endenergieflussdiagramm zeigt, welche Energieinhalte für die Klärschlammverwertung eingesetzt werden. Die Energien werden unterteilt in Energieinhalt des Klärschlammes, eingesetzte thermische Energie und Prozessenergie. Die Energiegrößen sind nachfolgend erläutert.

### **2.2.2.1 Energieinhalt Klärschlamm**

Der Klärschlamm hat einen organischen Anteil, der einem Heizwert entspricht. Der Heizwert des organischen Anteils entspricht gemäss Literatur 20 MJ/ kg oTS.

### **2.2.2.2 Thermische Energie**

Die thermische Energie wird bei den Trocknungsvarianten benötigt um das Restwasser im Klärschlamm zu verdampfen. Hierbei wird unterschieden ob es sich um hochwertige Energie handelt (bspw. Biogas oder Erdgas) oder um niederwertige Energie (heute ungenutzte Abwärme).

Die thermische Energie wird als Heizwert angegeben und kann zusammen mit dem Energieinhalt des Klärschlammes bilanziert werden. Im Prozess der Klärschlammverwertung wird der eingesetzte Heizwert umgewandelt. Nach der Umwandlung wird zwischen hochwertiger und niederwertiger Energie und Prozessverlusten unterschieden. Die hochwertige Energie wird als Wärmeenergie genutzt und substituiert einen anderen Energieträger. Die niederwertige Energie könnte theoretisch genutzt werden, liegt aber auf einem tiefen Temperaturniveau, welches eine Nutzung nicht rentabel macht. Die Verluste entstehen aufgrund des Wirkungsgrades der jeweiligen Prozesse und können nicht genutzt werden.

### **2.2.2.3 Prozessenergie**

Unter die Prozessenergie fallen sämtliche zusätzlich aufgewendeten Energien, die benötigt werden um die Schlammverwertung durchzuführen. Hierzu gehören Transporte, der Strombedarf der Prozesse und der Abwasserreinigung. Die Prozessenergie wird bspw. bei den Transporten in Abwärme der Abgase oder Abrieb auf der Strasse umgewandelt oder im Fall der Abwasserreinigung für den Betrieb der ARA benötigt. In den Endenergiendiagrammen wird die Prozessenergie deshalb zu den Verlusten gerechnet.

Nachfolgend wird der Rechnungsweg oder die Herkunft der Angaben zur Prozessenergie erläutert.

#### **Stromverbrauch**

Der Stromverbrauch der jeweiligen Prozesse ergibt sich aus Erfahrungswerten und Herstellerangaben.

#### **Transport**

Der Energieverbrauch für die Transporte ergibt sich aus dem Kraftstoffverbrauch für die LKW-Transporte. Die Transporte per Bahn werden mit einem spezifischen Stromverbrauch für den Gütertransport pro Tonnenkilometer berechnet<sup>1</sup>.

#### **Abwasserbehandlung**

Der Klärschlamm besitzt einen Trockensubstanzgehalt von 30 %, d.h. 70 % davon sind Wasser. Dieses Wasser fällt unabhängig vom Verwertungsweg an und muss gereinigt werden. Die Schmutzstofffracht des Abwassers ist bekannt und kann mit

---

<sup>1</sup> 9 kWh Elektrizität für 100 Tonnenkilometer. Quelle: Energieportal energie.ch

spezifischen Einwohnerfrachten in Einwohnergleichwerte umgerechnet werden<sup>2</sup>. Die Ermittlung des Strombedarfs für die Abwasserreinigung ergibt sich aus dem spezifischen Energiebedarf einer ARA, der abhängig ist von der Ausbaugrösse<sup>3</sup>.

### 2.2.3 Primärenergiebilanzen

Für die Erstellung der Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanzen wurde die Firma Quantis in Lausanne beauftragt. Die Beurteilung von Quantis ist in Englisch und befindet sich im Anhang. In diesem Abschnitt wird das Vorgehen im Detail beschrieben.

Für die Erstellung der Primärenergiebilanzen wurden sämtliche relevanten Energieströme, die in den jeweiligen Varianten genutzt werden, berücksichtigt. Um diese unterschiedlichen Ströme vergleichbar zu machen, können die verschiedenen Energieeinheiten auf den Verbrauch von nicht-erneuerbarer Primärenergie umgerechnet werden. Diese Umrechnungen wurden mit den entsprechenden Faktoren aus der Datenbank Ecoinvent v2.2 (2010)<sup>4</sup> des Swiss Centre for Life Cycle Inventories durchgeführt. Diese Datenbank ist international anerkannt und wird dementsprechend oft für ähnliche Anwendungen gebraucht.

Durch die Umrechnung in den Verbrauch von nicht-erneuerbarer Primärenergie (in MJ<sub>p</sub>) können Prozesse die unterschiedliche Energien einsetzen verglichen werden, was im Endenergiendiagramm noch schwierig ist. Beispielsweise kann durch diese Umrechnung der Verbrauch an elektrischer Energie direkt dem Verbrauch von Erdgas gleichgesetzt werden.

Für die Berechnung der Energiebilanz wird jeweils die Periode eines ganzen Jahres herangezogen. Um die verschiedenen Varianten untereinander besser vergleichbar zu machen wurde der gesamte Prozess in 4 Teilprozesse aufgeteilt, separat beurteilt und verglichen. Dies sind namentlich:

1. Die Trocknung, resp. Carbonisierung des entwässerten Schlammes

Der Wärmebedarf wird hierbei durch hochwertige Energie (Gas) oder niedrigwertige Energie (Abwärme) gedeckt. Für die Energiebilanzen wird hierbei nur die hochwertige Energie berücksichtigt. Die genutzte Abwärme in einzelnen Varianten fällt auch ohne die Nutzung in einer neuen Trocknung an und wird deshalb in der Energiebilanz nicht berücksichtigt.

2. Transporte (per Bahn und LKW)

Die Transporte werden in Tonnenkilometern (tkm) berechnet. Tonnenkilometer ergeben sich aus dem Produkt von Gewicht der transportierten Güter und transportierten Distanz.

3. Die Verbrennungsprozesse (Monoverbrennung oder Zementwerk)

---

<sup>2</sup> Gemäss VSA-FES

<sup>3</sup> Gemäss „Anleitung zur Analyse des Energieverbrauchs in Abwasserreinigungsanlagen des Kantons Zürich“, Baudirektion Kanton Zürich, Januar 2007

<sup>4</sup> Ecoinvent (2010). Ecoinvent Centre, ecoinvent data v2.2, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf CH

In der Verbrennung werden mehrere Prozesse (Prozessenergie, Rauchgasreinigung, Prozessmittel etc.) zusammengefasst.

#### 4. Die Reinigung des anfallenden Abwassers

Die anfallenden Brüdenabwässer müssen entweder separat oder in einer bestehenden ARA gereinigt werden. Abhängig von der Ausbaugrösse der Abwasserreinigungsanlage fällt der Energieverbrauch unterschiedlich aus.

Durch die Verbrennung des Klärschlamm entsteht Energie, die genutzt werden kann und direkt einen anderen Energieträger substituiert. In sämtlichen Varianten wird die entstandene Wärmeenergie als nutzbar deklariert und wirkt sich positiv auf die Gesamtenergiebilanz aus.

Die Ergebnisse der Gesamtenergiebilanz sind schliesslich die ausschlaggebenden und untereinander vergleichbaren Kennwerte.

#### 2.2.4 CO<sub>2</sub>-Bilanz

Die Berechnung der CO<sub>2</sub>-Bilanz wird mit einem ähnlichen Ansatz wie bei der Energiebilanz durchgeführt. Jeder Energiestrom der eingesetzt wird, kann mit dem spezifischen Treibhausgaspotential in CO<sub>2</sub>-Äquivalente umgerechnet werden. Die spezifischen Treibhausgaspotentiale stammen aus dem Fourth Assessment Report<sup>5</sup> des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). In diesem Report sind die Effekte des jeweiligen Treibhausgassausstosses in der Atmosphäre über einen Zeithorizont von 100 Jahren berücksichtigt.

Die Berechnung der gesamten CO<sub>2</sub>-Bilanz erfolgt identisch wie in der Energiebilanz durch die Aufteilung in dieselben 4 Teilprozesse. Die entstandenen Energien, die direkt genutzt werden können oder einen anderen Energieträger substituieren, werden der gesamten CO<sub>2</sub>-Bilanz ebenfalls wiederum gutgeschrieben.

Die Resultate der CO<sub>2</sub>-Bilanz werden so untereinander verglichen.

### 2.3 Abschätzung der Vergleichskosten

Die Vergleichskosten werden aufgrund konsistenter Kostenannahmen dargestellt. Entscheidend sind dabei Jahreskosten, welche sich aus der Summe von Werterhaltungskosten (Abschreibung) und Betriebskosten (laufende Kosten) darstellen lassen. Die Jahreskosten lassen sich danach auf Kosten pro angelieferte Tonne Klärschlamm oder pro Tonne Trockensubstanz umrechnen und darstellen.

Die abgeschätzten Vergleichskosten verteilen sich auf folgende Kostenfaktoren:

#### 1. Neuinvestitionen

Die Kosten für Schlammannahmestation, Erstellung von Gebäuden und Erschließung, sowie Kosten für die Trocknung werden aus den Erstellungskosten der TRAC aus dem Jahr 1997 entnommen und entsprechend aufindexiert (1997-2011: ca.

---

<sup>5</sup> IPCC (2007). Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I of the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change

25%)<sup>6</sup>. Weitere Investitionskosten werden durch Erfahrungswerte oder konkrete Of-fertanfragen abgeschätzt.

Bei den Varianten, die in Chur die bestehende Schlammannahme und die beste-henden Gebäude nutzen, entfallen die betreffenden Investitionskosten. Um die zu- künftig anfallenden Reparatur- und Unterhaltskosten zu berücksichtigen, wird in den Investitionskosten für Sanierung der Gebäude und Ersatz der elektromechanischen Ausrüstung ein aufindexierter Betrag von 40% der Erstellungskosten von 1997 ver-rechnet.

Bei den Varianten in denen Abwärme in irgendeiner Form genutzt wird, sind die Kosten für die Wärmekoppelung, d.h. die Nutzbarmachung der Abwärme, in den In-vestitionskosten enthalten.

## **2. Annuität**

Für die Abschreibung der Anlagen wird mit einer unterschiedlichen Abschreibedauer der verschiedenen Anlagen gerechnet. Für die Bausubstanz wird mit einer Ab- schreibedauer von 30 Jahren, für die elektromechanischen Anlageteile mit einer Dauer von 15 Jahren gerechnet. Da die Kosten nicht detailliert aufgeschlüsselt sind, wird in allen Varianten nur die Gebäudekosten und die Erschliessungskosten als Bausubstanz bewertet und dementsprechend über 30 Jahre abgeschrieben.

Die Abschreibung wird mit der Annuitätenmethode berechnet. Hierbei wird der Kapi-talwert der Investition über die entsprechende Abschreibedauer mit einem Kapital-zins von 3.5% berechnet.

In Varianten, bei welchen in Chur oder anderen Standorten die Infrastruktur nur sa- niert wird, erfolgt die Abschreibung wie in den Varianten bei denen ein Neubau er- stellt werden muss, über den Wiederbeschaffungswert.

## **3. Energiekosten**

Die Energiekosten setzen sich aus den Kosten für die thermische Energie und die elektrische Energie zusammen. Während für Strom ein Preis von 16 Rp/kWh ange- nommen wird, variiert der Preis für die thermische Energie je nach Standort und Art der vor Ort verfügbaren Energie zwischen 4 und 10 Rp/kWh.

## **4. Betriebskosten**

Die Betriebskosten setzen sich aus Kosten für Personal und Verwaltung, für Unter- halt und Reparaturen und für Brauchwasser zusammen. Die Personal- und Verwal-tungskosten, sowie die Kosten für das Brauchwasser bleiben für sämtliche neuen Anlagen auf dem Betrag der heutigen Kosten der TRAC. Die Unterhaltskosten für Maschinen und Mobiliar werden mit 3 % der Investitionskosten berechnet und befin-den sich ebenfalls im Bereich der heutigen Kosten der TRAC.

---

<sup>6</sup> Angaben aus der Broschüre Klärschlammtröcknung Graubünden, Bericht über die Entste-hungsgeschichte und Vorarbeiten, Juni 1997

## **5. Abgabekosten Endverwerter**

Mit den Abgabekosten werden die Entsorgungskosten für die Klärschlammmasche in einer Deponie oder die Abgabekosten beim Zementwerk bezeichnet. Auch in den Abgabekosten enthalten sind die Kosten für die Abwasserreinigung in der jeweiligen ARA oder in einer separaten Vorbehandlung.

## **6. Transportkosten**

Die Transportkosten beinhalten die Kosten für die Transporte die nach der zentralen Anlieferung des entwässerten Klärschlamm für den Weitertransport von weiteren Produkten anfallen, beispielsweise die Kosten für den Bahntransport beim Export in einen anderen Kanton oder für den LKW-Transport des Klärschlammgranulats ins Zementwerk.

In den Systemgrenzen (Kapitel 2.1) wurde definiert, dass sämtlicher Klärschlamm in Chur angeliefert wird und der Transport bis nach Chur nicht berücksichtigt wird. Wird die Schlammverwertung an einen neuen Standort verlegt, muss zusätzlich der Klärschlamm aus Chur (mehr als ein Drittel der Gesamtschlammmenge) an den neuen Standort transportiert werden. Diese Kosten werden berücksichtigt. Der Transport des übrigen Schlamm aus dem Kanton Graubünden an den neuen Standort wird nicht berücksichtigt, da sich hier Mehr- und Mindertransporte in etwa aufheben.

Die Summe dieser Kosten (Punkte 2 bis 6) ergeben die Jahreskosten, die auf Kosten pro Tonne entwässerten Klärschlamm (CHF/t) und pro Tonne Trockensubstanz (CHF/t TS) umgerechnet werden.

In der Phase 2 erfolgt für die weitergezogenen Varianten eine verfeinerte Berechnung der Kosten.

### 3 Beschrieb der betrachteten Varianten

#### 3.1 Gesetzliche Grundlagen

Die gesetzlichen Grundlagen zur Ausarbeitung der Studie finden sich in den folgenden Gesetzen und Verordnungen:

- Art. 31b Abs. 1 [USG](#)
- Art. 18-21 [GSchV](#)
- Anhang 2.6 [ChemRRV](#)
- Art. 29 [KUSG](#)
- Art. 17 und Art. 20 Abs.1 [KGSchG](#)

Seit September 2006 darf kein Klärschlamm mehr landwirtschaftlich genutzt werden. Den Kantonen blieb es vorbehalten Übergangsfristen zu erlauben. Die landwirtschaftliche Verwertung hatte aber im Kanton Graubünden nie einen bedeutenden Stellenwert eingenommen. Dies ist vor allem auf den Bio-Landbau und die integrierte Produktion zurück zu führen.

Auf Bundesebene steht im Moment eine Revision der entsprechenden Gesetzgebung (Technische Verordnung über Abfälle TVA) an. Im Zentrum steht dabei die Rückgewinnung von Phosphor. Möglicherweise wird dadurch die Co-Verbrennung ohne vorgängige Rückgewinnung des Phosphors verboten oder ein minimaler Wirkungsgrad für die Phosphorrückgewinnung eingeführt. Wie sich die eventuell neuen Grundlagen auf die Verwertung des Klärschlammes in Zementwerken auswirken werden, ist offen. Gesetzesanpassungen zur Wiedereinführung der landwirtschaftlichen Verwertung und Zulassung des Exports von Klärschlamm stehen heute und in naher Zukunft nicht zur Diskussion.

Sollte der Schwerpunkt wirklich auf die P-Rückgewinnung gelegt werden, ist es kaum nachvollziehbar, wenn Exporte ins Ausland im grösseren Rahmen bewilligt würden. Bereits heute muss für den Export von Klärschlamm eine entsprechende Ausfuhrbewilligung eingeholt werden. Sollte dies weiterhin der Fall sein, müsste man davon ausgehen, dass die Verwertung im Ausland kaum eine nachhaltige Lösung darstellt, insbesondere, da im Rahmen dieser Studie die Entwicklung auf gesetzlicher, gesellschaftlicher und technischer Ebene in Drittländern nicht beurteilt werden kann. Zudem wird der Export ins Ausland durch die Verordnung über den Verkehr von Abfällen VEVA (Art. 17c, Stand 2010) klar geregelt. Weitere Einzelheiten werden in der Variantenbeurteilung gegeben.

#### 3.2 Auslegungsdaten

Tabelle 1 zeigt die angefallene Klärschlammmenge während den letzten 3 Jahren. Im Mittel fallen 15'000 t entwässerter Klärschlamm mit einem Trockensubstanzgehalt von 30 % pro Jahr an. Um kleinere Schwankungen beim Klärschlammanfall auszugleichen, wird die Auslegung für einen Bereich von 14'500 bis 15'500 t ange-

lieferten Klärschlamm mit einem TS-Gehalt von 20 bis 40 % verwendet. Der Vergleich der Varianten erfolgt deshalb beim Kalkulationswertwert.

**Tabelle 1: Angefallene entwässerte Klärschlamm mengen bei der TRAC Chur**

		Mittelwert 2008-2010	Kalkulationswert	Auslegungsbereich
Klärschlamm lieferungen	[t/a]	14'765	<b>15'000</b>	14'500 – 15'500
Entwässerungsgrad	[%]	29.48	<b>30.0</b>	20 - 40
Fracht Trockensubstanz	[t/a]	4'349	<b>4'500</b>	4'000 – 5'000

Von den 15'000 t jährlich, kantonal anfallendem Klärschlamm, fallen ca. 5'500 t direkt auf der ARA Chur an.

Die Gehalte an einzelnen Nährstoffen und Schwermetallen werden basierend auf Analysen von herkömmlichem, ausgefaultem Klärschlamm angenommen. Eine Übersicht der wichtigsten Nährstoffkonzentrationen gibt Tabelle 2.

**Tabelle 2: Nährstoffgehalte und Frachten im Klärschlamm**

	Konzentration	Fracht/a
Phosphor	30.6 kg P/t TS	<b>140 t P</b>
Ammonium-Stickstoff	21.7 kg NH <sub>4</sub> -N/t TS	<b>100 t NH<sub>4</sub>-N</b>
Gesamt-Stickstoff	45.7 kg N <sub>tot</sub> /t TS	<b>210 t N<sub>tot</sub></b>

### 3.3 Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm

Prinzipiell bestehen verschiedene Ansätze zur P-Rückgewinnung aus dem kommunalen Abwasser und reichen von der eigentlichen Abwasserbehandlung bis zur Gewinnung aus Klärschlammmasche. Eine grobe Übersicht ist in der untenstehenden Tabelle<sup>7</sup> wiedergegeben

**Tabelle 3: Einsatzstellen und Rückgewinnungspotenziale**

Einsatzstelle	Volumenstrom	Phosphorkonzentration	Bindungsform	Rückgewinnungspotential (bezogen auf Zulauffracht der Kläranlage)
Kläranlagenablauf	200 L/(E*d)	5 - 8 mg/L	gelöst	15 - 50 %
Schlammwässer	1 - 10 L/(E*d)	20 - 100 mg/L	gelöst	~ 45 %
entwässerter Klärschlamm	0,15 L/(E*d)	~ 10 g/kg	biolog./ chemisch gebunden	~ 85 %
Klärschlammmasche	0,03 kg/(E*d)	~ 50 g/kg	chemisch gebunden	~ 85 %

<sup>7</sup> Pinnekamp, J. (2007). Studie „Stand der P-Elimination bei der Abwasserreinigung in NRW sowie Verfahren zur P-Rückgewinnung aus Klärschlamm und aus Prozesswässern der Schlammbehandlung“

Um bei den vorgestellten Verfahren zur Phosphorrückgewinnung einen hohen Rückgewinnungsgrad zu erreichen, ist es notwendig, im Abwasserreinigungsprozess möglichst viel Phosphor in den Klärschlamm einzubinden.

Üblicherweise geschieht dies durch die chemische Phosphorelimination. Bei einigen Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm ist dies jedoch dem Rückgewinnungsprozess hinderlich. Um ohne eine Metallsalzfällung möglichst viel Phosphor in den Klärschlamm einzubinden, können Verfahren zur vermehrten biologischen Phosphorelimination genutzt werden.

Wird im Abwasserreinigungsprozess eine vermehrte biologische Phosphorelimination betrieben, lagern die Mikroorganismen mehr Phosphor ein, als sie für ihr Zellwachstum benötigen. Diese eingelagerten Phosphate lassen sich gezielt durch weitere Behandlungsschritte wieder rücklösen und in einer verwertbaren Form abtrennen.

In der Schweiz besteht seit langem die gesetzliche Anforderung zur restriktiven P-Elimination. In den meisten Fällen wird dies mittels Zugabe von Fällsalzen erreicht. Zunehmend wird ergänzend auch biologische P-Elimination eingeführt. Vor diesem Hintergrund ist die MAP-Fällung und Gewinnung pflanzenverfügbarer P-Verbindungen aus dem Abwasser nicht ein gangbarer Weg. Hingegen ergibt sich durch die Fällung mit Eisen- und oder Alusalzen eine starke Aufkonzentrierung von Phosphaten im Klärschlamm. Gemäss der Baudirektion des Kantons Zürich<sup>8</sup> wird die Recyclingquote im Klärschlamm unter Anwendung geeigneter Verfahren auf 90% geschätzt während im Abwasser lediglich die Hälfte zurückgewonnen werden könnte.

Ebenfalls gibt es grundsätzlich auch die Möglichkeit direkt aus Nassschlamm P zurückzugewinnen. Allerdings ist hier der Forschungsstand hinter der Ascheverwertung zurückliegend. Zudem muss Klärschlamm so oder so thermisch behandelt werden. Damit ergibt sich die Möglichkeit der Volumenreduktion und Lagerfähigkeit, die es ermöglicht die Aschen separat zu deponieren und in Zukunft der P-Rückgewinnung zugänglich zu machen.

Zur Rückgewinnung von P aus Klärschlamm sind in der Schweiz heute vor allem 2 Verfahren in der Diskussion. Zum einen betreibt die Firma AshDec seit 2008 eine Pilotanlage in Loeben (A) mit einer Kapazität von 4'000t Dünger pro Jahr<sup>8</sup>. Das von der Firma AshDec angewendete Verfahren beruht auf dem EU-Forschungsprojekt SUSAN. Dabei werden die Aschen in einem Drehrohrofen unter Zugabe von Magnesium-und/oder Calciumchlorid erhitzt. Anschliessend erfolgt eine physikalische und chemische Konditionierung. Das Produkt ist weitgehend Schwermetallfrei. Allerdings bedeutet dies einen zusätzlichen, erheblichen technischen Aufwand und einen hohen Verbrauch an Primärenergie<sup>9</sup>. Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit liegen zurzeit keine gesicherten Daten vor. Zudem fehlen die benötigten amtlichen Zusage, dass dieses Recyclingprodukt in der Schweizerischen Landwirtschaft verwertet werden kann.

---

<sup>8</sup> Phosphor im Klärschlamm - Information zur künftigen Rückgewinnung, AWEL, 2008

<sup>9</sup> „Neue Wege des P-Recyclings aus Klärschlamm“ , KA, 2010 (57) – Nr. 4

Einen etwas anderen Weg geht der Zweckverband Abfallverwertung Bazenheid (ZAB). In einem Grundsatzpapier<sup>10</sup> der Geschäftsleitung, welches an einer Tagung in Warschau im August 2011 vorgestellt wurde, wird dem RecoPhos-Verfahren der Vorzug gegeben. Dabei soll es sich um ein chemisch-physikalisches Verfahren handeln, welches auf einer Verflüssigung der Phosphate mittels Säurezugabe beruht. Nähere Einzelheiten wurden nicht bekannt gegeben, allerdings soll RecoPhos weniger aufwändig und energetisch günstiger Phosphor zurückgewinnen als das Ash-Dec-Verfahren. In Kürze sollen Versuche mit grösseren Klärschlammengen in Deutschland gefahren werden. Bleibt noch anzufügen, dass die Wirbelschichtlinie in Bazenheid eine Co-Verbrennung darstellt, bei der neben Klärschlamm auch noch andere P-reiche, schadstoffarme organische Abfälle mitverbrannt werden.

Allgemein kann festgehalten werden, dass zurzeit keine industriellen Anlagen zur P-Rückgewinnung aus Klärschlammäsche betrieben werden. Die Datengrundlagen und Wirtschaftlichkeitsrechnungen sind sehr begrenzt verfügbar, womit eine Einschätzung schwierig ist. Es bleibt zu hoffen, dass hier in den nächsten 5 Jahren mehr Klarheit herrscht.

### 3.4 Übersicht der Varianten

Vom ANU wurden 7 Varianten vorgegeben die überprüft werden sollen. Zu den Varianten gehören, bedingt durch mehrere mögliche Standorte, zusätzlich Untervarianten.

Folgende Varianten werden untersucht:

#### 1. Heutige Lösung: Trocknung in Chur, Verbrennung im Zementwerk

Die bestehende Trocknung muss in den folgenden Jahren ersetzt werden. Beibehalten werden kann die gesamte Infrastruktur. Die Verbrennung erfolgt im bestehenden Zementwerk in Untervaz.

#### 2. Trocknung an neuem Standort, Verbrennung im Zementwerk

Im Rheintal gibt es 3 weitere Standorte an denen eine Trocknung mit bestehender Wärmekapazität betrieben werden könnte. Dadurch entstehen 3 Untervarianten.

#### 3. Verbrennung in der GEVAG

Die Verbrennung des entwässerten Schlamms erfolgt in der Kehrichtverbrennungsanlage GEVAG. Der Klärschlamm könnte vorher auch teilgetrocknet werden.

#### 4. Neue eigenständige Monoverbrennung im Kanton Graubünden

Eine eigenständige Monoverbrennung mit einer vorgesetzten Teiltrocknung<sup>11</sup> ermöglicht eine spätere P-Rückgewinnung aus der Verbrennungsasche. Als Standort kommen mehrere Orte in Frage. In dieser Studie wird Untervaz nicht berücksichtigt, da für den Zementwerkstandort keine Vorteile entstehen.

---

<sup>10</sup> „Thermische Herstellung von Düngern aus organischen Abfällen“, Referat gehalten in Warschau, ZAB, 9/2011

<sup>11</sup> Teiltrocknung auf 45 % TS-Gehalt ist gemäss Herstellerangaben (Kalogeo GmbH) für die Monoverbrennung nötig

## **5. Export zu einer ausserkantonalen Monoverbrennung (entwässert)**

Statt eine eigene Monoverbrennung in Graubünden zu erstellen, kann der entwässerte Schlamm zu einer grösseren Monoverbrennung in der Schweiz exportiert werden. Folgende Exportmöglichkeiten werden berücksichtigt:

- a) Transport zu der neuen, entstehenden Monoverbrennung in Zürich (Werdhölzli)
- b) Transport in die bestehende Monoverbrennung Bazenheid (KVA mit separater Monoverbrennungslinie)

## **6. Export ins Ausland (entwässert)**

In diesem Szenarium wird nur der Fall Deutschland als Exportland betrachtet. In Deutschland kann Klärschlamm in Braunkohlewerken, KVAs und Zementwerken verbrannt werden. Im Jahr 2010 wurden durchschnittlich 600 t Klärschlamm pro Monat von grenznahen ARA's aus der Schweiz nach Deutschland exportiert. Für den Export von Klärschlamm ins Ausland muss speziell die rechtliche Situation berücksichtigt werden.

## **7. Anbietervariante mit Hydrothermaler Carbonisierung (HTC)**

Die Hydrothermale Carbonisierung (HTC) ist ein in der Theorie seit vielen Jahren bekanntes Verfahren, das den natürlichen Kohlegestehungsprozess nachbildet. Der Klärschlamm wird hierbei unter hohem Druck und bei hohen Temperaturen (20-35 bar, 200°C) in energetisch hochwertigere Klärschlammkohle umgewandelt. Die hydrothermale Carbonisierung wird im grossen Massstab bereits mit Grünabfällen als Ausgangsmaterial angewendet (AVA-CO2, Karlsruhe). Mit Klärschlamm als Ausgangssubstrat wurden erst sehr begrenzte Versuche durchgeführt. Bei der Hydrothermalen Carbonisierung könnte es sich um eine zukunftsweisende Technologie handeln, sofern Praxistauglichkeit und Wirtschaftlichkeit anhand grosstechnischer Anwendungen nachgewiesen würde.

### 3.5 Mögliche Standorte

Bei der Suche nach dem künftigen Standort für die Klärschlammverwertung müssen zwei Punkte berücksichtigt werden. Der grösste Teil (ca. 60%) des Klärschlamm im Kanton Graubünden fällt im Churer Rheintal an, der neue Standort muss sich deshalb zwingend im Churer Rheintal befinden. Bei der Suche nach einem neuen Standort wird ausserdem die Energiefrage berücksichtigt, indem nur Standorte mit vorhandenem Wärmepotential beurteilt werden.

Vier Standorte wurden vom ANU vorgegeben<sup>12</sup> und werden nachfolgend in Abbildung 3 auf einer Übersichtskarte dargestellt und im Folgenden mit ihren Charakteristika zusammengefasst.

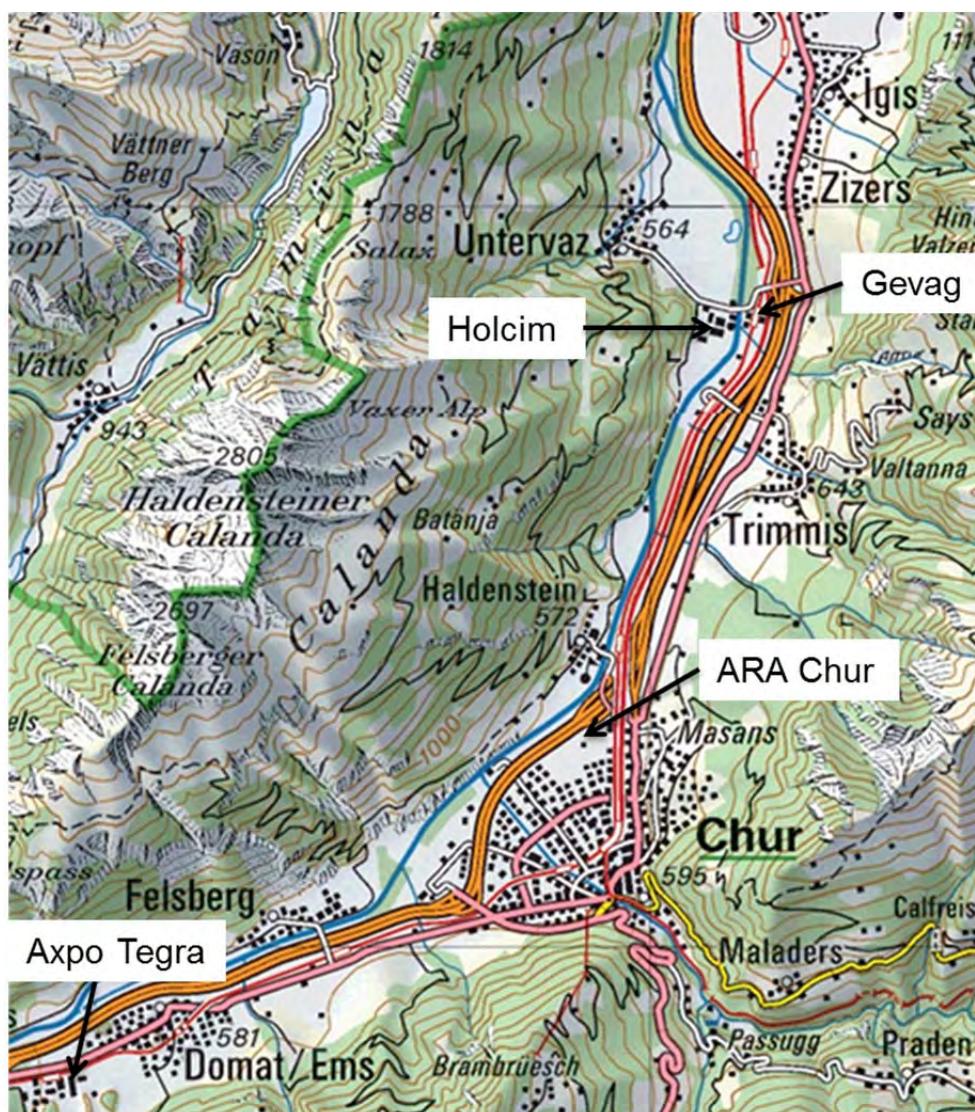


Abbildung 2: Übersichtskarte der möglichen Standorte (Quelle: [www.map.geo.admin.ch](http://www.map.geo.admin.ch))

<sup>12</sup> Aktennotiz der Kick-off Sitzung vom 24. März 2011

### **3.5.1 Chur**

Standort:	In Chur steht die heutige Trocknungsanlage auf dem Gelände der ARA Chur. Die Infrastruktur für die Schlammannahme ist vorhanden. Die bestehende Trocknungsanlage ist abgeschrieben, kann aber noch einige Jahre weiterbetrieben werden. Für einen längerfristigen Betrieb sind Investitionen nötig.
Verfahren:	In Frage kommen: Eine Sanierung der heutigen Trocknung (Variante 1), eine eigenständige Monoverbrennung (V4a) und der Neubau einer HTC-Anlage (V7)
Brüden:	Die Brüden werden direkt auf der ARA Chur entsorgt. Kapazität ist ausreichend vorhanden.
Energie:	Für den Betrieb der heutigen Trocknung wird Biogas aus der Faltung und zusätzlich Erdgas verwendet. Während der letzten Jahre wurden durchschnittlich 40% des Gasbedarfs durch Erdgas gedeckt.
Platzreserven:	sind gemäss Betriebsleiter vorhanden.

### **3.5.2 Domat/Ems**

Standort:	In Domat/Ems stehen ein Holzkraftwerk der Axpo-Tegra, die Produktion der EMS-Chemie und die ARA Tuma-Lunga.
Verfahren:	In Frage kommen: Neubau einer Trocknung (V2c) und eine eigenständige Monoverbrennung (V4c).
Brüden:	Die Behandlung der Brüden müsste in der ARA Tuma-Lunga erfolgen. Kapazitätsreserven sind hier nicht vorhanden. Eine Vorbehandlung der Brüden muss zwingend erstellt werden.
Energie:	Seit dem Wegfall der Grosswägerei sucht das Holzkraftwerk einen Abnehmer für die Wärmeenergie. Zur Verfügung steht Heisswasser mit einem Temperaturniveau von 100-120°C.
Platzreserven:	sind vorhanden.

### **3.5.3 Trimmis**

Standort:	Trimmis verfügt über die Kehrichtverbrennungsanlage des GEVAG.
Verfahren:	In Frage kommen: Neubau einer Trocknung (V2b), die Co-Verbrennung des Klärschlammes in der KVA GEVAG (V3) und eine eigenständige Monoverbrennung (V4b).
Brüden:	Die Brüden könnten via Kanalisation zur ARA Chur abgeleitet werden. Die Kanalisation zwischen Haldenstein und Chur verursacht regelmässig Geruchsprobleme. Eine Vorbehandlung ist deshalb zwingend <sup>13</sup> .
Energie:	Thermische Energie entsteht bei den Rauchgasverlusten. Hier exis-

---

<sup>13</sup> Gemäss telefonischer Besprechung mit Y. Quirin vom 29. Juli 2011

tiert eine Wärmemenge von 45.7 GWh/a, die bei einer nutzbaren Abkühlung von 130 auf 90°C zur Trocknung des Klärschlammes verwertbar wäre.

Verbrennung: Eine Co-Verbrennung des entwässerten Schlamms kann geprüft werden. Eine Monoverbrennung könnte am Standort des GEVAG realisiert werden.

Platzreserven: sind vorhanden.

#### **3.5.4 Untervaz**

Standort: Das Holcim-Zementwerk in Untervaz verbrennt heute den getrockneten Klärschlamm und bindet die Asche in den Klinker ein.

Verfahren: In Frage kommt der Neubau einer Trocknung (V2a).

Brüden: Können via Kanalisation zur ARA Landquart oder zur ARA Chur abgeleitet werden. Eine Vorbehandlung der Brüden ist notwendig.

Energie: Ende 2012 geht eine neue ORC-Anlage (Organik Ranküne Cycle) in Betrieb, die einen beträchtlichen Anteil der Abwärme aus dem Hauptkreis nutzt. Vorgesehen ist, die Abwärme des Klinkerkühlers zu einem späteren Zeitpunkt ebenfalls in den ORC-Betrieb einzubeziehen. Als Energieträger stehen die Kühlung der Rohmaterialmühle zur Verfügung (160-170 °C, 120'000 Nm<sup>3</sup>/h, 2'000 h/a) oder die Luft aus der ORC-Anlage (120-130 °C, 70'000 Nm<sup>3</sup>/h, >8'000 h/a).

Platzreserven: sind vorhanden.

### 3.6 Variante 1: Trocknung in Chur und Verbrennung in Untervaz

Variante 1 ist der aktuelle Entsorgungsweg mit der Trocknung in Chur und der Verwertung des getrockneten Schlamms im Zementwerk in Untervaz.

