

Inventar der Schweizer Klärschlamm-trocknung als Vorstufe zur thermischen und stofflichen Verwertung



Wirbelschichttrockner der ara bern

Foto: Isabelle Schönholzer

Dario Cairoli , Maurice Jutz, Anders Nättorp

Gefördert durch Interreg V B NWE, Projekt Phos4You

Basel, Februar 2021

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Abkürzungen	3
3	Methode und Vorgehen	3
4	Anlagen und Kapazität	4
4.1	Anlagenalter, Stilllegungen und Erweiterungen	4
4.2	Klärschlammengen und verfügbare Kapazitäten	4
5	Schlammigenschaften und Energieeffizienz	6
5.1	Klärschlammheizwert	7
5.2	Verwertung von Trockenklärschlamm	7
6	Kosten	9
7	Zusammenfassung	9
8	Literaturverzeichnis	9

1 Einleitung

Ziel dieses Projektes war die Erstellung eines Inventars der Schweizer Klärschlamm-trocknungsanlagen und Zementwerke. Als Informationsquellen dienten Arbeiten des VBSA, das Projekt SwissPhosphor und Angaben der Anlagenbetreiber. Das Projekt-Team möchte sich bei allen Beteiligten für die Unterstützung bedanken. Angaben zu Anlage, Betrieb und Schlammqualität wurden mit den Anlagenbetreibern in standardisierten Fragebögen festgehalten. Die Angaben der eingangs erwähnten Unterlagen wurden mit den Angaben aus den Fragebögen verglichen und die Ergebnisse anschliessend mit den Anlagenbetreibern validiert. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen insbesondere genutzt werden, um Szenarien für die Phosphorrückgewinnung zu erarbeiten. Dabei werden Technologien, die im Projekt Phos4You demonstriert werden, sowie andere umsetzungsreife, aschebasierte Technologien in Betracht gezogen. Die Erkenntnisse werden auch den Akteuren zur Verfügung gestellt, als Übersicht zum Stand der Technik.

2 Abkürzungen

ARA	Abwasserreinigungs-Anlage
eKS	Entwässerter Klärschlamm
KS	Klärschlamm
KVA	thermische Kehrlichtverwertungsanlage
SVA	(Mono-)Schlammverbrennungsanlage
TS	Trockensubstanzgehalt
TKS	Trockenklärschlamm

3 Methode und Vorgehen

Aus den vorhandenen Geschäftsberichten aus dem Jahr 2019 der Trocknungsanlagen und dem Bericht des VBSA zur «Klärschlamm-entsorgung in der Schweiz» (VBSA; B. Gaussen-Freidl, 2019) wurden die bereits veröffentlichten Daten zu den Schweizer Trocknungsanlagen gesammelt. Um Datenlücken zu schliessen, wurden die Anlagenbetreiber per Telefon und E-Mail gebeten ergänzende Angaben zu den Anlagen bereitzustellen und bereits vorhandene Daten auf Ihre aktuelle Gültigkeit zu überprüfen. Der Fragebogen (Tabelle 1) beinhaltet Punkte zu Anlagenkapazität, Schlamm-eigenschaften, Energieeffizienz und Betriebskosten. Alle Angaben beziehen sich, wenn nicht anders erwähnt, auf das Jahr 2019.

Von den 14 kontaktierten Anlagen nahmen 12 an der Inventur teil (die ARA Glarnerland und IDA Foce Ticino haben nicht teilgenommen).

Tabelle 1: Fragebogen für Trocknungsanlagen zur Erfassung von Zusatzinformationen

Klärschlamm, Entsorgung und Qualität	Energie und Effizienz	Kosten und Betrieb
Kapazität [t TS/a]	Energieträger der Trocknungsanlage	Gibt es eine Gebühr für die Schlammannahme?
Menge 2019 [t TS/a]	Trocknungstechnologie: Bandrockner, Wirbelschicht, ...	Gibt es eine Gebühr für die Schlamm-entsorgung?
Abnehmer des getrockneten Klärschlammes	Energiebedarf der Trocknungsanlage [kWh/t eKS]	Trocknungsaufwand [CHF/t TS]
Anteil an Trockensubstanz vor dem Trocknen in %	Anteil erneuerbarer Energie am Energiebedarf [%]	Inbetriebnahme der Anlage
Anteil an Trockensubstanz nach dem Trocknen [%]		Zustand der Anlage
Organischer Anteil an TS [%]		Gibt es Auflagen zur Betriebszeit?
		Betriebsende / Erweiterung geplant?

Die Angaben der Trocknungsanlagenbetreiber werden in Kapitel 4, 5 und 6 zusammengefasst und in Graphen gegenübergestellt. In Kapitel 5 wird aus den vorhandenen Daten der Heizwert berechnet. Daraus erfolgt eine CO₂-Bilanz der Substitution von Stein- und Braunkohle mit getrocknetem Klärschlamm. Die dazu benötigten Heizwerte und Emissionsfaktoren wurden aus der Literatur übernommen.

4 Anlagen und Kapazität

Die Trocknung des Klärschlammes wird in der Schweiz von 12 Abwasserreinigungsanlagen (ARA) mit einer Trocknungsanlage und zwei separaten Trocknungsanlagen (STRAG (AG) und Landi Aachtal (TG)) durchgeführt.

