

AiF-Forschungsvorhaben-Nr.: 14884 N
Bewilligungszeitraum: 01.08.2006 – 30.06.2008
Forschungsthema: **Möglichkeiten und Grenzen der Verwertung von Klärschlamm als Sekundärstoff in der Zementindustrie**

1 Einleitung

Anlass für das Forschungsvorhaben war die Tatsache, dass die Regelungen des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes, die hohen Brennstoffkosten, die stark gestiegenen Anforderungen hinsichtlich der Vermeidung klimaschädlicher CO₂-Emissionen und der steigende Entsorgungsdruck für einzelne Stoffe dazu geführt haben, dass immer mehr alternative Materialien für eine Verwertung im Zementherstellungsprozess diskutiert werden. Die Zementindustrie verwendet allerdings nur solche Stoffe als Sekundärroh- und -brennstoffe, die die Produktqualität sowie die Umweltverträglichkeit des Herstellungsprozesses und der hergestellten Produkte nicht beeinträchtigen. Faktoren, die die Einsetzbarkeit eines Stoffes beim Zementherstellungsprozess begrenzen können, müssen daher bereits im Vorfeld abschätzbar sein und in eingehenden Betriebs- und Produktuntersuchungen überprüft werden. Daraus sind dann Aussagen über die Eignung eines Stoffes als Sekundärroh- oder -brennstoff (oder beides zugleich), die betriebs- oder verfahrenstechnische Einbringung des Stoffs in den Herstellungsprozess und die maximal mögliche Einsatzmenge des jeweiligen Stoffes ableitbar.

Als fossile Brennstoffe kommen in Drehofenanlagen derzeit in erster Linie Stein- und Braunkohle zum Einsatz, in geringerem Umfang werden Petrolkoks und Heizöl eingesetzt. Die in der deutschen Zementindustrie verwendeten Sekundärbrennstoffe sind vor allem aufbereitete Leichtfraktionen des Haus- und Gewerbemülls, Tiermehl, Altöle, Altreifen, Holz- und Kunststoffabfälle. Die Sekundärstoffe werden energetisch verwertet. Anders als bei reinen Feuerungsanlagen werden ihre Aschen bzw. mineralischen Komponenten auch Bestandteil des Zementklinkers (Stoffumwandlungsprozess), sodass deren mögliche Auswirkungen auf die Produkteigenschaften beachtet werden müssen.

Für die Untersuchungen in diesem Forschungsvorhaben wurde Klärschlamm als Sekundärstoff in der deutschen Zementindustrie betrachtet, weil hier ein signifikantes Einsatzpotenzial sowie ein großer Informationsbedarf bestehen. Nicht zuletzt auch wegen seiner biogenen Herkunft ist Klärschlamm als CO₂-neutraler Brennstoff interessant. Die CO₂-Emissionen aus der Klärschlammverbrennung werden zwar gemäß Treibhaus-Emissionshandelsgesetz (TEHG) berichtet, jedoch mit einem Emissionsfaktor von Null versehen. Somit stellt der Einsatz von Klärschlamm im Klinkerbrennprozess für die Zementwerke eine wichtige Möglichkeit dar, ihre Minderungsverpflichtungen einzuhalten und Kosten für den Zukauf von Emissionsberechtigungen zu reduzieren.

Nach Erhebung des statistischen Bundesamtes belief sich der Klärschlammfall in Deutschland im Jahr 2004 auf ca. 2.3 Mio. t Trockensubstanz. Hiervon wurden 58 % stofflich verwertet und 35 % thermisch entsorgt. Der Rest wurde an andere Abwasserbehandlungsanlagen abgegeben bzw. im Bezugsjahr deponiert und zwischengelagert.

Seit Juni 2005 ist gemäß der „Technischen Anleitung Siedlungsabfall“ (TASi) eine Deponierung von Materialien mit mehr als 5 % Glühverlust in der Trockensubstanz nicht mehr zulässig. Dadurch eröffnen sich gute Chancen für den Einsatz in der thermischen Verwertung.