#### 3.6.1 Beschreibung

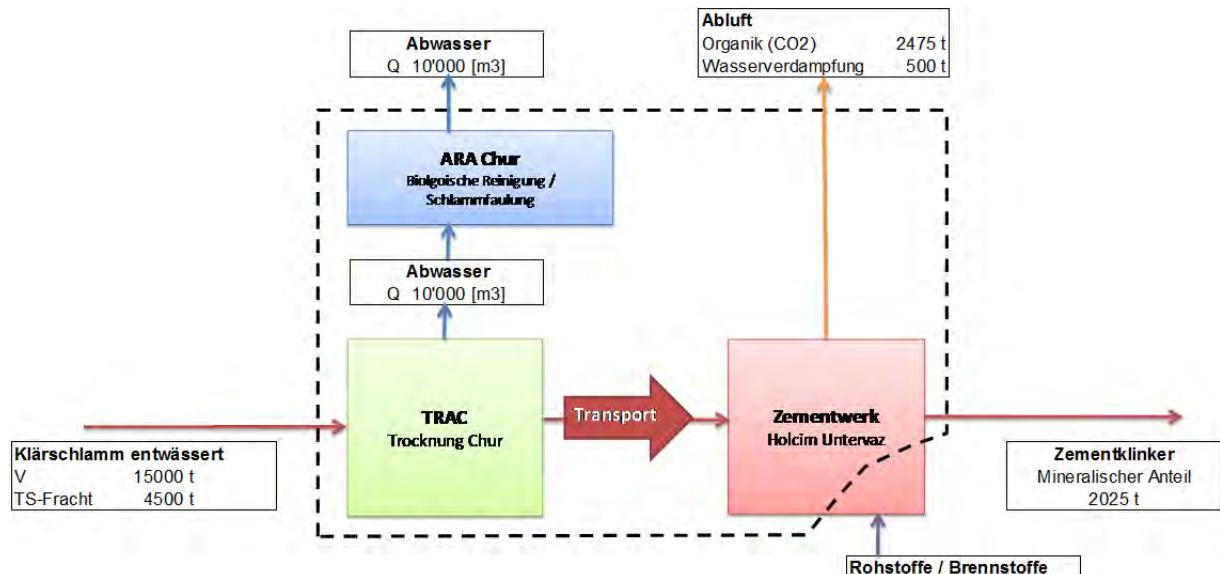


Abbildung 3: Massenflussschema der Variante 1 (Trocknung in Chur und Verbrennung in Untervaz)

In der Trocknungsanlage (Wirbelschichttrockner) wird der Schlamm von 30% TS-Gehalt auf >90% TS-Gehalt getrocknet. Die dabei anfallenden Brüdenabwässer werden direkt auf der ARA Chur behandelt. Der getrocknete Schlamm wird anschliessend mit Lastwagen zum Holcim-Zementwerk transportiert, wo der Schlamm als Ersatzbrennstoff dient und die Asche in den Klinker eingebunden wird.

Eine **Phosphorrückgewinnung** aus den Verbrennungsrückständen (Asche) ist in dieser Variante nicht möglich. Eine Rückgewinnung müsste vor der Verbrennung passieren. Hierfür sind aber keine wirtschaftlichen Verfahren vorhanden.

#### 3.6.2 Anlagen

##### Bestehende Anlagen

Die bestehende Trocknung in Chur kann noch einige Jahre betrieben werden. Die Hauptsubstanz der Anlage ist allerdings 12-jährig und dadurch immer reparaturanfälliger.

##### Neue Anlagen

Der Ersatz des Trockners ist für das Jahr 2016 vorgesehen (anfallende Kosten ca. CHF 300'000.-)<sup>14</sup>.

<sup>14</sup> Gemäss Email von W. Feurer (Betriebsleiter ARA Chur) vom 23. November 2011

### 3.6.3 Transporte

Der getrocknete Klärschlamm wird von der Trocknung in Chur per LKW nach Untervaz ins Zementwerk transportiert. Nach der Volumenreduktion durch die Trocknung bleiben 5'000 t Granulat, das in 20 t-Mulden nach Untervaz befördert wird. Benötigt werden ca. 250 Fahrten.

Die Asche muss nicht abtransportiert werden, da sie im Klinker eingebunden wird.

### 3.6.4 Endenergiefluss

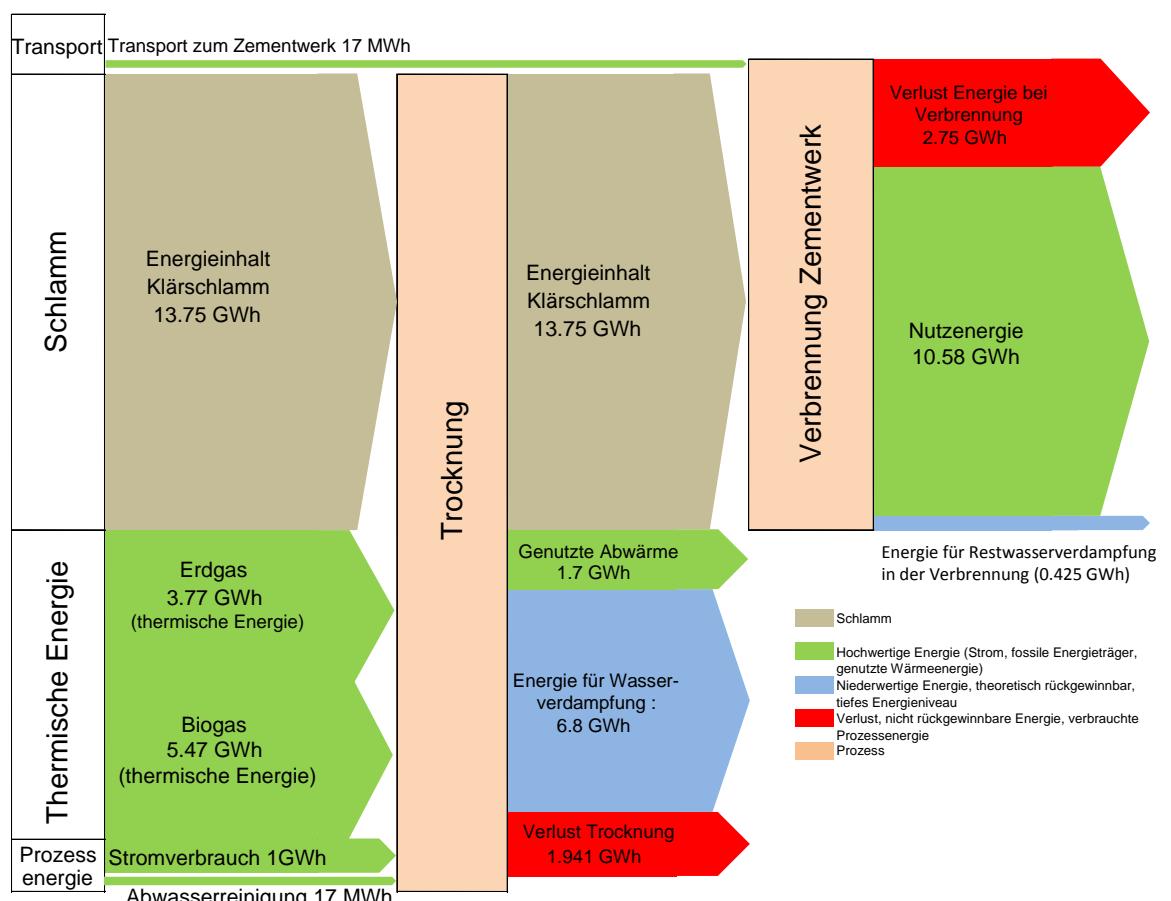


Abbildung 4: Energieflussdiagramm Endenergie in Variante 1 (Trocknung in Chur und Verbrennung in Untervaz)

Die heutige Trocknung wird mit Energie aus Biogas der ARA Chur betrieben. Das Faulgas reicht aber nicht aus, um den gesamten Energiebedarf der Trocknung zu decken. Deshalb wird bei Bedarf zusätzlich Erdgas verbrannt. Erdgas liefert ca.

40 %, Faulgas ca. 60 % der jährlich verbrauchten Wärmeenergie. Der Wirkungsgrad der Trocknung von 90 % ergibt sich aus dem Gasverbrauch 2010 und der theoretisch benötigten Wärmemenge. Der Wirkungsgrad der Verbrennung im Zementwerk wird jenem in den Monoverbrennungen gleichgesetzt und beträgt 80%<sup>15</sup>. Die zugeführte Wärme geht einerseits aufgrund des Wirkungsgrades der Trocknung zu ei-

<sup>15</sup> Bestätigt in telefonischer Anfrage bei Kalogeo AG und Bamag Maschinen AG

nem kleinen Teil an die Umgebung verloren, andererseits wird sie für die Wasser verdampfung gebraucht. Aus dem kondensierten Brüdenabwasser wird heute ein Teil der Wärme zurückgewonnen. Die restliche Energie liegt auf einem tiefen Temperaturniveau und wird nicht zurückgewonnen.

Für die Abwasserreinigung auf der ARA Chur, für den Transport des Klärschlamm zum Zementwerk und für die Verbrennung wird zusätzliche Energie aufgewendet.

Der getrocknete Klärschlamm substituiert im Zementwerk den Energieträger Braunkohle, d.h. wenn kein Klärschlamm zur Verfügung steht, muss im Zementwerk mehr Braunkohle verbrannt werden. Die Nutzenergie kann zu 100% als Wärmeenergie verwendet werden.

### 3.6.5 Primärenergie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz

Wie in Kapitel 2.2 beschrieben kann jeder dieser Energieströme in Primärenergie-Equivalente und in CO<sub>2</sub>-Equivalente umgerechnet werden. Die Nutzenergie, also die Substitution der Braunkohle wirkt sich hierbei positiv auf die Energie-, resp. CO<sub>2</sub>-Bilanz aus. In Abbildung 6 sind die Energie- und CO<sub>2</sub>-Equivalente der Variante 1 dargestellt. Hierbei entsprechen die negativen Equivalente verbrauchter Energie, während die positiven Equivalente genutzter Energie entsprechen.

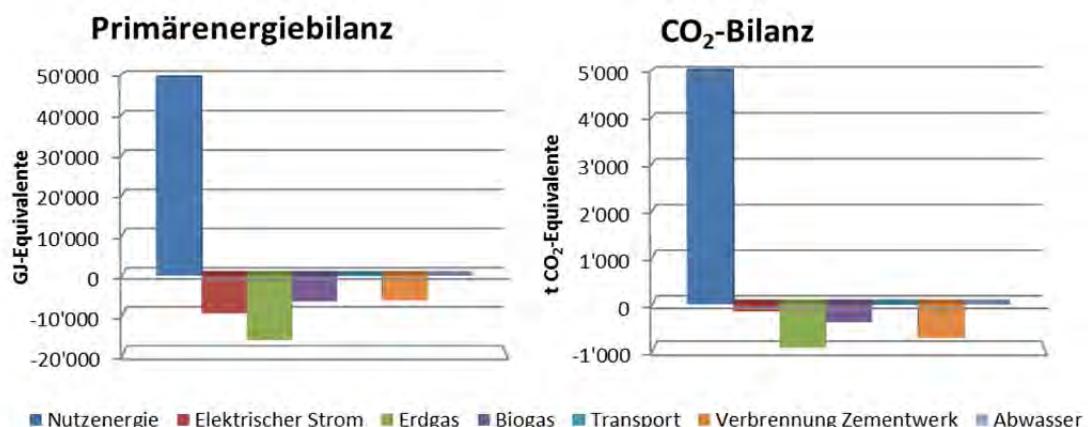


Abbildung 5: Primärenergie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz der Variante 1

Die Variante 1 weist eine **positive Energiebilanz von 10'707 GJ-Eq** und **eine positive CO<sub>2</sub>-Bilanz von 2'804 t CO<sub>2</sub>-Eq** auf. Die genaue Berechnung der Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz findet sich im Anhang.

### 3.6.6 Kosten Klärschlammensorgung

Die geschätzten Kosten für die Entsorgung pro Tonne angelieferten und entwässerten Klärschlamm (30% TS) betragen 201.4 CHF/t. Erwähnenswert sind vor allem die Kosten für die Abgabe des getrockneten Granulats beim Zementwerk, die im Jahr 2012 50 CHF pro Tonne Granulat betragen werden. Diese Kosten sind seit Jahren rückläufig und werden auch in den kommenden Jahren weiter zurückgehen, bis sie in absehbarer Zeit ganz wegfallen könnten. Bei einem totalen Wegfall der Entsorgungskosten verringern sich die Jahreskosten um 250'000 CHF, respektive um 16.60 CHF pro Tonne entwässerten Klärschlamm.

Die detaillierte Berechnung der Kosten befindet sich im Anhang.

**Tabelle 4: Kosten Klärschlammensorgung Variante 1**

		Variante 1
Neuinvestitionen	[CHF]	6'648'340
Jährliche Abschreibung	[CHF]	1'075'703
Energiekosten (thermisch)	[CHF]	638'347
Energiekosten (elektrisch)	[CHF]	175'000
Betriebskosten	[CHF]	775'100
Abgabekosten Endverwerter	[CHF]	270'000
Transportkosten	[CHF]	87'500
Jahreskosten	[CHF]	3'021'650
<b>Kosten pro Tonne Klärschlamm (30%)</b>	<b>[CHF]</b>	<b>201</b>
Kosten pro Tonne TS Klärschlamm	[CHF]	671

## 3.7 Variante 2: Verbrennung in Untervaz / Trocknung an neuem Standort

### 3.7.1 Beschreibung

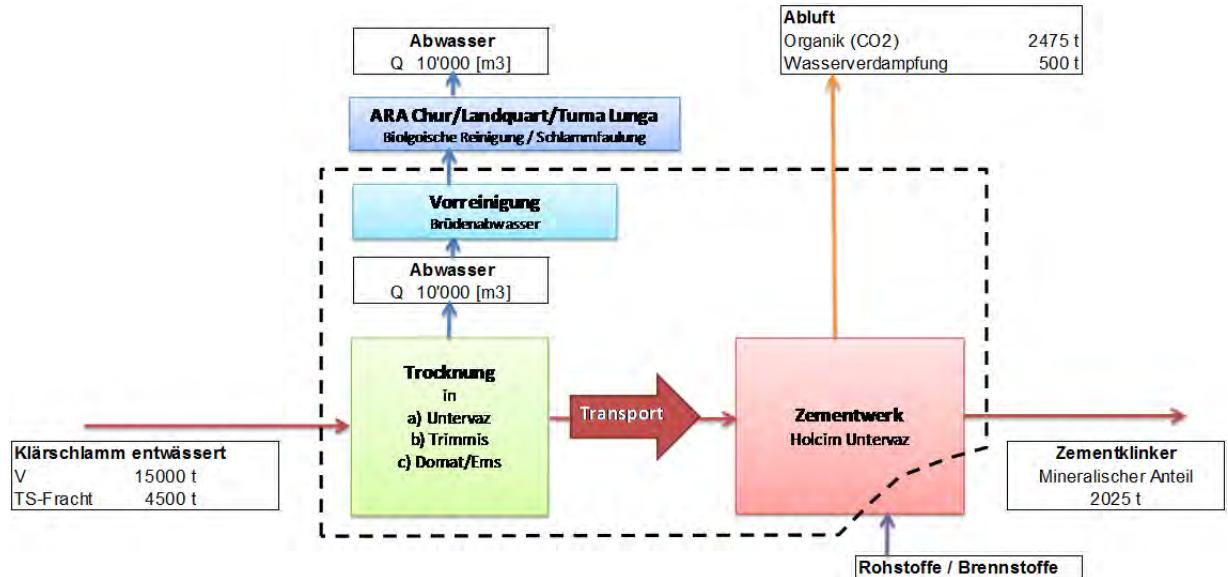


Abbildung 6: Massenflussschema der Variante 2 (Verbrennung in Untervaz / Trocknung an neuem Standort)

Variante 2 teilt sich in 3 Untervarianten auf. Gemeinsam haben die drei Varianten die Entsorgung des getrockneten Schlammes im Holcim-Zementwerk in Untervaz, wo der Schlamm als Ersatzbrennstoff dient und die Asche in den Klinker eingebunden wird.

Auf einen genaueren technischen Beschrieb der Verfahrenstechnik der jeweiligen Trocknung und der dazugehörigen Wärmerückgewinnung wird in diesem Bericht verzichtet. Hierfür sind weitergehende Erkundigungen bei Herstellern nötig, die den Rahmen dieses Berichts sprengen würden. Der Aufwand für die Rückgewinnung der Wärme aus der bestehenden Wärmequelle wird in den Investitionskosten mitberücksichtigt.

#### a) Erstellung einer neuen Trocknung in Untervaz

Mit der Erstellung einer neuen Trocknung wird die Schlammensorgung räumlich an einem Standort zusammengefasst. Für das Brüdenabwasser muss eine Vorbehandlung gebaut werden, bevor sie über die bestehende Abwasserleitung auf die ARA Landquart oder über eine neu zu erstellende Leitung in die ARA Chur gelangt.

Das Zementwerk nutzt seine Abwärme ab Ende 2011 in einer ORC-Anlage, indem aus der aus der Abwärme mittels Dampfturbine Strom produziert wird. Für die Trocknung kann die Abwärme aus der Klinkerkühlung bezogen werden oder gegebenenfalls auch die teilweise abgekühlte Luft aus der ORC-Anlage.

*b) Erstellung einer neuen Trocknung beim GEVAG in Trimmis*

Der GEVAG besitzt ein grosses Abwärme potential aus den Rauchgasen, das für eine Trocknung am Standort Trimmis genutzt werden könnte. Die heissen Rauchgase können allerdings aufgrund des Säuretaupunktes nicht direkt für die Trocknung eingesetzt werden. Die Wärme muss in einem Rückgewinnungssystem nutzbar gemacht werden.

Für das Brüdenabwasser muss eine Vorbehandlung gebaut werden, bevor das behandelte Abwasser über die bestehende Abwasserleitung auf die ARA Chur oder Landquart gelangt.

*c) Erstellung einer neuen Trocknung beim Axpo Holzkraftwerk in Domat/Ems*

Das grosse Wärmepotential des Holzkraftwerks in Domat/Ems, das bei der Aufhebung der Grosswägerei frei wurde, könnte für die Trocknung des Klärschlammes am Standort Domat/Ems genutzt werden. Die Grosswägerei wurde mit Heisswasser beliefert (100°C, max. 14 MW), das in einer Bandtrocknung als Wärmequelle für die Schlammertrocknung eingesetzt werden könnte.

Für das Brüdenabwasser muss eine Vorbehandlung gebaut werden, bevor sie über die bestehende Abwasserleitung auf die ARA Tuma Lunga gelangt.

Eine **Phosphorrückgewinnung** aus den Verbrennungsrückständen (Asche) ist für alle Untervarianten in der Variante 2 nicht möglich. Eine Rückgewinnung müsste vor der Verbrennung passieren. Hierfür sind aber keine wirtschaftlichen Verfahren vorhanden.

### **3.7.2 Anlagen**

*Bestehende Anlagen*

Zementwerk Holcim

*Neue Anlagen*

Bei allen Untervarianten muss eine Trocknung und eine Brüdenvorbehandlung neu gebaut werden.

*Rückzubauende Anlagen*

Die Trocknung in Chur ist rückzubauen.

### **3.7.3 Transporte**

Wird die Trocknung nicht in Chur durchgeführt, muss der Transport des entwässerten Klärschlammes der ARA Chur zum Trocknungsort zusätzlich berücksichtigt werden (siehe Kapitel 2.3). Die ARA Chur produziert jährlich rund 5'500 t entwässerten Klärschlamm, der in 20 t -Mulden an den Trocknungsort transportiert werden muss. Zusätzlich fällt der Transport des getrockneten Klärschlammgranulats vom Trocknungsort zum Zementwerk in Untervaz, sowie die Ableitung des Abwassers an.

- a) Entwässerter Schlamm: Transport von Chur nach Untervaz (10 km, 5'500 t/a).

Granulat: Kein Transport nötig, da Granulat in Untervaz anfällt.

Wasser: wird nach Vorreinigung nach Landquart oder Chur abgeleitet.

- b) Entwässerter Schlamm: Transport von Chur nach Trimmis (10 km, 5'500 t/a).

Granulat: Transport von Trimmis nach Untervaz nötig (2 km, 5'000t/a).

Wasser: wird nach Vorreinigung nach Landquart oder Chur abgeleitet.

- c) Entwässerter Schlamm: Transport von Chur nach Domat/Ems (10 km, 5'500 t/a).

Granulat: Transport von Domat/Ems nach Untervaz nötig (20 km, 5'000 t/a).

Wasser: wird nach Vorreinigung auf die ARA Tuma Lunga abgeleitet.

### 3.7.4 Endenergiefluss

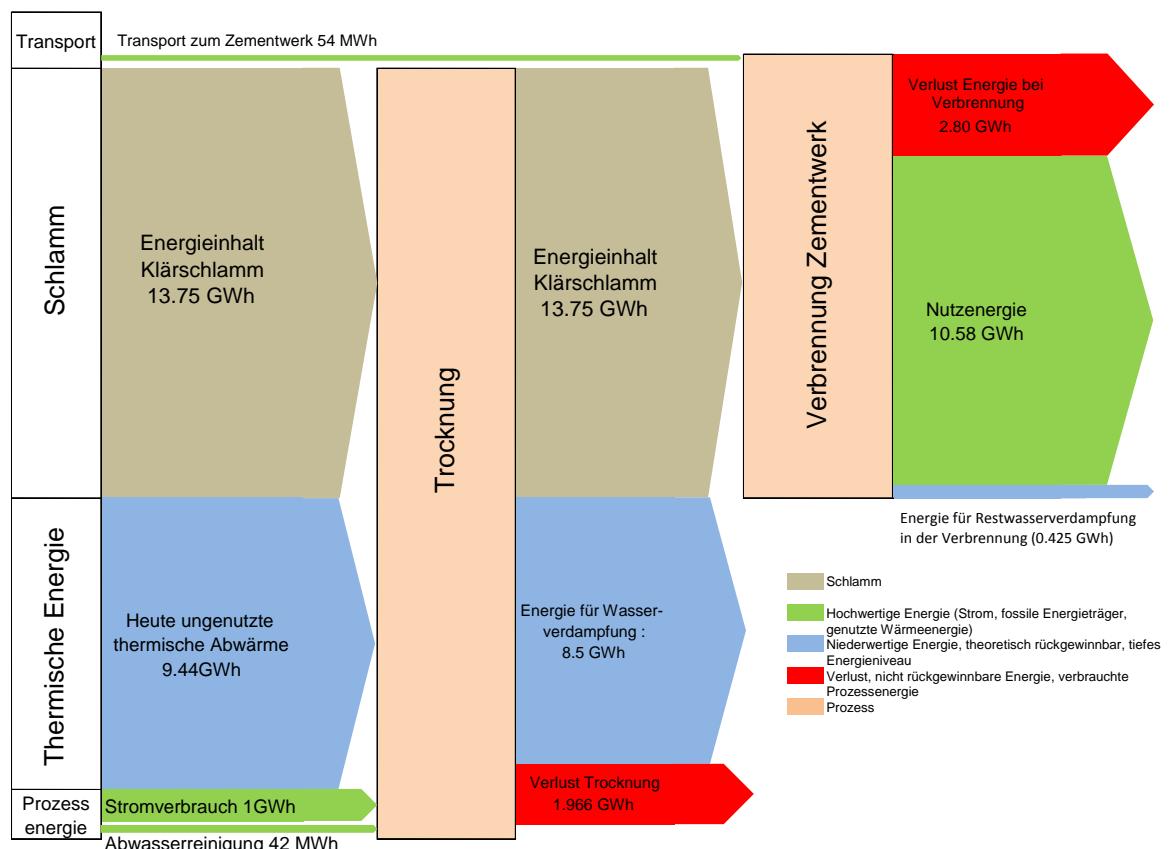


Abbildung 7: Energieflussdiagramm Endenergie in Variante 2 am Beispiel von Variante 2a (Verbrennung in Untervaz / Trocknung in Untervaz)

Die thermischen Energiequellen der unterschiedlichen Varianten werden heute nicht genutzt und werden mit der Erstellung einer Trocknung an den jeweiligen Standorten erstmals verwertet. Diese werden deshalb als niedrigwertige Energie betrachtet. Der Wirkungsgrad von 90% entspricht dem heutigen Wirkungsgrad der Trocknung in Chur (Kapitel 3.6.4). Der Wirkungsgrad der Verbrennung im Zementwerk wird ebenfalls aus Kapitel 3.6.4 übernommen.

Die Nutzenergie kann zu 100% als Wärmeenergie im Zementwerk verwendet werden.

### 3.7.5 Primärenergie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz

Der thermische Energieeinsatz wird in der Primärenergiebilanz und der CO<sub>2</sub>-Bilanz nicht berücksichtigt, da es sich um heute ungenutzte Abwärme handelt. Aufgrund dieser Nicht-Berücksichtigung des thermischen Energiebedarfs ergeben sich die grossen Unterschiede in den Primärenergiebilanzen gegenüber der Variante 1. Die Nutzenergie substituiert im Zementwerk Primärenergie und wird der Primärenergie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz deshalb positiv angerechnet.

Abbildung 9 zeigt die Primärenergie und CO<sub>2</sub>-Bilanz der Variante 2a. Die Bilanzen der Varianten 2b und 2c und deren Berechnungswege sehen sehr ähnlich aus und können im Anhang eingesehen werden.

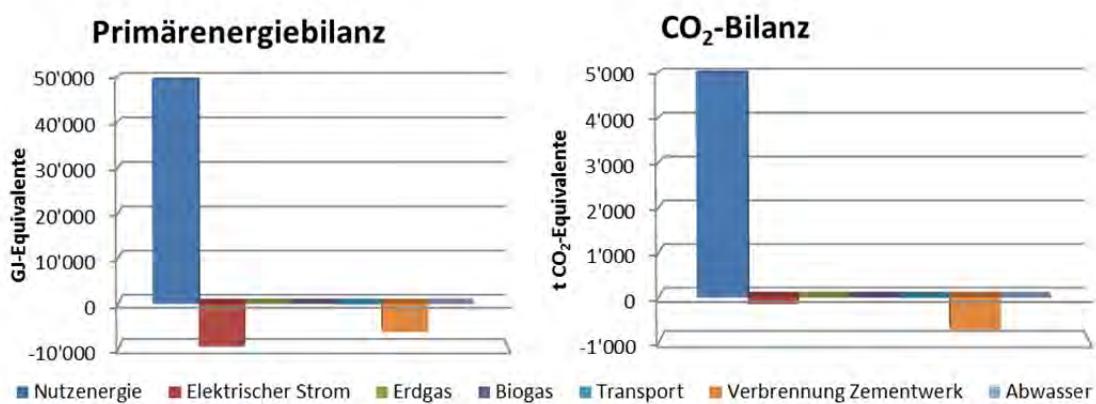


Abbildung 8: Primärenergie und CO<sub>2</sub>-Bilanz am Beispiel der Variante 2a

Die Variante 2a weist eine **positive Energiebilanz von 33'044 GJ-Eq** und eine **positive CO<sub>2</sub>-Bilanz von 4'095 t CO<sub>2</sub>-Eq** auf.

Die Variante 2b weist eine **positive Energiebilanz von 33'011 GJ-Eq** und eine **positive CO<sub>2</sub>-Bilanz von 4'093 t CO<sub>2</sub>-Eq** auf.

Die Variante 2c weist eine **positive Energiebilanz von 32'721 GJ-Eq** und eine **positive CO<sub>2</sub>-Bilanz von 4'076 t CO<sub>2</sub>-Eq** auf.

### 3.7.6 Kosten Klärschlammensorgung

Die geschätzten Kosten für die Entsorgung pro Tonne angelieferten entwässerten Klärschlamm (30% TS) betragen zwischen 207 und 241 CHF/t. Die Unterschiede kommen aufgrund der unterschiedlichen Kosten für die thermische Energie und den Transportkosten zustande. Die Neuinvestition ist bei der Variante 2c tiefer, da für die Energieerzeugung auf bestehende Infrastruktur zurückgegriffen werden kann. Sehr entscheidend ist hierbei der Wärmepreis (Sekundärenergie) der in **Variante 2a: 10 Rp/kWh<sup>16</sup>**, in **Variante 2b: 4 Rp/kWh<sup>17</sup>** und in **Variante 2c: 4.5 Rp/kWh<sup>18</sup>** beträgt.

<sup>16</sup> Gemäss Telefonat mit O. Floca, Umweltkoordinator der Holcim am 20.September 2011

<sup>17</sup> Gemäss E-Mail der Betriebsleitung der GEVAG (F. Boone) am 26.September 2011

<sup>18</sup> Gemäss Mitteilung von D. Gobbo, Geschäftsführer der Axpo Tegra AG am 26.September 2011

Wie in Variante 1 sind auch in Variante 2 die Entsorgungskosten im Zementwerk nicht garantiert. Die Jahreskosten könnten sich um 250'000 CHF, resp. um 16.60 CHF pro Tonne entwässerten Klärschlamm verringern.

Die detaillierte Berechnung der Kosten befindet sich im Anhang.

**Tabelle 5: Kosten Klärschlammmentsorgung Variante 2**

		Variante 2a	Variante 2b	Variante 2c
		Untervaz	Trimmis	Domat/Ems
Neuinvestitionen	[CHF]	15'022'500	15'022'500	13'313'875
Jährliche Abschreibung	[CHF]	1'189'760	1'189'760	1'189'760
Energiekosten (thermisch)	[CHF]	935'001	374'000	420'750
Energiekosten (elektrisch)	[CHF]	175'000	175'000	175'000
Betriebskosten	[CHF]	775'100	775'100	775'100
Abgabekosten Endverwerter	[CHF]	450'000	450'000	450'000
Transportkosten	[CHF]	96'250	146'250	191'250
Jahreskosten	[CHF]	3'621'111	3'110'110	3'201'860
<b>Kosten pro Tonne Klärschlamm (30%)</b>	<b>[CHF]</b>	<b>241.4</b>	<b>207.3</b>	<b>213.5</b>
Kosten pro Tonne TS Klärschlamm	[CHF]	805	691	712

### 3.8 Variante 3: Co-Verbrennung in der KVA GEVAG

#### 3.8.1 Beschreibung

Die Co-Verbrennung des gesamten entwässerten Klärschlamm in der KVA GEVAG in Trimmis ist nicht möglich. Aus betrieblichen Gründen ist der Anteil an entwässertem Klärschlamm an der Gesamtverbrennungsmenge der KVA auf 10 % beschränkt. Grund für diese Begrenzung ist das schwierige Handling des Klärschlamm, das zu einer schlechten Einmischung in den Kehricht und dadurch Probleme mit der Prozessführung zur Folge hat. Auch wurden Probleme mit der Verbrennung durch Krustenbildung an der Oberfläche des „Verbrennungskuchens“ festgestellt<sup>19</sup>.

Die erhöhte Staubentwicklung führt ausserdem zu Verunreinigungen im Kessel. Zwar sind diese Probleme seit längerer Zeit bekannt und es existieren mittlerweile Verfahren, die eine Reinigung der Kessel ermöglichen, doch diese sind kostenintensiv. Das Mitverbrennen von einem höheren Anteil an Klärschlamm verursacht deshalb entsprechend höhere Unterhaltskosten in der KVA.

**Die KVA GEVAG in Trimmis verbrennt jährlich ca. 90'000 t Kehricht. Die entwässerten 15'000 t Klärschlamm überschreiten die angestrebten 10 % deutlich.**

Eine Möglichkeit wäre, den Klärschlamm erst zu trocknen und anschliessend in der KVA zu verbrennen. Die Kosten für die Verbrennung in der KVA können aber mit dem Annahmepreis für das getrocknete Granulat in der Zementfabrik (typähnliche Variante) nicht konkurrieren. Der Abgabepreis für eine Tonne Kehricht liegt zwischen CHF 170-200.-, während die Entsorgungskosten bei der Zementfabrik in Untervaz 2010 bei CHF 58.- pro Tonne getrocknetes Granulat liegen.

Eine Alternative wäre die Verbrennungskapazität der GEVAG auszunützen und die möglichen 10% des Klärschlamm (9'000 t) in Trimmis zu verbrennen. Der restliche Klärschlamm (6'000 t) müsste anderweitig verbrannt werden, beispielsweise durch den Export in eine ausserkantonale KVA. Diese Möglichkeit wird aber politisch wohl kaum durchsetzbar sein und ergibt technisch und logistisch keinen Sinn.

Ein weiterer Nachteil der Co-Verbrennung von Klärschlamm mit Kehricht ist das Verunmöglichen einer **Phosphorrückgewinnung**. Mit der Vermischung mit gewerblichem oder häuslichem Kehricht wird die Phosphorkonzentration in der Verbrennungsschlacke stark reduziert und eine P-Rückgewinnung nicht mehr lohnend.

**Von der genaueren Betrachtung des Entsorgungsweges mit einer Co-Verbrennung in der KVA der GEVAG wird deshalb abgesehen.**

<sup>19</sup> Bestätigt per E-Mail durch Betriebsleitung der GEVAG (F. Boone) am 15. August 2011

### 3.9 Variante 4: Eigenständige Monoverbrennung in GR

#### 3.9.1 Beschreibung

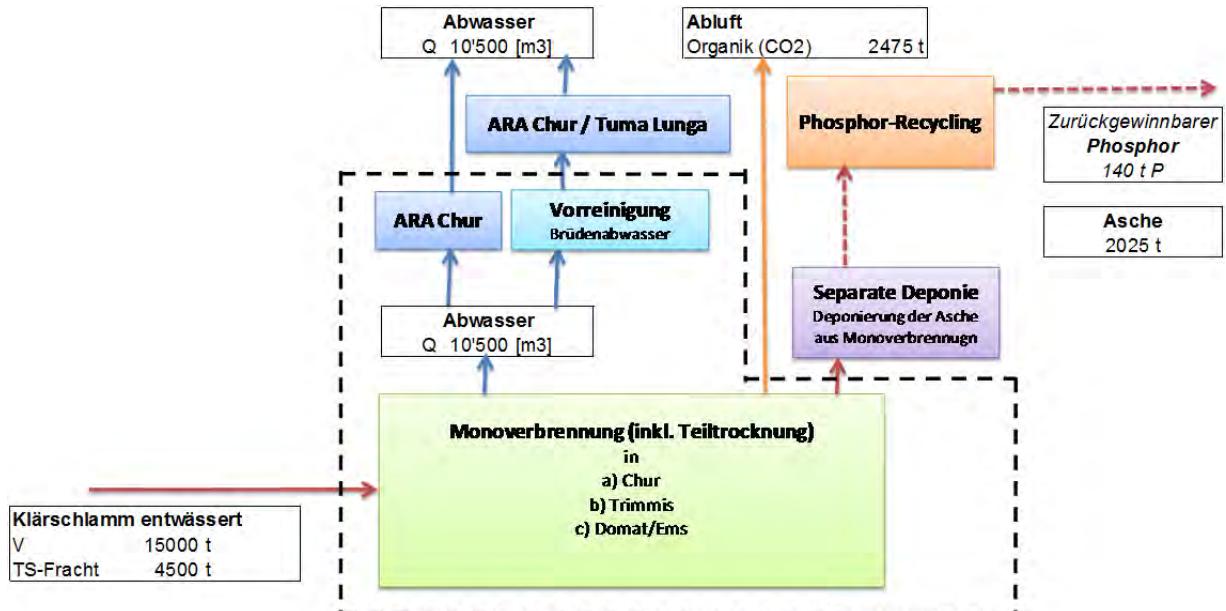


Abbildung 9: Massenflussschema der Variante 4 (Eigenständige Monoverbrennung in GR)

Mit einer Monoverbrennung wird der entwässerte Klärschlamm separat von anderem Brenngas verbrannt. Die entstehende Asche kann für die **Phosphorrückgewinnung** verwendet werden. Es existieren bereits heute Verfahren, die eine Rückgewinnung des Phosphors aus der Klärschlammäsche ermöglichen (Kapitel 4.1.7). Die meisten können zum jetzigen Zeitpunkt aber noch nicht wirtschaftlich betrieben werden. Die Klärschlammäsche wird deshalb in separaten Kompartimenten der Verbrennungsschlackedeponien zwischengelagert. Sobald geeignete Verfahren für die P-Rückgewinnung existieren, kann die Klärschlammäsche aus den Zwischenlagern für die P-Rückgewinnung verwendet werden.

Für die Monoverbrennung wird der entwässerte Klärschlamm erst teilgetrocknet. Die Teiltrocknung erfolgt mit den Rauchgasen aus dem Monoverbrennungsofen. Nach der Teiltrocknung bis auf einen TS-Gehalt von 45 % erfolgt die Verbrennung meist in einem Wirbelschichtofen. Die Rauchgase werden in einer Rauchgasreinigungsstufe gereinigt. Möglich sind auch Systeme mit einer separaten Trocknung, die mit der produzierten Wärmeenergie einer nachfolgenden Monoverbrennung betrieben werden<sup>20</sup>.