Die Schweizer Trocknungsanlagen setzen hauptsächlich Bandtrockner ein. Ausnahmen sind die ARA Bern und TRAC Chur (Wirbelschichttrockner); die Landi Aachtal (Trommeltrockner) und die SEPE, CADI (Trun) und ARA Glarnerland (solare Trocknung).

4.1 Anlagenalter, Stilllegungen und Erweiterungen

Das Alter der untersuchten Anlagen variiert zwischen 5 Jahren (ARA Bern) und 30 Jahre (Landi Aachtal), wie in Abbildung 1 dargestellt.

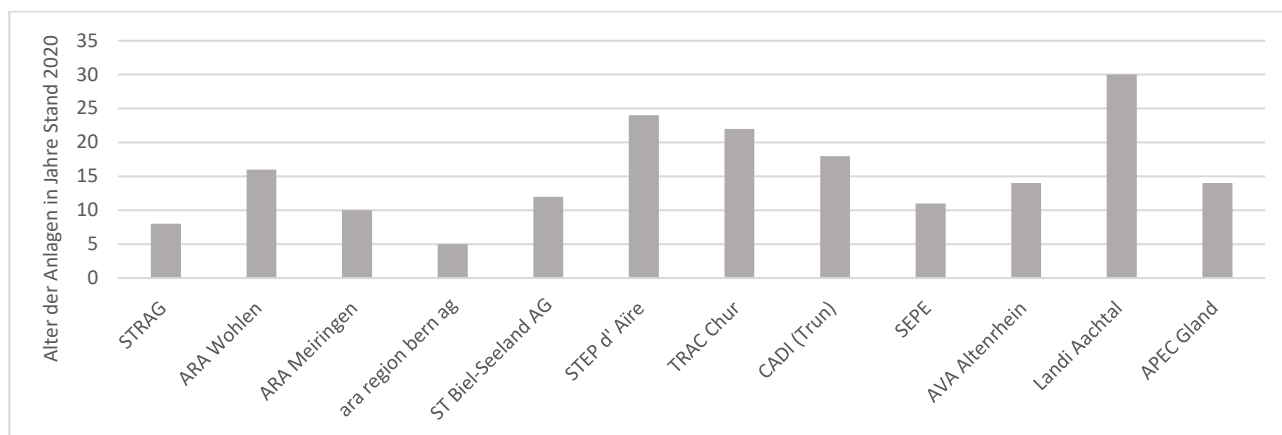


Abbildung 1: Anlagenalter Stand 2020

Die Anlagen der ARA Wohlen, STEP d' Aïre, IDA Focce Ticino und APEC Gland werden bis 2025, altersbedingt und auf Grund auslaufender Verträge, stillgelegt. Bei der ARA APEC Gland ist eine neue Kläranlage geplant. Momentan ist aber noch nicht bekannt ob diese auch eine Trocknungsanlage umfassen soll. Über eine Stilllegung der Anlage der ST Biel-Seeland AG im Jahr 2030 wird je nach Lösung des Phosphor-Recyclings entschieden.

4.2 Klärschlammengen und verfügbare Kapazitäten

Eine Aufteilung pro Anlage des getrockneten Klärschlammes in t TS/Jahr ist in Abbildung 2 dargestellt. Rund 80% der Klärschlamm-trocknung wird in 6 Anlagen durchgeführt (STRAG (AG), ara region bern ag (BE), ST Biel-Seeland AG (BE), STEP d' Aïre (GE), TRAC Chur (GR), AVA Altenrhein (SG) und Landi Aachtal (TG)).

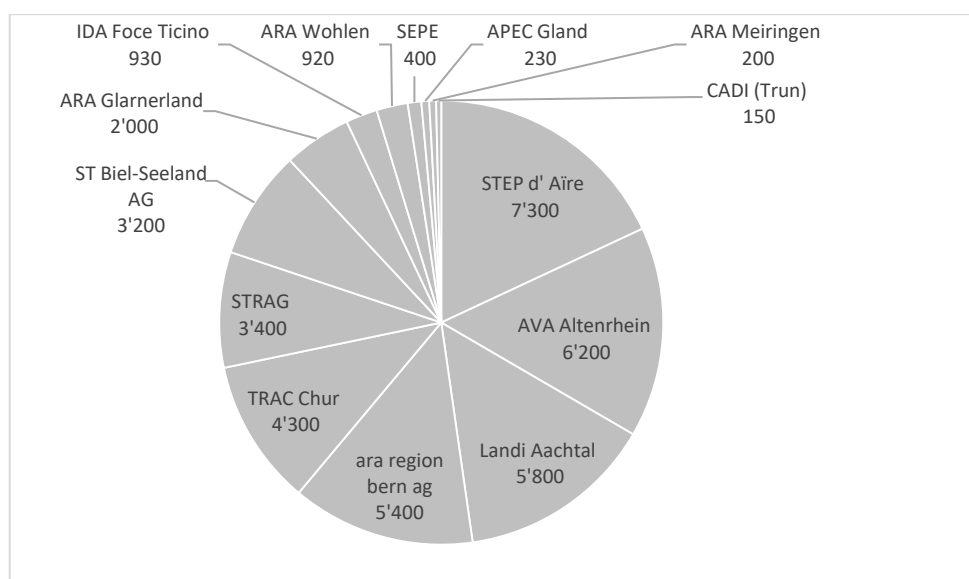


Abbildung 2: Aufteilung der Mengen Klärschlamm (t TS/a) auf die Schweizer Trocknungsanlagen. Gesamtmenge 2019 ca. 40'400 t TS.