Der Klinkerbrennprozess bietet sich aufgrund der hohen Temperaturen und der langen Verweilzeiten für eine thermische Verwertung an. Allerdings unterscheiden sich die „Brennstoffeigenschaften“ von Klärschlamm wesentlich von den bisher in der Zementindustrie eingesetzten Stoffen (niedriger Heizwert, hoher bzw. variierender Wassergehalt, hoher Aschegehalt). Um Klärschlämme energetisch verwerten zu können, muss zunächst der hohe Wassergehalt von etwa 95 % im Anfallzustand eines Klärwerkes reduziert werden. Hierfür ist eine zusätzliche Vorbehandlung nötig. Mit einer mechanischen Entwässerung lässt sich der Wassergehalt auf 80 bis 55 % reduzieren. Mit thermischen Trocknungsverfahren kann der Wassergehalt auf 15 bis 5 % reduziert werden. Es existieren verschiedene Handlungsoptionen, je nach dem welche Trocknungsart (zentral oder dezentral) bzw. Klärschlammart eingesetzt sowie welcher Brennstoff durch Klärschlamm substituiert wird.

Gegenstand dieses Forschungsvorhabens war deshalb, durch Betriebs- und Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen die Möglichkeiten und Grenzen der Verwertung von Klärschlamm als alternativer Sekundärstoff in der Zementindustrie näher zu untersuchen. Dies gilt nicht zuletzt auch zur Leistung eines Beitrags zur Entsorgungssicherheit in Deutschland.

Das Forschungsvorhaben (AiF-Vorhaben-Nr.: 14884 N) der Forschungsvereinigung Verein Deutscher Zementwerke e.V. wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V. (AiF) gefördert.

2 Forschungsziel und Lösungsweg

In diesem Forschungsvorhaben wurden erstmals systematische Untersuchungen zum Einsatz von Klärschlamm in der Zementindustrie bei verschiedenen Einsatzqualitäten und Einsatzmöglichkeiten durchgeführt. Im Vordergrund der Untersuchungen standen die Möglichkeiten und Grenzen einer wirtschaftlichen und umweltverträglichen Verwertung von Klärschlamm als alternativer Sekundärstoff in der Zementindustrie. Durch zahlreiche Betriebs- und Produktuntersuchungen wurden die Einflüsse des Klärschlammeinsatzes auf die Quecksilberemissionen, das Produkt, den Energieverbrauch und den Ofenbetrieb ermittelt. Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ergänzte das Untersuchungsspektrum.

Wesentliches Ziel dieser Arbeit war, durch umfangreiche Versuche an drei Ofenanlagen in drei Zementwerken die Möglichkeiten und Grenzen einer umweltverträglichen Verwertung von Klärschlamm zu betrachten. Im Fokus der Untersuchungen standen hierbei Aspekte wie die Eignung von Klärschlamm als Brennstoff, maximal mögliche Einsatzmengen, die Auswirkungen der verschiedenen Klärschlämme auf den Ofenbetrieb, die Quecksilberemissionen (v.a. Quecksilber) sowie auf den Klinker und Zement. Eine Untersuchung zur Brenneroptimierung rundete das Untersuchungsprofil ab. Hinsichtlich der Einsatzqualitäten wurden Vergleiche zwischen mechanisch entwässertem Klärschlamm im Calcinator zu granuliertem Klärschlamm in der Hauptfeuerung, ein Vergleich des Einsatzes von mit Kohle gemahlenem Trockenklärschlamm in der Hauptfeuerung sowie ein Vergleich des Einsatzes von granuliertem Trockenklärschlamm in der Hauptfeuerung angestellt. Als Bezug diente jeweils die Ofenfahrweise ohne Klärschlammeinsatz. Die Einsatzraten der Klärschlämme betragen während der Ofenversuche zwischen 5 und 11 % der Feuerungswärmeleistung des Ofens.

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit war es, die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für den Einsatz von Klärschlamm in der deutschen Zementindustrie zu analysieren. Für die Analyse der wirtschaftlichen Einsatzbedingungen wurde eine repräsentative virtuelle Anlage mit einer Klinkerkapazität von 3.000 t/d im Raum Westfalen herangezogen. In der ökonomischen Betrachtung wurde die Substitution der Energieträger Steinkohle, Braunkohle und Tiermehl analysiert. Dabei standen drei Konzepte im Vordergrund: (A) Akquisition von mechanisch entwässertem Klärschlamm, zentrale Trocknung im Zementwerk mit Abwärme aus Kühlerabluft, Verbrennung in der Haupt- und Zweitfeuerung; (B) Akquisition von Trockenklärschlamm, Verbrennung in der Haupt- und Zweitfeuerung und (C) Akquisition von mechanisch entwässertem Klärschlamm, Verbrennung in der Zweitfeuerung. In Sensibilitätsanalysen wurden signifikante Einflussgrößen wie Auslastung der Anlagen, Klärschlamm-Entgelt, Heizwert der Klärschlämme, Kapitalkosten, CO₂-Zertifikatpreis, Transportkosten, Strompreise und Brennstoffkosten untersucht.