Für die Monoverbrennung kommen drei Standorte in Frage:

a) *Erstellung einer neuen Monoverbrennungsanlage in Chur*

Am Standort der heutigen Trocknung kann eine Monoverbrennungsanlage erstellt werden. Die bestehende Schlammannahmestation kann beibehalten werden. Die

<sup>20</sup> Bspw. Klärschlammverwertungskonzept sludge2energy von Huber SE (D)

Verbrennung erfolgt in einem Wirbelschichtofen. Die Brüden können direkt auf die ARA Chur eingeleitet werden.

*b) Erstellung einer neuen Monoverbrennungsanlage in Trimmis bei der GEVAG*

Bei der bestehenden KVA kann, im Gegensatz zu den beiden anderen Monoverbrennungsvarianten, die Monoverbrennung in einem Drehrohrofen durchgeführt werden. Vorteil des Drehrohrofens, in welchem der Schlamm mit Heissgas aus der KVA verbrannt werden kann, sind die tieferen Investitionskosten. Dieses System wird seit 2008 bereits bei der KVA in Uvrier (VS) für die Verbrennung von Klärschlamm angewendet. Neu zu erstellen ist eine Schlammannahmestation. Die Rauchgase sollten in der bestehenden Rauchgasbehandlung der KVA gereinigt werden können, wodurch die Brüdenvorbehandlung entfällt. Das Abwasser aus der GEVAG wird anschliessend über die bestehende Leitung zur ARA Chur geführt.

*c) Erstellung einer neuen Monoverbrennungsanlage in Domat/Ems*

Beim Holzkraftwerk kann eine Monoverbrennung für Klärschlamm erstellt werden. Die Verbrennung erfolgt in einem Wirbelschichtofen. Die entstehende Abwärme kann im Netz des Holzkraftwerks verwendet werden. Durch den Wegfall der Grosswägerei ist der Absatz von Wärme aber nicht gesichert. Die Schlammannahmestation und Brüdenvorbehandlung müssen neu erstellt werden. Die gereinigten Brüdenabwässer werden anschliessend in die ARA Tuma Lunga eingeleitet.

### **3.9.2 Anlagen**

#### *Bestehende Anlagen*

Die bestehende Infrastruktur in Chur (TRAC) kann für eine Monoverbrennung genutzt werden (Variante 4a), muss hierzu aber ausgebaut werden.

#### *Neue Anlagen*

In Trimmis (4b) und in Domat/Ems (4c) muss eine neue Monoverbrennungsanlage inklusive Gebäude, Schlammannahme und Erschliessung gebaut werden. Ausserdem muss in Domat/Ems eine Brüdenvorbehandlung erstellt werden.

### **3.9.3 Transporte**

Transporte von entwässertem Klärschlamm fallen an wenn die Monoverbrennung nicht in Chur durchgeführt wird.

Die Transporte der Klärschlammmasche zur Deponie werden nicht separat aufgeführt. Wirtschaftlich sind sie im Betrag für die Deponierung der Klärschlammmasche integriert.

Folgende Transporte fallen an:

- a) Entwässerter Schlamm: Keine Transporte

Wasser: wird direkt in die ARA Chur eingeleitet

- b) Entwässerter Schlamm: Transport von Chur nach Trimmis (5'500 t/a).

Wasser: wird nach Vorreinigung nach Landquart oder Chur abgeleitet.

- c) Entwässerter Schlamm: Transport von Chur nach Domat/Ems (5'500 t/a)  
 Wasser: wird nach Vorreinigung auf die ARA Tuma Lunga abgeleitet.

### 3.9.4 Endenergiefluss

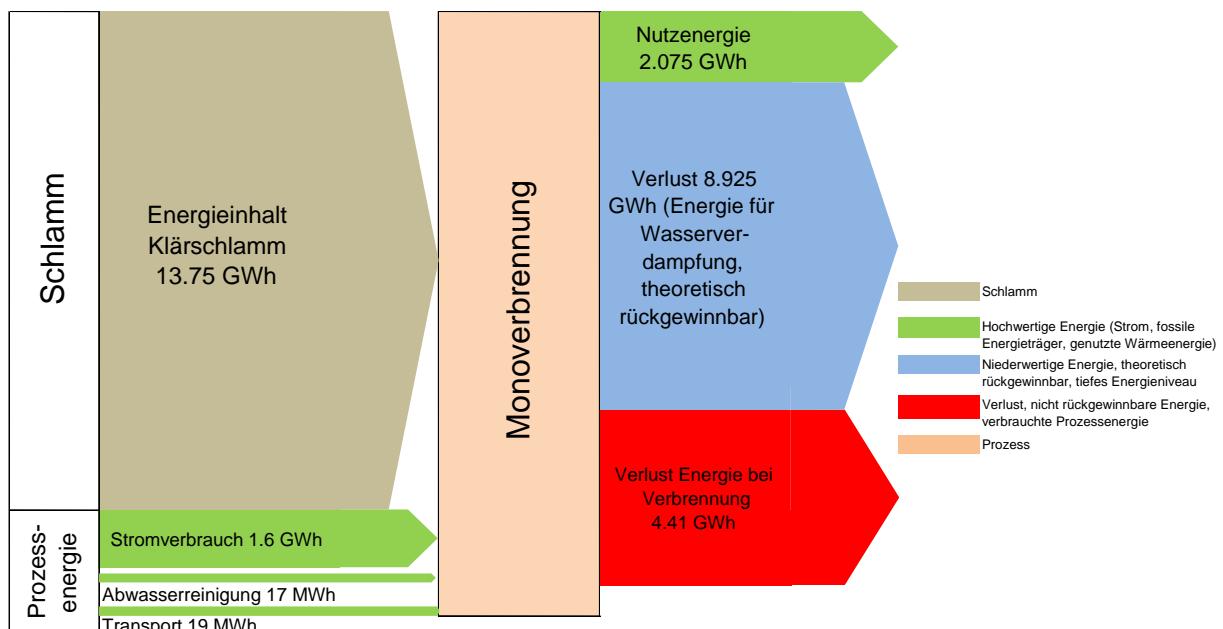


Abbildung 10: Energieflussdiagramm Endenergie in Variante 4 am Beispiel der Variante 4b (Eigenständige Monoverbrennung in Trimmis)

Bei der eigenständigen Monoverbrennung entfällt die Zufuhr von zusätzlicher thermischer Energie. Bei der Monoverbrennung von entwässertem Klärschlamm (70% Wasser) entsteht deutlich weniger Nutzenergie als in den Varianten 1 und 2, bei denen getrockneter Schlamm im Zementwerk genutzt wird. Der grösste Teil der Heizenergie des Klärschlammes muss direkt für die Verdampfung des Wassers verwendet werden. Diese Wärmeenergie findet sich in den kondensierten Brüdenabwässer wieder, das sich auf einem geringen Temperaturniveau befindet und nur beschränkt für die Rückgewinnung von Wärme genutzt werden kann.

Die verbleibenden 2 GWh Nutzenergie könnten zwar verwertet werden, dies bedingt aber das Vorhandensein eines Abnehmers. Folgende Möglichkeiten bestehen in den 3 Standorten:

- Chur: Mit dem Wegfall der TRAC muss die Faulraumbeheizung auf einem anderen Weg erfolgen. Zusammen mit dem Biogas aus der Faulung könnte die Nutzenergie aus der Monoverbrennung verstromt werden und gleichzeitig den Faulraum beheizen. Der Wirkungsgrad solcher Systeme mit einer Mikrogasturbine beträgt 25-30%.
- Trimmis: Die erzeugte Nutzenergie kann mit dem bestehenden System mit einem Wirkungsgrad von 20-25 % verstromt werden.
- Domat/Ems: Mit dem Wegfall der Grosswäscherei hat das Holzkraftwerk bereits einen Wärmeüberschuss. Die erzeugte Nutzenergie kann auf den bestehenden Systemen mit einem Wirkungsgrad von 20-25 % verstromt werden.

Für den Betrieb der Monoverbrennung muss elektrischer Strom eingesetzt werden (Leistung 200 kW, Betriebszeit ca. 8000 h/a<sup>21</sup>). Die Aufwendung von Energie für die Abwassereinigung und den Transport ist ähnlich wie in den Varianten 1 und 2.

### 3.9.5 Primärenergie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz

Der Energieverbrauch der Monoverbrennung ist ein Sammelparameter, der die Abluftreinigung, die Bereitstellung der Infrastruktur und die Deponierung der Asche beinhaltet. Die Nutzenergie fliesst als Wärmeenergie in die Primärenergiebilanz ein.

Die Primärenergie- und die CO<sub>2</sub>-Bilanz sieht bei allen drei möglichen Standorten sehr ähnlich aus. Unterschiedlich sind nur die Energieaufwände für die Abwasserreinigung und den Transport.

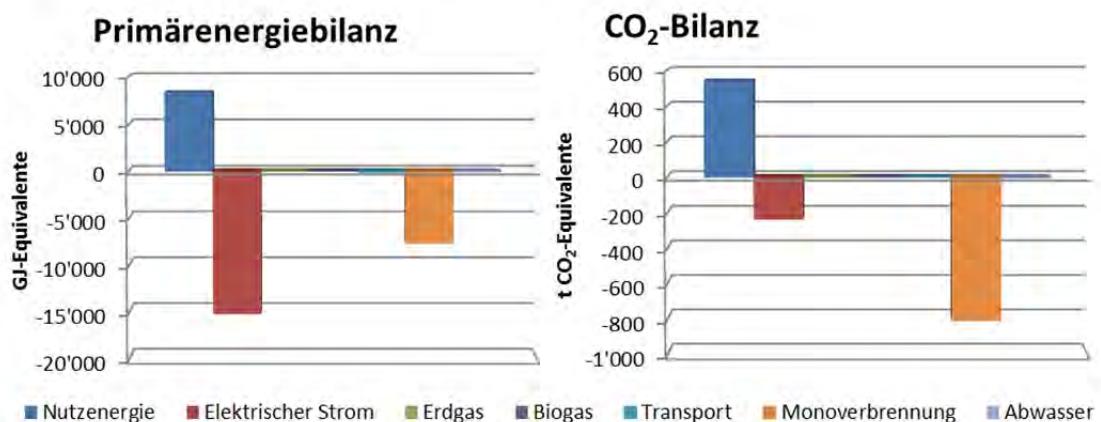


Abbildung 11: Primärenergie und CO<sub>2</sub>-Bilanz am Beispiel der Variante 4b

Die Variante 4a weist eine **negative Energiebilanz von 14'545 GJ-Eq** und eine **negative CO<sub>2</sub>-Bilanz von 508 t CO<sub>2</sub>-Eq** auf.

Die Varianten 4b und 4c weisen eine **negative Energiebilanz von 14'731 GJ-Eq** und eine **negative CO<sub>2</sub>-Bilanz von 519 t CO<sub>2</sub>-Eq** auf.

### 3.9.6 Kosten Klärschlammensorgung

Die geschätzten Kosten für die Entsorgung pro Tonne angelieferten entwässerten Klärschlamm (30% TS) betragen zwischen 176 und 207 CHF/t. Deutlich billiger ist eine Monoverbrennung in Chur, da hier die bestehende Infrastruktur der Trocknung teilweise genutzt werden kann und der entwässerte Schlamm nicht zusätzlich anfällt. Die Variante Trimmis ist günstiger, weil mit dem Einsatz eines Drehrohrofens weniger Investitionskosten anfallen.

Weitere Unterschiede finden sich in den Betriebskosten, die zu einem Teil auch von den Investitionskosten abhängen. Ein weiterer Unterschied ist in den „Abgabekosten Endverwerter“, in welchen die Abwasserreinigung in einer separaten Vorbehandlung stattfindet.

<sup>21</sup> Angabe der Kalogeo, Hersteller von für Wirbelschichtverbrennungen. Für die Drehofenverbrennung wird dieselbe Stromverbrauch angenommen.

Die detaillierte Berechnung der Kosten befindet sich im Anhang.

**Tabelle 6: Kosten Klärschlammensorgung Variante 4**

	[CHF]	Variante 4a	Variante 4b	Variante 4c
		Chur	Trimmis	Domat/Ems
Neuinvestitionen	[CHF]	13'208'700	13'170'500	15'970'500
Jährliche Abschreibung	[CHF]	1'166'994	1'028'968	1'272'078
Energiekosten (thermisch)	[CHF]	0	0	0
Energiekosten (elektrisch)	[CHF]	256'000	256'000	256'000
Betriebskosten	[CHF]	795'361	794'215	878'215
Abgabekosten Endverwerter	[CHF]	425'000	605'000	605'000
Transportkosten	[CHF]	0	96'250	96'250
Jahreskosten	[CHF]	2'643'355	2'780'433	3'107'543
<b>Kosten pro Tonne Klärschlamm (30%)</b>	<b>[CHF]</b>	<b>176</b>	<b>185</b>	<b>207</b>
Kosten pro Tonne TS Klärschlamm	[CHF]	587	618	691

### 3.9.7 Deponierung

Die separate Deponierung der Klärschlammmasche ist für eine Phosphorrückgewinnung unbedingt nötig. Generell kann die Schlacke in einem separaten, abgegrenzten Kompartiment einer bestehenden (oder eventuell neuen) Deponie eingelagert werden.

### 3.10 Variante 5: Ausserkantonale Verwertung in einer Monoverbrennung

Eine Möglichkeit ist den Klärschlamm in einen anderen Kanton zu exportieren. Betrachtet werden zwei mögliche Schlammabnehmer: die KVA Bazenheid (Teil Monoverbrennung) und die neue Monoverbrennung in Zürich Werdhölzli (geplant).

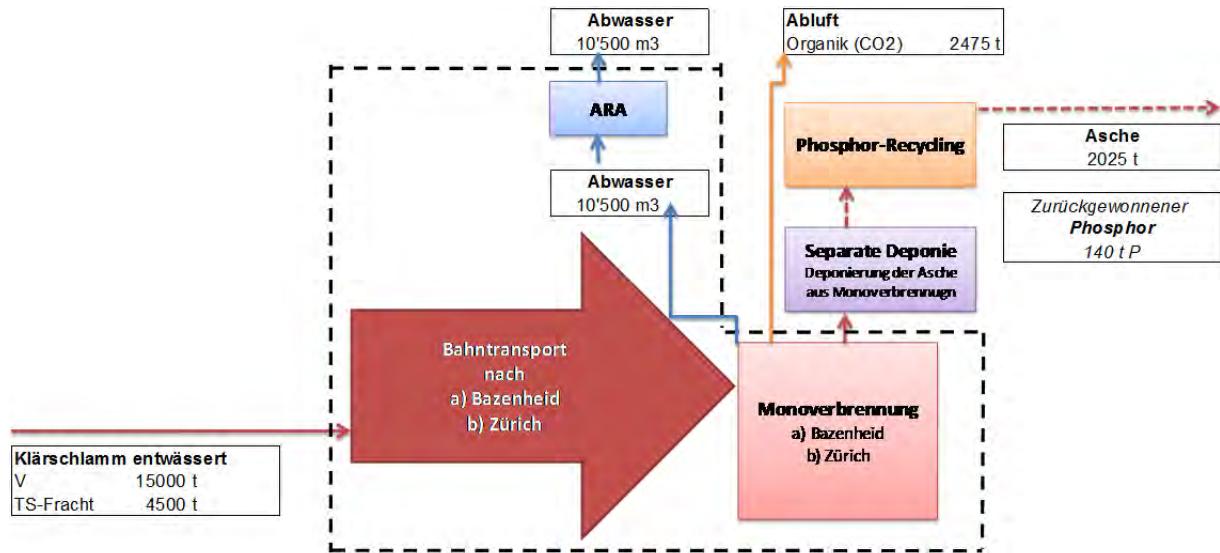


Abbildung 12: Massenflussschema der Variante 5

#### 3.10.1 Variante 5 a): Export des Klärschlamm zur KVA Bazenheid (Monoverbrennung)

Die Obstverwertung Oberaach (OGO), der Abwasserverband Altenrhein (AVA) und der Zweckverband Abfallverwertung Bazenheid (ZAB) haben sich 2005 zur Klärschlamm Interessengemeinschaft Ost (KIGO) zusammengeschlossen. Während der OGO und der AVA Trocknungsanlagen betreiben, wird in Bazenheid seit Herbst 2008 eine neue Wirbelschichtverbrennungsanlage nur für industrielle Schlämme / Granulate und Klärschlämme betrieben. Die Anlage in Bazenheid hat eine Verbrennungskapazität von ca. 30'000-40'000 Tonnen entwässerte Schlämme (Trocken-substanzgehalt von durchschnittlich 30%) pro Jahr. Die in der Wirbelschicht produzierte Abwärme wird in Form von Dampf/Warmwasser oder als Strom genutzt.

Die Asche aus der Monoverbrennung wird in einem separaten Kompartiment der Deponie eingelagert, um eine Rückgewinnung des Phosphors zu einem späteren Zeitpunkt zu ermöglichen.

Die Monoverbrennung der KVA Bazenheid ist momentan noch nicht ganz ausgelastet und es würde Kapazität bestehen um 15'000 Tonnen entwässerten Klärschlamm aus dem Kanton Graubünden anzunehmen. Die Betriebsleitung der KVA Bazenheid hat bestätigt, dass der Klärschlamm des Kantons Graubünden in der KVA Bazenheid zu einem Preis von 90 CHF/t entwässerten Klärschlamm entsorgt werden könnte. Um den Preis und die Verwertung in Bazenheid zu ermöglichen, müsste vertraglich die Klärschlammensorgung mit Bazenheid langfristig vereinbart werden<sup>22</sup>.

<sup>22</sup> Gemäss E-Mail von der Betriebsleitung der KVA Bazenheid (C. Bianculli) vom 21. 9. 2011

Die KVA Bazenheid beschäftigt sich ausserdem konkret mit der Rückgewinnung von Phosphor. Mit einem Partner aus Deutschland soll die P-Rückgewinnung für die Herstellung eines Düngers innerhalb der nächsten 5 Jahre auch in der Schweiz konkret werden.

### **3.10.2 Variante 5 b): Export des Klärschlamm nach Zürich Werdhölzli (Monoverbrennung)**

Der Kanton Zürich will eine neue Klärschlammverwertungsanlage für den gesamten im Kanton Zürich anfallenden Klärschlamm bauen. In einer breit angelegten Studie wurden 5 Standorte geprüft. Der Standort bei der ARA Werdhölzli in Zürich wurde dabei als der ökologisch und ökonomisch beste Standort identifiziert. Der Stadtrat von Zürich hat nun beschlossen, dass mit der Planung und Realisierung der Schlammverbrennungsanlage begonnen werden soll. Die Inbetriebnahme ist im Jahr 2015 vorgesehen. Die Anlage wird durch die Stadt Zürich (ERZ) erstellt und anschliessend auch betrieben. Vor dem Bau muss aber der Kredit für die Anlage in einer Volksabstimmung erst angenommen werden. Die heute abgeschätzten Entsorgungskosten betragen weniger als 110 CHF<sup>23</sup> pro Tonne entwässerten Klärschlamm.

Bei der neuen Schlammverwertungsanlage im Werdhölzli wird es sich um eine moderne Monoverbrennungsanlage mit einem Wirbelschichtofen handeln, welcher die entwässerten Klärschlämme erst vortrocknet und anschliessend verbrennt. Die Wärme wird nach der Deckung des Eigenbedarfs der Kläranlage Werdhölzli an weitere Wärmebezüger weitergegeben.

Für die Abgabe des Klärschlamm aus dem Kanton Graubünden an die neue Klärschlammverwertungsanlage im Werdhölzli müssen noch weitere Abklärungen getroffen werden. Finanziell kann dieser Verwertungsweg zwar durchgerechnet werden (unter der Annahme, dass auch für ausserkantonale Klärschlammannahmen der gleiche Entsorgungspreis gilt). Falls diese Variante in die engere Auswahl käme, müsste eine entsprechende Anfrage direkt über den Kanton erfolgen.

### **3.10.3 Beschreibung**

Das genaue Stapel- und Transportkonzept müsste mit den künftigen Abnehmern noch abgesprochen werden. In Chur kann die bestehende Infrastruktur beibehalten werden und gegebenenfalls als Stapel oder Annahmestation für den folgenden Weitertransport genutzt werden. Es besteht aber auch die Möglichkeit, dass der Klärschlammtransport direkt von den Kläranlagen zum Endabnehmer geht.

Für diese Leistung würde eine Pauschale für Wartung und Unterhalt in die Betriebskosten eingerechnet.

---

<sup>23</sup> Gemäss Broschüre Klärschlamm-Agenda der Baudirektion Zürich, Oktober 2010

### 3.10.4 Transporte

In dieser Studie wird für den Transport nur die Option Bahntransport berücksichtigt<sup>24</sup>. Ein Transport mit Lastwagen zu ausserkantonalen Standorten kommt gemäss ANU nicht in Frage.

Heute werden bereits ca. 3500 t/a Klärschlamm aus dem Engadin und der Region Davos per Bahn nach Chur transportiert. Der Klärschlamm wird dafür in Mulden geladen, die per LKW von der ARA zur Verladestation der Bahn gebracht werden.

Nach dem Bahntransport werden die Mulden wiederum von einem LKW am Bahnhof Chur abgeholt und zur ARA Chur gebracht. Diese Transporte werden von der Rhätischen Bahn (RhB) durchgeführt. Für die Berechnung des Transportpreises für die Variante 5 wird angenommen, dass diese Transporte direkt nach Landquart gehen und dort von den RhB-Eisenbahnwagen auf die Eisenbahnwagen der SBB umgeladen werden. Für die 3'500 t wird nur mit dem Preis für den Transport von Landquart nach Bazenheid, resp. Zürich gerechnet.

Der restliche Klärschlamm, der heute per LKW nach Chur transportiert wird, wird weiterhin dort angenommen. Nach der Annahme wird der Klärschlamm in die dafür vorgesehenen Mulden gefüllt und per LKW zum Bahnhof Chur gebracht, wo die Mulden auf die Eisenbahnwagen der SBB verladen werden.

Die berücksichtigten Preise stammen aus der Offerte der Firma ACTS AG<sup>25</sup>.

### 3.10.5 Endenergiefluss

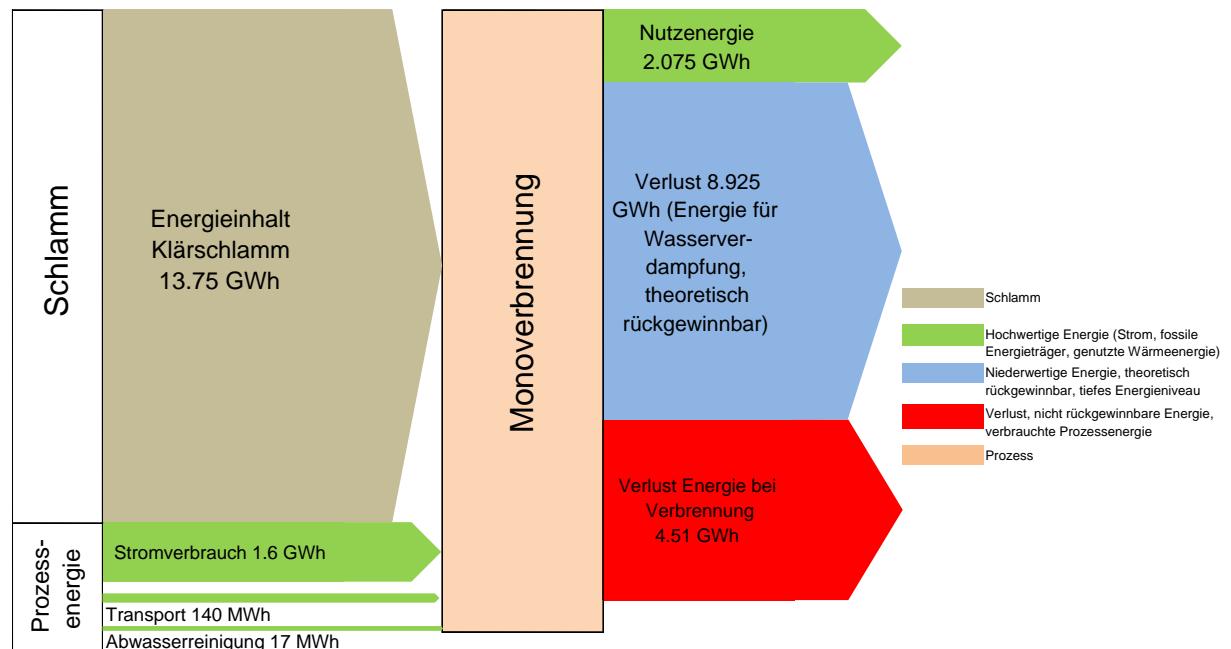


Abbildung 13: Energieflussdiagramm Endenergie in Variante 5 am Beispiel der Verbrennung in Bazenheid

<sup>24</sup> Gemäss Besprechung mit dem ANU vom 2. September 2011

<sup>25</sup> Aus dem E-Mail von F. Zumkehr (ACTS AG) vom 11. Oktober 2011

Die Klärschlammverwertung in einer ausserkantonalen Monoverbrennung ähnelt vom Endenergieaufwand den Monoverbrennungen im Graubünden aus Kapitel 3.9. Die Energie für den Transport ist aufgrund der grösseren Transportdistanzen höher. Da der Transport aber mit der Bahn durchgeführt werden kann, ist der Unterschied moderat.

Die erzeugte Nutzenergie kann in beiden Untervarianten mit den bestehenden Systemen und dem üblichen Wirkungsgrad von 20-22% verstromt werden.

### 3.10.6 Primärenergie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz

Die Primärenergie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz der Variante 5 ist praktisch identisch mit den Bilanzen in Variante 4. Unterschiedlich sind einzig die Transporte, die aber dank dem Bahntransport die CO<sub>2</sub>-Bilanz nicht stark belasten.

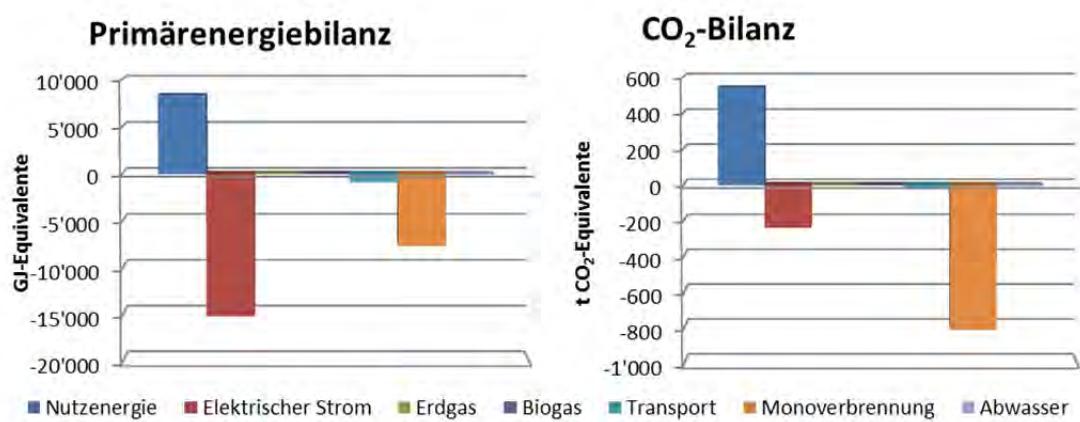


Abbildung 14: Primärenergie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz der Variante 5 am Beispiel der Monoverbrennung in Bazenheid

Die Variante 5a weist eine **negative Energiebilanz von 15'414 GJ-Eq** und eine **negative CO<sub>2</sub>-Bilanz von 530 t CO<sub>2</sub>-Eq** auf.

Die Variante 5b weist eine **negative Energiebilanz von 15'539 GJ-Eq** und eine **negative CO<sub>2</sub>-Bilanz von 533 t CO<sub>2</sub>-Eq** auf.

### 3.10.7 Kosten Klärschlammensorgung

Die Kosten der Klärschlammensorgung betragen für die Variante 5 a) nach Bazenheid 143 CHF/t entwässerter Klärschlamm und für die Variante 5 b) nach Zürich Werdhölzli 164 CHF/t entwässerter Klärschlamm. In den Kosten enthalten ist auch eine Investition in die bestehende Infrastruktur in Chur, die nötig ist, um die Schlammannahme zu sanieren (siehe Kapitel 2.3). Ausserdem wird eine Pauschale für den Betrieb in Chur verrechnet.

Die Abgabekosten bei der Monoverbrennung in Bazenheid betragen 90 CHF/t, in Zürich betragen sie 110 CHF/t entwässerten Klärschlamm. Die Preise müssen bei einer allfälligen Konkretisierung dieser Varianten vertraglich mit den entsprechenden Betreibern fixiert werden.

**Tabelle 7: Kosten Klärschlammensorgung Variante 5**

		Variante 5a	Variante 5b
		Bazenheid	Zürich
Neuinvestitionen	[CHF]	1'003'800	1'003'800
Jährliche Abschreibung	[CHF]	177'844	177'844
Energiekosten (thermisch)	[CHF]	0	0
Energiekosten (elektrisch)	[CHF]	0	0
Betriebskosten	[CHF]	100'000	100'000
Abgabekosten Endverwerter	[CHF]	1'350'000	1'650'000
Transportkosten	[CHF]	515'500	530'500
Jahreskosten	[CHF]	2'143'344	2'458'344
<b>Kosten pro Tonne Klärschlamm (30%)</b>	<b>[CHF]</b>	<b>143</b>	<b>164</b>
Kosten pro Tonne TS Klärschlamm	[CHF]	476	546

### 3.11 Variante 6: Export ins Ausland

Massgebend für den Export von Klärschlamm ist die VEVA (Verordnung über den Verkehr von Abfällen 814.610). Art. 17 regelt die Ausfuhrfuhrbewilligungen von Abfällen. Demnach ist die Ausfuhr von Klärschlamm nur in Ausnahmefällen (Revisions, Ausfall des normalen Entsorgungsweges etc.) oder bei langfristigen bilateralen Abkommen in der grenznahen Region möglich. Der Klärschlamm, der heute aus der Schweiz ins Ausland exportiert wird, stammt vornehmlich von grenznahen ARA's die auch ausländisches Wasser klären.

Abklärungen mit dem BAFU ergaben, dass der Export des gesamten Klärschlamm aus dem Kanton Graubünden nicht bewilligt werden würde<sup>26</sup>.

**Von weiteren Abklärungen über den Export ins Ausland wird deshalb abgesehen.**

---

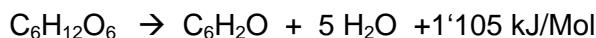
<sup>26</sup> Gemäss Bestätigung des BAFU vom 14. September 2011 per E-Mail.

### 3.12 Variante 7: Anbietervariante: HTC

Basis für Berechnungen in Variante 7 ist die Offerte der Firma AVA-CO2 vom 16. August 2011. Da es sich beim HTC-Prozess bei der Anwendung für Klärschlamm um ein junges Verfahren, das sich noch in Entwicklung befindet, handelt, können die Angaben je nach Prozess und Hersteller variieren.

#### 3.12.1 Der HTC-Prozess

Bei der hydrothermalen Carbonisierung (HTC) wird der natürliche Kohlegestehungsprozess nachgebildet. Unter Ausschluss von Luftsauerstoff und unter Einwirkung von Druck (20-35 bar) und Temperatur (200°C) wird Biomasse in energetisch hochwertige Biokohle umgewandelt. Dabei werden der organischen Biomasse (vereinfacht als Zucker  $C_6H_{12}O_6$  dargestellt) Wassermoleküle abgespalten:



Die durch die Reaktion freigesetzte Wärme wird mittels Wärmetauschern zurückgewonnen und für die Erwärmung der zu karbonisierenden Biomasse verwendet. Die benötigte Wärmemenge kann dadurch deutlich reduziert werden. Gemäss Anbieterangaben enthält die durch den HTC-Prozess hergestellte Klärschlammkohle ca. 85% des zugeführten Kohlenstoffs. Der restliche Kohlenstoff verbleibt einerseits im Prozesswasser (ca. 10%) und entweicht andererseits mit der Prozessluft (ca. 5%). Die gewonnene Klärschlammkohle ist sehr gut entwässerbar (bis zu 70% TS-Gehalt) und kann gemäss Anbieter zu Pellets gepresst werden. Die Klärschlammkohle kann theoretisch als Brennstoff oder für Bodenverbesserungen verwendet werden. Der Einsatz als Bodenverbesserer in der Landwirtschaft muss aber aufgrund der schweizerischen Gesetzgebung ausgeschlossen werden.

Der Heizwert des entstehenden verkohlten Klärschlamm ist mit 11.2 MJ/kg TS leicht höher, als jener des gewöhnlichen Klärschlamm mit 10.66 MJ/kg<sup>27</sup>. Der HTC-Prozess geht aber auch mit einer Abnahme der Trockensubstanz einher (Abnahme um ca. 30-35%)<sup>28</sup>. Da der Heizwert des Klärschlamm durch die Verkohlung nur schwach gesteigert werden kann und gleichzeitig eine Reduktion der Trockensubstanz stattfindet, muss von einem, auf den Heizwert bezogenen, Wirkungsgrad von rund 70% ausgegangen werden. Die Verluste im Energiegehalt finden sich einerseits in der Abluft wieder und andererseits im Prozessabwasser, das relativ stark mit CSB belastet ist. Die von den Herstellern angegebenen Wirkungsgrade sind in neueren Publikationen höher angegeben. Basis für Berechnungen in dieser Studie bilden aber die Angaben aus der Machbarkeitsstudie des BAFU<sup>27</sup>.

Wird der HTC-Prozess mit Klärschlamm durchgeführt, befinden sich nach dem Verkohlungsprozess auch Schwermetalle und weitere schwer abbaubare Stoffe in der Kohle. Die Klärschlammkohle ist also auch nach dem Umwandlungsprozess ein Ab-

<sup>27</sup> Angaben stammen aus der Machbarkeitsstudie BAFU, Schlussbericht: Hydrothermale Carbonisierung von Klärschlamm der ZHAW (Zürcher Fachhochschule für angewandte Wissenschaften), Abteilung IUNR (Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen), 2011

<sup>28</sup> Gemäss Angaben der Firma AVA-CO2 in der Richtofferte HTC für das Projekt "ANU Graubünden" vom 16.8.2011

fallstoff, der gemäss Gesetzgebung entsprechend zu entsorgen ist. Ein weiterer unklarer Punkt ist das Handling der Biokohle. Es ist aus unserer Sicht momentan nicht klar ob die Klärschlammkohle gut transportierbar ist. Kohlestaub könnte zu Problemen führen.

Es existieren mehrere Anbieter, die den HTC-Prozess für die Verarbeitung von Klärschlamm anbieten. Uns sind dafür momentan folgende bekannt: TerraNova Energy, TFC Engineering AG (KELAG) und AVA-CO<sub>2</sub>. Eine industrielle Vollmassstabsanlage betreibt momentan keine dieser Firmen. Als Referenzen dienen momentan erst Pilotanlagen. Die TerraNova Energy betreibt in Kaiserslautern eine Pilotanlage mit Klärschlamm, während die AVA-CO<sub>2</sub> in Karlsruhe eine Pilotanlage in industriellem Massstab betreibt. Diese Anlage wurde allerdings bisher nur mit Grüngut gefahren. Die TFC Engineering AG erstellt in Buchs SG eine Pilotanlage die Klärschlamm, gemischt mit Grüngut, verarbeitet. Diese ist allerdings noch nicht in Betrieb gegangen.

Bei der AVA-CO<sub>2</sub> wurde eine Offerte für eine HTC-Anlage eingeholt, die den Klärschlamm von Graubünden verarbeiten sollte. Die AVA-CO<sub>2</sub> ist ein weltweit tätiges Unternehmen, das seinen Sitz in Zug hat.

### 3.12.2 Beschreibung

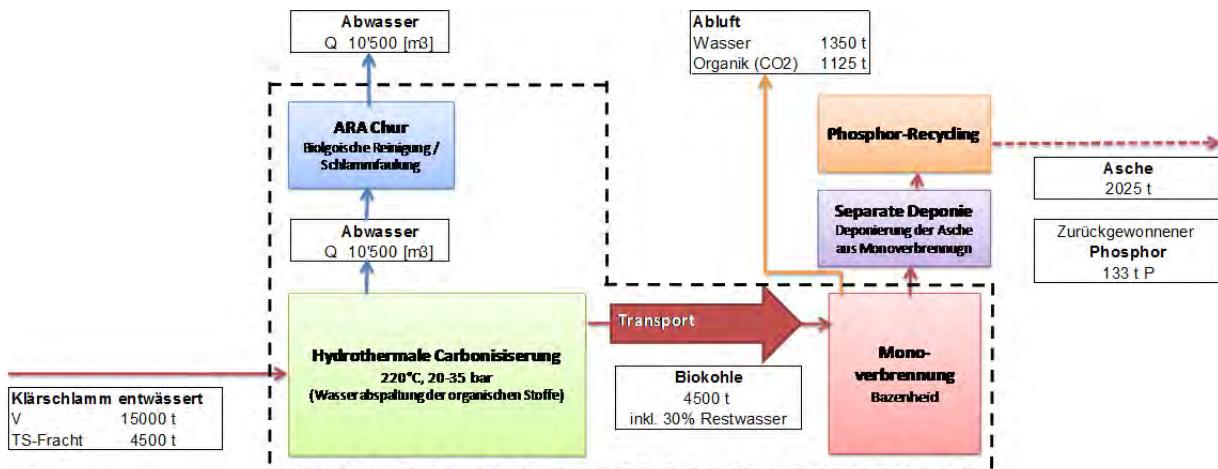


Abbildung 15: Massenflussschema der Variante 7

Für diese Studie wurde für die HTC-Anlage der Standort Chur gewählt. Auf der ARA Chur besteht die Infrastruktur für die Schlammannahme, Platzreserven für eine solche Anlage sind vorhanden und für die Reinigung des Prozessabwassers steht die ARA Chur zur Verfügung.