Gemäss der Erhebung des VBSA wurden im Jahr 2017 in der Schweiz rund 40'500 t Trockensubstanz (TS)/a Klärschlamm in Zementwerken verbrannt. Dies entspricht 23% der gesamten Menge an in der Schweiz verbrannter Trockensubstanz von 180'000 t TS/a (VBSA; B. Gaussen-Freidl, 2019). Diese Studie hat im Jahr 2019 ein gleichbleibendes Niveau von 40'400 t TS/a an verbrannter Trockensubstanz in Zementwerken festgestellt.

Gleichzeitig ist laut VBSA die Kapazität zur Klärschlamm-trocknung etwa gleich geblieben. 2017 verfügte die Schweiz noch über eine Trocknungskapazität von 56'000 t TS/a. 2019 waren es 54'000 t TS/a, was einem Rückgang von 4 % entspricht. Laut unsere Umfrage wird durch Stilllegungen wird die Schweizweite Kapazität bis 2026 auf 42'000 t TS/a, um 22 % sinken. Die Auslastungsrate von 72 % im Jahr 2017 stieg auf 75 % im Jahr 2019. Wobei die ara region bern ag über 45% der schweizweiten Überkapazität verfügt, wie in Abbildung 3 und Abbildung 4 ersichtlich. Wenn der Klärschlamm der stillgelegten Anlagen nicht mehr getrocknet wird, werden im Jahr 2026 die Schweizer Anlagen zu 69 % ausgelastet sein.

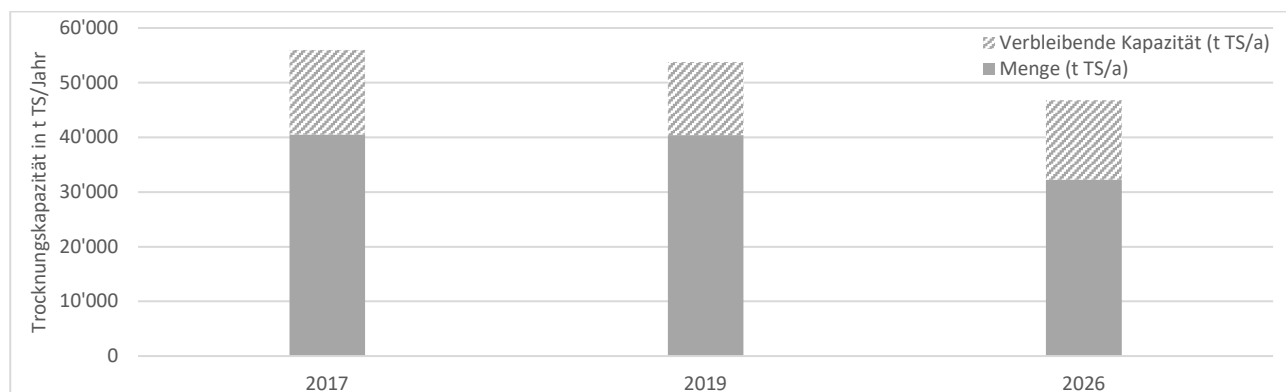


Abbildung 3: Kumulierte Auslastung der Kapazität der Trocknungsanlagen im Jahr 2017 (VBSA, 2019), 2019 und 2026 (FHNW) (t TS/a)

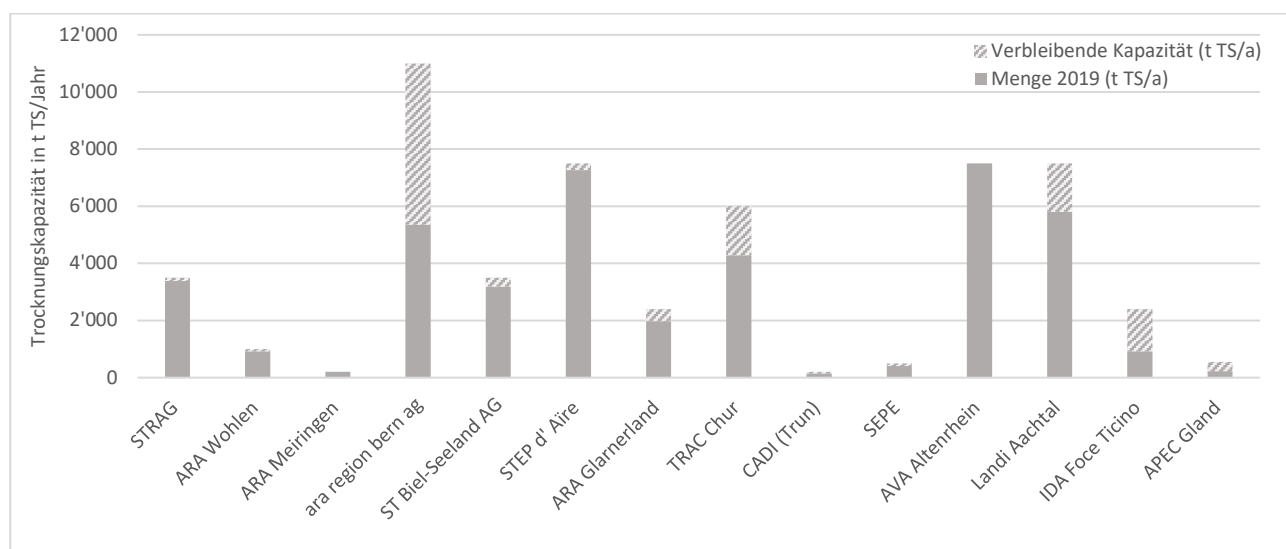


Abbildung 4: Auslastung der Kapazität der Trocknungsanlagen im Jahr 2019 (t TS/a)