3 Ergebnisse

Betriebsversuche

Insgesamt wurden 3 Betriebsversuche an industriellen Anlagen durchgeführt. Die untersuchten Ofenanlagen sind als A, B und C bezeichnet. Es handelt sich um moderne Drehofenanlagen mit Zyklonvorwärmer, an denen Sekundärbrennstoffe eingesetzt werden. Dadurch gelten die Regelungen und die Emissionsgrenzwerte der 17. BImSchV. Als Rohmühlenarten sind in diesen Werken Kugelmühlen oder Walzenschüsselmühlen vertreten, als Entstaubungseinrichtungen Elektrofilter oder Gewebefilter. Die Auswirkungen des Klärschlammeinsatzes wurden bei verschiedenen Brennstoffmischungen untersucht. **Tabelle 1** zeigt zusammenfassend die Hauptmerkmale der einbezogenen Ofenanlagen inklusive der installierten Abgasreinigungseinrichtungen.

Tabelle 1: Hauptmerkmale der untersuchten Ofenanlagen

	Ofen in Werk (A)	Ofen in Werk (B)	Ofen in Werk (C)
Art des Vorwärmers	Zyklonvorwärmer	Zyklonvorwärmer	Zyklonvorwärmer
Anzahl Zyklonstufen	6	4	4
Anzahl Stränge	2	2	1
Calcinator	Ja	nein	nein
durchschnittl. Klinkerleistung während der Versuche	3.660 t/d	2.560 t/d	1.125 t/d
Art des Kühlers	Rostkühler	Satellitenkühler	Rostkühler
Art des Staubfilters	Elektrofilter	Elektro-/ Gewebefilter	Gewebefilter

Einflüsse auf den Ofenbetrieb

Während der Betriebsversuche konnte kein signifikanter Einfluss des Klärschlammeinsatzes auf den Ofenbetrieb festgestellt werden. Bei Bilanzierung der Schwefel-, Chlor- und Alkalieinträge zeigte sich, dass die Einnahmen der vorgenannten Verbindungen über den Klärschlamm im Vergleich zu den übrigen Einnahmen gering waren. Deshalb wurde auch keine Verstärkung bzw. Beeinträchtigung der bekannten Chlor-, Schwefel- und Alkalistoffkreisläufe in der Ofenanlage durch den Klärschlammeinsatz festgestellt. Ebenso wurden keine Auswirkungen auf die Emissionen festgestellt. Die Grenzwerte wurden eingehalten.

Bei einer Werksuntersuchung wurden außerdem die Auswirkungen des Klärschlammeinsatzes in der Drehofenfeuerung auf die Flammenbildung sowie die Möglichkeiten zur Optimierung der Brennereinstellung betrachtet. Hierbei wurde die Drehofenflamme mittels eines Thermografiesystem vermessen und die erzeugten Bilder ausgewertet. Zusammenfassend wurde festgestellt, dass die Veränderungen der Flamme bei der eingesetzten Klärschlammmenge sehr gering waren. Dies stimmt mit den Ergebnissen der energetischen Bilanzierung überein. Deshalb war die Möglichkeit zur Brennoptimierung bei Klärschlammeinsatz ebenfalls gering. Eine Erhöhung der Primärluftmenge führte nicht zur Intensivierung der Verbrennung. Die Erwartung, bei zündträgen Brennstoffen, die zu einer Verlängerung der Aufheiz- und Zündstrecke führen, mit einer Erhöhung der Brennerluftmenge den Zündpunkt und damit auch die Flamme wieder näher an den Brennermund heranzuholen, wurde in diesem Fall

somit nicht bestätigt. Vermutlich war die an dieser Ofenanlage mögliche betriebstechnische Veränderung nicht so groß, dass sich ein signifikanter Einfluss gezeigt hätte. Als Ergebnis ist festzuhalten, dass Trockenklärschlamm somit bis zu einer Substitutionsrate von ca. 10 % der Feuerungswärmeleistung der Ofenanlage ohne messbare Auswirkung auf die Sinterzone eingesetzt werden kann. Exemplarisch zeigt **Bild 1** die Thermogramme für zwei Flammenquerschnitte beim Klärschlammbetrieb der Drehofenanlage. Das obere Thermogramm gibt einen brennernen Flammenquerschnitt wieder, während das untere die Aufheiz- und Zündstrecke der Brennstoffe sowie ein Temperaturprofil entlang der Flamme wiedergibt. Für alle hier gezeigten Thermogramme gilt, dass kühle Temperaturbereiche blau, gemäßigte grün und heiße gelb dargestellt werden.