Für die Weiterverwertung der Klärschlammkohle kommt nur die thermische Verwertung in Frage. Die Verbrennung der Klärschlammkohle muss des Weiteren eine Phosphorrückgewinnung aus der Asche ermöglichen. Für die thermische Entsorgung wird im Sinne einer provisorischen Weiterverarbeitung zur Phosphorrückgewinnung, eine Verbrennung in der Monoverbrennungslinie der KVA Bazenheid vor-

gesehen<sup>29</sup>, die die Klärschlammkohle zum gleichen Preis wie den entwässerten Schlamm annehmen würde (90 CHF/t). Die Kosten und die Bilanzen von Variante 7 würden sich noch deutlich ändern, wenn die Klärschlammkohle in einer separaten Energiezentrale (z.B. kombinierte Strom/Heizzentrale) verbrannt oder vergast und die entstehende Asche für eine Phosphorrückgewinnung deponiert würde. Theoretisch kommt auch eine Verwertung der Klärschlammkohle in einer Co-Verbrennung (Zementwerk, KVA, Holzkraftwerk, Kohlekraftwerk) in Frage. Diese Optionen werden in dieser Studie allerdings nicht geprüft, da hiermit keine Phosphorrückgewinnung aus der Asche möglich ist.

Die von der AVA-CO<sub>2</sub> offerierte HTC-Anlage arbeitet mit einem Multi-Batch Verfahren. Der HTC-Prozess findet hierbei parallel in drei Batchreaktoren statt. Im sogenannten Mixing-Tank wird die Klärschlammmasse unter Druck aufgeheizt. Als Wärmeträger dient Dampf, der einerseits im Prozess zurückgewonnen wird, andererseits vor Ort produziert werden muss. Nach dem Mixingtank werden die drei nachfolgenden HTC-Reaktoren batchweise beschickt und die Carbonisierung findet unter einem Druck von 20-35 bar und einer Temperatur von 200°C statt. Im „Outlet Buffer Tank“ wird die carbonisierte Biomasse abgekühlt und im „Evaporation Tank“ wird das Prozesswasser aufgefangen und teilweise rezykliert.

Das entstehende Prozesswasser weist relativ hohe CSB- (ca. 45'000 mg CSB/L) und Stickstoffkonzentrationen (ca. 2'500 mg N/L) auf. Erhöhte Phenolkonzentrationen (ca. 600 mg Phenole/L) sind ebenfalls zu erwarten. Das Prozesswasser muss deshalb in einer ARA gereinigt werden. Für den Standort Chur wird angenommen, dass das Prozessabwasser wie die Brüden aus der Trocknung ohne Vorreinigung in der ARA Chur entsorgt werden können. An einem anderen Standort ist eine separate Behandlung der Brüdenabwässer unumgänglich. Die hohen CSB-Konzentrationen im Prozessabwasser würden auch eine Verwertung in der Faulung ermöglichen. Die ARA Chur verfügt allerdings nicht über genügend Faulraumkapazität um täglich bis zu 30 m<sup>3</sup> Prozessabwasser zusätzlich in der Faulung zu verwerten<sup>30</sup>. Ein Ausbau der Faulung, evtl. durch den Einsatz einer Membrananlage zur Abtrennung von Faulwasser aus dem Faulturm, wäre hierbei unumgänglich<sup>31</sup>. Eine genauere Untersuchung des Prozessabwassers ist für einen solchen Einsatz aber zwingend nötig.

### 3.12.3 Transporte

Die Klärschlammkohle wird mit dem LKW zur nächsten Bahnverladestation in Chur gefahren und per Bahn zu der KVA in Bazenheid transportiert.

Ungeklärt ist die Konsistenz der entstandenen Klärschlammkohle. Probleme könnten durch feine Staubpartikel beim Transport entstehen.

---

<sup>29</sup> Besprochen an Sitzung mit dem ANU vom 2. September 2011 in Chur, bestätigt am 4. Juni per E-Mail von der Betriebsleitung der KVA Bazenheid (C. Bianculli)

<sup>30</sup> Gemäss Email von W. Feurer (Betriebsleiter ARA Chur) vom 23. November 2011

<sup>31</sup> Die HOLINGER AG hat ein solches SMART-System (Sophisticated Membrane Anaerobic Reactor Technology) auf der ARA Wangen-Wiedlisbach implementiert. Die Faulgasproduktion konnte dadurch erheblich gesteigert werden.

### 3.12.4 Endenergiefluss

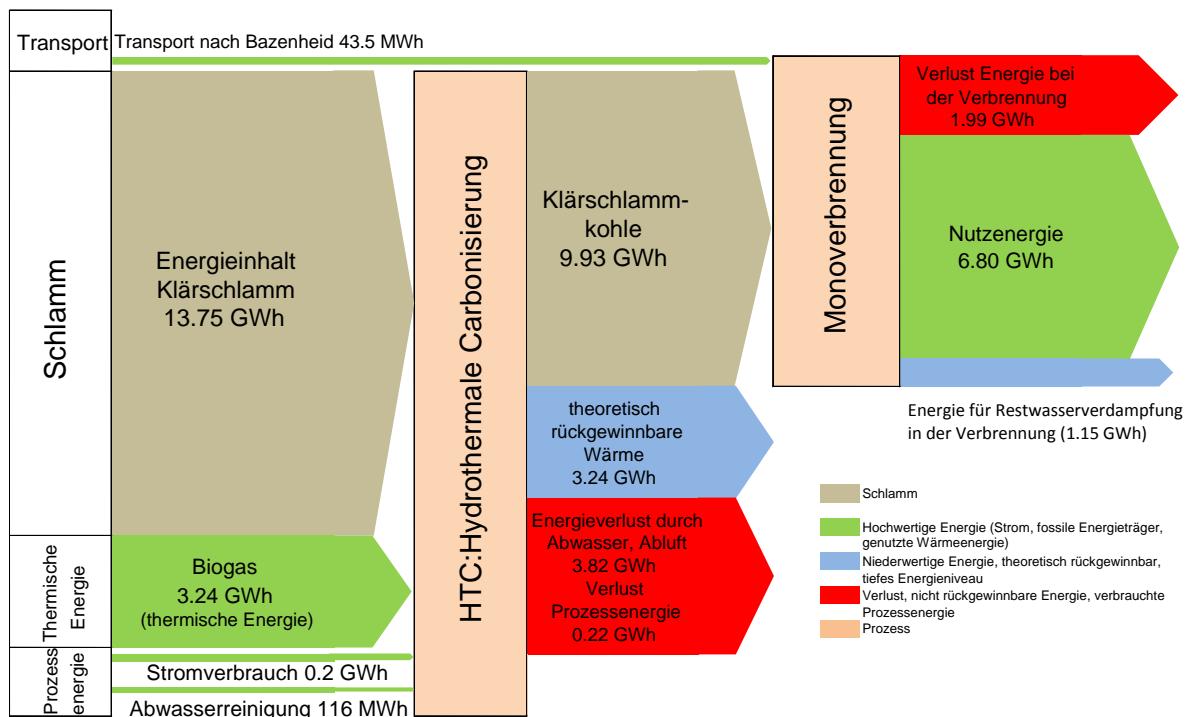


Abbildung 16: Energieflussdiagramm Endenergie in Variante 7 mit dem HTC-Verfahren

Das HTC-Verfahren verbraucht deutlich weniger Endenergie in Form von Strom und Wärme als eine Trocknung des Klärschlammes. Für die Produktion der benötigten thermischen Energie wird angenommen, dass Biogas aus dem Faulturm der ARA Chur genutzt werden.

### 3.12.5 Primärenergie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz

Transport und Verwertung in der Monoverbrennung sind vergleichbar mit der Variante 5. Aufgrund des deutlich tieferen Wassergehalts in der Klärschlammkohle (TS-Gehalt: 70%) gegenüber dem entwässerten Schlamm (TS-Gehalt: 30%) ist die theoretisch nutzbare Nutzenergie in der Monoverbrennung in Variante 7 deutlich höher als in Variante 5.

Stärker ins Gewicht als bei anderen Varianten fällt die Abwasserreinigung, die aufgrund des hohen CSB-Gehalts energieintensiver ist. Verglichen mit den anderen Energieaufwänden, nimmt aber die Abwasserreinigung in der Energiebilanz eine untergeordnete Rolle ein.

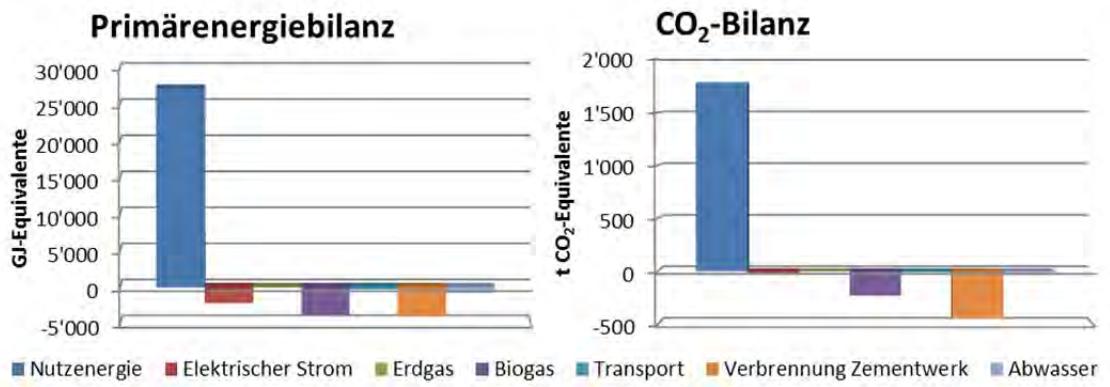


Abbildung 17: Primärenergie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz der Variante 5 am Beispiel der Monoverbrennung in Bazenheid

Die Variante 7 weist eine **positive Energiebilanz von 16'488 GJ-Eq** und eine **positive CO<sub>2</sub>-Bilanz von 1'055 t CO<sub>2</sub>-Eq** auf.

### 3.12.6 Vergleich Trocknung - HTC-Prozess

Der HTC-Prozess ist exotherm, ein Teil der Energie entsteht also durch die Reaktionsabwärme, welche zu einem Teil zurückgewonnen wird. Der thermische Energieverbrauch beträgt weniger als die Hälfte des für eine Trocknung benötigten Energieverbrauchs. Der Verbrauch an elektrischer Energie ist laut Herstellerangaben ebenfalls deutlich tiefer als bei einer Trocknung. Durch den HTC-Prozess geht aber, gerechnet mit den Angaben aus der Offerte von AVA-CO<sub>2</sub> und den ermittelten Heizwerten aus der ZHAW-Studie, ca. 30% des möglichen Heizwerts verloren. Die Datengrundlage für diese Berechnung ist momentan relativ beschränkt und es kann davon ausgegangen werden, dass dieser Heizwertverlust eher kleiner ausfällt.

In Tabelle 8 sind die Energieeinsätze und Energieverluste der Verfahren Trocknung und HTC verglichen. In diesem Vergleich nicht mit einbezogen ist der weitere Verwertungsweg bei welchem, gemäss dieser Studie, der entwässerte Klärschlamm nach der Trocknung in der TRAC ins Zementwerk (>90 % TS) zur Verbrennung geht und bei der die Klärschlammkohle des HTC-Verfahrens (70 % TS) in eine Monoverbrennung führt.

Tabelle 8: Vergleich zwischen der nutzbaren thermischen Energie nach einer Trocknung und nachdem HTC-Verfahren anhand dem Klärschlammfall des Kantons Graubünden während einem Jahr

	Trocknung	HTC-Verfahren	Einheit
Energieinhalt Trockensubstanz	13'750	13'750	MWh/a
Thermischer Energiebedarf	9'240	3'240	MWh/a
Verluste HTC-Prozess (Prozesswasser, CO <sub>2</sub> -Ausgasung)		3'820	
<b>Nutzbare thermische Energie</b>	<b>4'510</b>	<b>6'690</b>	<b>MWh/a</b>

Aufgrund des tieferen thermischen Energiebedarfs des HTC-Verfahrens bleibt, unabhängig vom weiteren Verwertungsweg, in der Bilanz mehr theoretisch nutzbare Energie beim HTC-Prozess zurück.

### **3.12.7 Ausblick**

Die HTC-Technologie ist zwar seit vielen Jahren bekannt, ihre industrielle Nutzung steckt allerdings noch in den Kinderschuhen. Es existieren nur wenige Anbieter die HTC für die industrielle Nutzung anbieten und diese sind zum grössten Teil noch im Pilotanlagenstadium. Die Anwendung des HTC-Prozesses mit Klärschlamm ist momentan nur sehr knapp erforscht. Als Ausgangsmaterialien wurden in der bisherigen Forschung hauptsächlich Biertreber, Hefeextrakt und andere Grüngutabfälle verarbeitet. Der organische Anteil dieser Edukte ist deutlich höher als bei ausgelaufem Klärschlamm. Die Ergebnisse mit den obengenannten Ausgangsmaterialien sind deshalb nicht direkt vergleichbar wie wenn ausgelaufener Klärschlamm als Ausgangsmaterial eingesetzt wird.

Momentan existiert noch keine Anlage die grössere Mengen Klärschlamm in einem HTC-Reaktor verkohlt.

An der Fachhochschule Wädenswil wurde eine BAFU-finanzierte Machbarkeitsstudie über die hydrothermale Carbonisierung von Klärschlamm durchgeführt. Nach Abschluss dieser Studie wurde ein Projektantrag für eine tiefergehende Analyse über die Anwendung des HTC-Prozesses mit Klärschlamm vom BAFU gutgeheissen. Während den nächsten zwei Jahren wird im Rahmen dieses Forschungsprojekts an verschiedenen Schwerpunkten weitergeforscht. Genauer untersucht wird hierbei die Optimierung der Prozessparameter des HTC-Prozesses, die Charakterisierung und Reinigung des Prozessabwassers. Die ZHAW ist im Rahmen dieses Projekts auch an der Forschung mit Pilotanlagen auf Kläranlagen interessiert.

Die Firma AVA-CO<sub>2</sub> besitzt in Deutschland bereits eine Pilotanlage in der Versuche mit stabilisiertem und unstabilisiertem Klärschlamm aus der ARA Karlsruhe durchgeführt wurden. Leider stehen die Ergebnisse zum Zeitpunkt dieses Berichts noch nicht zur Verfügung.

Mehrere Punkte sind bei der Anwendung des HTC-Prozesses mit Klärschlamm momentan noch ungeklärt, jedoch wird von verschiedenen Stellen an dieser Technologie geforscht. Es ist anzunehmen, dass in zwei bis drei Jahren deutlich mehr über die Anwendung mit Klärschlamm bekannt sein wird. Bis dann wird auch klar sein ob der HTC-Prozess für die Verarbeitung von Klärschlamm eine wirtschaftliche Technologie ist und welcher Anbieter das beste Anlagenkonzept für den HTC-Prozess hat.

### 3.12.8 Kosten Klärschlammertsorgung

Die geschätzten Kosten für die Entsorgung pro Tonne angelieferten entwässerten Klärschlamm (30% TS) betragen 174 CHF/t. Die Firma AVA-CO<sub>2</sub> bietet auch ein Contractor-Modell an, in welchem sie die Anlage selbst aufstellt und auch betreibt. In diesem Fall muss mit der AVA-CO<sub>2</sub> vertraglich die Verwertung des Klärschlamm geregelt werden. Vorteil dieses Modells ist die Risikoverminderung, durch die geringen Investitionskosten.

**Tabelle 9: Kosten Klärschlammertsorgung mit Variante 7 HTC**

		Variante 7
		HTC
Neuinvestitionen	[CHF]	10'569'200
Jährliche Abschreibung	[CHF]	1'032'284
Energiekosten (thermisch)	[CHF]	220'455
Energiekosten (elektrisch)	[CHF]	32'400
Betriebskosten	[CHF]	716'176
Abgabekosten Endverwerter	[CHF]	445'000
Transportkosten	[CHF]	162'000
Jahreskosten	[CHF]	2'608'315
<b>Kosten pro Tonne Klärschlamm (30%)</b>	<b>[CHF]</b>	<b>173.9</b>
Kosten pro Tonne TS Klärschlamm	[CHF]	580

## 4 Szenarienvergleich

### 4.1 Beurteilungskriterien

Die zu beurteilenden Kriterien können in drei Bereiche Umwelt, Ökonomie und Gesellschaft eingeteilt werden. In Absprache mit dem ANU werden sämtliche Kriterien des Gesellschaftsbereichs, wie politische Machbarkeit oder Akzeptanz bei der Bevölkerung in dieser Studie nicht berücksichtigt<sup>32</sup>.

Die Beurteilung wird in dieser ersten Phase in Tabellenform präsentiert. Die beurteilten Kriterien werden nachfolgend kurz vorgestellt.

#### 4.1.1 Investitionskosten

Die Investitionskosten sind jene Kosten die der jeweiligen Variante zum Zeitpunkt der Erstellung, resp. Sanierung der neuen Anlage anfallen. Sie sind in Anhang 1 genau aufgeführt.

#### 4.1.2 Schlammentsorgungskosten pro Tonne Klärschlamm (30%)

Die Entsorgungskosten werden gemäss Kapitel 2.3 ermittelt. Als Vergleich sind in Tabelle 9 die Kosten der Klärschlammensorgung der letzten Jahre dargestellt.

Grund für die laufend abnehmenden Kosten ist der Betrag für die Abschreibung der bestehenden Anlage (TRAC), der kontinuierlich verringert werden konnte und ab 2010 komplett entfällt. Aufgrund des Alters der Anlage werden sich in den nächsten Jahren die Werterhaltungskosten erhöhen.

Ebenfalls deutlich gesenkt haben sich die Kosten für die Abgabe des Klärschlammgranulats im Zementwerk. Seit 2008 die Tonne getrocknetes Klärschlammgranulat für 66 CHF entsorgt werden konnte, verringert sich der Preis jährlich um 4 CHF bis im Jahr 2014 42 CHF Entsorgungsgebühr pro Tonne bezahlt werden müssen. Der Entsorgungsvertrag der Stadt Chur mit der Holcim AG endet Ende 2014, kann aber verlängert werden. Anzunehmen ist, dass sich die Kosten für die Abgabe des getrockneten Schlamms in den Zementwerken sich künftig weiter verringern werden und möglicherweise in absehbarer Zeit sogar komplett wegfallen. Der Entsorgungsvertrag kann gekündigt werden, wenn sich der Marktpreis für Klärschlamm signifikant ändert.

**Tabelle 10: Kosten für die Klärschlammensorgung in der TRAC Chur seit 2006**

	2006	2007	2008	2009	2010
Entsorgungskosten pro Tonne entwässerter Klärschlamm in CHF	179	162	155	145	128

<sup>32</sup> Gemäss Besprechung mit dem ANU vom 2. September 2011

Abbildung 20 zeigt die Entsorgungskosten der untersuchten Varianten auf. Die Differenz zwischen Variante 1 mit 201 CHF/t und den heute anfallenden Kosten aus Tabelle 10 kommt aufgrund der berücksichtigten Abschreibekosten zustande.



Abbildung 18: Entsorgungskosten pro Tonne entwässerten Klärschlamm in den 7 untersuchten Varianten.

#### 4.1.3 Entsorgungssicherheit

Die Beurteilung der Entsorgungssicherheit bezieht sich auf den Entsorgungsweg und die Entsorgung des Endprodukts (z.B. getrockneter Klärschlamm oder Klärschlammkohle). Mögliche Einflüsse sind hier gesetzliche Bestimmungen (P-Rückgewinnung), alternative Verwertungen des entstandenen Produkts oder vertragliche Bestimmungen mit dem Endverwerter des Produkts (z.B. Zementwerk oder ausserkantonale Monoverbrennungen).

#### 4.1.4 Komplexität Verfahren

Die Komplexität bezieht sich auf die Anzahl Verfahrensschritte und die bestehende Erfahrung an den verschiedenen Standorten.

#### 4.1.5 Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz

Die Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanzen wurden von der Firma Quantis in Lausanne durchgeführt. Dessen Report befindet sich im Anhang.

Entscheidend, sowohl bei der Energie- als auch bei der CO<sub>2</sub>-Bilanz ist, ob die Energie die bei der Verbrennung des Endprodukts entsteht, tatsächlich genutzt werden kann. Im Zementwerk findet eine optimale Nutzung statt, indem der getrocknete Klärschlamm direkt Primärenergie substituiert. Bei den Monoverbrennungen von Klärschlamm entsteht deutlich weniger Nutzenergie, die von Variante zu Variante unterschiedlich und nur beschränkt genutzt werden kann. Für die entstehende Wärmeenergie muss ein Abnehmer gefunden werden um diese Energie überhaupt nutzbar zu machen. Bei den eigenständigen Monoverbrennungen im Graubünden könn-

te dies, aufgrund der relativ kleinen Nutzenergie schwierig werden. Für die Bilanzen wurde bei sämtlichen Varianten von einer Nutzung ausgegangen.

Der in der folgenden Beurteilung ausgewiesene Wert der Primärenergiebilanzen ist jeweils die Differenz zwischen der genutzten Energie und der eingesetzten Energie. Die Bilanzen der Varianten 1, 2a, 2b, 2c und 7 weisen dabei positive Bilanzwerte aus, während die Varianten 4a, 4b, 4c, 5a und 5b negative Bilanzwerte zeigen.

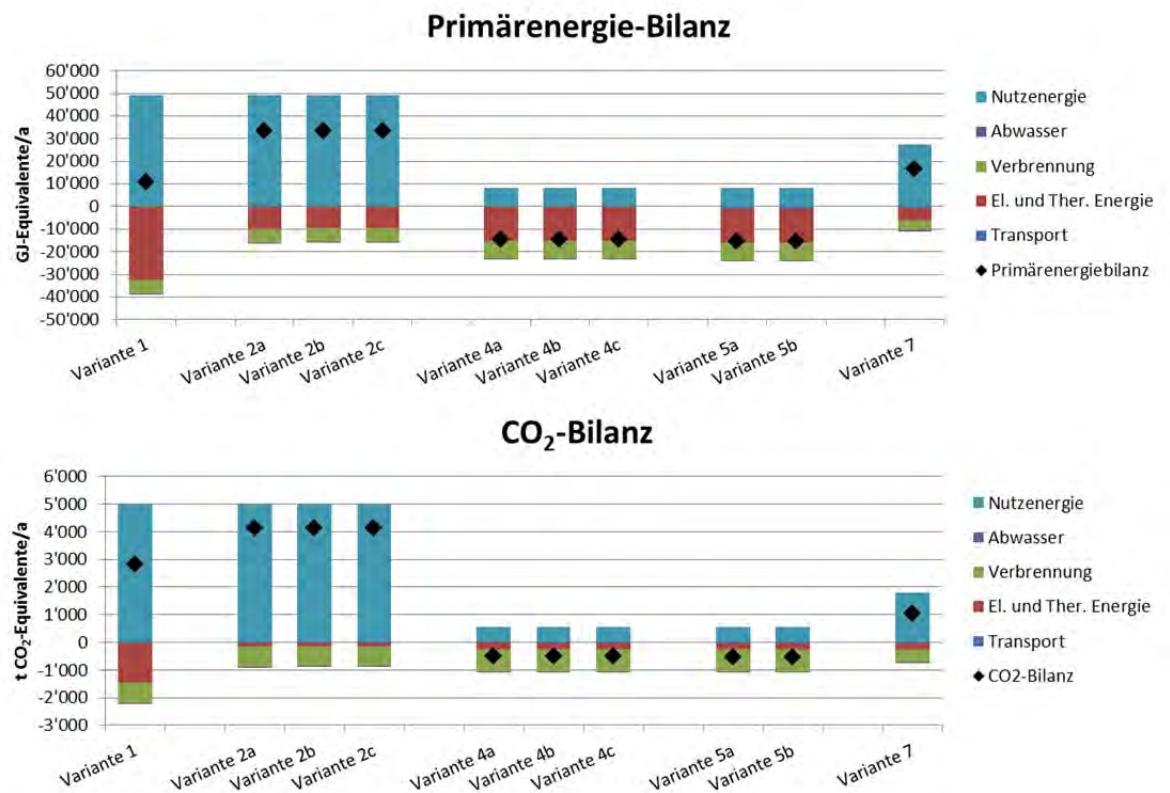


Abbildung 19: Energie und CO<sub>2</sub>-Bilanz der untersuchten Varianten

Der Abbildung 21 ist zu entnehmen, dass beispielsweise der Transport oder die Reinigung des Abwassers nur einen beschränkten Einfluss auf die Bilanzen haben.

#### 4.1.6 Transporte

Die Transporte zeigen die nötigen Transportstrecken und die Art der Transporte (Bahn/LKW) auf.

#### 4.1.7 Phosphorrückgewinnung

Ein Teil der beschriebenen Varianten sehen die Möglichkeit der Phosphorrückgewinnung aus den Verbrennungsrückständen (Asche) vor. Nicht möglich ist die Rückgewinnung, wenn der Klärschlamm im Zementwerk verbrannt und die Asche in den Klinker eingebaut wird.

Die Holcim AG, die mehrere Zementwerke in der Schweiz betreibt und in diesen rund 30-40 % des gesamtschweizerischen Klärschlammverwertet, ist sich dieser Tatsache bewusst und steht der Revision der TVA skeptisch gegenüber.

Der Standpunkt der Holcim ist, dass mit einer Monoverbrennung und der anschliessenden Einlagerung in ein separates Kontingent einer Deponie das Problem nicht gelöst, sondern nur aufgeschoben werde<sup>33</sup>. Tatsächlich sind heute nur wenige wirtschaftliche Verfahren auf dem Markt, die den Phosphor mit einem vernünftigen Aufwand zurückgewinnen können. Möglich wäre auch, dass die P-Rückgewinnung bereits vor der Zugabe in den Drehrohrofen stattfindet, was die Verwertung in der Zementindustrie wieder in den Vordergrund rücken liesse. Über solche Forschungsbemühungen sind zurzeit keine Details bekannt.

#### **4.1.8 Abwasserbehandlung**

Die Abwasserbehandlung kann nur auf der ARA Chur ohne zusätzliche Investitionen erfolgen. Angenommen wird, dass auch das HTC-Prozesswasser aus Variante 7 in der ARA Chur verarbeitet werden kann. An sämtlichen anderen Standorten muss eine Vorbehandlung für das Abwasser erstellt werden. Die Betriebskosten sind für diese deutlich höher im Vergleich zur Behandlung in der ARA Chur.

#### **4.1.9 Technologische Risiken**

Unter den technologischen Risiken wird die Betriebserfahrung mit dem gewählten System der jeweiligen Variante beurteilt. Dazu gehören auch die Anzahl möglicher Anbieter des gewählten Systems.

### **4.2 Beurteilung**

In den nachfolgenden Tabellen werden diese Kriterien qualitativ und quantitativ beurteilt. Die Beurteilung wird in den folgenden Grafiken farblich vorgenommen. D.h. Grün eingefärbte Felder werden als optimal angesehen, während rote Felder Nachteile einer deutlich schlechteren Beurteilung entsprechen. Auf eine Auswertung mit Gewichtung und Rangierung der einzelnen Varianten wird verzichtet.

---

<sup>33</sup> Gemäss Telefonat mit Herrn C. Zipper, Umweltbeauftragter der Holcim vom 21. September 2011

Tabelle 11: Beurteilung der Varianten 1 und 2 (Farblegende: rot entspricht einer negativen Beurteilung, grün einer positiven)

		Variante1		Variante 2			
Parameter		Trocknung auf der ARA Chur, Verbrennung im Zementwerk		2a): Trocknung in Untervaz, Verbrennung im Zementwerk		2b): Trocknung in Trimmis, Verbrennung im Zementwerk	
Schlammentsorgungskosten		201 CHF/t KS		241 CHF/tKS		207 CHF/tKS	
Investitionskosten/Annuität		6'648 kCHF	1'076 kCHF/a	15'023 kCHF	1'190 kCHF/a	15'023 kCHF	1'190 kCHF/a
Entsorgungssicherheit		Mehrere Zementwerke in der CH Volumenreduktion verbilligt Kosten für Transporte Alternative Verbrennung evtl. möglich Unklarheiten nach TVA-Revision		Mehrere Zementwerke in der CH Volumenreduktion verbilligt Kosten für Transporte Alternative Verbrennung evtl. möglich Unklarheiten nach TVA-Revision		Mehrere Zementwerke in der CH Volumenreduktion verbilligt Kosten für Transporte Alternative Verbrennung evtl. möglich Unklarheiten nach TVA-Revision	
Entsorgung Endverwerter		250 kCHF (50CHF/t Granulat)		250 kCHF (50 CHF/t Granulat)		250 kCHF (50 CHF/t Granulat)	
Komplexität Verfahren		Zweistufiges Verfahren mit Verarbeitung an zwei Standorten, Erfahrung besteht lokal		Zweistufiges Verfahren mit Verarbeitung am selben Standort, Erfahrung ist am Standort nicht vorhanden		Zweistufiges Verfahren mit Verarbeitung an zwei Standorten, Erfahrung ist am Standort nicht vorhanden	
Energieeinsatz	Thermisch	9.24 GWh	640 kCHF	9.24 GWh	935 kCHF	9.24 GWh	374 kCHF
	Elektrisch	1 GWh	175 kCHF	1 GWh	175 kCHF	1 GWh	175 kCHF
Bilanzen	CO <sub>2</sub> -Bilanz	+2'804 t CO <sub>2</sub> -Equivalente		+4'115 t CO <sub>2</sub> -Equivalente		+4'113 t CO <sub>2</sub> -Equivalente	
	Energiebilanz	+10'707 GJ Primärenergie-Equivalente		+33'367 GJ Primärenergie-Equivalente		+33'334 GJ Primärenergie-Equivalente	
Transporte		50'000 tkm mit LKW (Chur-Untervaz)		50'000 tkm mit LKW(Chur –Untervaz)		50'000 tkm mit LKW (Chur –Trimmis) 10'000 tkm mit LKW (Trimmis-Untervaz)	
Kosten Transporte		87 kCHF		96 kCHF		146 kCHF	
P-Rückgewinnung		nicht möglich		nicht möglich		nicht möglich	
Technologische Risiken		Ausgereifte Technologie, mehrfach ausgeführt		Ausgereifte Technologie, mehrfach ausgeführt		Ausgereifte Technologie, mehrfach ausgeführt	
Brüdenbehandlung		Direkt auf ARA Chur		Neue Brüdenbehandlung nötig		Neue Brüdenbehandlung nötig	
Betriebskosten Brüden		20 kCHF		200 kCHF		200 kCHF	

Tabelle 12: Beurteilung der Varianten 3 und 4 (Farblegende: rot entspricht einer negativen Beurteilung, grün einer positiven)

		Variante 3	Variante 4				
Parameter		Co-Verbrennung in der KVA Gevag	4a): Monoverbrennung in Chur		4b): Monoverbrennung in Trimmis		
Schlammentsorgungskosten		Variante 3 wird nicht beurteilt, da die KVA GEVAG nicht genügend Kapazität aufweist.	176 CHF/tKS		185 CHF/tKS		
Investitionskosten/Annuität			13'208 kCHF	1'167 kCHF	13'171 kCHF	1'028 kCHF	
Entsorgungssicherheit			Eigenständige Anlage garantiert hohe Entsorgungssicherheit Notfalls Abgabe an andere Monoverbrennungen		Eigenständige Anlage garantiert hohe Entsorgungssicherheit Notfalls Abgabe an andere Monoverbrennungen		
Kosten Entsorgung			405 kCHF (300 CHF/m <sup>3</sup> Asche)		405 kCHF (300 CHF/m <sup>3</sup> Asche)		
Komplexität Verfahren			Mit der Teiltrocknung und der Monoverbrennung entsteht ein kompaktes zweistufiges Verfahren. Nur ein Standort.		Mit der Teiltrocknung und der Monoverbrennung entsteht ein kompaktes zweistufiges Verfahren. Nur ein Standort.		
Energieeinsatz	Thermisch		Keine	0 CHF	Keine	0 CHF	
	Elektrisch		1.6 GWh	256 kCHF	1.6 GWh	256 kCHF	
Bilanzen	CO <sub>2</sub> -Bilanz		-508 t CO <sub>2</sub> -Equivalente		-519 t CO <sub>2</sub> -Equivalente		
	Energiebilanz		-14'545 GJ Primärenergie-Equivalente		-14'731 GJ Primärenergie-Equivalente		
Transporte			Keine Transporte		50'000 tkm mit LKW (Chur – Domat/Ems)		
Kosten Transporte			0 CHF		96 kCHF		
P-Rückgewinnung			P-Rückgewinnung zu einem späteren Zeitpunkt möglich.		P-Rückgewinnung zu einem späteren Zeitpunkt möglich.		
Technologische Risiken			Verfahren ist gut bekannt, schweizweit noch nicht sehr viele Anwender.		Verfahren ist gut bekannt, schweizweit noch nicht sehr viele Anwender.		
Brüdenbehandlung			Direkt auf ARA Chur		Neue Brüdenbehandlung nötig		
Betriebskosten Brüden			20 kCHF		200 kCHF		

Tabelle 13: Beurteilung der Varianten 5, 6 und 7 (Farblegende: rot entspricht einer negativen Beurteilung, grün einer positiven)

		Variante 5				Variante 6	Variante 7	
Parameter		Export ausserkantonal nach Bazenheid		Export ausserkantonal nach Zürich Werdhölzli		Export Ausland	Anbietervariante: HTC-Verfahren	
Schlammentsorgungskosten		143 CHF/t KS		164 CHF/t KS		174 CHF/t KS		
Investitionskosten/Annuität		1'004 kCHF	189 kCHF/a	1'004 kCHF	178 kCHF/a	10'569 kCHF 1'032 kCHF/a		
Entsorgungssicherheit		Die Entsorgungssicherheit muss vertraglich mit den Abnehmern geregelt werden.		Die Entsorgungssicherheit muss vertraglich mit den Abnehmern geregelt werden.		Momentan existiert keine ähnliche Anlage. Die Produkteigenschaften (Handling) ist unklar. Alternative Abnehmer müssen erst überzeugt werden.		
Kosten Entsorgung		1'350 kCHF/a (90 CHF/t eKS)		1'650 kCHF/a (110 CHF/t eKS)		405 kCHF (90 CHF/t KS-Kohle)		
Komplexität Verfahren		Die Transporte müssen koordiniert werden. Nach der Abgabe ist der ausserkantionale Betreiber verantwortlich.		Die Transporte müssen koordiniert werden. Nach der Abgabe ist der ausserkantionale Betreiber verantwortlich.		Das Multibatchverfahren der AVA-CO2 besteht aus 6 Reaktoren und ist entsprechend komplex. Keine Vollmassstabs- Erfahrung vorhanden.		
Energieeinsatz	Thermisch	Keine	Keine	Keine	Keine	3.6 GWh 220 kCHF		
	Elektrisch	Keine	keine	Keine	keine	0.2 GWh 32 kCHF		
Bilanzen	CO <sub>2</sub> -Bilanz	-530 t CO <sub>2</sub> -Equivalente		-533 t CO <sub>2</sub> -Equivalente		+1'055 t CO <sub>2</sub> -Equivalente		
	Energiebilanz	-15'414 GJ Primärenergie-Equivalente		-15'539 GJ Primärenergie-Equivalente		+16'488 GJ Primärenergie-Equivalente		
Transporte		1'575'000 tkm per Bahn(Chur – Bazenheid)		1'800'000 tkm per Bahn (Chur – Zürich)		472'500 tkm per Bahn (Chur-Bazenheid)		
Kosten Transporte		516 kCHF		531 kCHF		162 kCHF		
P-Rückgewinnung		P-Rückgewinnung zu einem späteren Zeitpunkt möglich.		P-Rückgewinnung zu einem späteren Zeitpunkt möglich.		P-Rückgewinnung möglich bei Verbrennung in Monoverbrennung		
Technologische Risiken		Externer Abnehmer		Externer Abnehmer		Es handelt sich um ein neues Verfahren für die Klärschlammverwertung. Keine Erfahrung vorhanden		
Brüdenbehandlung Betriebskosten Brüden	Durch den Betreiber		Durch den Betreiber		Direkt auf ARA Chur Brüdenzusammensetzung problematisch (Phenole)		30 kCHF	
	Im Entsorgungspreis inbegriffen		Im Entsorgungspreis inbegriffen					

### 4.3 Weiteres Vorgehen

Aufgrund der vorliegenden Studie hat das ANU entschieden, dass nur die folgenden 3 Varianten für die Klärschlammverwertung im Kanton Graubünden zukünftig in Betracht gezogen werden:

- Variante 1 mit der Trocknung in Chur und der Verbrennung im Zementwerk
- Variante 5 a) mit dem Export des Klärschlammes nach Bazenheid (oder Zürich)
- Variante 7 mit der hydrothermalen Carbonisierung des Klärschlammes

In einer zweiten Phase werden die Varianten 5 a) und 7 genauer untersucht. Für Variante 1 bedarf es keiner weiteren Untersuchung. Die Stadt Chur als Betreiberin der Klärschlamm-trocknung ist für den Betrieb zuständig und kann die zukünftigen Aufwände am besten abschätzen.