Die wegfallende Kapazität zur Klärschlamm-trocknung in der Westschweiz und im Tessin wird grösstenteils durch die Verbrennung in Schlammverbrennungsanlagen (SVA) ersetzt werden. Die notwendige Kapazität wäre zwar vorhanden um den Ausfall aufzufangen, jedoch ist es logistisch meist sinnvoller auf lokale Schlammverbrennungsanlagen auszuweichen. Im Kanton Aargau könnte die wegfallende Trocknungskapazität der ARA Wohlen durch die Anlage STRAG aufgefangen werden. Sie könnte ihre Kapazität bei Bedarf von 3'500 t TS/a auf 5'000 t TS/a erweitern. Falls die Luftkühlung durch eine Flusswasserkühlung ersetzt würde, könnte die Kapazität sogar bis auf 10'000 t TS/a ausgebaut werden. Beim AVA in Altenrhein ist anlässlich einer Ersatzinvestition im 2023 eine Gesamtleistung von über 10'000 t TS/a geplant. Dies da grössere Schwankungen und ein abnehmender Trend im Trockensubstanzgehalt des angelieferten Klärschlammes die zusätzliche Trocknungsleistung voraussetzen.

Die aufgezeigten Kapazitäten ermöglichen eine gewisse Flexibilität bezüglich möglicher Szenarien der Phosphor-Rückgewinnung und einem allfälligen Anstieg des Bedarfs an getrocknetem Klärschlamm.

Abbildung 5 veranschaulicht die Auslastung der verschiedenen Klärschlamm-trocknungsanlagen auf der Schweizer Karte im Jahr 2019. Zum Vergleich stellt Abbildung 6 die voraussichtlichen Kapazitäten und Mengen im Jahr 2025 dar. Bei der Dar-

stellung wurde davon ausgegangen, dass die zu Trocknende Menge pro Anlage sich gegenüber dem Jahr 2019 nicht verändern wird. Gleichzeitig sind ebenfalls mögliche Stilllegungen und Kapazitätserweiterungen vermerkt. Die Grösse der Kuchendiagrammen stellt 100% der jeweiligen Anlagekapazität dar.

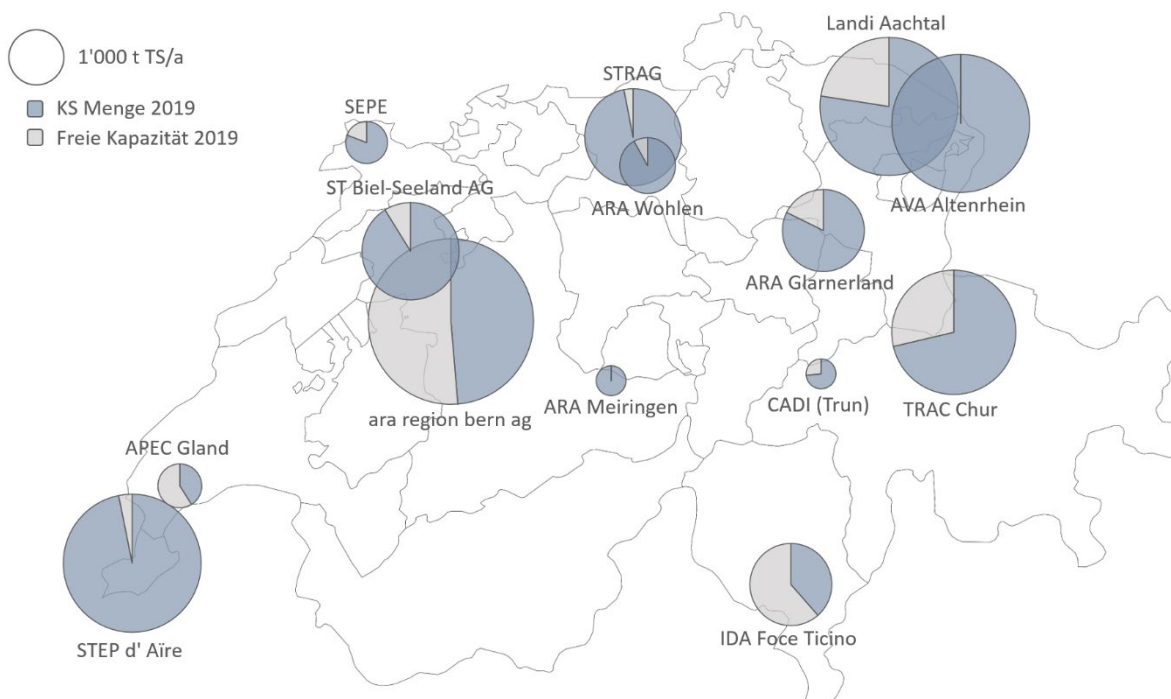


Abbildung 5: Auslastung und Kapazitäten der Klärschlamm-Trocknungsanlagen (t TS/Jahr 2019) auf der Schweizer Karte dargestellt