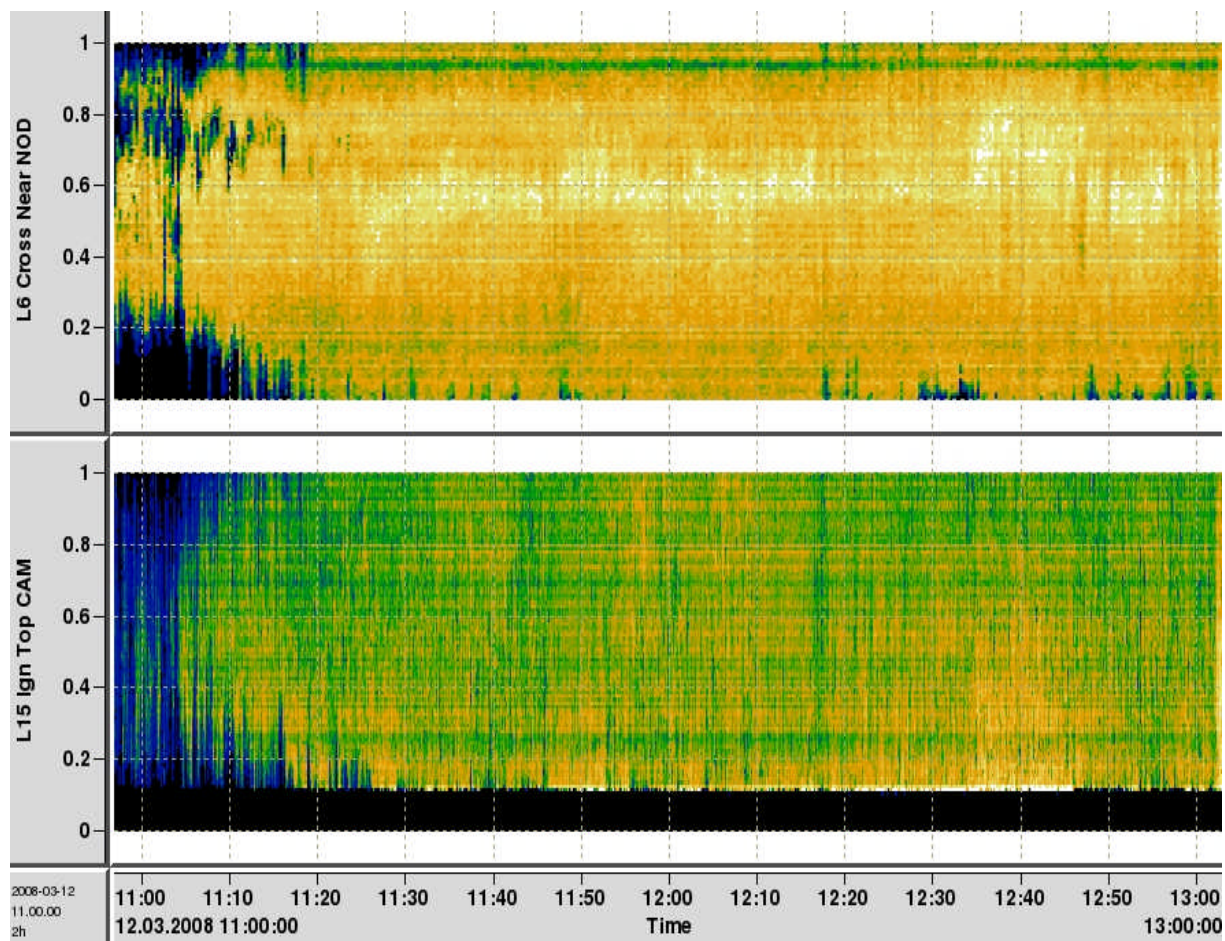


Bild 1: Thermogramme zweier Flammenquerschnitte bei Klärschlammmitverbrennung

Einflüsse auf den Energieverbrauch

Anhand der mengenmäßigen Erfassung der in die Ofenanlagen ein- und austretenden Stoffströme, deren Temperaturen sowie der Stoffanalysen wurden die Ofenanlagen stofflich und energetisch bilanziert. Hierfür wurden die Energieeinnahmen und –ausgaben des sogenannten inneren Bilanzraums, d.h. Wärmetauscher, Ofen und Kühler gegenübergestellt. Als Berechnungsgrundlage der Energiebilanzen wurde das VDZ-Merkblatt Vt10 „Durchführung und Auswertung von Drehofenversuchen“ herangezogen. Da sich Einnahmen und Ausgaben nicht restlos ausgleichen, verbleibt ein Bilanzfehlbetrag von ca. 3%, der eine gute Qualität der Messergebnisse unterstreicht. Während der gesamten Betriebsversuche wurden bei den Bilanzmessungen weitgehend gleichbleibende Ofenmehl- und Brennstoffaufgaben gewähr-