Weitere Abklärungen zur Exportvariante betreffen genauere Abklärungen für den Transport mit der Bahn, Logistik und die Nutzung der Energie am Standort Bazenheid. Zur hydro-thermalen Carbonisierung sind Systeme zur Weiterverarbeitung der Klärschlammkohle von Interesse, sowie die Betrachtung von Systemen anderer Hersteller (beispielsweise Terra-Nova).

Bereits nach Abschluss der ersten Phase kann aber die Aussage gemacht werden, dass zum heutigen Zeitpunkt kein definitiver Verwertungsweg beschlossen werden kann.

Momentan ist unklar, wann und in welcher Form die TVA bezüglich der P-Rückgewinnung angepasst wird. Der heutige Weg der Klärschlammensorgung steht und fällt mit der Revision der TVA.

Bei der hydrothermalen Carbonisierung sind momentan nicht genug gesicherte Daten vorhanden, die einen risikolosen Einstieg in diese Technologie zulassen würden.

Der heutige Entsorgungsweg mit der TRAC und der Entsorgung im Zementwerk Untervaz ist kostengünstig und kann sicher noch während den nächsten 5-10 Jahren begangen werden. Aus diesen Gründen kann der Entscheid, welcher Weg in der Klärschlammensorgung in Graubünden gegangen werden soll, zu einem späteren Zeitpunkt, aber spätestens in ungefähr 5 Jahren getroffen werden. Zwischenzeitlich können die realisierten Systeme auf dem Markt beobachtet werden.

Bern, 4. Juni 2012

Verfasser: David Salzgeber, Bernhard Wiedmer

HOLINGER AG

## **Anhang 1**

### **Kostenberechnungen**

Variante 1.0 Trocknung auf der ARA Chur, Verbrennung im Zementwerk					Relevante Berechnungen		
	Abschreibebedauer Kapitalzins: 3.5%	Einheit	Kosten	Jahreskosten Fr.	Berechnungen	Einheit	Zahl
<b>Neuinvestitionen</b>					Klärschlamm lieferungen	[t]	15'000
Erneuerung EMSRT & Sanierung bestehender Anlagen		CHF	4'706'950	40% der Bestehenden Werte (inkl. Indexierung 25%)	Entwässerungsgrad	[%]	30
Heutiger Wert nach Sanierung:	Gebäude Trocknung	30 Jahre	CHF 2'967'500	161'347 Aufindexiert (25%) aus Bericht Entstehung TRAC Chur 1997	organischer Anteil	[%]	55
	Schlammannahme	15 Jahre	CHF 1'528'750	132'734 Aufindexiert (25%) aus Bericht Entstehung TRAC Chur 1997	Fracht Trockensubstanz	[t]	4500
	Erschliessung	30 Jahre	CHF 562'500	30'584 Aufindexiert (25%) aus Bericht Entstehung TRAC Chur 1997	TS-Gehalt nach Trocknung	%	90
	Energieerzeugung	15 Jahre	CHF 1'708'625	148'351 aus Bericht Entstehung TRAC Chur 1997 abzüglich Trockner 4Mio	Granulat nach trocknung	t	5'000
	Wirbelschichttrockner	15 Jahre	CHF 5'000'000	434'125 Gemäss Bericht Entstehung TRAC 1997, abzgl. Energie	Wasserverdampfung	t	10'000
Nebenkosten	20% der Kosten	15 Jahre	CHF 1'941'390	168'561 UVG, Honorar, Nebenkosten			
<b>Total Investitionen</b>		CHF	<b>6'648'340</b>		th. Energie für Wasserverdampfung	kWh/tH2O	850
<b>Energiekosten</b>					Stromverbr. Für Trocknung	kWh/m3H2O	100
Thermisch	Faulgas	CHF/a	377'686	Gemäss Angaben Hr. Feurer Telefonat 20.9.2011	Wirkungsgrad Trocknung	%	90.909
	Erdgas	CHF/a	260'661	638'347 Gemäss Angaben Hr. Feurer Telefonat 20.9.2011	th. Energie für H2O-Verd.	kWh	9'350'009
Elektrisch	Strom	CHF/a	175'000	175'000 Gemäss Angaben Hr. Feurer Telefonat 20.9.2011	elektrische Energie für H2O-Verd.	kWh	1'000'000
<b>Betriebskosten</b>					Strompreis	CHF/kWh	0.16
Personal & Verwaltung		CHF/a	322'100	aus: TRAC 2010	Kosten Strom	CHF	160'000
Unterhaltskosten	Reparaturen Masch. Und Mobi., Abfall	CHF/a	376'000	aus: TRAC 2010 (ca. 3% des Investitionswerts von 1997)	Erdgasverbrauch 2010	Nm3	330636
Wasserkosten	Kühlwasser	CHF/a	77'000	775'100 Gemäss Angaben Hr. Feurer Telefonat 20.9.2011	Biogasverbrauch 2010	Nm3	728772
<b>Abgabekosten Endverwerter</b>					Energieinhalt Erdgas	kWh/Nm3	11.409
Zementwerk Holcim	50.-/t Granulat	CHF/a	250'000	5000 t Granulat (inkl. 10 % Wasser)	Energieinhalt Biogas	kWh/Nm3	7.5
Entsorgung Brüden		CHF/a	20'000	270'000 Pauschal aus JB TRAC 2010 (aufgerundet)	Kosten th. Energie aus Gasgemisch	Rp/kWh	6.91
<b>Transportkosten</b>					Kosten Brauch- Frischwasser	Fr/m3	0.9
Transport Chur-Untervaz	250 Fahrten	CHF/a	87'500	87'500 pro Fahrt: 350 CHF			
<b>Total Jahreskosten</b>		CHF/a	<b>3'021'650</b>		Transportkilometer Chur -Untervaz	km	10
Total Jahreskosten		CHF/a	<b>3'021'650</b>		Kosten pro Transport	CHF/Tran.	350
Kosten pro Tonne Klärschlamm (30%)		CHF/t KS	201.44		Anzahl Transporte	Anz	250
Kosten pro Tonne TS Klärschlamm		CHF/t TS	671.48				

**Variante 2.a****Trocknung in Untervaz, Verbrennung im Zementwerk**

		Abschreibedauer Kapitalzins: 3.5%	Einheit	Kosten CHF/a	Jahreskosten			
<b>Neuinvestitionen</b>								
Neue Trocknung	Wirbelschichtrockner	15 Jahre	CHF	5'000'000	434'125	Gemäss Kosten TRAC 1997 / Offerte Picatech Huber	Berechnungen	Einheit
	Schlammannahme	15 Jahre	CHF	1'529'875	132'832	Kosten aus TRAC-Erstellung (inkl. 25% Indexierung)	Klärschlamm lieferungen	[t]
	Gebäude	30 Jahre	CHF	2'967'750	161'361	Kosten aus TRAC-Erstellung (inkl. 25% Indexierung)	Entwässerungsgrad	[%]
	Erschliessung	30 Jahre	CHF	562'500	30'584	Kosten aus TRAC-Erstellung (inkl. 25% Indexierung)	organischer Anteil	[%]
	Energieerzeugung	15 Jahre	CHF	1'708'625	148'351	aus Bericht Entstehung TRAC Chur 1997 abzüglich Trockner 4Mio	Fracht Trockensubstanz	[t]
Neue Brüdenbehandlung		15 Jahre	CHF	750'000	65'119	Pauschale Schätzung	TS-Gehalt nach Trocknung	%
Nebenkosten	20% der Kosten	15 Jahre	CHF	2'503'750	217'388	UVG, Honorar, Nebenkosten	Granulat nach trocknung	t
<b>Total Investitionen</b>				<b>CHF 15'022'500</b>			Wasserverdampfung	t
<b>Energiekosten</b>								
Energiekosten	thermische Energie		CHF/a	935'001		Kosten von 10Rp/kWh gemäss Tel Hr. Floca vom 20.9.2011	th. Energie für Wasserverdampfung	kWh/tH2O
	Stromkosten		CHF/a	175'000	1'110'001	Gemäss Angaben Hr. Feurer Telefonat 20.9.2011	Stromverbr. Für Trocknung	kWh/m3H2O
<b>Betriebskosten</b>								
Personal & Verwaltung			CHF/a	322'100		aus: TRAC 2010	Wirkungsgrad Trocknung	%
Unterhaltskosten	Reparaturen Masch. Und Mobi., Abfall		CHF/a	376'000		aus: TRAC 2010 (ca. 3% des Investitionswerts von 1997)	th. Energie für H2O-Verd.	kWh
Wasserkosten	Kühlwasser		CHF/a	77'000	775'100	Gemäss Angaben Hr. Feurer Telefonat 20.9.2011	elektrische Energie für H2O-Verd.	kWh
<b>Abgabekosten Endverwerter</b>								
Zementwerk Holcim	50.-/t Granulat		CHF/a	250'000		Granulat: 4500 t TS à90%:	Kosten thermische Energie	Rp/kWh
Entsorgung Brüden	Betriebskosten		CHF/a	100'000		10.-/m3 Brüde	Kosten Brauch- Frischwasser	Fr/m3
	Personal (0.5 Stellen)		CHF/a	50'000		Pauschale		
	Unterhaltskosten		CHF/a	50'000	450'000	Pauschale	Transportkilometer Chur -Untervaz	km
<b>Transportkosten</b>								
Schlamm Chur - Untervaz	275 Fahrten		CHF/a	96'250		pro Fahrt 350 CHF	Kosten pro Transport	CHF/Tran.
Granulattransport	Keiner		CHF/a	96'250			Anzahl Transporte	Anz
<b>Total Jahreskosten</b>				<b>CHF/a</b>	<b>3'621'111</b>			
Kosten pro Tonne Klärschlamm (30%)			<b>CHF/t KS</b>		<b>241.41</b>			
Kosten pro Tonne TS Klärschlamm			<b>CHF/t TS</b>		<b>804.69</b>			

**Variante 2.b**
**Trocknung in Trimmis, Verbrennung im Zementwerk**

		Abschreibezeitraum	Einheit	Kosten	Jahreskosten				
					CHF/a				
<b>Neuinvestitionen</b>									
Neue Trocknung	Wirbelschichtrockner	15 Jahre	CHF	5'000'000	434'125	Gemäss Kosten TRAC 1997 / Offerte Picatech Huber			
	Schlammannahme	15 Jahre	CHF	1'529'875	132'832	Kosten aus TRAC-Erstellung (inkl. 25% Indexierung)			
	Gebäude	30 Jahre	CHF	2'967'750	161'361	Kosten aus TRAC-Erstellung (inkl. 25% Indexierung)			
	Erschliessung	30 Jahre	CHF	562'500	30'584	Kosten aus TRAC-Erstellung (inkl. 25% Indexierung)			
	Energieerzeugung	15 Jahre	CHF	1'708'625	148'351	aus Bericht Entstehung TRAC Chur 1997 abzüglich Trockner 4Mio			
Neue Brüdenbehandlung		15 Jahre	CHF	750'000	65'119	Pauschale Schätzung			
Nebenkosten	20% der Kosten	15 Jahre	CHF	2'503'750	217'388	UVG, Honorar, Nebenkosten			
<b>Total Investitionen</b>			<b>CHF</b>	<b>15'022'500</b>					
<b>Energiekosten</b>									
Energiekosten	thermische Energie		CHF/a	374'000		Kosten von 4Rp/kWh gemäss E-Mail F. Boone vom 26.9.2011			
	Stromkosten		CHF/a	175'000	549'000	Gemäss Angaben Hr. Feurer Telefonat 20.9.2011			
<b>Betriebskosten</b>									
Personal & Verwaltung			CHF/a	322'100		aus: TRAC 2010			
Unterhaltskosten	Reparaturen Masch. Und Mobi., Abfall		CHF/a	376'000		aus: TRAC 2010 (ca. 3% des Investitionswerts von 1997)			
Wasserkosten	Kühlwasser		CHF/a	77'000	775'100	Gemäss Angaben Hr. Feurer Telefonat 20.9.2011			
<b>Abgabekosten Endverwerter</b>									
Zementwerk Holcim	50.-/t Granulat		CHF/a	250'000		Granulat: 4500 t TS à90%:			
Entsorgung Brüden	Betriebskosten		CHF/a	100'000		10.-/m <sup>3</sup> Brüde			
	Personal (0.5 Stellen)		CHF/a	50'000		Pauschale			
	Unterhaltskosten		CHF/a	50'000	450'000	Pauschale			
<b>Transportkosten</b>									
Schlamm Chur - Untervaz	275 Fahrten		CHF/a	96'250		pro Fahrt 350 CHF			
Granulat Trimmis Untervaz	250 Fahrten		CHF/a	50'000	146'250	pro Fahrt: 200 CHF			
<b>Total Jahreskosten</b>			<b>CHF/a</b>	<b>3'110'110</b>					
Kosten pro Tonne Klärschlamm (30%)			<b>CHF/t KS</b>	<b>207.34</b>					
Kosten pro Tonne TS Klärschlamm			<b>CHF/t TS</b>	<b>691.14</b>					
<b>Relevante Berechnungen</b>									
Berechnungen						<b>Einheit</b>	<b>Zahl</b>		
Klärschlammlieferungen						[t]	15'000		
Entwässerungsgrad						[%]	30		
organischer Anteil						[%]	55		
Fracht Trockensubstanz						[t]	4500		
TS-Gehalt nach Trocknung						%	90		
Granulat nach trocknung						t	5'000		
Wasserverdampfung						t	10'000		

**Variante 2.c**
**Trocknung in Domat/Ems, Verbrennung im Zementwerk**

		Abschreibezeitdauer Kapitalzins: 3.5%	Einheit	Kosten	Jahreskosten CHF/a			
<b>Neuinvestitionen</b>								
Neue Trocknung	Wirbelschichttrockner	15 Jahre	CHF	5'000'000	434'125	Gemäss Kosten TRAC 1997 / Offerte Picatech Huber		
	Schlammannahme	15 Jahre	CHF	1'529'875	132'832	Kosten aus TRAC-Erstellung (inkl. 25% Indexierung)		
	Gebäude	30 Jahre	CHF	2'967'750	161'361	Kosten aus TRAC-Erstellung (inkl. 25% Indexierung)		
	Erschliessung	30 Jahre	CHF	562'500	30'584	Kosten aus TRAC-Erstellung (inkl. 25% Indexierung)		
	Energieerzeugung	15 Jahre	CHF	1'708'625	148'351	bestehende Infrastruktur, deshalb nicht in den Neuinvestitionen enthalten. In den Jahreskosten aber mit dem gleichen Betrag abgeschrieben wie in Varianten 2a und 2b		
Neue Brüdenbehandlung					65'119	Pauschale Schätzung		
Nebenkosten	20% der Kosten	15 Jahre	CHF	750'000	217'388	UVG, Honorar, Nebenkosten		
<b>Total Investitionen</b>						<b>CHF 13'313'875</b>		
<b>Energiekosten</b>								
Energiekosten	thermische Energie		CHF/a	420'750		Kosten von 4.5Rp/kWh Mittelinung von Herr Gobbo (Axpo) 26.9.2011	th. Energie für Wasserverdampfung	KWh/H2O 850
	Stromkosten		CHF/a	175'000	595'750	Gemäss Angaben Hr. Feurer Telefonat 20.9.2011	Stromverbr. Für Trocknung	KWh/m3H2O 100
<b>Betriebskosten</b>								
Personal & Verwaltung			CHF/a	322'100		aus: TRAC 2010	Wirkungsgrad Trocknung	% 90.909
Unterhaltskosten	Reparaturen Masch. Und Mobi., Abfall		CHF/a	376'000		aus: TRAC 2010 (ca. 3% des Investitionswerts von 1997)	th. Energie für H2O-Verd.	kWh 9'350'009
Wasserkosten	Kühlwasser		CHF/a	77'000	775'100	Gemäss Angaben Hr. Feurer Telefonat 20.9.2011	elektrische Energie für H2O-Verd.	kWh 1'000'000
<b>Abgabekosten Endverwerter</b>								
Zementwerk Holcim	50.-/t Granulat		CHF/a	250'000		Granulat: 4500 t TS à90%:	Kosten thermische Energie	Rp/kWh 4.5
Entsorgung Brüden	Betriebskosten		CHF/a	100'000		10.-/m3 Brüde	Kosten Brauch- Frischwasser	Fr/m3 0.9
	Personal (0.5 Stellen)		CHF/a	50'000		Pauschale	Transportkilometer Chur - Domat/Ems	km 10
	Unterhaltskosten		CHF/a	50'000	450'000	Pauschale	Kosten pro Transport	CHF/Tran. 350
<b>Transportkosten</b>								
Schlamm Chur - Domat/Ems	275 Fahrten		CHF/a	96'250		pro Fahrt 350 CHF	Anzahl Transporte	Anz. 275
Granulat Domat/Ems-Untervaz	250 Fahrten		CHF/a	95'000	191'250	pro Fahrt 380 CHF	Fahrtkilometer Domat/Ems - Untervaz	km 20
<b>Total Jahreskosten</b>								
Total Jahreskosten			<b>CHF/a</b>		<b>3'201'860</b>		Kosten pro Transport	CHF/Tran. 380
Kosten pro Tonne Klärschlamm (30%)			<b>CHF/t KS</b>		<b>213.46</b>		Anzahl Fahrten	Anz. 250
Kosten pro Tonne TS Klärschlamm			<b>CHF/t TS</b>		<b>711.52</b>			
<b>Relevante Berechnungen</b>								
Berechnungen							<b>Einheit</b>	<b>Zahl</b>
Klärschlamm lieferungen							[t]	15'000
Entwässerungsgrad							[%]	30
organischer Anteil							[%]	55
Fracht Trockensubstanz							[t]	4500
TS-Gehalt nach Trocknung							%	90
Granulat nach trocknung							t	5'000
Wasserdampfung							t	10'000

Variante 4.a		Eigenständige Monoverbrennung in Chur					Relevante Berechnungen		
		Abschreibedauer Kapitalzins: 3.5%	Einheit	Kosten	Jahreskosten CHF/a			Einheit	Zahl
<b>Neuinvestitionen</b>									
Rückbau bestehende Trocknung			CHF	300'000		Schätzung	Berechnungen		
Neue Monoverbrennung	Wirbelschichtverbrennung inklusive Teiltrocknung	15 Jahre	CHF	7'500'000	651'188	Gemäss Hersteller Kalogeo GmbH (Hr. Schild)	Klärschlamm lieferungen	[t]	15'000
Erweiterung Gebäude	0.5 Gebäudekosten Trocknung		CHF	1'483'750		Halbe Kosten der Gebäudeerstellung Trocknung inkl. Indexierung 25%	Entwässerungsgrad	[%]	30
Erneuerung EMSRT & Sanierung bestehender Anlagen			CHF	2'023'500		40% der Bestehenden Werte (inkl. Indexierung 25%)	organischer Anteil	[%]	55
Heutiger Wert nach Sanierung	Gebäude Trocknung	30 Jahre	CHF	2'967'500.0	161'347	Aufindexiert aus Bericht Entstehung TRAC Chur 1997	Frach Trockensubstanz	[t]	4500
	Schlammannahme	15 Jahre	CHF	1'528'750.0	132'734	Aufindexiert aus Bericht Entstehung TRAC Chur 1997	TS-Gehalt nach Teiltrocknung	%	45
	Erschliessung	30 Jahre	CHF	562'500.0	30'584	Aufindexiert aus Bericht Entstehung TRAC Chur 1997	Granulat nach trocknung	t	10'000
Nebenkosten	20% der Kosten	15 Jahre	CHF	2'201'450	191'141	UVG, Honorar, Nebenkosten	Wasserverdampfung	t	5'000
<b>Total Investitionen</b>			<b>CHF</b>	<b>13'208'700</b>			th. Energie für Wasserverdampfung	kWh/th2O	850
<b>Energiekosten</b>									
Thermisch	keine		CHF/a	-			Betriebszeit Monoverbrennung	h/a	8'000
Elektrisch	Strom		CHF/a	256'000	256'000	Gemäss Kalogeo (Hr. Schild) Leistung 200 kW, Betriebszeit 8000 h/a	Leistung Monoverbrennung	kW	200
<b>Betriebskosten</b>									
Personal & Verwaltung			CHF/a	322'100		aus: TRAC 2010	Strompreis	CHF/kWh	0.16
Unterhaltskosten	Reparaturen Masch. Und Mobi., Abfall		CHF/a	396'261		3% der Gesamtinvestitionskosten	Kosten Strom	CHF	256'000
Wasserkosten	Kühlwasser		CHF/a	77'000	795'361	identisch TRAC (für Trockengutkühlung, Kondensation)			
<b>Abgabekosten Endverwerter</b>									
Kosten Inertdeponie	300 CHF/m3 Asche		CHF/a	405'000		inkl. Transport 2025 mineralischer Anteil mit Dicht 1.5	Aschemenge	t/a	2025
Entsorgung Brüden	Betriebskosten		CHF/a	20'000	425'000	Pauschal ab TRAC JB 2010	Dichte Asche	t/m3	1.5
<b>Transportkosten</b>									
Keine			CHF/a	-		Bereits in den Deponiekosten enthalten	Aschenvolumen	m3	1350
<b>Total Jahreskosten</b>					<b>2'643'355</b>		Kosten Inertdeponie inkl. Transport	CHF/m3	300
Kosten pro Tonne Klärschlamm (30%)					<b>176.22 CHF/t KS</b>				
Kosten pro Tonne TS Klärschlamm					<b>587.41 CHF/t TS</b>				

**Variante 4.b****Eigenständige Monoverbrennung in Trimmis**

		Abschreibedauer Kapitalzins: 3.5%	Einheit	Kosten Fr.	Jahreskosten CHF/a	
<b>Neuinvestitionen</b>						
Schlammannahme		15 Jahre	CHF	1'528'750	132'734	Kosten aus TRAC-Erstellung (inkl. 25% Indexierung)
Gebäudeerstellung		30 Jahre	CHF	2'967'500	161'347	Kosten aus TRAC-Erstellung (inkl. 25% Indexierung)
Erschliessung		30 Jahre	CHF	562'500	30'584	Kosten aus TRAC-Erstellung (inkl. 25% Indexierung)
Neue Monoverbrennung	Drehrohrverbrennungssofen inklusive Teiltrocknung	15 Jahre	CHF	5'500'000	477'538	Jakob Stiefel AG, ab 5 Mio für 3000 tTS, nach Vorbild UTO Uvrier
Einbau in die bestehende Rauchgasreinigung		15 Jahre	CHF	500'000	43'413	Pauschalschätzung
Nebenkosten	20% der Kosten	15 Jahre	CHF	2'111'750	183'353	UVG, Honorar, Nebenkosten
<b>Total Investitionen</b>			<b>CHF</b>	<b>13'170'500</b>		
<b>Energiekosten</b>						
Thermisch	keine Strom		CHF/a	-		
Elektrisch			CHF/a	256'000	256'000	Dito Variante 4a: Leistung 200 kW, Betriebszeit 8000 h/a
<b>Betriebskosten</b>						
Personal & Verwaltung			CHF/a	322'100		aus: TRAC 2010
Unterhaltskosten	Reparaturen Masch. Und Mobi., Abfall		CHF/a	395'115		3% der Gesamtinvestitionskosten
Wasserkosten	Kühlwasser		CHF/a	77'000	794'215	identisch TRAC (für Trockengutkühlung, Kondensation)
<b>Abgabekosten Endverwerter</b>						
Kosten Inertdeponie	300 CHF/m3 Asche		CHF/a	405'000		inkl. Transport/ ab KESO bericht, 2025t mineralischer Anteil mit Dicht 1.5
Entsorgung Brüden	Betriebskosten		CHF/a	100'000		dito Variante 2
	Personal		CHF/a	50'000		dito Variante 2
	Unterhaltskosten		CHF/a	50'000	605'000	dito Variante 2
<b>Transportkosten</b>						
Schlamm Chur - Untervaz	275 Fahrten		CHF/a	96'250	96'250	pro Fahrt 350 CHF
<b>Total Jahreskosten</b>				<b>2'780'433</b>		

Kosten pro Tonne Klärschlamm (30%)  
Kosten pro Tonne TS Klärschlamm

**185.36 Fr./t KS**  
**617.87 Fr./t TS**

**Relevante Berechnungen**

Berechnungen	Einheit	Zahl
Klärschlammlieferungen	[t]	15'000
Entwässerungsgrad	[%]	30
organischer Anteil	[%]	55
Fracht Trockensubstanz	[t]	4500
TS-Gehalt nach Teiltrocknung	%	45
Granulat nach trocknung	t	10'000
Wasserverdampfung	t	5'000
th. Energie für Wasserverdampfung	kWh/tH2O	850
Betriebszeit Monoverbrennung	h/a	8'000
Leistung Monoverbrennung	kW	200
Strompreis	CHF/kWh	0.16
Kosten Strom	CHF	256'000
Aschemenge	t/a	2025
Dichte Asche	t/m3	1.5
Aschenvolumen	m3	1350
Kosten Inertdeponie inkl. Transport	CHF/m3	300
Transportkilometer Chur -Untervaz	km	10
Kosten pro Transport	CHF/Tran.	350
Anzahl Transporte	Anz	275

**Variante 4.c**
**Eigenständige Monoverbrennung in Domat/Ems**

		Abschrebedauer Kapitalzins: 3.5%	Einheit	Kosten Fr.	Jahreskosten CHF/a	
<b>Neuinvestitionen</b>						
Schlammannahme		15 Jahre	CHF	1'528'750	132'734	Kosten aus TRAC-Erstellung (inkl. 25% Indexierung)
Gebäudeerstellung		30 Jahre	CHF	2'967'500	161'347	Kosten aus TRAC-Erstellung (inkl. 25% Indexierung)
Erschliessung		30 Jahre	CHF	562'500	30'584	Kosten aus TRAC-Erstellung (inkl. 25% Indexierung)
Brüdenbehandlung		15 Jahre	CHF	750'000	65'119	Pauschalschätzung
Neue Monoverbrennung	Wirbelschichtverbrennung inklusive Teiltrocknung	15 Jahre	CHF	7'500'000	651'188	Gemäss Hersteller Kalogeo GmbH (Hr. Schild)
Nebenkosten	20% der Kosten	15 Jahre	CHF	2'661'750	231'107	UVG, Honorar, Nebenkosten
<b>Total Investitionen</b>				<b>CHF 15'970'500</b>		
<b>Energiekosten</b>						
Thermisch	keine Strom		CHF/a	-		
Elektrisch			CHF/a	256'000	256'000	Gemäss Kalogeo (Hr. Schild) Leistung 200 kW, Betriebszeit 8000 h/a
<b>Betriebskosten</b>						
Personal & Verwaltung			CHF/a	322'100		aus: TRAC 2010
Unterhaltskosten	Reparaturen Masch. Und Mobi., Abfall		CHF/a	479'115		3% der Gesamtinvestitionskosten
Wasserkosten	Kühlwasser		CHF/a	77'000	878'215	identisch TRAC (für Trockengutkühlung, Kondensation)
<b>Abgabekosten Endverwerter</b>						
Kosten Inertdeponie	300 CHF/m3 Asche		CHF/a	405'000		inkl. Transport/ ab KESO bericht, 2025t mineralischer Anteil mit Dicht 1.5
Entsorgung Brüden	Betriebskosten		CHF/a	100'000		dito Variante 2
	Personal		CHF/a	50'000		dito Variante 2
	Unterhaltskosten		CHF/a	50'000	605'000	dito Variante 2
<b>Total Jahreskosten</b>				<b>3'107'543</b>	<b>CHF/a</b>	
Kosten pro Tonne Klärschlamm (30%)					<b>207.17</b>	<b>CHF/t KS</b>
Kosten pro Tonne TS Klärschlamm					<b>690.57</b>	<b>CHF/t TS</b>

**Relevante Berechnungen**

Berechnungen	Einheit	Zahl
Klärschlamm lieferungen	[t]	15'000
Entwässerungsgrad	[%]	30
organischer Anteil	[%]	55
Fracht Trockensubstanz	[t]	4500
TS-Gehalt nach Teiltrocknung	%	45
Granulat nach Trocknung	t	10'000
Wasserdampfung	t	5'000
th. Energie für Wasserdampfung	kWh/tH2O	850
Betriebszeit Monoverbrennung	h/a	8'000
Leistung Monoverbrennung	kW	200
Strompreis	CHF/kWh	0.16
Kosten Strom	CHF	256'000
Aschemenge	t/a	2025
Dichte Asche	t/m3	1.5
Aschenvolumen	m3	1350
Kosten Inertdeponie inkl. Transport	CHF/m3	300
Transportkilometer Chur - Untervaz	km	10
Kosten pro Transport	CHF/Tran.	350
Anzahl Transporte	Anz	275

**Variante 5.a**
**Export des Klärschlams nach Bazenheid**

	Abschrebedauer Kapitalzins: 3.5%	Einheit	Kosten Fr.	Jahreskosten CHF/a		Berechnungen Klärschlamm lieferungen	Einheit [t]	Zahl 15'000
<b>Neuinvestitionen</b>								
Erneuerung EMSRT & Sanierung bestehender Anlagen		CHF	836'500		40% der Bestehenden Werte (inkl. Indexierung 25%)	Entwässerungsgrad	[%]	30
Heutiger Wert nach Sanierung:	Schlammannahme	15 Jahre	CHF	1'528'750	132'734 Aufindexiert aus Bericht Entstehung TRAC Chur 1997	organischer Anteil	[%]	55
	Erschliessung	30 Jahre	CHF	562'500	30'584 Aufindexiert aus Bericht Entstehung TRAC Chur 1997	Fracht Trockensubstanz	[t]	4500
Nebenkosten	20% der Kosten	15 Jahre	CHF	167'300	14'526 UVG, Honorar, Nebenkosten	Schlammtransporte mit RhB heute	[t]	3'500
<b>Total Investitionen</b>					<b>CHF 1'003'800</b>	Schlammtransport ARA Chur-Bhf Chur	[t]	11'500
<b>Betriebskosten Graubünden</b>								
Unterhaltskosten Stapel	Diverses	CHF/a	100'000	100'000	gleich wie TRAC 2010	Entsorgungspreis entwässerter KS	CHF/t	90
<b>Abgabekosten Endverwerter</b>								
Kosten Entsorgung	90 CHF/ Tonne entw. Schlamm	CHF/a	1'350'000	1'350'000	15'000 t entwässerter Schlamm	Transport Bahn Landquart-Bazenheid KVA	CHF/t	29
<b>Transportkosten</b>								
Schlamm Landquart-Bazenheid	29.-/t	CHF/a	101'500		heutige Bahntransporte	Transport Bahn Chur-Bazenheid KVA	CHF/t	31
Schlamm Chur-Bazenheid	31.-/t	CHF/a	356'500		restlicher Schlamm	Transport LKW ARA Chur- Bahnhof Chur	CHF pro Fahrt	100
LKW Chur-Chur		CHF/a	57'500	515'500	100 CHF/ Fahrt, 575 Fahrten	Ladung pro Fahrt	t/Fahrt	20
<b>Total Jahreskosten</b>					<b>2'143'344 CHF/a</b>			
Kosten pro Tonne Klärschlamm (30%)					<b>142.89 CHF/t KS</b>			
Kosten pro Tonne TS Klärschlamm					<b>476.30 CHF/t TS</b>			

**Variante 5.b**
**Export des Klärschlams nach Zürich Werdhölzli**

	Abschrebedauer Kapitalzins: 3.5%	Einheit	Kosten Fr.	Jahreskosten CHF/a		Berechnungen Klärschlamm lieferungen	Einheit [t]	Zahl 15'000
<b>Neuinvestitionen</b>								
Erneuerung EMSRT & Sanierung bestehender Anlagen		CHF	836'500		40% der Bestehenden Werte (inkl. Indexierung 25%)	Entwässerungsgrad	[%]	30
Heutiger Wert nach Sanierung:	Schlammannahme	15 Jahre	CHF	1'528'750	132'734 Aufindexiert aus Bericht Entstehung TRAC Chur 1997	organischer Anteil	[%]	55
	Erschliessung	30 Jahre	CHF	562'500	30'584 Aufindexiert aus Bericht Entstehung TRAC Chur 1997	Fracht Trockensubstanz	[t]	4500
Nebenkosten	20% der Kosten	15 Jahre	CHF	167'300	14'526 UVG, Honorar, Nebenkosten	Schlammtransporte mit RhB heute	[t]	3'500
<b>Total Investitionen</b>			<b>CHF</b>	<b>1'003'800</b>		Schlammtransport ARA Chur-Bhf Chur	[t]	11'500
<b>Betriebskosten Graubünden</b>								
Unterhaltskosten Stapel	Diverses	CHF/a	100'000	100'000	gleich wie TRAC 2010			
<b>Abgabekosten Endverwerter</b>								
Kosten Entsorgung	90 CHF/ Tonne entw. Schlamm	CHF/a	1'650'000	1'650'000	15'000 t entwässerter Schlamm	Entsorgungspreis entwässerter KS	CHF/t	110
<b>Transportkosten</b>								
Schlamm Landquart-Zürich	30.-/t	CHF/a	105'000		heutige Bahntransporte	Transport Bahn Landquart-Zürich Werdhölzli	CHF/t	30
Schlamm Chur-Zürich	32.-/t	CHF/a	368'000		restlicher Schlamm	Transport Bahn Chur-Zürich Werdhölzli	CHF/t	32
LKW Chur-Chur		CHF/a	57'500	530'500	100 CHF/ Fahrt, 575 Fahrten	Transport LKW ARA Chur- Bahnhof Chur	CHF pro Fahrt	100
<b>Total Jahreskosten</b>				<b>2'458'344</b>	<b>CHF/a</b>	Ladung pro Fahrt	t/Fahrt	20
Kosten pro Tonne Klärschlamm (30%)					<b>163.89 CHF/t KS</b>			
Kosten pro Tonne TS Klärschlamm					<b>546.30 CHF/t TS</b>			

**Variante 7**
**Hydrothermale Karbonisierung: HTC**

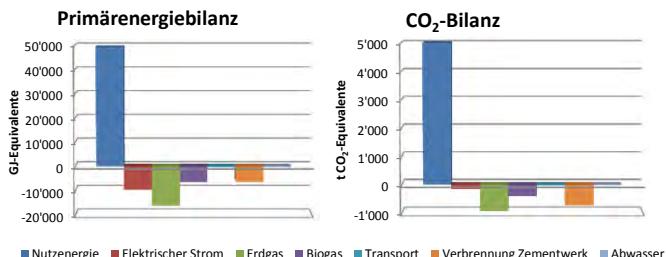
	Abschreibebedauer Kapitalzins: 3.5%	Einheit	Kosten Fr.	Jahreskosten CHF/a				
<b>Neuinvestitionen</b>								
Rückbau Trocknung und Gebäude		CHF	300'000	Pauschal				
HTC-Anlage (AVACO2)	Eurokurs: 1.35	15 Jahre	CHF 6'311'250	547'975 gemäss Offerte AVACO2				
Integration Infrastruktur	Wasser, Strom, etc.	30 Jahre	CHF 562'500	30'584 Kosten aus TRAC-Erstellung (inkl. 25% Indexierung)				
Lagerung/Stapel KS-kohle		30 Jahre	CHF 300'000	16'311 Schätzung				
Erneuerung EMSRT & Sanierung	Schlammannahme und Energieerzeugung		CHF 1'294'950	40% der Bestehenden Werte (Schlammannahme, inkl. Indexierung 25%)				
Heutiger Wert nach Sanierung:	Schlammannahme	15 Jahre	CHF 1'528'750	132'734 Aufindexiert aus Bericht Entstehung TRAC Chur 1997				
	Energieerzeugung	15 Jahre	CHF 1'708'625	148'351 aus Bericht Entstehung TRAC Chur 1997 abzüglich Trockner 4Mio				
Nebenkosten	20% der Kosten	15 Jahre	CHF 1'800'500	156'329 UVG, Honorar, Nebenkosten				
<b>Total Investitionen</b>			<b>CHF 10'569'200</b>					
<b>Energiekosten</b>								
Thermisch	Biogas	CHF/a	220'455	mit Preis von 6.9 Rp/kWh				
Elektrisch	Strom	CHF/a	32'400	252'855 Strompreis von 16Rp/kWh				
<b>Betriebskosten</b>								
Personal & Verwaltung		CHF/a	322'100	aus: TRAC 2010				
Unterhaltskosten	Reparaturen Masch. Und Mobi., Abfall	CHF/a	317'076	3% der Gesamtinvestitionskosten				
Wasser Kosten	Kühlwasser	CHF/a	77'000	716'176 Gemäss Angaben Hr. Feurer Telefonat 20.9.2011				
<b>Abgabekosten Endverwerter</b>								
Kosten Entsorgung Bazenheim	90 CHF/t Biokohle	CHF/a	405'000	Abgabepreis im KVA Bazenheim gemäss Auskunft Betriebsleiter				
Entsorgung Brüden		CHF/a	40'000	445'000 Pauschal aus JB TRAC 2010 (Faktor 2 für Mehrbelastung)				
<b>Transportkosten</b>								
Schlamm Chur-Bazenheim	31.-/t	CHF/a	139'500	restlicher Schlamm				
LKW Chur-Chur	5.-/t	CHF/a	22'500	162'000 100 CHF/ Fahrt, 225 Fahrten				
<b>Total Jahreskosten</b>			<b>2'608'315 CHF/a</b>					
Kosten pro Tonne Klärschlamm (30%)				<b>173.89 CHF/t KS</b>				
Kosten pro Tonne TS Klärschlamm				<b>579.63 CHF/t TS</b>				
<b>Relevante Berechnungen</b>								
Berechnungen					Einheit	Zahl		
Klärschlammlieferungen					[t]	15'000		
Entwässerungsgrad					[%]	30		
organischer Anteil					[%]	55		
Fracht Trockensubstanz					[t]	4500		
Klärschlammkohle aus t Klärschlamm					t/t TS KS	0.7		
Entstehende Klärschlammkohle					t TS	3150		
Wasseranteil Klärschlammkohle					%	70		
Klärschlammkohle Endprodukt					t KS-Kohle	4500		