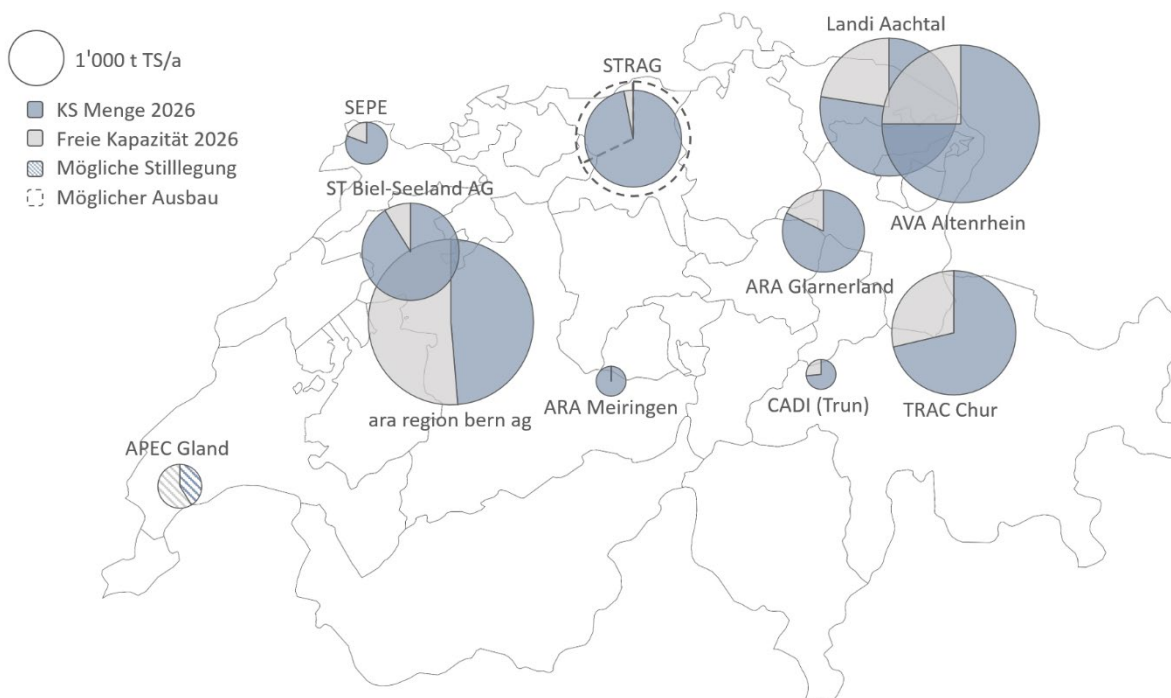


Abbildung 6: Prognose zu der Auslastung und den Kapazitäten der Klärschlamm-Trocknungsanlagen (t TS/Jahr 2026) auf der Schweizer Karte dargestellt

5 Schlammeigenschaften und Energieeffizienz

Im Durchschnitt erhalten die Trocknungsanlagen einen entwässerten Klärschlamm mit 30 % Trockensubstanzgehalt und trocknen diesen bis zu einem Trockensubstanzgehalt von 90 % (Abbildung 7). Die CADI (Trun) mit der solaren Trocknung erreicht bei guten Verhältnissen einen Trocknungsgrad von 90 % und kann so den Schlamm im Zementwerk Untervaz verwerten. Meistens wird der Schlamm aber auf 65 % Trockensubstanz getrocknet, um Transportkosten zu sparen, und an-

schliessend in der KVA GEVAG verbrannt. Die ARA Meiringen trocknet ihren Klärschlamm ebenfalls aus logistischen Gründen vor dem Transport zur Entsorgung zur 60 km entfernten KVA AVAG Thun. In Abbildung 7 ist der Jahresdurchschnitt des Trocknungsgrads der Schweizer Anlagen dargestellt.