## **Anhang 2**

### **Energiebilanzen**

## Energie & CO2-Bilanz berechnungen Variante 1

Energiegehalt Klärschlamm			13.75 GWh		
	Wert	Einheit	Notes	Primärenergie-Equivalente [GJ-Eq]	CO2-Equivalente [t CO2-Eq]
<b>Eingesetzte Energien</b>					
Elektrischer Strom	1 GWh	normal Electricity-Mix Switzerland		-9'486	-149
Erdgas	3.77 GWh	entspricht 330441 Nm3 Gas		-16'188	-926
Biogas	5.47 GWh	entspricht 729333 Nm3 Gas		-6'480	-386
<b>Trocknung</b>					
Wirkungsgrad	90 %	Wirkungsgrad der Trocknung			
Wärmeverlust	0.924 GWh	Wärmeverlust Trocknung			
<b>Transport</b>					
Transportkilometer	10 km	Chur-Untervaz			
Tonnenkilometer	50000 tkm	Transport by LKW(Truck à 20t)		-161	-10
Anzahl Fahrten	250 Fahrten	mit 20t/Fahrt			
Farthkilometer	5000 km	Jewils Hin und Zurück			
Energieverbrauch Transport	16.94 MWh	Transportenergie			
<b>Brennung Zementwerk</b>					
Effizienz	80 %	Wirkungsgrad des Zementwerks			
Wärmeverlust	2.75 GWh				
Wasserverdampfung	0.425 GWh	Energie für die Wasserverdampfung		-6'254	-721
<b>Abwasser</b>					
Abwasser	10000 m3	gereinigt in ARA Chur			
CSB-Fracht	10000 kg/a				
NH4-Fracht	10000 kg/a				
Stromverbrauch ARA	17 MWh				
Einwohnergleichwerte	564 PE	gemäss Berechnung VSA/FES		-66	-4
<b>Energieverbrauch, ohne Substitution</b>					
<b>Totaler Energie Verbrauch</b>				<b>-38'635</b>	<b>-2'194</b>
<b>Nutzenergie</b>					
Nutzenergie	10.575 GWh	Substitution von Primärenergie (Braunkohle)		49'342	4'999
<b>Energieverbrauch, mit Substitution von Braunkohle Wärmeenergie</b>					
<b>Totaler Energie Verbrauch</b>				<b>10'707</b>	<b>2'804</b>

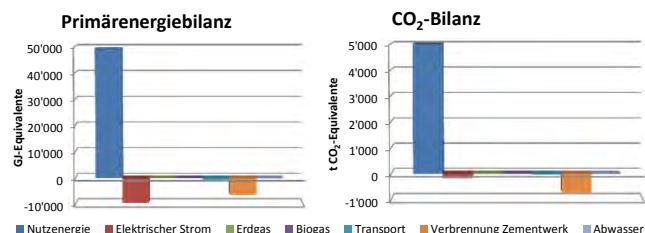


## Relevante Größen

Berechnungen	Einheit	Zahl
Klärschlamm entwässert	[t]	15'000
TS-Gehalt Klärschlamm entwässert	[%]	30
Organischer Anteil Klärschlamm	[%]	55
Trockenmasse Klärschlamm	[t]	4500
Thermische Energie für Wasserverdampfung	kWh/H2O	850
Elektrische Energie für Wasserverdampfung	kWh/m3H2O	100
Heizwert Klärschlamm (organischer anteil)	kJ/kgTS	20'000
Heizwert Klärschlamm TS	kJ/kg TS	11'000
Trockensubstanzgehalt nach Trocknung	%	90
CSB-Gehalt Brüdenabwasser	mg/L	1'000
NH4-N-Gehalt Brüdenabwasser	mg/L	1'000
P-Gehalt Brüdenabwasser	mg/L	10
GUS-Gehalt Brüdenabwasser	mg/L	20
Stromverbrauch pro EW in ARA 30'000-100'000EW	kWh/EW	30
Energiegehalt Biogas	kWh/Nm3	7.5
Energiegehalt Erdgas	kWh/Nm4	11.409
Dieselverbrauch pro km	L Diesel/km	0.35
Energieinhalt Diesel	MJ/kgdiesel	42.5
Dichte Diesel	kg/L	0.82
<b>Primärenergie equivalente</b>		
Elektrizität, low voltage, at grid [#752]	MJ-Eq/kWh	9.48580109
Erdgas, burned in industrial furnace >100kW [#1363]	MJ-Eq/MJ	1.19271677
Biogas, from sewage sludge, burned in industrial furnace [#135, 6165,6169]	MJ-Eq/MJ	0.32906468
LKW-Transpor, lorry 20-28t, fleet average [#1942]	MJ-Eq/km	3.22918872
Abwasserreinigung, sewage, to wastewater treatment, class 2, scenario #1-6	MJ-Eq/m3	6.61135496
Verbrennung, dried sludge, to incineration	MJ-Eq/kg	1.25085154
Substitution Wärme aus Braunkohleheat, at hard coal industrial furnace 1-10MW	MJ-Eq/MJ	1.29608708
<b>CO2-Equivalente</b>		
Elektrizität, low voltage, at grid [#752]	CO2-Eq/kWh	0.14862
Erdgas, burned in industrial furnace >100kW [#1363]	CO2-Eq/MJ	0.068197
Biogas, from sewage sludge, burned in industrial furnace [#135, 6165,6169]	CO2-Eq/MJ	0.01958044
LKW-Transpor, lorry 20-28t, fleet average [#1942]	CO2-Eq/km	0.19464
Abwasserreinigung, sewage, to wastewater treatment, class 2, scenario #1-6	CO2-Eq/m3	0.3823536
Verbrennung, dried sludge, to incineration	CO2-Eq/kg	0.14419153
Substitution Wärme aus Braunkohleheat, at hard coal industrial furnace 1-10MW	CO2-Eq/MJ	0.1313

## Energie & CO2-Bilanz berechnungen Variante 2a: Trocknung in Untervaz

Energiegehalt Klärschlamm	13.75 GWh			
<b>Eingesetzte Energien</b>	<b>Wert</b>	<b>Einheit</b>	<b>Notes</b>	<b>Primärenergie-Equivalente [GJ-Eq]</b> <b>CO2-Equivalente [t CO2-Eq]</b>
Elektrischer Strom	1 GWh	normal Electricity-Mix Switzerland		-9'486 -149
Abwärme	9.44 GWh	aus Klinkerühlung, 20% Verlust	Abwärme: Keine Relevanz	Abwärme: Keine Relevanz
<b>Trocknung</b>				
Wirkungsgrad	90 %	Wirkungsgrad der Trocknung		
Wärmeverlust	0.94 GWh	Wärmeverlust Trocknung		
<b>Transport</b>				
Transportkilometer	10 km	Chur-Untervaz (Mehrtransporte aufgrund Standort neuer Trocknung)		
Tonnenkilometer	150000 tkm	Transport by LKW(Truck à 20t)	-484	-29
Anzahl Fahrten	250 Fahrten	mit 20t/Fahrt		
Farhtkilometer	5000 km	Jewils Hin und Zurück		
Energieverbrauch Transport	16.94 MWh	Transportenergie		
<b>Zementwerk</b>				
Effizienz	80 %	Wirkungsgrad des Zementwerks		
Wärmeverlust	2.75 GWh			
Wasserverdampfung	0.425 GWh	Energie für die Wasserverdampfung	-6'254	-721
<b>Abwasser</b>				
Abwasser	10000 m3	gereinigt in separater Vorbehandlung		
CSB-Fracht	10000 kg/a			
NH4-Fracht	10000 kg/a			
Stromverbrauch ARA	42 MWh		-74	-4
Einwohnergleichwerte	564 PE	gemäss Berechnung VSA/FES		
<b>Energieverbrauch, ohne Substitution</b>				
<b>Totaler Energie Verbrauch</b>			<b>-16'298</b>	<b>-903</b>
<b>Nutzenergie</b>				
Nutzenergie	10.575 GWh	Substitution von Primärenergie (Braunkohle)	49'342	4'999
<b>Energieverbrauch, mit Substitution von Braunkohle Wärmeenergie</b>				
<b>Totaler Energie Verbrauch</b>			<b>33'044</b>	<b>4'095</b>

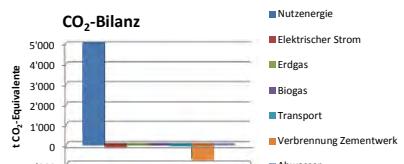
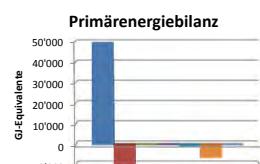


## Relevante Berechnungen

Berechnungen	Einheit	Zahl
Klärschlamm entwässert	[t]	15'000
Klärschlamm aus ARA Chur	t	5500
TS-Gehalt Klärschlamm entwässert	[%]	30
Organischer Anteil Klärschlamm	[%]	55
Trockenmasse Klärschlamm	[t]	4500
Thermische Energie für Wasserverdampfung	kWh/lH2O	850
Elektrische Energie für Wasserverdampfung	kWh/m3H2O	100
Heizwert Klärschlamm (organischer anteil)	kJ/kg TS	20'000
Heizwert Klärschlamm TS	kJ/kg TS	11'000
Trockensubstanzgehalt nach Trocknung	%	90
CSB-Gehalt Brüdenabwasser	mg/L	1'000
NH4-N-Gehalt Brüdenabwasser	mg/L	1'000
P-Gehalt Brüdenabwasser	mg/L	10
GUS-Gehalt Brüdenabwasser	mg/L	20
Stromverbrauch pro EW in ARA 1'000EW (separate Vorbehandlung)	kWh/EW	75
NH4-N pro Einwohnergleichwert	kg NH4/PE a	2.4
Dieselverbrauch pro km	L Diesel/km	0.35
Energieinhalt Diesel	MJ/kgdiesel	42.5
Dichte Diesel	kg/L	0.82
<b>Primärenergie equivalente</b>		
Elektrizität, low voltage, at grid [#752]	MJ-Eq/kWh	9.48580109
LKW-Transpor, lorry 20-28t, fleet average [#1942]	MJ-Eq/tkm	3.22918872
Abwasserreinigung, sewage, to wastewater treatment, class 4, scenario #1-6	MJ-Eq/m3	7.38199664
Verbrennung, dried sludge, to incineration	MJ-Eq/kg	1.25085154
Substitution Wärme aus Braunkohleheat, at hard coal industrial furnace 1-10MW	MJ-Eq/MJ	1.29608708
<b>CO2-Equivalente</b>		
Elektrizität, low voltage, at grid [#752]	CO2-Eq/kWh	0.14862
LKW-Transpor, lorry 20-28t, fleet average [#1942]	CO2-Eq/tkm	0.19464
Abwasserreinigung, sewage, to wastewater treatment, class 4, scenario #1-6	CO2-Eq/m3	0.44987364
Verbrennung, dried sludge, to incineration	CO2-Eq/kg	0.14419153
Substitution Wärme aus Braunkohleheat, at hard coal industrial furnace 1-10MW	CO2-Eq/MJ	0.1313

## Energie & CO2-Bilanz berechnungen Variante 2b: Trocknung in Trimmis

Energiegehalt Klärschlamm			13.75 GWh
Wert	Einheit	Notes	
<b>Eingesetzte Energien</b>			
Elektrischer Strom	1 GWh	normal Electricity-Mix Switzerland	-9'486 -149
Abwärme	9.44 GWh	aus den Rauchgasverlusten der KVA	Abwärme: Keine Relevanz Abwärme: Keine Relevanz
<b>Trocknung</b>			
Wirkungsgrad	90 %	Wirkungsgrad der Trocknung	
Wärmeverlust	0.94 GWh	Wärmeverlust Trocknung	
<b>Transport</b>			
Transportkilometer	10 km	Chur-Trimmis (Mehrtransporte aufgrund Standort neuer Trocknung)	
Tonnenkilometer	150000 tkm	Transport mit LKW(Truck à 20t)	-484
Transport distance	2 km	Trimmis-Untervaz (Transport getrockneter Schlamm)	
Tonnenkilometer	10000 tkm	Transport mit LKW(Truck à 20t)	-32 -31
Anzahl Fahrten	1000 Fahrten	mit 20t/Fahrt	
Farthkilometer	16000 km	Jewils Hin und Zurück	
Energieverbrauch Trans	54.21 MWh	Transportenergie	
<b>Zementwerk</b>			
Effizienz	80 %	efficiency of the cement plant	
Wärmeverlust	2.75 GWh		
Wasserverdampfung	0.425 GWh	Energie für Wasserverdampfung	-6'254 -721
<b>Abwasser</b>			
Abwasser	10000 m3	gereinigt in separater Vorbehandlung	
CSB-Fracht	10000 kg/a		
NH4-Fracht	10000 kg/a		
Stromverbrauch ARA	42 MWh		-74 -4
Einwohnergleichwerte	564 PE	gemäss Berechnung VSA/FES	
<b>Energieverbrauch, ohne Substitution</b>			<b>-16'331 -905</b>
<b>Totaler Energie Verbrauch</b>			
<b>Nutzenergie</b>			
Nutzenergie	10.575 GWh	Substitution von Primärenergie (Braunkohle)	49'342 4'999
<b>Energieverbrauch, mit Substitution von Braunkohle Wärmeenergie</b>			
<b>Totaler Energie Verbrauch</b>			<b>33'011 4'093</b>

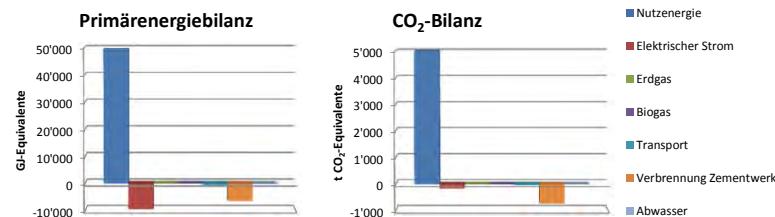


## Relevante Berechnungen

Berechnungen	Einheit	Zahl
Klärschlamm entwässert	[t]	15'000
Klärschlamm aus ARA Chur	t	5500
TS-Gehalt Klärschlamm entwässert	[%]	30
Organischer Anteil Klärschlamm	[%]	55
Trockenmasse Klärschlamm	[t]	4500
Thermische Energie für Wasserverdampfung	kWh/tH2O	850
Elektrische Energie für Wasserverdampfung	kWh/m3H2O	100
Heizwert Klärschlamm (organischer anteil)	kJ/kgTS	20'000
Heizwert Klärschlamm TS	kJ/kg TS	11'000
Trockensubstanzgehalt nach Trocknung	%	90
CSB-Gehalt Brüdenabwasser	mg/L	1'000
NH4-N-Gehalt Brüdenabwasser	mg/L	1'000
P-Gehalt Brüdenabwasser	mg/L	10
GUS-Gehalt Brüdenabwasser	mg/L	20
Stromverbrauch pro EW in ARA 1'000EW (separate Vorbehandlung)	kWh/EW	75
NH4-N pro Einwohnergleichwert	kg NH4/PE a	2.4
Dieselverbrauch pro km	L Diesel/km	0.35
Energieinhalt Diesel	MJ/kgdiesel	42.5
Dichte Diesel	kg/L	0.82
<b>Primärenergie equivalent</b>		
Elektrizität, low voltage, at grid [#752]	MJ-Eq/kWh	9.48580109
LKW-Transpor, lorry 20-28t, fleet average [#1942]	MJ-Eq/tkm	3.22918872
Abwasserreinigung, sewage, to wastewater treatment, class 4, scenario #1-6	MJ-Eq/m3	7.38199664
Verbrennung, dried sludge, to incineration	MJ-Eq/kg	1.25085154
Substitution Wärme aus Braunkohleheat, at hard coal industrial furnace 1-10MW	MJ-Eq/MJ	1.29608708
<b>CO2-Equivalente</b>		
Elektrizität, low voltage, at grid [#752]	CO2-Eq/kWh	0.14862
LKW-Transpor, lorry 20-28t, fleet average [#1942]	CO2-Eq/tkm	0.19464
Abwasserreinigung, sewage, to wastewater treatment, class 4, scenario #1-6	CO2-Eq/m3	0.44987364
Verbrennung, dried sludge, to incineration	CO2-Eq/kg	0.144419153
Substitution Wärme aus Braunkohleheat, at hard coal industrial furnace 1-10MW	CO2-Eq/MJ	0.1313

Energie& CO2-Bilanz berechnungen Variante 2c: Trocknung in Domat/Ems

Energiegehalt Klärschlamm			13.75 GWh	Primärenergie-Equivalente [MJ-Eq]	CO2-Equivalente [CO2-Eq]
	Wert	Einheit	Notes		
<b>Eingesetzte Energien</b>					
Elektrischer Strom	1 GWh		normal Electricity-Mix Switzerland		-9'486
Abwärme	9.44 GWh		aus dem Axpo-Holzkraftwerk	Abwärme: Keine Relevanz	Abwärme: Keine Relevanz
<b>Trocknung</b>					
Wirkungsgrad	90 %		Wirkungsgrad der Trocknung		
Wärmeverlust	0.94 GWh		Wärmeverlust Trocknung		
<b>Transport</b>					
Transportkilometer	10 km		Chur-Damat/Ems (Mehrtransporte aufgrund Standort neuer Trocknung)		
Tonnenkilometer	150000 tkm		Transport mit LKW(Truck à 20t)		
Transport distance	20 km		Damat/Ems-Untervaz (Transport getrockneter Schlamm)		
Tonnenkilometer	100000 tkm		Transport mit LKW(Truck à 20t)	-807	-49
Anzahl Fahrten	1000 Fahrten		mit 20t/Fahrt		
Farthkilometer	25000 km		Jeweils Hin und Zurück		
Energieverbrauch Trans	84.70 MWh		Transportenergie		
<b>Zementwerk</b>					
Effizienz	80 %		Wirkungsgrad Zementwerkverbrennung		
Wärmeverlust	2.75 GWh				
Wasserverdampfung	0.425 GWh		Loss for water evaporation	-6'254	-721
<b>Abwasser</b>					
Abwasser	10000 m3		gereinigt in separater Vorbehandlung		
CSB-Fracht	10000 kg/a				
NH4-Fracht	10000 kg/a				
Stromverbrauch ARA	42 MWh			-74	-4
Einwohnergleichwerte	564 PE		gemäss Berechnung VSA/FES		
<b>Energieverbrauch, ohne Substitution</b>					
<b>Totaler Energie Verbrauch</b>				-16'621	-923
<b>Nutzenergie</b>					
Nutzenergie	10.575 GWh		Substitution von Primärenergie (Braunkohle)	49'342	4'999
<b>Energieverbrauch, mit Substitution von Braunkohle Wärmeenergie</b>					
<b>Totaler Energie Verbrauch</b>				32'721	4'076



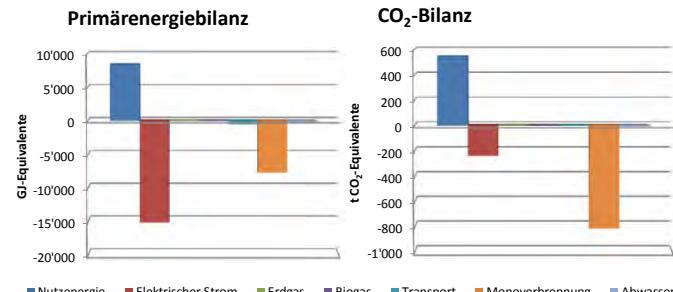
## Relevante Berechnungen

Berechnungen	Einheit	Zahl
Klärschlamm entwässert	[t]	15'000
Klärschlamm aus ARA Chur	t	5500
TS-Gehalt Klärschlamm entwässert	[%]	30
Organischer Anteil Klärschlamm	[%]	55
Trockenmasse Klärschlamm	[t]	4500
Thermische Energie für Wasserverdampfung	kWh/tH2O	850
Elektrische Energie für Wasserverdampfung	kWh/m3H2O	100
Heizwert Klärschlamm (organischer anteil)	kJ/kgTS	20'000
Heizwert Klärschlamm TS	kJ/kg TS	11'000
Trockensubstanzgehalt nach Trocknung	%	90
CSB-Gehalt Brüdenabwasser	mg/L	1'000
NH4-N-Gehalt Brüdenabwasser	mg/L	1'000
P-Gehalt Brüdenabwasser	mg/L	10
GUS-Gehalt Brüdenabwasser	mg/L	20
Stromverbrauch pro EW in ARA 1'000EW (separate Vorbehandlung)	kWh/EW	75
Dieselverbrauch pro km	L Diesel/km	0.35
Energieinhalt Diesel	MJ/kgdiesel	42.5
Dichte Diesel	kg/L	0.82
<b>Primärenergie</b> <b>äquivalente</b>		
Elektrizität, low voltage, at grid [#752]	MJ-Eq/kWh	9.48580109
LKW-Transpor, lorry 20-28t, fleet average [#1942]	MJ-Eq/tkm	3.22918872
Abwasserreinigung, sewage, to wastewater treatment, class 4, scenario #1-6	MJ-Eq/m3	7.38199664
Verbrennung, dried sludge, to incineration	MJ-Eq/kg	1.25085154
Substitution Wärme aus Braunkohleheat, at hard coal industrial furnace 1-10MW	MJ-Eq/MJ	1.29608708
<b>CO2-Equivalente</b>		
Elektrizität, low voltage, at grid [#752]	CO2-Eq/kWh	0.14862
LKW-Transpor, lorry 20-28t, fleet average [#1942]	CO2-Eq/tkm	0.19464
Abwasserreinigung, sewage, to wastewater treatment, class 4, scenario #1-6	CO2-Eq/m3	0.44987364
Verbrennung, dried sludge, to incineration	CO2-Eq/kg	0.14419153
Substitution Wärme aus Braunkohleheat, at hard coal industrial furnace 1-10MW	CO2-Eq/MJ	0.1313

## Energie & CO2-Bilanz berechnungen Variante 4a: Monoverbrennung in Chur

Energiegehalt Klärschlamm 13.75 GWh

Wert	Einheit	Notes	Primärenergie-Equivalente	CO2-Equivalente
			[MJ-Eq]	[CO2-Eq]
<b>Eingesetzte Energien</b>				
Elektrischer Strom	1.6 GWh	normal Electricity-Mix Switzerland	-15'177	-238
Thermische Energie	keine			
<b>Transport</b>				
Keine Transporte			0	0
<b>Monoverbrennung</b>				
Effizienz	80 %	Efizienz Monoverbrennung		
Wärmeverlust	2.75 GWh			
Wasserverdampfung	8.925 GWh	Verlust für Wasserverdampfung	-7'657	-810
<b>Abwasser</b>				
Abwasser	10'500 m <sup>3</sup>	gereinigt in der ARA Chur		
CSB-Fracht	10500 kg/a			
NH4-Fracht	10500 kg/a			
Stromverbrauch ARA	17 MWh		-69	-4
Einwohnergleichwerte	573 PE	gemäss Berechnung VSA/FES		
<b>Energieverbrauch, ohne Substitution</b>				
Totaler Energie Verbrauch			-22'903	-1'052
<b>Nutzenergie</b>				
Nutzenergie	2.075 GWh	Substitution Wärmeenergie Schweiz	8'358	544
<b>Energieverbrauch, mit Substitution von Braunkohle Wärmeenergie</b>				
Totaler Energie Verbrauch			-14'545	-508

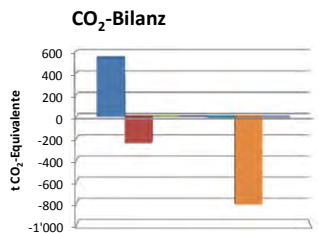
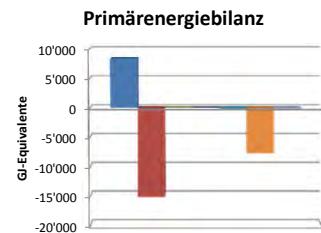


## Relevante Berechnungen

Berechnungen	Einheit	Zahl
Klärschlamm entwässert	[t]	15'000
Klärschlamm aus ARA Chur	t	5500
TS-Gehalt Klärschlamm entwässert	[%]	30
Organischer Anteil Klärschlamm	[%]	55
Trockenmasse Klärschlamm	[t]	4500
Thermische Energie für Wasserverdampfung	kWh/tH <sub>2</sub> O	850
Elektrische Energie für Wasserverdampfung	kWh/m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> O	100
Heizwert Klärschlamm (organischer anteil)	kJ/kg TS	20'000
Heizwert Klärschlamm TS	kJ/kg TS	11'000
Trockensubstanzgehalt nach Trocknung	%	90
Betrieb Monoverbrennung	h/a	8000
Leistung Monoverbrennung	kW	200
CSB-Gehalt Brüdenabwasser	mg/L	1'000
NH4-N-Gehalt Brüdenabwasser	mg/L	1'000
P-Gehalt Brüdenabwasser	mg/L	10
GUS-Gehalt Brüdenabwasser	mg/L	20
Stromverbrauch pro EW in ARA 30'000-100'000EW	kWh/EW	30
<b>Primärenergie equivalente</b>		
Elektrizität, low voltage, at grid [#752]	MJ-Eq/kWh	9.48580109
LKW-Transpor, lorry 20-28t, fleet average [#1942]	MJ-Eq/tkm	3.22918872
Abwasserreinigung, sewage, to wastewater treatment, class 2, scenario #1-6	MJ-Eq/m <sup>3</sup>	6.61135496
Monoverbrennung disposal, dewatered sludge, to incineration	MJ-Eq/kg	0.51044501
Substitution Wärmeenergie Schweiz	MJ-Eq/MJ	1.11893232
<b>CO2-Equivalente</b>		
Elektrizität, low voltage, at grid [#752]	CO2-Eq/kWh	0.14862
LKW-Transpor, lorry 20-28t, fleet average [#1942]	CO2-Eq/tkm	0.19464
Abwasserreinigung, sewage, to wastewater treatment, class 2, scenario #1-6	CO2-Eq/m <sup>3</sup>	0.3823536
Monoverbrennung disposal, dewatered sludge, to incineration	CO2-Eq/kg	0.05399801
Substitution Wärmeenergie Schweiz	CO2-Eq/MJ	0.07285727

## Energie & CO2-Bilanz berechnungen Variante 4b: Monoverbrennung in Trimmis

Energiegehalt Klärschlamm	13.75 GWh			
Wert	Einheit	Notes	Primärenergie-Equivalente [MJ-Eq]	CO2-Equivalente [CO2-Eq]
<b>Eingesetzte Energien</b>				
Elektrischer Strom	1.6 GWh	normal Electricity-Mix Switzerland	-15'177	-238
Thermische Energie		keine		
<b>Transport</b>				
Transport distance	10 km	Chur-Trimmis (Mehrtransporte aufgrund neuem Standort Schlammverwertung)		
Tonnenkilometer	55000 tkm	Transport by LKW(Truck à 20t)		
Anzahl Fahrten	275 Fahrten	mit 20t/Fahrt		
Fahrhkilometer	5500 km	Jewils Hin und Zurück		
Energieverbrauch Transport	18.64 MWh	Transportenergie	-178	-11
<b>Monoverbrennung</b>				
Effizienz	80 %	Effizienz Monoverbrennung		
Wärmeverlust	2.75 GWh			
Wasserverdampfung	8.925 GWh	Verlust für Wasserverdampfung	-7'657	-810
<b>Abwasser</b>				
Abwasser	10'500 m3	gereinigt in der ARA Chur		
CSB-Fracht	10500 kg/a			
NH4-Fracht	10500 kg/a			
Stromverbrauch ARA	17 MWh		-78	-5
Einwohnergleichwerte	573 PE	gemäss Berechnung VSA/FES		
<b>Energieverbrauch, ohne Substitution</b>				
<b>Totaler Energie Verbrauch</b>			<b>-23'089</b>	<b>-1'063</b>
<b>Nutzenergie</b>				
Nutzenergie	2.075 GWh	Substitution Wärmeenergie Schweiz	8'358	544
<b>Energieverbrauch, mit Substitution von Braunkohle Wärmeenergie</b>				
<b>Totaler Energie Verbrauch</b>			<b>-14'731</b>	<b>-519</b>

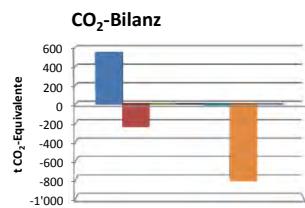
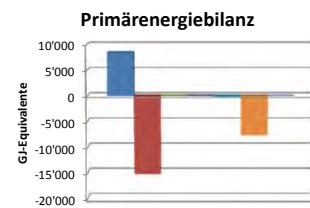


## Relevante Berechnungen

Berechnungen	Einheit	Zahl
Klärschlamm entwässert	[t]	15'000
Klärschlamm aus ARA Chur	t	5500
TS-Gehalt Klärschlamm entwässert	[%]	30
Organischer Anteil Klärschlamm	[%]	55
Trockenmasse Klärschlamm	[t]	4500
Thermische Energie für Wasserverdampfung	kWh/lH2O	850
Elektrische Energie für Wasserverdampfung	kWh/m3H2O	100
Heizwert Klärschlamm (organischer anteil)	kJ/kgTS	20'000
Heizwert Klärschlamm TS	kJ/kg TS	11'000
Trockensubstanzgehalt nach Trocknung	%	90
 Betrieb Monoverbrennung	h/a	8000
Leistung Monoverbrennung	kW	200
 Dieselverbrauch pro km	L Diesel/km	0.35
Energieinhalt Diesel	MJ/kgdiesel	42.5
Dichte Diesel	kg/L	0.82
 CSB-Gehalt Brüdenabwasser	mg/L	1'000
NH4-N-Gehalt Brüdenabwasser	mg/L	1'000
P-Gehalt Brüdenabwasser	mg/L	10
GUS-Gehalt Brüdenabwasser	mg/L	20
Stromverbrauch pro EW in ARA 30'000-100'000EW	kWh/EW	30
 <b>Primärenergie equivalente</b>		
Elektrizität, low voltage, at grid [#752]	MJ-Eq/kWh	9.4858
LKW-Transpor, lorry 20-28t, fleet average [#1942]	MJ-Eq/tkm	3.2292
Abwasserreinigung, sewage, to wastewater treatment, class 4, scenario #1- MJ-Eq/m3	MJ-Eq/m3	7.3820
Monoverbrennung disposal, dewatered sludge, to incineration	MJ-Eq/kg	0.5104
Substitution Wärmeenergie Schweiz	MJ-Eq/MJ	1.1189
 <b>CO2-Equivalente</b>		
Elektrizität, low voltage, at grid [#752]	CO2-Eq/kWh	0.1486
LKW-Transpor, lorry 20-28t, fleet average [#1942]	CO2-Eq/tkm	0.1946
Abwasserreinigung, sewage, to wastewater treatment, class 4, scenario #1- CO2-Eq/m3	CO2-Eq/m3	0.4499
Monoverbrennung disposal, dewatered sludge, to incineration	CO2-Eq/kg	0.0540
Substitution Wärmeenergie Schweiz	CO2-Eq/MJ	0.0729

## Energie & CO2-Bilanz berechnungen Variante 4c: Monoverbrennung in Domat/Ems

Energiegehalt Klärschlamm			13.75 GWh		
	Wert	Einheit	Notes	Primärenergie-Equivalente [MJ-Eq]	CO2-Equivalente [CO2-Eq]
<b>Eingesetzte Energien</b>					
Elektrischer Strom	1.6 GWh	normal Electricity-Mix Switzerland		-15'177	-238
Thermische Energie		keine			
<b>Transport</b>					
Transport distance	10 km	Chur-Domat-Ems (TMehrtransporte aufgrund neuem Standort Schlammverwertung)			
Tonnenkilometer	55000 tkm	Transport by LKW (Truck à 20t)			
Anzahl Fahrten	275 Fahrten	mit 20t/Fahrt			
Fahrkilometer	5500 km	Jewils Hin und Zurück		-178	-11
Energieverbrauch Transport	18.64 MWh	Transportenergie			
<b>Monoverbrennung</b>					
Effizienz	80 %	Effizienz Monoverbrennung			
Wärmeverlust	2.75 GWh				
Wasserverdampfung	8.925 GWh	Verlust für Wasserverdampfung		-7'657	-810
<b>Abwasser</b>					
Abwasser	10'500 m3	gereinigt in separater Vorbehandlung			
CSB-Fracht	10500 kg/a				
NH4-Fracht	10500 kg/a				
Stromverbrauch ARA	43 MWh			-78	-5
Einwohnergleichwerte	573 PE	gemäss Berechnung VSA/FES			
<b>Energieverbrauch, ohne Substitution</b>					
Totaler Energie Verbrauch				-23'089	-1'063
<b>Nutzenergie</b>					
Nutzenergie	2.075 GWh	Substitution Wärmeenergie Schweiz		8'358	544
<b>Energieverbrauch, mit Substitution von Braunkohle Wärmeenergie</b>					
Totaler Energie Verbrauch				-14'731	-519



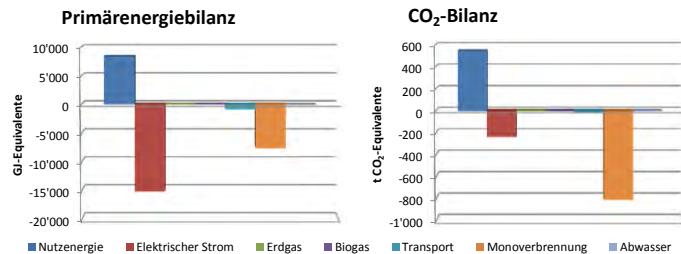
- Nutzenergie
- Elektrischer Strom
- Erdgas
- Biogas
- Transport
- Monoverbrennung
- Abwasser

## Relevante Berechnungen

Berechnungen	Einheit	Zahl
Klärschlamm entwässert	[t]	15'000
Klärschlamm aus ARA Chur	t	5500
TS-Gehalt Klärschlamm entwässert	[%]	30
Organischer Anteil Klärschlamm	[%]	55
Trockenmasse Klärschlamm	[t]	4500
Thermische Energie für Wasserverdampfung	kWh/tH <sub>2</sub> O	850
Elektrische Energie für Wasserverdampfung	kWh/m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> O	100
Heizwert Klärschlamm (organischer anteil)	kJ/kg TS	20'000
Heizwert Klärschlamm TS	kJ/kg TS	11'000
Trockensubstanzgehalt nach Trocknung	%	90
<b>Betrieb Monoverbrennung</b>		
Leistung Monoverbrennung	h/a	8000
	kW	200
<b>Dieselverbrauch pro km</b>		
Energieinhalt Diesel	L Diesel/km	0.35
Dichte Diesel	MJ/kgdiesel	42.5
	kg/L	0.82
CSB-Gehalt Brüdenabwasser	mg/L	1'000
NH4-N-Gehalt Brüdenabwasser	mg/L	1'000
P-Gehalt Brüdenabwasser	mg/L	10
GUS-Gehalt Brüdenabwasser	mg/L	20
Stromverbrauch pro EW in ARA 1'000EW (separate Vorbehandlung)	kWh/EW	75
<b>Primärenergie equivalente</b>		
Elektrizität, low voltage, at grid [#752]	MJ-Eq/kWh	9.4858
LKW-Transpor, lorry 20-28t, fleet average [#1942]	MJ-Eq/tkm	3.2292
Abwasserreinigung, sewage, to wastewater treatment, class 4, scenario #1-6	MJ-Eq/m <sup>3</sup>	7.3820
Monoverbrennung disposal, dewatered sludge, to incineration	MJ-Eq/kg	0.5104
Substitution Wärmeenergie Schweiz	MJ-Eq/MJ	1.1189
<b>CO2-Equivalente</b>		
Elektrizität, low voltage, at grid [#752]	CO2-Eq/kWh	0.1486
LKW-Transpor, lorry 20-28t, fleet average [#1942]	CO2-Eq/tkm	0.1946
Abwasserreinigung, sewage, to wastewater treatment, class 4, scenario #1-6	CO2-Eq/m <sup>3</sup>	0.4499
Monoverbrennung disposal, dewatered sludge, to incineration	CO2-Eq/kg	0.0540
Substitution Wärmeenergie Schweiz	CO2-Eq/MJ	0.0729

#### Energie & CO2-Bilanz berechnungen Variante 5a: Monoverbrennung in Bazenheid

Energiegehalt Klärschlamm			13.75 GWh		
	Wert	Einheit	Notes	Primärenergie-Equivalente [MJ-Eq]	CO2-Equivalente [CO2-Eq]
<b>Eingesetzte Energien</b>					
Elektrischer Strom	1.6 GWh		normal Electricity-Mix Switzerland	-15'177	-238
Thermische Energie			keine		
<b>Transport</b>					
Transport distance	105 km		Chur-Bazenheid		
Tonnenkilometer	1575000 tkm		Transport mit der Bahn		
Energieverbrauch Transport	141.75 MWh		Transportenergie	-869	-22
<b>Monoverbrennung</b>					
Effizienz	80 %		Effizienz Monoverbrennung		
Wärmeverlust	2.75 GWh				
Wasserverdampfung	8.925 GWh		Verlust für Wasserverdampfung	-7'657	-810
<b>Abwasser</b>					
Abwasser	10'500 m3		gereinigt in der ARA Bauzenheid		
CSB-Fracht	10500 kg/a				
NH4-Fracht	10500 kg/a				
Stromverbrauch ARA	17 MWh			-69	-4
Einwohnergleichwerte	573 PE		gemäss Berechnung VSA/FES		
<b>Energieverbrauch, ohne Substitution</b>					
Totaler Energie Verbrauch				-23'773	-1'074
<b>Nutzenergie</b>					
Nutzenergie	2.075 GWh		Substitution Wärmeenergie Schweiz	8'358	544
<b>Energieverbrauch, mit Substitution von Braunkohle Wärmeenergie</b>					
Totaler Energie Verbrauch				-15'414	-530

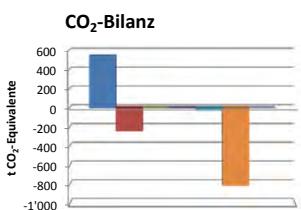
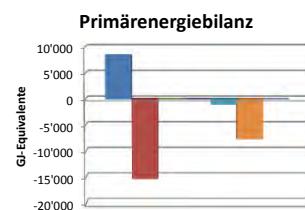


## Relevante Berechnungen

Berechnungen	Einheit	Zahl
Klärschlamm entwässert	[t]	15'000
Klärschlamm aus ARA Chur	t	5500
TS-Gehalt Klärschlamm entwässert	[%]	30
Organischer Anteil Klärschlamm	[%]	55
Trockenmasse Klärschlamm	[t]	4500
Thermische Energie für Wasserverdampfung	kWh/tH2O	850
Heizwert Klärschlamm (organischer anteil)	kJ/kg TS	20'000
Heizwert Klärschlamm TS	kJ/kg TS	11'000
Trockensubstanzgehalt nach Trocknung	%	90
Betrieb Monoverbrennung	h/a	8000
Leistung Monoverbrennung	kW	200
Energieverbrauch Elektrizität pro tkm	kWh/tkm	0.09
CSB-Gehalt Brüdenabwasser	mg/L	1'000
NH4-N-Gehalt Brüdenabwasser	mg/L	1'000
P-Gehalt Brüdenabwasser	mg/L	10
GUS-Gehalt Brüdenabwasser	mg/L	20
Stromverbrauch pro EW in ARA 30'000-100'000EW	kWh/EW	30
<b>Primärenergie</b> <b>equivalente</b>		
Elektrizität, low voltage, at grid [#752]	MJ-Eq/kWh	9.48580108
Bahntransport transport, freight, rail	MJ-Eq/tkm	0.55206027
Abwasserreinigung, sewage, to wastewater treatment, class 2, scenario #1-6	MJ-Eq/m3	6.61135496
Monoverbrennung disposal, dewatered sludge, to incineration	MJ-Eq/kg	0.51044501
Substitution Wärmeenergie Schweiz	MJ-Eq/MJ	1.1189323
<b>CO2-Equivalente</b>		
Elektrizität, low voltage, at grid [#752]	CO2-Eq/kWh	0.14862
Bahntransport transport, freight, rail	CO2-Eq/tkm	0.014192
Abwasserreinigung, sewage, to wastewater treatment, class 2, scenario #1-6	CO2-Eq/m3	0.3823536
Monoverbrennung disposal, dewatered sludge, to incineration	CO2-Eq/kg	0.0539980
Substitution Wärmeenergie Schweiz	CO2-Eq/MJ	0.07285727

Energie & CO<sub>2</sub>-Bilanz berechnungen Variante 5b: Monoverbrennung in Zürich

Energiegehalt Klärschlamm			13.75 GWh		
	Wert	Einheit	Notes	Primärenergie-Equivalente [MJ-Eq]	CO2-Equivalente [CO2-Eq]
<b>Eingesetzte Energien</b>					
Elektrischer Strom	1.6 GWh		normal Electricity-Mix Switzerland	-15'177	-238
Thermische Energie			keine		
<b>Transport</b>					
Transport distance	120 km		Chur-Zürich		
Tonnenkilometer	1800000 tkm		Transport mit der Bahn		
Energieverbrauch Transport	162 MWh		Transportenergie	-994	-26
<b>Monoverbrennung</b>					
Effizienz	80 %		Effizienz Monoverbrennung		
Wärmeverlust	2.75 GWh				
Wasserverdampfung	8.925 GWh		Verlust für Wasserverdampfung	-7'657	-810
<b>Abwasser</b>					
Abwasser	10'500 m3				
CSB-Fracht	10500 kg/a				
NH4-Fracht	10500 kg/a				
Stromverbrauch ARA	17 MWh			-69	-4
Einwohnergleichwerte	573 PE		gemäss Berechnung VSA/FES		
<b>Energieverbrauch, ohne Substitution</b>					
Totaler Energie Verbrauch				-23'897	-1'077
<b>Nutzenergie</b>					
Nutzenergie	2.075 GWh		Substitution Wärmeenergie Schweiz	8'358	544
<b>Energieverbrauch, mit Substitution von Braunkohle Wärmeenergie</b>					
Totaler Energie Verbrauch				-15'539	-533

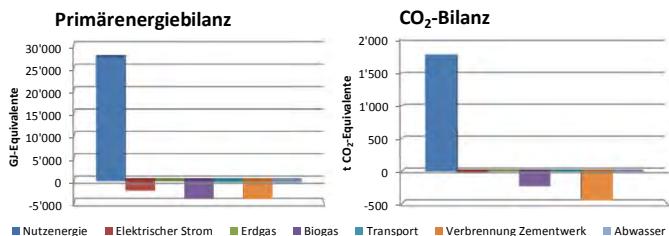


## Relevante Berechnungen

Berechnungen	Einheit	Zahl
Klärschlamm entwässert	[t]	15'000
Klärschlamm aus ARA Chur	t	5500
TS-Gehalt Klärschlamm entwässert	[%]	30
Organischer Anteil Klärschlamm	[%]	55
Trockenmasse Klärschlamm	[t]	4500
Thermische Energie für Wasserverdampfung	kWh/TH2O	850
Heizwert Klärschlamm (organischer anteil)	kJ/kgTS	20'000
Heizwert Klärschlamm TS	kJ/kg TS	11'000
Trockensubstanzgehalt nach Trocknung	%	90
 Betrieb Monoverbrennung	h/a	8000
Leistung Monoverbrennung	kW	200
 Energieverbrauch Elektrizität pro tkm	kWh/tkm	0.09
 CSB-Gehalt Brüdenabwasser	mg/L	1'000
NH4-N-Gehalt Brüdenabwasser	mg/L	1'000
P-Gehalt Brüdenabwasser	mg/L	10
GUS-Gehalt Brüdenabwasser	mg/L	20
Stromverbrauch pro EW in ARA 30'000-100'000EW	kWh/EW	30
 <b>Primärenergie</b> <b>equivalente</b>		
Elektrizität, low voltage, at grid [#752]	MJ-Eq/kWh	9.486
Bahntransport transport, freight, rail	MJ-Eq/tkm	0.552
Abwasserreinigung, sewage, to wastewater treatment, class 2, scenario #1-6	MJ-Eq/m3	6.611
Monoverbrennung disposal, dewatered sludge, to incineration	MJ-Eq/kg	0.510
Substitution Wärmeenergie Schweiz	MJ-Eq/MJ	1.115
 <b>CO2-Equivalente</b>		
Elektrizität, low voltage, at grid [#752]	CO2-Eq/kWh	0.149
Bahntransport transport, freight, rail	CO2-Eq/tkm	0.014
Abwasserreinigung, sewage, to wastewater treatment, class 2, scenario #1-6	CO2-Eq/m3	0.382
Monoverbrennung disposal, dewatered sludge, to incineration	CO2-Eq/kg	0.054
Substitution Wärmeenergie Schweiz	CO2-Eq/MJ	0.073

## Energie & CO2-Bilanz berechnungen Variante 7: HTC-Verfahren in Chur, Verbrennung in Bazenheid

Energiegehalt Klärschlamm			13.75 GWh		
	Wert	Einheit	Notes	Primärenergie-Equivalente [MJ-Eq]	CO2-Equivalente [CO2-Eq]
<b>Eingesetzte Energien</b>					
Elektrischer Strom	0.2 GWh		Normaler Strommix Schweiz	-2'134	-33
Thermische Energie	3.24 GWh		correspond to 432000 Nm3 Biogas	-3'838	-228
<b>HTC-Plant</b>					
Wärmeverluste	1.575 GWh		als Wärmeenergie im Wasser		
Energieverluste	3.82 GWh		Als Heizwertverluste im Wasser		
Biockohle produziert	3150 t		entspricht 9.93125 GWh		
<b>Transport</b>					
Transportdistanz	105 km		Chur-Bazenheid		
Tonnenkilometer	472500 tkm		Transport by railway	-261	-7
Energieverbrauch Transport	42.53 MWh		Transportenergie		
<b>Monoverbrennung</b>					
Effizienz	80 %		Effizienz Monoverbrennung		
Wärmeverlust	1.98625 GWh				
Wasserverdampfung	1.1475 GWh		Loss for water evaporation	-3'963	-446
<b>Abwasser</b>					
Abwasser	10'500 m <sup>3</sup>				
CSB-Fracht	315000 kg/a				
NH4-Fracht	10500 kg/a				
Stromverbrauch ARA	116 MWh			-697	-14
Einwohnergleichwerte	3850 PE		gemäss Berechnung VSA/FES		
<b>Energieverbrauch, ohne Substitution</b>					
Totaler Energie Verbrauch				-10'894	-728
<b>Nutzenergie</b>					
Nutzenergie	6.80 GWh		Substitution Wärmeenergie Schweiz	27'381	1783
<b>Energieverbrauch, mit Substitution von Braunkohle Wärmeenergie</b>					
Totaler Energie Verbrauch				16'488	1'055



## Relevante Berechnungen

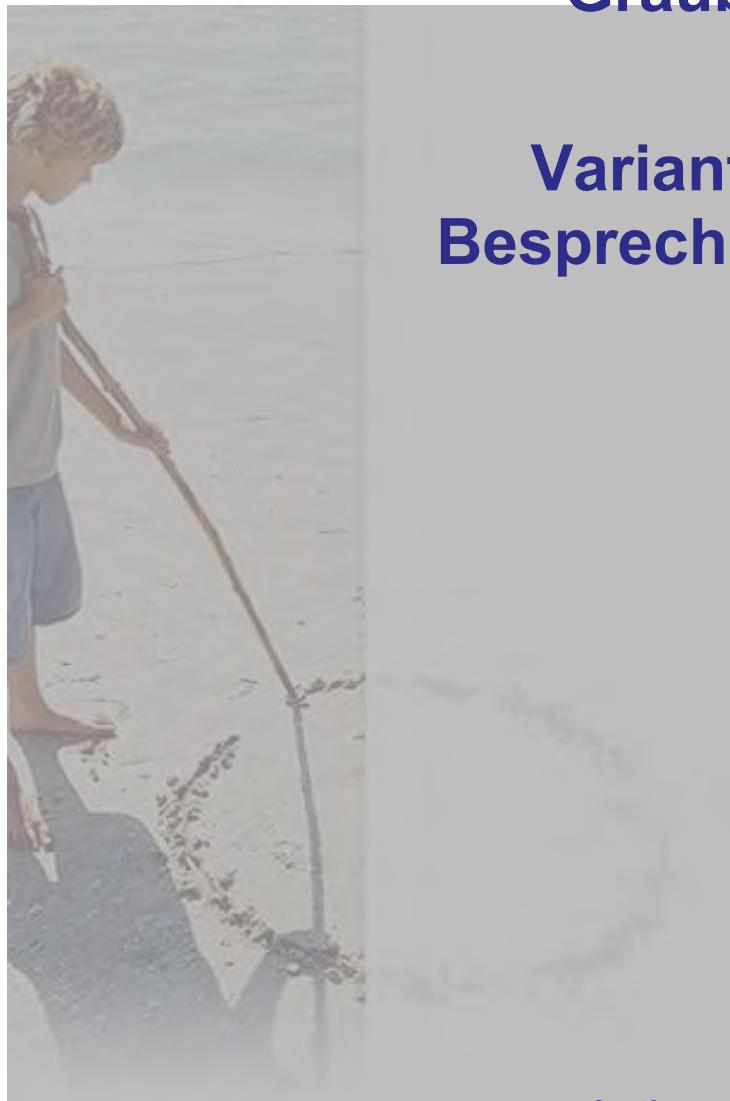
Berechnungen	Einheit	Zahl
Klärschlamm entwässert	[t]	15'000
Klärschlamm aus ARA Chur	t	5500
TS-Gehalt Klärschlamm entwässert	[%]	30
Organischer Anteil Klärschlamm	[%]	55
Trockenmasse Klärschlamm	[t]	4500
Thermische Energie für Wasserverdampfung	kWh/tH2O	850
Heizwert Klärschlamm (organischer anteil)	kJ/kgTS	20'000
Heizwert Klärschlamm TS	kJ/kg TS	11'000
Trockensubstanzgehalt nach Trocknung	%	90
Elektrische Energie für HTC pro Tonne TS	kWh/t TS	50
Thermische Energie für HTC pro Tonne TS	kWh/t TS	720
Abwärme HTC-Verfahren	kWh/t TS	350
Ausbeute Biokohle HTC	t/TS	0.7
TS-Gehalt Kbiokohle	%	70
Heizwert Biokohle	kJ/kg TS	11'350
Energiegehalt Biogas	KWh/Nm3	7.5
 Energieverbrauch Elektrizität pro tkm	kWh/tkm	0.09
 CSB-Gehalt Brüdenabwasser	mg/L	30'000
NH4-N-Gehalt Brüdenabwasser	mg/L	1'000
P-Gehalt Brüdenabwasser	mg/L	10
GUS-Gehalt Brüdenabwasser	mg/L	20
Stromverbrauch pro EW in ARA 30'000-100'000EW	kWh/EW	30
 <b>Primärenergie equivalente</b>		
Elektrizität, low voltage, at grid [#752]	MJ-Eq/kWh	9.486
Biogas, from sewage sludge, burned in industrial furnace [#135, 6165,6169]	MJ-Eq/MJ	0.329
Bahntransport transport, freight, rail	MJ-Eq/tkm	0.552
treatment, sewage, to wastewater treatment, class 2, scenario #7	MJ-Eq/m3	66.416
Mix Monoverbrennung und Zementment, da H2O-Gehalt 70 %	MJ-Eq/kg	0.881
Substitution Wärmeenergie Schweiz	MJ-Eq/MJ	1.115
 <b>CO2-Equivalente</b>		
Elektrizität, low voltage, at grid [#752]	CO2-Eq/kWh	0.145
Biogas, from sewage sludge, burned in industrial furnace [#135, 6165,6169]	CO2-Eq/MJ	0.020
Bahntransport transport, freight, rail	CO2-Eq/tkm	0.014
treatment, sewage, to wastewater treatment, class 2, scenario #7	CO2-Eq/m3	1.319
Mix Monoverbrennung und Zementment, da H2O-Gehalt 70 %	CO2-Eq/kg	0.099
Substitution Wärmeenergie Schweiz	CO2-Eq/MJ	0.073

## **Anhang 3**

### **Report Quantis: Energie und CO<sub>2</sub>-Bilanzen**

# **Critical review “Klärschlammensorgung Graubünden”**

## **Variantenstudie Besprechung Phase 1**



Prepared for:  
**HOLINGER**  
Kasthoferstrasse 23  
3000 Berne 31  
28.09.2011

## **FINAL REPORT**

Author: Arnaud Dauriat (Project Manager)  
[arnaud.dauriat@quantis-intl.com](mailto:arnaud.dauriat@quantis-intl.com)

# Table of contents

<b>1</b>	<b>Context</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Critical review</b>	<b>3</b>
2.1	System definition	3
2.2	Energy balance	3
<b>3</b>	<b>Life Cycle Assessment (LCA)</b>	<b>3</b>
3.1	Goal and scope of the study	3
3.2	Life Cycle Inventory (LCI)	4
3.2.1	Life cycle inventory database	4
3.2.2	Modelling of dewatered sludge drying	4
3.2.3	Modelling of transport processes	4
3.2.4	Modelling of incineration	4
3.2.5	Modelling of wastewater treatment	5
3.2.6	Reference heat and electricity production	5
3.3	Environmental criteria and impact assessment methods	5
3.3.1	CED method	5
3.3.2	IPCC method	5
3.4	Results	6
3.4.1	Consumption of non-renewable primary energy	6
3.4.2	GHG emissions	7
3.5	Interpretation	8
<b>4</b>	<b>Conclusions and recommendations</b>	<b>8</b>

## 1 Context

Holinger A.G. has been evaluating various options regarding sewage sludge disposal in the Canton of Graubünden and shall present the results to the Cantonal Authorities by the end of September 2011. At this point of the project, Holinger A.G. has detailed the economics, the technical characteristics, the logistics and the energy balance (in terms of final energy) of seven (7) scenarios. In addition, Holinger A.G. would like to include non-renewable primary energy consumption and greenhouse gas (GHG) emission data to characterize the environmental impact of the scenarios.

The contents of the present report refer to the study "Klärschlammensorgung Graubünden: Variantenstudie, Besprechung Phase 1" (hereafter "the study"), prepared by Holinger A.G. for the Canton of Graubünden. More particularly, the various comments and calculations provided in the present document refer to the flow diagrams, i.e. mass balance (MB) and energy balance (EB), provided by Mr David Salzgeber (Holinger A.G.) as an Excel file ("Klärschlamm Graubünden\_EnergieCO2\_Bilanzen.xlsx") on 20 September 2011 and the two subsequent updates (on the same date and on 21 September 2011).

## 2 Critical review

### 2.1 System definition

Although the definition and boundaries of the system may be appropriate for the economic analysis performed within the study, the latter cannot be applied as such for Life Cycle Assessment (LCA) purposes. In order to allow the comparison between the various scenarios, indeed, the corresponding systems need to provide the same exact services (i.e. to have the same function). In other words, the various systems need to deal with the same amount of “dewatered sludge” (“Klärschlamm entwässert”) which is ok, but need also to provide the same service in terms of wastewater treatment and possible energy supply.

The systems for LCA purposes should therefore include the following processes in all cases:

- drying of the dewatered sludge and incineration of the dried sludge (possibly combined into a single step of dewatered sludge incineration)
- possible transport of the dried sludge between the drying and the incineration stages
- complete wastewater treatment (WWT) resulting from the drying and/or incineration processes (down to clean water)
- possible substitution of reference energy supply (when the heat from incineration is actually valorised)

### 2.2 Energy balance

Given the little information available regarding the drying and incineration processes involved in the various scenarios, it is not possible to validate the energy consumption at the various stages. The calculations performed by Holinger A.G., however, seem to be of the correct order of magnitude and do not show any evident mistake. As the energy balance proves to have a significant effect on the LCA results, the figures should however be validated (if this is not already the case) by the various economic actors or technology providers concerned.

## 3 Life Cycle Assessment (LCA)

As agreed in the offer, the input and output data (i.e. final energy consumption, transport and wastewater treatment, as well as possible energy output) were taken as provided by Holinger A.G. At this stage of the project (i.e. “Besprechung Phase 1”), the level of detail of the input and output data (and therefore of the LCA) is considered to be that of a screening approach. The LCA was performed by Quantis based on the flowcharts (one per scenario) provided by Holinger A.G., taking into account the comments above regarding system definition.

### 3.1 Goal and scope of the study

The goal of the present LCA is to compare, from an environmental point of view, five (5) scenarios (including various alternatives for some scenarios) regarding the treatment and elimination of dewatered sludge in the Canton of Graubünden:

- **Scenario 1:** Drying at the WWTP in Chur, incineration in a cement plant (Untervaz)
- **Scenario 2:** Drying at a new location (3 options: Untervaz, Trimmis or Domat Ems), incineration in a cement plant (Untervaz)
- **Scenario 4:** Independent mono-incineration in Graubünden (3 options: Chur, Trimmis or Domat/Ems)
- **Scenario 5:** Independent mono-incineration in another Canton (2 options: Bazenheid or Zürich), transport of the dewatered sludge by train
- **Scenario 7:** Hydrothermal carbonisation (HTC) and subsequent dedicated incineration of biocoal in Trimmis

The systems under study are focused on dewatered sludge treatment and incineration. The main function of the system is therefore to treat dewatered sludge. As a result, the functional unit shall refer to a fixed volume or mass of dewatered sludge to be treated (in the present case 15'000 t of dewatered sludge). For practical reasons, the functional unit is defined as one year of operation, corresponding to a fixed volume of 15'000 t of dewatered sludge regardless of the scenario.

## 3.2 Life Cycle Inventory (LCI)

### 3.2.1 Life cycle inventory database

The life cycle inventory database used in the present study is ecoinvent v2.2 (2010)<sup>1</sup>. Developed by the Swiss Centre for Life Cycle Inventories, ecoinvent is indeed the reference LCI database in Switzerland, and is also widely used at the international level.

### 3.2.2 Modelling of dewatered sludge drying

The modelling of the drying process is based on the electrical and thermal energy use, as provided by Holinger A.G. in the flow diagrams. Depending on the energy agents used, processes from the ecoinvent database include:

- “biogas, burned in cogen with gas engine”, CH, [MJ] (#135), adapted to take “biogas, from sewage sludge, at regional storage”, CH, [Nm3] (#6165) as the main input (instead of “biogas, production mix, at storage”, CH, [Nm3] (#6169))
- “natural gas, burned in industrial furnace >100kW”, RER, [MJ] (#1363)
- “electricity, low voltage, at grid”, CH, [kWh] (#752)
- waste heat (e.g. from clinker cooling in scenario 2) is considered to have a zero impact

### 3.2.3 Modelling of transport processes

Depending on the mode of transport used, transport processes from the ecoinvent database include:

- transport, lorry 20-28t, fleet average, CH, [tkm] (#1942)
- transport, freight, rail, CH, [tkm] (#1984)

### 3.2.4 Modelling of incineration

Depending on the scenario, incineration applies to dried sludge (scenarios 1-2), dewatered sludge (scenarios 4-5) or biocoal (scenario 7).

The modelling of the incineration process is based on a spreadsheet model provided in the ecoinvent database<sup>2</sup>. Based on a user-defined elemental composition of the waste to be incinerated, the model provides a complete ecoinvent-compatible inventory of waste-specific incineration. The composition of the waste input in the present study (i.e. dried sludge, dewatered sludge or biocoal) was adapted from the pre-defined composition of “digester sludge”, as characterized in the ecoinvent database and model mentioned above. The composition was adapted in order to match the actual water content in all the scenarios.

The incineration process as characterized in the ecoinvent database (and therefore in the present study) includes the following processes:

- infrastructure for the incineration plant
- process energy consumption for waste incineration
- auxiliary material consumption for flue gas cleaning
- waste-specific air and water emissions from incineration
- emissions to water from slag compartment, and residual material landfill

<sup>1</sup> ecoinvent (2010). ecoinvent Centre, ecoinvent data v2.2, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH.

<sup>2</sup> Calculation tool for waste disposal in municipal solid waste incinerators (2008). Doka Life Cycle Assessment, Zürich, CH.

### 3.2.5 Modelling of wastewater treatment

Like incineration, the modelling of wastewater treatment is based on a spreadsheet model provided in the ecoinvent database<sup>3</sup>. Based on a user-defined composition of the wastewater to be treated, the model provides a complete specific ecoinvent-compatible inventory of wastewater treatment. The composition of the wastewater in the present study was adapted from the pre-defined composition of “sewage water”, as characterized in the ecoinvent database and model mentioned above. The composition was adapted in order to match the actual COD and BOD content in all the scenarios.

### 3.2.6 Reference heat and electricity production

The reference heat production is based on the average mix of energy agents for heat production in industry and services in Switzerland. Market shares of individual energy agents are from the Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2009<sup>4</sup>. Energy agents include 45.9% fuel oil, 33.3% natural gas, 3.5% coal, 9.1% wood, 6.3% municipal and industrial waste, and 2.0% other renewables. Wood was divided arbitrarily into 50% wood from industry and 50% wood from forests. Other renewables were added to municipal and industrial waste, and divided arbitrarily into waste and biowaste.

The reference electricity production is based on the average Swiss supply mix, including domestic production, imports and exports of electricity.

## 3.3 Environmental criteria and impact assessment methods

The environmental impact of dewatered sludge treatment and elimination is evaluated according to two impact assessment methods:

- **consumption of non-renewable primary energy** according to the “Cumulative Energy Demand” (CED) method
- **greenhouse gas (GHG) emissions** according to the “IPCC 2007 (100a)” (IPCC) method

### 3.3.1 CED method

The CED method aims to investigate the energy use throughout the life cycle of a product, process or service. This includes the direct uses as well as the indirect (or so-called “grey”) consumption of energy due to the use of, e.g. construction materials or raw materials. It is often considered as the method of reference when energy aspects are concerned. The impacts are expressed in MJ of non-renewable primary energy (MJ<sub>p</sub>).

### 3.3.2 IPCC method

The characterization of different gaseous emissions according to their global warming potential and the aggregation of different emissions in the impact category “climate change” is one of the most widely used methods in LCIA. The characterization values for greenhouse gas (GHG) emissions are based on global warming potentials (GWP) published by the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), here IPCC’s Fourth Assessment Report<sup>5</sup> (IPCC 2007). The time horizon used to evaluate the effects of the lifetime of GHG in the atmosphere is 100 years. The reference GHG is carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and the aggregate impact is expressed in kilograms of CO<sub>2</sub> equivalent (kg CO<sub>2</sub> eq.).

<sup>3</sup> Calculation Tool for Municipal Wastewater Treatment Plant WWTP (2008). oka Life Cycle Assessment, Zürich, CH.

<sup>4</sup> SFOE, 2010. Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2009.

<sup>5</sup> IPCC (2007). Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

### 3.4 Results

The energy output from the incineration process varies from one scenario to another. Depending on the scenario and the location of the various processes, the energy output may be valued as useful energy or not. In cases where output energy is actually valued outside the system, it is considered that this (thermal) output energy replaces reference heat (see chapter 3.2.6) except in scenarios 1-2 where output energy replaces coal.

Because it is difficult to know in advance whether the output energy will actually be valued or not, both situations are considered in each scenario. The most likely situation in each case is indicated.

The results are expressed in quantities of impact per year (corresponding to a fixed quantity of dewatered sludge to be treated), as explained previously. The contribution of the main components of the system to the environmental impact is indicated explicitly. The main components include:

- transport
- drying process
- incineration process
- wastewater treatment (WWT)
- credit (possible negative impact due to energy substitution when output energy is valued)

#### 3.4.1 Consumption of non-renewable primary energy

The results of the LCA regarding the consumption of non-renewable primary energy (in MJ<sub>p</sub>/yr) are presented in Table 1. The most likely results (according to Holinger A.G.) for each scenario (with output energy being valued or not) are shown in light blue with underlined figures.

**Table 1: Non-renewable primary energy consumption (in MJ<sub>p</sub>/yr) according to the CED method**

Scenarios	Transport	Drying	Incineration	WWT	Total without credit	Credit	Total with credit
Scenario 1	1.61E+05	3.22E+07	6.25E+06	6.61E+04	<b>3.86E+07</b>	-4.93E+07	<b>-1.07E+07</b>
Scenario 2a	1.61E+05	9.49E+06	6.25E+06	7.38E+04	<b>1.60E+07</b>	-4.93E+07	<b>-3.34E+07</b>
Scenario 2b	1.94E+05	9.49E+06	6.25E+06	7.38E+04	<b>1.60E+07</b>	-4.93E+07	<b>-3.33E+07</b>
Scenario 2c	4.84E+05	9.49E+06	6.25E+06	7.38E+04	<b>1.63E+07</b>	-4.93E+07	<b>-3.30E+07</b>
Scenario 4a	0.00E+00	0.00E+00	2.28E+07	6.94E+04	<b>2.29E+07</b>	-8.36E+06	<b>1.45E+07</b>
Scenario 4b	1.78E+05	0.00E+00	2.28E+07	7.75E+04	<b>2.31E+07</b>	-8.36E+06	<b>1.47E+07</b>
Scenario 4c	1.78E+05	0.00E+00	2.28E+07	7.75E+04	<b>2.31E+07</b>	-8.36E+06	<b>1.47E+07</b>
Scenario 5a	8.69E+05	0.00E+00	2.28E+07	6.94E+04	<b>2.38E+07</b>	-8.36E+06	<b>1.54E+07</b>
Scenario 5b	9.94E+05	0.00E+00	2.28E+07	6.32E+04	<b>2.39E+07</b>	-8.36E+06	<b>1.55E+07</b>
Scenario 7	2.61E+05	5.97E+06	4.52E+06	6.97E+05	<b>1.14E+07</b>	-2.74E+07	<b>-1.59E+07</b>

The data presented in Table 1 is illustrated in Figure 1.

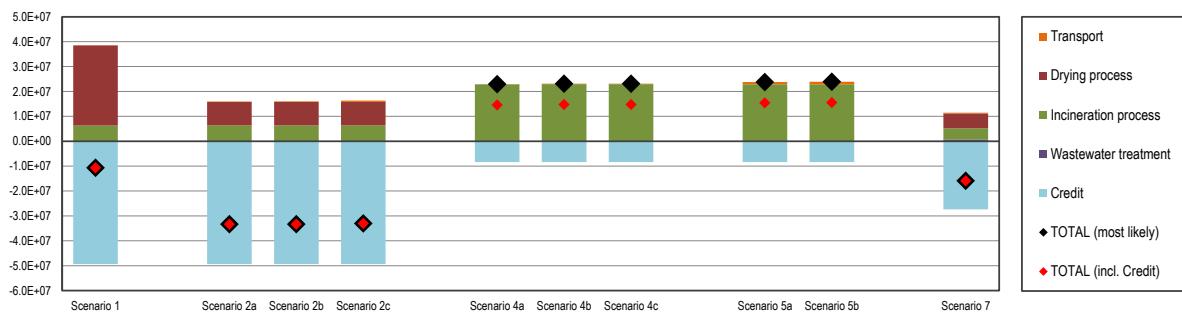


Figure 1: Non-renewable primary energy consumption (in MJ<sub>p</sub>/yr) according to the CED method

### 3.4.2 GHG emissions

The results of the LCA regarding the GHG emissions (in kg CO<sub>2</sub> eq./yr) are presented in Table 2. The most likely results for each scenario (with output energy being valued or not) are shown in light blue with underlined figures.

Table 2: GHG emissions (in kg CO<sub>2</sub> eq./yr) according to the IPCC method

Scenarios	Transport	Drying	Incineration	WWT	Total without credit	Credit	Total with credit
Scenario 1	9.73E+03	1.46E+06	7.21E+05	3.82E+03	<u>2.19E+06</u>	-5.00E+06	<u>-2.80E+06</u>
Scenario 2a	9.73E+03	1.49E+05	7.21E+05	4.50E+03	<u>8.84E+05</u>	-5.00E+06	<u>-4.11E+06</u>
Scenario 2b	1.17E+04	1.49E+05	7.21E+05	4.50E+03	<u>8.86E+05</u>	-5.00E+06	<u>-4.11E+06</u>
Scenario 2c	2.92E+04	1.49E+05	7.21E+05	4.50E+03	<u>9.03E+05</u>	-5.00E+06	<u>-4.10E+06</u>
Scenario 4a	0.00E+00	0.00E+00	1.05E+06	4.01E+03	<u>1.05E+06</u>	-5.44E+05	<u>5.08E+05</u>
Scenario 4b	1.07E+04	0.00E+00	1.05E+06	4.72E+03	<u>1.06E+06</u>	-5.44E+05	<u>5.19E+05</u>
Scenario 4c	1.07E+04	0.00E+00	1.05E+06	4.72E+03	<u>1.06E+06</u>	-5.44E+05	<u>5.19E+05</u>
Scenario 5a	2.24E+04	0.00E+00	1.05E+06	4.01E+03	<u>1.07E+06</u>	-5.44E+05	<u>5.30E+05</u>
Scenario 5b	2.55E+04	0.00E+00	1.05E+06	3.45E+03	<u>1.08E+06</u>	-5.44E+05	<u>5.33E+05</u>
Scenario 7	6.71E+03	2.62E+05	5.14E+05	1.39E+04	<u>7.96E+05</u>	-1.78E+06	<u>-9.88E+05</u>

The data presented in Table 2 is illustrated in Figure 2.

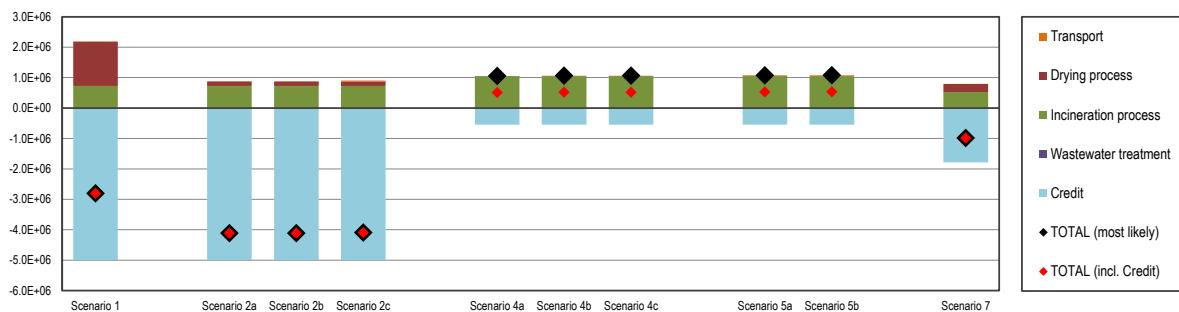


Figure 2: GHG emissions (in kg CO<sub>2</sub> eq./yr) according to the IPCC method

### 3.5 Interpretation

Based on the results presented in Figure 1 and Figure 2, Scenario 2 appears to be the best solution in terms of both the non-renewable primary energy consumption and GHG emissions. This is mainly explained by the fact that the drying process is powered with waste heat with zero impact and by the fact that the output energy is the largest and can actually be valued thereby providing a significant credit to the scenario.

It comes out that the most significant contribution is due to the incineration process and (to a lesser extent for most scenarios) the drying process. In all the scenarios, transport and wastewater treatment appear to be negligible.

In the situation where output energy cannot be valued in any scenario, then scenario 7 (HTC) appears to show the lowest impact, with a better result than scenario 2.

## 4 Conclusions and recommendations

In terms of environmental impact, location alternatives show negligible differences (if any). Transport in general (like WWT) plays a negligible role in the overall impact compared to the drying and incineration processes.

The credit plays a major role in the final impact, thereby emphasizing the necessity to clarify this issue in case environmental impact (limited here to non-renewable primary energy consumption and GHG emissions) could be a deciding criterion. In this situation, both the drying and the incineration processes should be better defined and characterized (e.g. composition of input and output products, performance, energy consumption, etc.) in order to provide a more detailed analysis with a lower uncertainty.

The possible recycling of phosphorous in dedicated incineration facilities (scenarios 4, 5 and 7) was not taken into account (because it refers to future technologies). Such a technology could have an effect on the environmental performance of the various scenarios, and one should check how the recycling of phosphorous would impact the results.

Other technological solutions (e.g. anaerobic fermentation of the dewatered sludge for biogas production, combined heat and power production in dedicated incineration plants, etc.) could also be of some interest and could possibly have an effect regarding the environmental benefit of the various scenarios (or yet constitute other scenarios).

Finally, the most likely situation in scenarios 4 and 5 is that the energy output is not valued outside the system. Given the fact that the location of the dedicated incinerator is somehow open, the latter should really be chosen so that the energy output can be valorised. Indeed, the effect on the environmental impact is the most significant of all the contributions.