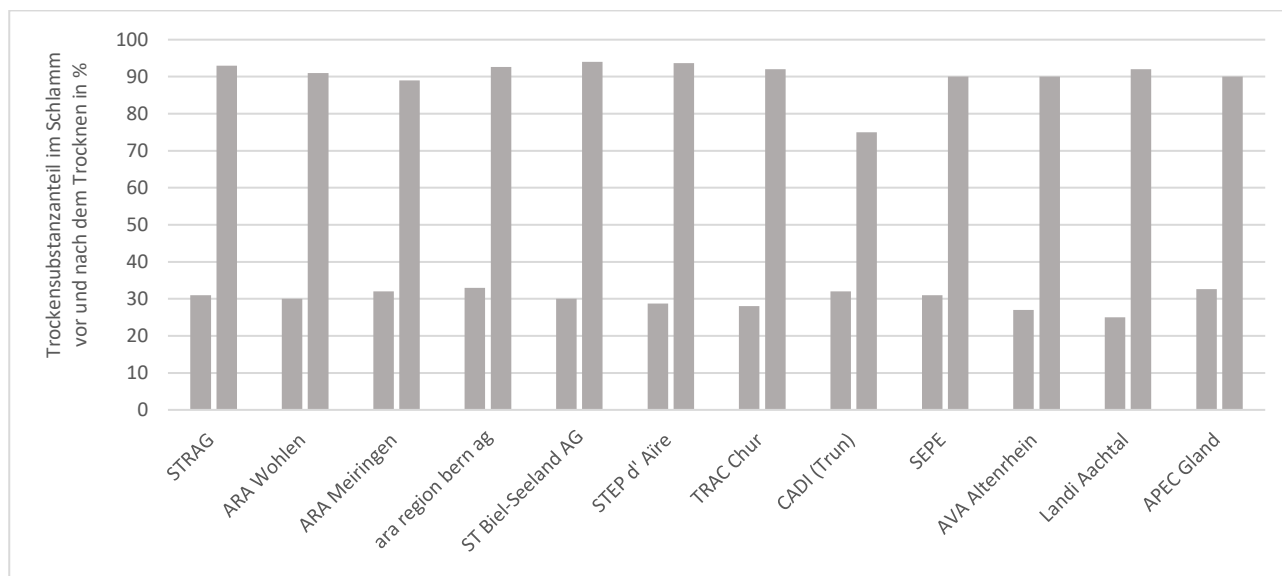


Abbildung 7: Trockensubstanzanteil im Schlamm vor und nach dem Trocknen in % pro Anlage im Jahr 2019

Der durchschnittliche organische Anteil des Klärschlammes beträgt 53%. Die STEP d' Aire verfügt über den niedrigsten Anteil mit 49% wobei die ara region bern ag den höchsten Anteil mit 58% misst.

Der organische Anteil ist insofern wichtig, da dieser den Heizwert des getrockneten Klärschlammes massgeblich bestimmt. Somit besitzt ein Klärschlamm mit hohem organischem Anteil einen hohen Heizwert.

5.1 Klärschlammheizwert

Der mittlere Heizwert der verschiedenen Schlämme wurde folgendermassen berechnet: Aus dem mittleren Heizwert der Trockensubstanz der Schlämme aus dem Kanton Zürich (Jahresmittelwert) wurde der Heizwert des organischen Anteils (5.5 MWh/t) berechnet. Zudem wurde angenommen, dass dieser Heizwert des organischen Anteils für Schweizer Schlämme repräsentativ ist. Über den organischen Anteil konnte so der Heizwert der Schlämme der verschiedenen Anlagen berechnet werden (Abbildung 8) (FHNW; A. Nättorp, 2019). Der schweizweite durchschnittliche Heizwert des Klärschlammes wird mit ca. 2.9 MWh/t Trockensubstanz (Ca. 10.4 MJ/t TS) berechnet.

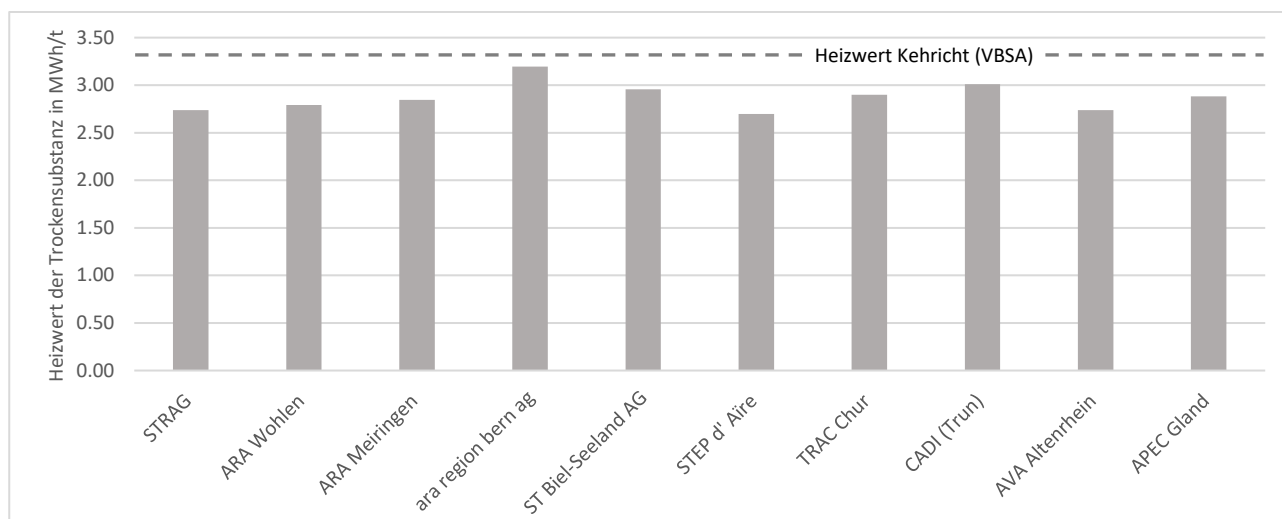


Abbildung 8: Berechneter Heizwert der getrockneten Klärschlämme in MWh/t Trockensubstanz

5.2 Verwertung von Trockenklärschlamm

Die Betrachtung von Klärschlamm als erneuerbarer Energieträger gewinnt, in Anbetracht der steigenden Nachfrage nach erneuerbaren Energien, an Bedeutung. Dabei spielt die Trocknung des Klärschlammes eine wichtige Rolle. Einerseits ermöglicht die Trocknung eine vergleichsweise einfache Lagerung und Transport des Klärschlammes. Andererseits wird durch die

Energieintensive Trocknung die Frage aufgeworfen, ob die CO₂- und Energiebilanz von Trockenklärschlamm das Trocknen rechtfertigen.

Abschätzung der CO₂-Bilanz des Trockenklärschlammes

Die Trocknung des Klärschlammes kann je nach Anlagentyp und Energieträger stark variierende CO₂-Emissionen aufweisen. Der Energiebedarf der Anlage zur Trocknung von Klärschlamm kann von 0.13 MWh/t TS bei solarer Trocknung bis zu 2.9 MWh/t TS bei einem Bandtrockner reichen (Tensor Consulting AG; G. Caduff, 2007). Die Anlagen können mit Solarenergie, Hackschnitzel, Biogas, Tierfetten, industrieller Abwärme, oder mit fossilen Brennstoffen betrieben werden. Betrieb mit Strom für Wärmepumpen ist auch möglich, wobei der Schweizer Lieferstrommix im Jahr 2019 aus 75 % Erneuerbarem Strom besteht (Pronovo AG, 2020). Die CO₂ Emissionen variieren somit nach Standort und den zur Trocknung verwendeten Energieträger. Im ungünstigsten Fall wird ein Trocknungsverfahren eingesetzt, das zu 100 % mit Erdgas betrieben wird. Dadurch entstehen sogenannte Vorkettenemissionen von 0.58 t CO₂/t TS (0.52 t CO₂/t TKS), die vor der eigentlichen Verbrennung, bei der Gewinnung des Brennstoffs, entstehen. Im besten Fall wird eine Anlage mit 100 % CO₂ neutraler Energie betrieben. Dabei fallen nur die Transportemissionen als Vorkettenemissionen an, was 0.01 t CO₂/t TS entspricht (Tensor Consulting AG; E. Kind, 2009). In der Schweiz wird 85 % des Klärschlammes mit erneuerbaren Energien, Strom oder industrieller Abwärme und der Rest mit Heizöl oder Erdgas getrocknet, was im Durchschnitt 0.28 t CO₂/t TS an Vorkettenemissionen entspricht (BAFU, 2018).

Die Gesamtemissionen von Trockenklärschlamm umfassen die Vorkettenemissionen der Trocknung und des Transports, so wie auch die Emissionen der Verbrennung. Die Emissionen der Verbrennung des Trockenklärschlammes betragen ca. 0.99 t CO₂/t TS (0.89 t CO₂/t TKS) (BAFU, 2019). Somit betragen die Gesamtemissionen des Trockenklärschlammes im ungünstigsten Fall 1.57 t CO₂/t TS (1.41 t CO₂/t TKS), im besten Fall 0.99 t CO₂/t TS (0.90 t CO₂/t TKS) und im Durchschnitt 1.27 t CO₂/t TS (1.14 t CO₂/t TKS). Wie aufgezeigt unterscheiden sich die CO₂-Emissionen je nach Anlage stark. Daher ist bei einer regionalen Abschätzung der CO₂-Emissionen zu empfehlen die anlagenspezifischen Werte zu bestimmen und nicht den Schweizer Durchschnittswert zu verwenden.

Um die CO₂-Emissionswerte des Trockenklärschlammes zu vergleichen, wurden Vorkettenfaktoren zur Gewinnung diverser Brennstoffe aus der Literatur entnommen (BDEW, 2015) und in Tabelle 2 dargestellt. Der Gesamtemissionsfaktor pro freigesetzter Energiemenge, ist für Trockenklärschlamm vergleichsweise hoch. Lediglich beim Verbrennen des CO₂ neutral getrockneten Klärschlammes wird weniger CO₂ ausgestossen als bei Stein- und Braunkohle bei gleichem Brennwert. Verglichen mit Heizöl oder Erdgas wird deutlich mehr CO₂ ausgestossen.

Tabelle 2: Miteinbezug der Vorkettenemissionen in Gesamtemissionen verschiedener Brennstoffe

Energieträger	Vorkettenemissionen [t CO₂/t]	Emissionsfaktor (BAFU, 2019) [t CO₂/t]	Gesamtemissionsfaktor [t CO₂/t]	Heizwert (BAFU, 2019) [MWh/t]	Gesamtemissionsfaktor [g CO₂/MWh]
<i>TKS (CH Durchschnitt)</i>	0.25	0.89	1.14	2.6	0.42
<i>TKS (100 % Erdgas)</i>	0.52	0.89	1.41	2.6	0.54
<i>TKS (100 % CO₂ neutral)</i>	0.01	0.89	0.90	2.6	0.34
<i>Steinkohle</i>	0.24	2.36	2.60	7.1	0.37
<i>Braunkohle</i>	0.45	2.26	2.71	6.6	0.41
<i>Heizöl</i>	0.32	3.16	3.48	11.9	0.29
<i>Erdgas</i>	0.27	2.67	2.94	13.1	0.22

Energiebilanz des Trockenklärschlammes

Das energieintensive Trocknen des Klärschlammes kann von 0.13 MWh/t TS bei solarer Trocknung bis zu 2.9 MWh/t TS bei einem Bandtrockner reichen (Tensor Consulting AG; G. Caduff, 2007). Dies entspricht 5% bzw. 100% des Heizwertes vom Trockenklärschlammes.