# Variantenstudie Phase 2

## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung und Fazit .....	2
1 Variante 5: Export nach Bazenheid .....	4
1.1 Logistik .....	4
1.2 Kosten .....	5
1.2.1 Investitionskosten .....	5
1.2.2 Betriebskosten .....	6
1.2.3 Jahreskosten .....	6
2 Variante 7: Hydrothermale Carbonisierung .....	7
2.1 AVA-CO2 .....	7
2.1.1 Verfahren .....	7
2.1.2 Prozesswasser .....	8
2.1.3 Pilotanlagen .....	9
2.1.4 Erfahrungen mit Klärschlamm .....	10
2.1.5 Erwartete Ausbeute .....	10
2.2 TerraNova Energy .....	11
2.2.1 Verfahren .....	11
2.2.2 Prozesswasser .....	12
2.2.3 Pilotanlage .....	13
2.2.4 Erfahrungen / Referenzen .....	13
2.2.5 Erwartete Ausbeute .....	14
2.3 Vergleich beider Firmen .....	14
2.4 Verwertung der Biokohle .....	16
2.4.1 Verwertung als Bodenverbesserer .....	16
2.4.2 Verwertung als Brennstoff .....	16
2.4.3 Verwertung in einer Vergasung .....	16

## Zusammenfassung und Fazit

In der ersten Phase der Variantenstudie Klärschlammensorgung Graubünden wurden 7 Varianten für die zukünftige Klärschlammensorgung des Kantons Graubünden vertieft untersucht. Zusammen mit dem Amt für Natur und Umwelt (ANU) des Kantons Graubünden wurden, basierend auf diesem ersten Bericht, drei Varianten bestimmt, die für die zukünftige Klärschlammensorgung in Frage kommen. Diese sind:

Variante 1: Status Quo mit Trocknung in Chur und Verbrennung im Zementwerk

Variante 5: a) Export des Klärschlammes in die Monoverbrennung Bazenheid (ZAB)

Variante 7: Hydrothermale Carbonisierung (HTC) des Klärschlammes

Zu Variante 1 wurden keine vertieften Abklärungen durchgeführt. Die Betreiber der heutigen Trocknung in Chur (TRAC) können die Massnahmen für den künftigen Betrieb der TRAC gut abschätzen.

Zu Variante 5a mit dem Export des Klärschlammes konnten in weiterführenden Abklärungen mit dem Betreiber der Monoverbrennung in Bazenheid und den verantwortlichen Transportunternehmen ein genaueres Bild des Klärschlammexports gezeichnet werden. Die in diesem Bericht vorgeschlagene Lösung sollte aber nicht als logistisch einzig machbare Variante betrachtet werden. Sollte die ausserkantonale Exportvariante aktuell werden, muss mit den einzelnen Kläranlagen, sowie den involvierten Transportunternehmen die Koordination der Bahnexporte einzeln betrachtet werden. Für eine Abschätzung der Kosten reichen die durchgeführten Abklärungen durchaus.

Im Rahmen der zusätzlichen Abklärungen zur Variante 7 wurden zwei Anbieter der HTC-Technologie in Deutschland besucht und deren Anlagen, resp. Pilotanlagen besichtigt. Nach wie vor liegen relativ wenige Erfahrungswerte bezüglich der Anwendung der hydrothermalen Carbonisierung mit Klärschlamm vor. Mit der Besichtigung der Anlage der TerraNova Energy in Kaiserslautern konnte eine interessante (nicht zuletzt preisliche) Alternative zum Angebot der AVA-CO2 dazugewonnen werden. Auch in der Schweiz werden künftig weitere Erfahrungen mit der HTC-Technologie gesammelt. Gemäss unserem Informationsstand, hat sich beispielsweise die ARA Oftringen entschieden, ihren Klärschlamm künftig mit der HTC-Technologie zu verkohlen und 2012 im Rahmen eines Ideenwettbewerbs weitergehende Abklärungen mit unterschiedlichen Anbietern anzustreben.

Die zusätzlichen Abklärungen dieses zweiten Berichts kommen zusammengefasst zum gleichen Schluss, welcher bereits in der ersten Phase gezogen werden konnte. Der Status Quo mit der Trocknung in Chur und der Abgabe im Zementwerk ist momentan die günstigste Lösung und ist, solange die Technische Verordnung über Abfälle (TVA) nicht geändert wird, auch ökologisch eine sinnvolle Variante. Mit der HTC-Technologie liegt ein Verfahren vor, zu welchem in wenigen Jahren weit mehr Informationen vorliegen werden, und eventuell zusätzliche Anbieter sich am Markt beteiligen. Als weiterhin komfortable Option kommt die Möglichkeit des Exports in eine Monoverbrennung dazu.

Innerhalb der heutigen Diskussionen um die zukünftige Energiepolitik der Schweiz sollte nicht unterschätzt werden, dass der Klärschlamm auch ein wertvoller Energieträger ist. Die Energiebilanzen, die im Rahmen des ersten Berichts erarbeitet wurden weisen hierbei klar auf, mit welchen Technologien die grössten Energieeinsparungen erzielt werden können.

# 1 Variante 5: Export nach Bazenheid

Die Exportvariante nach Bazenheid ist gemäss dem Bericht "KlärschlammSORung Graubünden; Variantenstudie: Phase 1" die langfristig günstigste Variante um den Klärschlamm zu entsorgen, respektive zu verwerten. In den weitergehenden Abklärungen der zweiten Phase sollen die Investitions- und Betriebskosten, sowie Details zur Logistik genauer geklärt werden.

## 1.1 Logistik

Die KVA Bazenheid hat einen Bahnanschluss und nimmt bereits heute Kehricht auf dem Bahnweg an. Die Anlage hat einen eigenen Gleisanschluss womit ein Weitertransport von Bahnhof zu KVA entfällt. Auch würde der Endtransport ab Gleisanschluss durch die KVA-Mitarbeitenden erfolgen und ist im angegebenen Preis für die Schlammabgabe in der KVA Bazenheid inbegriffen.

Auf der KVA Bazenheid besteht zurzeit keine grosse, zusätzliche Stapelkapazität für Klärschlamm. Demzufolge muss der Transport in regelmässigen Abständen erfolgen. Die KVA empfiehlt wöchentliche Transporte à 300 Tonnen<sup>1</sup>. Die Firma ACTS AG bevorzugt ebenfalls diese Lösung, das heisst eine wöchentliche Lieferung mit jeweils einer Zugskomposition.

Die erste Phase ging von der Annahme aus, dass der Klärschlamm, wie bisher mit dem LKW angeliefert in Chur angenommen und von dort weitertransportiert wird. Auch ging die erste Phase davon aus, dass der bereits heute per Bahn angelieferte Schlamm in Landquart von den Schmalspurwagen der Rhätischen Bahn (RhB) auf die Normalspurwagen der SBB umgeladen wird.

Für den Schlamm aus ARAs der heute via Landquart nach Chur gelangt, macht ein Umschlag in Chur geographisch keinen Sinn. Vorgesehen wird deshalb, den Schlamm dieser ARAs direkt nach Landquart zur Verladung auf das SBB-Schienennetz zu bringen. Der restliche Schlamm des Kantons kann wie bisher in Chur angenommen und von dort in ACTS-Mulden per LKW zur Verladestation in Landquart gebracht werden. Für den Schlammumschlag in Chur kann allerdings nicht, wie in der ersten Phase vorgesehen, das bestehende Schlammsilo für den Verlad in die ACTS-Container genutzt werden. Neu, wird eine gedeckte Halle für den Schlammumschlag vorgesehen, in der Klärschlamm in Mulden zwischengelagert werden kann.

Um eine wöchentliche Lieferung von 300 Tonnen zu ermöglichen, muss der Umschlag in Landquart mit den Lieferungen der RhB und dem Schlamm, der in Chur angenommen wird, entsprechend koordiniert werden. Auf einen exakten Vorschlag wird in diesem Bericht verzichtet. Zusammen mit den ARA's und den Transportunternehmen muss im Falle einer Realisation dieser Variante die Logistik und die Verrechnung der Schlammengen nach einer Lösung gesucht werden.

---

<sup>1</sup> Infos aus Email vom 12. Dezember 2011 von C. Bianculli, Vorsitzender der Geschäftsleitung Zweckverband Abfallverwertung Bazenheid (ZAB))

Tabelle 1 zeigt die Aufteilung des Schlamms auf die beiden Umschlagplätze. Die Daten stammen aus dem Jahr 2010<sup>2</sup>.

**Tabelle 1: Aufteilung der Klärschlammengen auf Umladung direkt in Landquart und Umschlag in Chur**

## 1.2 Kosten

### 1.2.1 Investitionskosten

Für die Umstellung des Schlammtransports in den ARAs, die neu in Landquart direkt auf die SBB-Wagen verladen, sind keine signifikanten Investitionen notwendig.

Investitionen fallen einzig in Chur an, wo der Schlammumschlag neu organisiert werden muss. In Absprache mit dem Betriebsleiter der ARA Chur können die Investitions- und Betriebskosten des Schlammumschlags wie in Tabelle 2, resp. Tabelle 3 abgeschätzt werden.

<sup>2</sup> Städteverwaltung Chur, (2010). Klärschlamm Trocknungsanlage TRAC, Jahresbericht 2010

Tabelle 2: Investitionskosten für neue Schlammumschlagshalle

<b>Neuinvestitionen</b>	
Erstellung Schlammumschlagshalle	CHF 1'000'000
<b>Total Investitionen</b>	<b>CHF 1'000'000</b>

Die Mulden für den Schlammtransport werden von der ACTS AG zur Verfügung gestellt.

### 1.2.2 Betriebskosten

Betriebskosten fallen nur für den Schlammumschlag in Chur an.

Tabelle 3: Betriebskosten Schlammumschlag in Chur

<b>Betriebskosten Schlammumschlag</b>	
<b>Unterhaltskosten und Betrieb</b>	<b>CHF/a 120'000</b>

### 1.2.3 Jahreskosten

Die Jahreskosten können Tabelle 4 entnommen werden. Die Kosten für den Bahntransport stammen aus der Offerte der ACTS AG vom 11.Oktober 2011. Die Kosten pro Tonne entsorgten Klärschlamm unterscheiden sich mit 139.9 CHF/t Klärschlamm nur unwesentlich von den in der ersten Phase berechneten Kosten von 142.9 CHF/t Klärschlamm. Grund für die leicht tieferen Kosten sind die leicht veränderten Investitionskosten.

Tabelle 4: Jahreskosten für die Exportvariante in die KVA Bazenheid

<b>Neuinvestitionen</b>	
Erstellung Schlammumschlagshalle	
<b>Total Investitionen</b>	<b>CHF/a 86'825</b>
<b>Betriebskosten Schlammumschlag</b>	
Unterhaltskosten und Betrieb	<b>CHF/a 120'000</b>
<b>Transportkosten</b>	
Schlammtransport	t/a 15'000
Transportkosten Landquart-Bazenheid	CHF/t 29
Transportkosten Bahn	<b>CHF/a 435'000</b>
LKW-Transport Chur-Landquart	t/a 8'500
Kosten LKW-Transport	CHF/t 8
Transportkosten LKW	<b>CHF/a 68'000</b>
<b>Abgabekosten Endverwerter</b>	
Schlammmenge	t/a 15'000
Abgabekosten ZAB	CHF/t 90
Kosten Entsorgung	<b>CHF/a 1'350'000</b>
<b>Total Jahreskosten</b>	
<b>Jahreskosten</b>	<b>CHF/a 2'098'452</b>
<b>Kosten pro t Klärschlamm</b>	<b>CHF/t KS 139.9</b>

## 2 Variante 7: Hydrothermale Carbonisierung

Die zusätzlichen Informationen in diesem Kapitel stammen im Wesentlichen aus der Besichtigung der Pilotanlagen der AVA-CO<sub>2</sub> in Karlsruhe und der TerraNova Energy in Kaiserslautern. Im Zuge von Abklärungen für ein anderes Projekt (Klärschlammverwertung ARA Oftringen) hat HOLINGER Luzern einen Besuch bei diesen zwei Anbietern in Deutschland organisiert. Zusammen mit einer Delegation von HOLINGER Luzern und dem Betriebsleiter der ARA Oftringen, besuchten Herr Thomas Maron vom ANU Graubünden und Herr David Salzgeber HOLINGER Bern am 18. November 2011 die beiden Anlagen in Deutschland.

### 2.1 AVA-CO<sub>2</sub>

Die AVA-CO<sub>2</sub> AG ist ein international tätiges Unternehmen mit Hauptsitz in Zug und einem Standort für Pilotversuche in Karlsruhe. Die AVA-CO<sub>2</sub> ist ein relativ junges Unternehmen mit dem ehrgeizigen Ziel, der weltweit führende Anbieter von Anlagen zur hydrothermalen Carbonisierung (HTC) zu sein<sup>3</sup>.

#### 2.1.1 Verfahren

In

Abbildung 1 ist das Verfahren der AVA-CO<sub>2</sub> schematisch dargestellt:

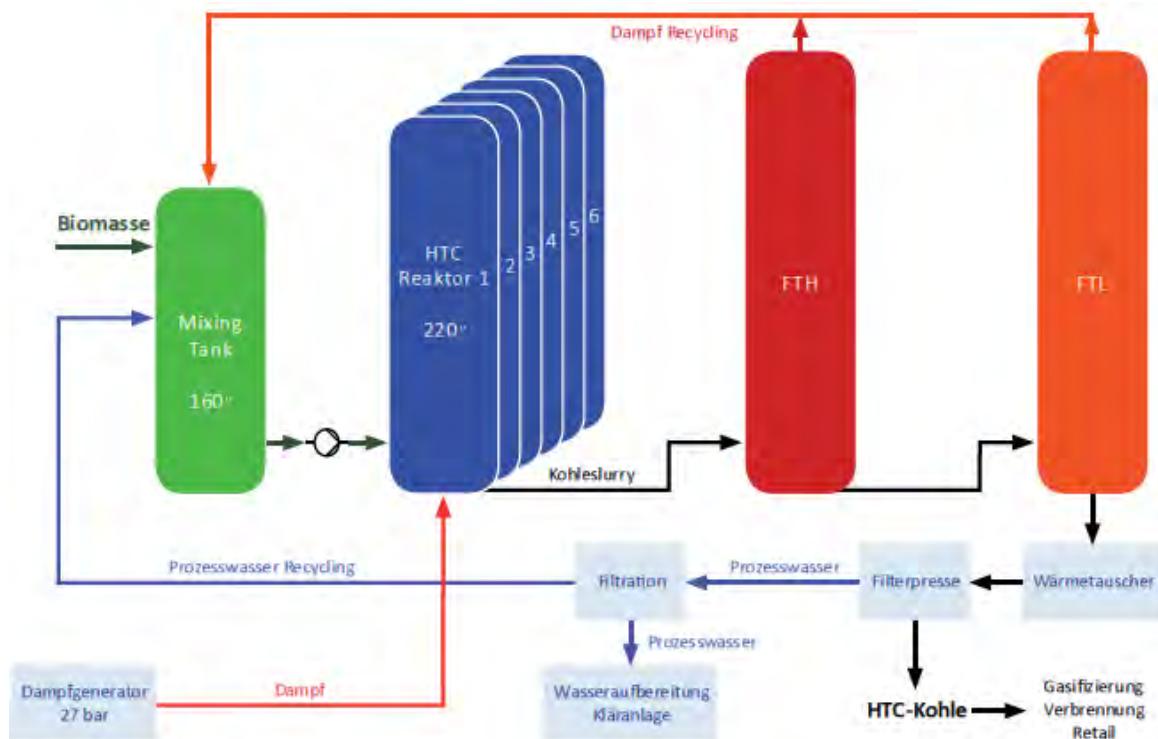


Abbildung 1: Schematische Darstellung HTC-Verfahren AVA-CO<sub>2</sub> (Quelle: AVA-CO<sub>2</sub>).

<sup>3</sup> Mehr Infos unter [www.ava-co2.com](http://www.ava-co2.com)

Die AVA-CO2 HTC-Anlage arbeitet in einem „multi-batch“ Verfahren. Der eigentliche HTC-Prozess findet als Batch-Prozess statt. Allerdings wird durch den Durchmischungstank und die Flash Tanks ein quasikontinuierlicher Betrieb ermöglicht.

Zuerst wird die Biomasse dem Durchmischungstank zugeführt, in welchem er aufbereitet und vorgewärmt wird. Die vorgeheizte Biomasse wird anschliessend im Batch-Verfahren in die HTC-Reaktoren gepumpt. Im HTC-Reaktor wird die Biomasse bei einer Temperatur von 220 °C, einem Druck von ca. 25 bar und einer Verweilzeit von 4 – 5 h karbonisiert. Das Aufheizen der Biomasse erfolgt durch direktes Dampfleinblasen. Nach Abschluss der HTC-Reaktion wird die karbonisierte Biomasse schrittweise in den beiden Flash Tanks entspannt. Dabei wird Dampf in den Mischungstank rezykliert, um die Biomasse vorzuwärmen.

Der Biokohleschlamm wird anschliessend über einen Wärmetauscher einer Filterpresse zugeführt. Mittels der Filterpresse kann die Biokohle auf einen TS-Gehalt von ca. 70% entwässert werden. Falls die Biokohle für die weitere Verwertung thermisch weiter getrocknet werden muss, kann dafür gegebenenfalls die Abwärme des HTC-Prozesses genutzt werden (z.B. Bandtrockner).



Abbildung 2: Biokohle aus der HTC-0 Anlage der AVA-CO2 (Substrat Biertrieber)

### 2.1.2 Prozesswasser

Das Prozessabwasser wird nach der Filterpresse über eine Filtration und Separation geführt. Anschliessend wird ein Teil des Prozessabwassers in den HTC-Prozess (Mischungstank) zurückgeführt (min. 30%). Durch die Rückführung kann einerseits die Biokohleausbeute erhöht (Rückführung von Kohlenstoff und organischen Säuren) und die Belastung im Abwasser reduziert werden.

Der restliche Anteil des Prozessabwassers muss zur Aufbereitung in die Kläranlage geleitet werden. Ohne Behandlung des Prozesswassers muss mit einem sehr stark

belasteten Abwasser gerechnet werden. Gemäss der Studie der ZHAW<sup>4</sup> muss mit Konzentrationen von bis zu 50'000 mg CSB/l sowie mit einem hohen Stickstoff und Phenolgehalt gerechnet werden.

Die AVA-CO2 arbeitet zurzeit an einem Aufbereitungssystem für das Prozessabwasser, welches aber aus patentrechtlichen Gründen noch nicht fundierter vorgestellt werden kann. Einzige momentan zugängliche Angabe ist, dass mit Konzentrationen von weniger als 2'500 mg CSB/l und 1'000 mg TOC/l im aufgereinigten Prozesswasser zu rechnen ist. Momentan sind diese Angaben noch mit Vorsicht zu betrachten, da die Bestätigung in der Praxis aussteht.

### 2.1.3 Pilotanlagen

AVA-CO2 befasst sich allgemein mit der hydrothermalen Carbonisierung von Biomasse. Die grösste Erfahrung hat die AVA-CO2 hauptsächlich mit der Carbonisierung von Biertrebern, Rübenschitzel, sowie Schilf und anderem pflanzlichem Materialien. Die AVA-CO2 betreibt in Karlsruhe zurzeit zwei Testanlagen, in welchen neue Substrate für die Carbonisierung getestet werden können:

- Kleine Pilotanlage (K3-335) um die Carbonisierung einer Biomasse mit relativ kleiner Menge zu untersuchen.
- Testanlage im industriellen Massstab (HTC-0), um das gesamte HTC-Verfahren (inkl. Wärmerückführung) zu testen. Die Testanlage besteht aus einem Mischungstank, einem HTC-Reaktor und einem Flash Tank. Die Tankgrössen sind auf diese Ausmasse genormt und würden auch in einer industriellen Anlage diese Grösse besitzen.

Abbildung 3 zeigt die die Pilotanlage K3-335 und Abbildung 4 zeigt die HTC-Anlage im Industriemassstab.



Abbildung 3: Pilotanlage K3-335 für Versuche mit kleineren Volumen

<sup>4</sup> Machbarkeitsstudie BAFU, Schlussbericht: Hydrothermale Carbonisierung von Klärschlamm der ZHAW (Zürcher Fachhochschule für angewandte Wissenschaften), Abteilung IUNR (Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen), 2011



Abbildung 4: Testanlage HTC-0 im Industriemassstab der AVA-CO2 (Quelle: AVA-CO2)

#### 2.1.4 Erfahrungen mit Klärschlamm

Versuche mit Klärschlamm wurden bis anhin nur in der kleinen Pilotanlage durchgeführt. Dabei wurde Klärschlamm der ARA Kaiserslautern verwendet. Noch im Dezember 2011 sollen Versuche mit ausgefaultem Klärschlamm der ARA Bern in der kleineren Anlage durchgeführt werden. Im Februar 2012 sollen dann weitere Versuche auf der grossen Testanlage mit Klärschlamm der ARA Bern durchgeführt werden. Die dabei erzeugte Biokohle aus Klärschlamm soll anschliessend für Feuerungsexperimente in der Zementindustrie verwendet werden (Zementwerk Siggenthal, TS-Gehalt Biokohle:  $\approx 75\%$  (ohne thermische Trocknung)). Hintergrund dieser Versuche ist die Erneuerung der Schlammbehandlung auf der ARA Bern. Die Resultate dieser Versuche werden weitere Erkenntnisse über die Eignung des HTC-Verfahrens der AVA-CO2 für die Carbonisierung von Klärschlamm liefern.

Eine Vollmassstabsanlage ist zurzeit in Norddeutschland im Bau. Als Substrat werden hier allerdings Biertreber, und zu einem späteren Zeitpunkt weitere pflanzliche Substrate eingesetzt. Die weiteren Betriebserfahrungen basieren auf den Erkenntnissen aus den beschriebenen, zwei Pilotanlagen.

#### 2.1.5 Erwartete Ausbeute

Gemäss AVA-CO<sub>2</sub> befindet sich nach dem HTC-Prozess bis 88% der im Ausgangssubstrat enthaltenen Energie in der produzierten Biokohle (Optimierungsziel: 94%). Die von der HOLINGER AG im Bericht "Klärschlammbehandlung Graubünden: Variantenstudie Phase 1" ermittelte Energiebilanz gibt dieselbe Ausbeute mit 70% an. Grundlage der Berechnungen von HOLINGER waren die gemessenen Heizwertanalysen aus der erwähnten Studie der ZHAW. Wir weisen bei diesen Betrachtungen darauf hin, dass ohne Versuche mit ausgefaultem Klärschlamm im Vollmassstab sämtliche Ausbeuteschätzungen kritisch zu hinterfragen sind.

## 2.2 TerraNova Energy

Die TerraNova Energy GmbH mit Sitz in Düsseldorf befasst sich seit 2007 mit der hydrothermalen Carbonisierung. Die TerraNova arbeitet eng mit Hochschulinstituten zusammen und zählt sich zu den national und international führenden Unternehmen im Bereich der hydrothermalen Carbonisierung<sup>5</sup>.

## 2.2.1 Verfahren

Die hydrothermale Carbonisierung findet im System der TerraNova in einem kontinuierlichen Prozess statt. In Abbildung 5 ist das Verfahren der TerraNova im Verfahrensfließbild dargestellt, während Abbildung 6 den Reaktor zusammen mit dem vorgesetzten Wärmetauscher zeigt.

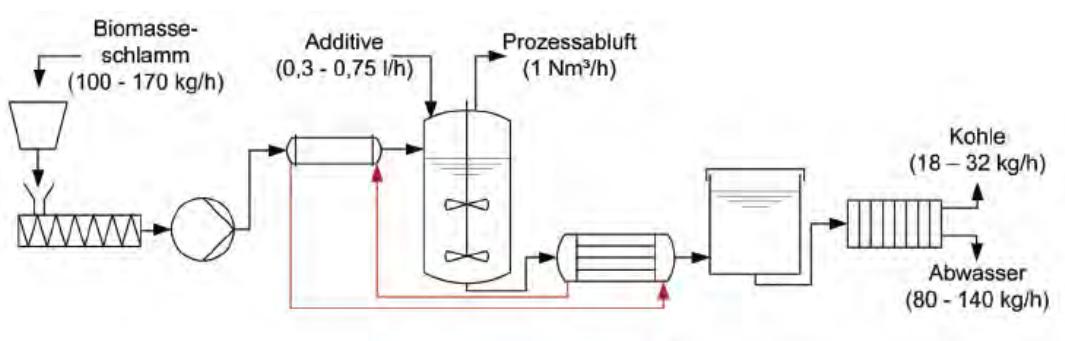


Abbildung 5: HTC-Verfahren TerraNova (Quelle: TerraNova Energy)



Abbildung 6: Animation des TerraNova HTC-Reaktors (Quelle: TerraNova Energy)

Der pumpfähige Klärschlamm (TS-Gehalt  $\leq 30\%$ ) wird in einen Vorlagetrichter eingebracht. Mittels einer bei Umgebungstemperatur betriebener Pumpe wird der Klärschlamm kontinuierlich in den Eintragswärmetauscher gefördert. Der Wärmetauscher wird im Gegenstrom mit Thermoöl betrieben. Vor dem Eintritt in den Reaktor werden dem Klärschlamm Zusatzstoffe wie Säuren und Salze zugegeben. Ziel dieser katalytischen Additive ist die Beschleunigung des HTC-Prozesses.

<sup>5</sup> Mehr Infos unter [www.terranova-energy.com](http://www.terranova-energy.com)

Im Reaktor findet die hydrothermale Carbonisierung bei ca. 200 °C und 20 – 25 bar statt. Der HTC-Reaktor ist mit einem langsam laufenden Rührwerk ausgestattet, wodurch eine Rückvermischung der frischen Biomasse mit den während der Reaktion frei werdenden organischen Säuren erfolgt. Dadurch kann die Reaktion beschleunigt und der pH-Wert im sauren Bereich gehalten werden, wodurch der Bedarf an extern zugeführter Säure vermindert wird.

Der kontinuierliche Abzug des Reaktionsgemisches erfolgt im unteren Teil des Reaktors. Die mittlere Aufenthaltszeit im Reaktor beträgt 2 – 4 Stunden, welche durch die Fördergeschwindigkeit der Dickstoffpumpe eingestellt werden kann. Im Ausstragswärmetauscher wird die Biokohle abgekühlt und die Wärme über den Thermoölkreislauf dem frischen zu karbonisierenden Klärschlamm zugeführt.

Mittels einer Kammerfilterpresse wird der Biokohleschlamm auf einen TS-Gehalt von bis zu 70% entwässert. Gegebenenfalls kann die entwässerte Biokohle auch weiter getrocknet (z.B. mittels Bandrockner) wie auch pelletiert werden. Bezuglich Pelletierung besteht bei der Firma TerraNova bereits Erfahrung aufgrund mehrerer Versuchen mit unterschiedlichen Anbietern.



Abbildung 7: Biokohle aus Klärschlamm aus dem HTC-Reaktor der TerraNova nach der Kammerfilterpresse

### 2.2.2 Prozesswasser

Das Prozesswasser im System der TerraNova ist sehr stark organisch belastet. Um die Belastung durch das in die Kläranlage rückgeführte Wasser zu vermindern, entwickelt TerraNova ein Recycling System. Dieses Recycling System befindet sich momentan in der Patentierungsphase, weshalb momentan keine näheren Informationen über das System veröffentlicht werden können.

Gemäss TerraNova kann mit dem Recycling System das Prozesswasser auf Konzentrationen von ca. 38'000 mg CSB/l und 6'000 mg N/l gereinigt werden. Ausser-

dem sollen die Trübstoffe aus dem Prozesswasser entfernt werden können. Mit der Weiterentwicklung dieses Systems erhofft sich die TerraNova zukünftig weitere Verminderung der Prozesswasserbelastung.

### 2.2.3 Pilotanlage

Die Pilotanlage in Kaiserslautern wurde im April 2010 in Betrieb genommen. Sie hat eine Durchsatzkapazität von 2'000 t Klärschlamm (30% TS) pro Jahr und kann somit bereits den Klärschlamm von rund 20'000 Einwohnern verarbeiten. Die Anlage wurde allerdings primär als Pilotanlage betrieben; d.h. ständig optimiert und verändert. Erfahrung im Dauerbetrieb besteht nur während mehreren Tagen.

Vorteil am Standort Kaiserslautern ist, dass das HTC-Prozesswasser direkt auf die ARA abgeleitet werden kann. Da nur ein Bruchteil des Klärschlammes der ARA Kaiserslautern hydrothermal carbonisiert wird, kann diese Rückbelastung der ARA problemlos abgebaut werden.

Abbildung 8 zeigt die Pilotanlage in Kaiserslautern.



Abbildung 8: Pilotanlage der TerraNova auf der Kläranlage in Kaiserslautern

### 2.2.4 Erfahrungen / Referenzen

TerraNova hat sich vorwiegend auf die hydrothermale Carbonisierung von Klärschlamm spezialisiert, hat aber in der Pilotanlage auch bereits Versuche mit anderem Ausgangsmaterial gefahren. Die Pilotanlage (2'000 t/a) war bis anhin ca. 2'500h in Betrieb und wurde während mehreren Tagen konsequent überwacht (Messkampagnen und Bilanzierungen). Aufgrund der Versuche in der Pilotanlage, können bereits relativ verlässliche Informationen über den elektrischen und thermischen Energiebedarf gewonnen werden.

In Kleve (Nordrhein-Westfalen) soll momentan die erste Anlage im Vollmassstab für die hydrothermale Carbonisierung von Klärschlamm entstehen. Die Anlage soll jährlich 8'000 t entwässerten Klärschlamm carbonisieren (entspricht ca. 80'000 EW). Die Anlage befindet sich momentan allerdings noch im Bewilligungsverfahren. TerraNova ist aber zuversichtlich die Anlage 2012 in Betrieb nehmen zu können.

### **2.2.5 Erwartete Ausbeute**

Die TerraNova gibt an etwa 75 % der Trockensubstanz des Klärschlammes in die Kohle zu überführen. Die TerraNova-Kohle hat einen Heizwert der etwa 10% höher ist als jener des Klärschlammes (basierend auf dem TS). Das ergibt eine Gesamt-ausbeute von knapp über 80%.

### **2.3 Vergleich beider Firmen**

Die Anlagen der beiden genauer untersuchten Firmen lassen sich, trotz unterschiedlicher Systeme, gut miteinander vergleichen. Tabelle 5 vergleicht die beiden Systeme.

**Tabelle 5: Vergleich der HTC-Anlagensysteme der AVA-CO2 und der TerraNova Energy**

	<b>TerraNova Energy</b>	<b>AVA-CO<sub>2</sub></b>
Investitionskosten:	<p>2'900'000 Euro 4'500 t TS Klärschlamm/a Ohne Kosten für Gebäude, Fundament, Wärme Optional: Trockner für 0.5 Mio Euro (Trocknung 90%TS) BHKW zur Bereitstellung Prozesswärme: 0.6 Mio Euro</p>	<p>4'675'000 Euro 4'500 t TS Klärschlamm/a Ohne Kosten für Pelletierung, Dampfherstellung, Integration in bestehende Infrastruktur</p>
Finanzierungsmodelle	- Kauf der Anlage mit Servicevertrag	<p>- Contractor Modell: AVA-CO<sub>2</sub> als Investor und Betreiber - Kauf der Anlage</p>
Elektrischer Energiebedarf:	Ca. 160 kWh/t TS (inkl. Pelletierung)	Ca. 120 kWh/t TS
Thermischer Energiebedarf:	HTC-Prozess: ca. 630 kWh/t TS Trocknung: ca. 150 kWh/t TS	HTC-Prozess: ca. 710 kWh/t TS Trocknung: keine zusätzliche Energie nötig. Kann gemäss AVA-CO <sub>2</sub> vollständig durch Abwärme aus HTC-Prozess gedeckt werden.
Betrieb HTC-Anlage:	Kontinuierlich	Multibatch-Verfahren
Wärmezufuhr HTC-Anlage:	Thermoölkreislauf	Direkte Dampfeinblasung
Rückführung HTC-Abwasser:	Nein Keine Verdünnung durch Dampf, Abwasser sehr konzentriert.	Ja Durch Dampfeinblasung wird eine Verdünnung des Abwassers gemacht, Konzentrationen deshalb tiefer.
Katalysatoren	Ja, zugegeben werden Säuren und Salze. Kostenpunkt gemäss Richtofferte ca. 55'000 Euro/a	Nein
HTC-Abwasseraufbereitung	In Patentierphase: Zu erwartende Gehalte des gereinigten Abwassers: CSB: 38'000 mg/L; Ntot: 6'000 mg/L (Stand: Okt 2011)	In Patentierphase: Zu erwartende Gehalte des gereinigten Abwassers: CSB: 2'500 mg/L, TOC: 1'000 mg/L (Angaben Nov. 2011)
Referenzanlagen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pilotanlage auf der ARA Kaiserslautern (2'000 t/a, Substrat Klärschlamm, Laufzeit: 2'500 h)</li> <li>- Erste Anlage (80'000 EW) wird zurzeit in Kleve errichtet (Substrat: Klärschlamm; Stand: Bewilligungsverfahren)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pilotanlage (K3-335) und Testreaktor (HTC-0) im industriellen Massstab in Karlsruhe.</li> <li>- Bau von kommerzieller HTC Anlage in Ost-Deutschland (mehrere Reaktoren, Substrate: Schilf, Mais..).</li> </ul>

## 2.4 Verwertung der Biokohle

Für die Verwertung der Biomasse bestehen in bei beiden Systemen Ideen zur Weiterverwendung. Generell kommen die folgenden Verwertungswege in Frage.

### 2.4.1 Verwertung als Bodenverbesserer

Die Nutzung in der Landwirtschaft oder generell die Ausbringung in die Umwelt ist basierend auf der geltenden Gesetzgebung in der Schweiz zurzeit wie auch in der überblickbaren Zukunft praktisch ausgeschlossen.

### 2.4.2 Verwertung als Brennstoff

Die Entsorgung der Biokohle aus Klärschlamm in einer Verbrennung bietet sich als einfacher Verbrennungsweg an. TerraNova schreibt, dass die Kohle generell ohne weitere Modifikation der vorhandenen Brennertechnik, statt fossiler Kohle in Kohlefeuerungen eingesetzt werden kann. Auch denkbar ist eine Co-Verbrennung mit fossiler Kohle oder mit anderen Brennstoffen.

In Hinblick auf die anstehende Revision der TVA (Technische Verordnung über Abfälle), die eine Rückgewinnung des Phosphors aus dem Klärschlamm vorsieht, muss die Verbrennung der Biokohle in einer Monoverbrennung stattfinden. Aus der Asche der Monoverbrennung ist eine Rückgewinnung des Phosphors möglich. Vorteil der Verbrennung von Biokohle anstatt entwässertem Klärschlamm in einer Monoverbrennung ist der kleinere Wassergehalt, der eine wesentlich höhere Nutzung der enthaltenen Energie aus dem Klärschlamm ermöglicht. Eine Nutzung der Wärmeenergie oder eine Verstromung sind denkbar.

Die aus dieser Variante gewinnbare Nutzenergie kann aus der Energiebilanz aus der ersten Phase der Variantenstudie entnommen werden. Die Nutzenergie entspricht den dort ermittelten Energiemengen, unabhängig davon ob die Biokohle in der bestehenden Monoverbrennung in Bazenheid, oder in einer neuen Monoverbrennung in Trimmis verbrannt wird.

Die KVA in Bazenheid hat bestätigt, dass auch die HTC-Kohle in der Monoverbrennung verwertet werden können. Der Annahmepreis wäre mit 90 CHF pro Tonne Klärschlammkohle identisch jenem, der für die Annahme des entwässerten Klärschlamm verlangt wird.

### 2.4.3 Verwertung in einer Vergasung

Die Terranova wird die Vergasung von Biokohle im Rahmen eines Projektes in Deutschland 2012 realisieren. Nach erfolgreichem Abschluss dieses Projektes möchte TerraNova die Vergasung von Biokohle standardmäßig anbieten. Die AVA-CO2 beschäftigt sich ebenfalls mit der Vergasung von Biokohle. Zum jetzigen Zeitpunkt besteht bezüglich Vergasung der Biokohle allerdings absolut keine praktische Erfahrung.

Trotzdem könnte eine Vergasung der hergestellten Biokohle eine lukrative Verwertung dar-

stellen. Technisch sollte die Vergasung der Biokohle realisierbar sein. Je nach erwünschter physikalischer Struktur kann die produzierte Biokohle pelletiert oder in Pulverform belassen werden. Die Verwertung des produzierten Gases in einem BHKW produziert Strom, der ins Netz eingespielen werden kann, sowie Wärme, die einen Teil der für das HTC-Verfahren benötigten Wärme substituieren könnte. Eine Vergasung und anschliessende lokale Verstromung der Biokohle würde also den Selbstdeckungsgrad einer Kläranlage bedeutend steigern.

Eine Abschätzung über die zu erwartete Energieausbeute bezüglich Gas-, Strom- oder Wärmeproduktion bei einer Vergasung der Biokohle ist aufgrund mangelnder praktischer Erfahrungen momentan nicht möglich.

Bern, 4. Juni 2012

Verfasser: David Salzgeber, Bernhard Wiedmer

HOLINGER AG



Amt für Natur und Umwelt  
Uffizi per la natura e l'ambiente  
Ufficio per la natura e l'ambiente

Herausgeber..... Amt für Natur und Umwelt  
Uffizi per la natura e l'ambiente  
Ufficio per la natura e l'ambiente

Bezugsadresse:..... Amt für Natur und Umwelt GR  
Gürtelstrasse 89  
7001 Chur  
Telefon: 081 257 29 46  
Telefax: 081 257 21 54  
eMail: [info@anu.gr.ch](mailto:info@anu.gr.ch)  
[www.anu.gr.ch](http://www.anu.gr.ch)

Datum ..... September 2012

 Variantenstudium  
Klärschlammensorgung  
Kanton Graubünden 2011