Verwertung von Trockenklärschlamm

In der Schweiz wird fast 100% des getrockneten Klärschlammes in Zementwerken verwertet. Dies entspricht 40'000 t TS/a, bei einer schweizweiten Kapazität der Zementwerke von ca. 60'000 t TS/a. Dabei stellt Holcim eine Kapazität von 45'000 t

TS/a, Jura Cement 10'000 t TS/a und Vigier Ciment ca. 5'000 t TS/a. Dabei kann bei der Verbrennung von Trockenklärschlamm, der CO₂-arm getrocknet wurde, nicht nur CO₂ eingespart werden, gegenüber der Verbrennung von Kohle, sondern es kann auch die entstehende Asche mit einem Mehrwert verwertet werden, womit eine Deponierung und die damit verbundenen Emissionen wegfallen.

In Anbetracht der Energiewende kann Trockenklärschlamm nicht nur als erneuerbarer Energieträger, sondern auch als Energiespeicher betrachtet werden. Denn überschüssige Solar- und Windenergie kann so, z.B. mittels Wärmepumpen, in der Trocknung verwertet und im Trockenklärschlamm gelagert werden. So könnte Trockenklärschlamm zukünftig auch in Schlammverbrennungsanlagen verbrannt werden, um Energie in bestehende Fernwärmenetze einzuspeisen. Kapazität bei den Schlammverbrennungsanlagen wäre vorhanden. Zusätzlich zu den 190'000 t Trockensubstanz die jährlich verbrennt werden, besteht eine freie Kapazität von 26'000 t TS/a (FHNW; A. Nättorp, 2019).

6 Kosten

Die Annahmehöhen der entwässerten Klärschlammes auf den Trocknungsanlagen werden in der Regel kostendeckend festgelegt. Die Trocknungskosten variieren je nach Anlage zwischen 80.- CHF/t eKS und 169.- CHF/t eKS. Anlagen mit einer solaren Trocknung weisen geringere Betriebskosten auf als Band-, Wirbelschicht- oder Trommeltrockner. Im Schweizer Durchschnitt belaufen sich die Betriebskosten auf 127.- CHF/t eKS. Die Transportkosten zu den Zementwerken variieren mit der Transportdistanz zwischen 12.50 CHF/t und 79.- CHF/t. Die Abgabegebühren des Klärschlammes an die Zementwerke fallen meist klein aus oder sind bereits in den Transportkosten integriert.

7 Zusammenfassung

Die Merkmale der 12 Schweizer Klärschlamm-trocknungsanlagen wurden in Zusammenarbeit mit den Betreibern erfasst und analysiert. Die wichtigsten Erkenntnisse sind:

- Vier Anlagen werden bis 2025 stillgelegt. Der momentan dort noch getrocknete Klärschlamm wird zukünftig grösstenteils, gemäss Anlagenbetreiber, als entwässertes Klärschlamm in SVA verbrannt.
- Die Klärschlamm-trocknungsanlagen sind im Durchschnitt zu 75 % ausgelastet.
- Energieeffizienz und CO₂-arme Energieträger sind wichtig für die Umweltbilanz der Klärschlamm-trocknung. In günstigen Fällen verursacht getrockneten Klärschlamm weniger CO₂-Emissionen als Braunkohle.
- Die Betriebskosten für die Klärschlamm-trocknung variieren zwischen 80.- CHF/t eKS und 169.- CHF/t eKS getrocknetem Klärschlamm.

Diese Ergebnisse sind ein Teil der Grundlagen für die im Projekt Phos4You vorgesehene Entwicklung von realistischen Umsetzungsszenarien für Phosphorrückgewinnung.

8 Literaturverzeichnis

- BAFU. (2018). *Faktenblatt: CO₂-Emissionsfaktoren für die Berichterstattung der Kantone*. Bern.
- BAFU. (2019). *Faktenblatt: CO₂-Emissionsfaktoren des Treibhausgasinventars der Schweiz*. Bern.
- BDEW. (2015). *Primärenergiefaktoren*. Berlin.
- ESU-services Ltd.; R. Frischknecht, R. Itten, K. Flury. (2012). *Treibhausgas-Emissionen der Schweizer Strommixe*. Uster.
- FHNW; A. Nättorp. (2019). *Inventur der Schweizer Klärschlammverbrennungsanlagen*. Basel.
- Holinger AG; T. Zumbühl. (2019). *Swissphosphor, Ergebnisse Forum 1*. Bern.
- Pronovo AG. (2020). *Cockpit Stromkennzeichnung Schweiz*. Frick.
- Swissphosphor; T. Zumbühl. (2020). *Grundlagenbericht Swissphosphor*. Bern.
- Tensor Consulting AG; E. Kind. (2009). *Klärschlamm – ein erneuerbarer Energieträger*. Bern.
- Tensor Consulting AG; G. Caduff. (2007). *Klärschlamm-trocknung durch Abwärmenutzung*. Bern.
- VBSA; B. Gaussen-Freidl. (2019). *Klärschlamm-trocknung in der Schweiz*. Bern.