leistet. In der nachfolgenden **Tabelle 2** ist die wichtigste Kenngröße aus den durchgeführten Energiebilanzen, d.h. der klinkerspezifische Brennstoffenergieeinsatz (incl. Bilanzrest) dargestellt. Die Betriebsweisen der Öfen sind mit VB (Verbundbetrieb) und DB (Direktbetrieb) abgekürzt. Verbundbetrieb bedeutet, dass die jeweilige Rohmühle in Betrieb war und das Ofenabgas zur Rohmaterialtrocknung verwendet wurde.

Tabelle 2: Klinkerspezifische Brennstoffenergieeinsätze

	Werk A (VB)	Werk B (VB)	Werk C (DB+VB)
ohne KS¹ - Einsatz	3437 kJ/kg Kl.	3631 kJ/kg Kl.	3593 kJ/kg Kl.
MEKS² im Calcinator	3844 kJ/kg Kl.	-----	-----
granulierter TKS³	3447 kJ/kg Kl.	-----	3584 kJ/kg Kl.
mit Kohle gemahlener TKS	-----	3658 kJ/kg Kl.	-----

Die durchgeführten Energiebilanzen bei Einsatz bzw. Vergleich von granulierten Trockenklärschlamm zu den mit Kohle gemahlene Trockenklärschlamm in der Hauptfeuerung sowie ohne Klärschlammeinsatz zeigen klinkerspezifische Brennstoffenergieeinsätze von ca. 3600 kJ/kg Klinker auf. Bei Einsatz von mechanisch entwässertem Klärschlamm im Calcinator ergab sich erwartungsgemäß eine Erhöhung des klinkerspezifischen Brennstoffenergieeinsatzes um ca. 250 kJ/kg Klinker im Vergleich zum Referenzversuch ohne Klärschlammeinsatz. Dieser Effekt ist hauptsächlich auf den erhöhten Wassereintrag durch den feuchten Klärschlamm zurückzuführen. Der Einsatz vom Trockenklärschlamm im Bereich <10 % der Feuerungswärmeleistung hatte dagegen keinen messbaren Einfluss auf den klinkerspezifischen Brennstoffenergiebedarf der Ofenanlage.

Einflüsse auf die Hg-Emissionen

Klärschlämme weisen i.d.R. etwas höhere Quecksilbergehalte auf als die substituierten Regelbrennstoffe (Stein- oder Braunkohle, Petrolkoks). Da Quecksilber ein leicht flüchtiges Spurenelement ist, wird es bei Zementdrehofenanlagen teilweise emittiert. Um weitere Kenntnisse über den Verbleib des Quecksilbers bei Klärschlammeinsatz zu erhalten, wurden Quecksilberbilanzen der Ofenanlagen erstellt. Neben Quecksilber wurden auch Abgasparameter wie O₂, CO, CO₂, SO₂, NO und NO₂ zur Prozessbeurteilung erfasst. Hierbei wurden jedoch keine signifikanten Veränderungen festgestellt. Für die Quecksilberbilanzen wurden die Stoffströme über die jeweiligen Bilanzgrenzen hinweg beprobt und die Proben auf ihre Quecksilbergehalte untersucht. Unterschieden wurde jeweils zwischen dem inneren Bilanzraum (Vorwärmer, Ofen und Kühler) sowie dem äußeren Bilanzraum (Ofenanlage, Rohmühle und Staubabscheidung). Da das Rohmehlsilo das Aufgabegut für einige Stunden bis Tage speichert, wurde das Silo aus dem Bilanzraum herausgenommen. Je nach Quecksilbergehalt des eingesetzten Klärschlammes kann die maximale Substitutionsrate begrenzt sein, um die Einhaltung des Grenzwerts nach 17. BImSchV zu gewährleisten. Quecksilber neigt aufgrund seiner Flüchtigkeit in Drehofenanlagen zur Kreislaufbildung. Das Quecksilber, das bei höheren Temperaturen vor allem im Bereich des Vorwärmers bzw. im Ofen verdampft, wird mit entgegenströmenden Gas mitgenommen und kondensiert in kälteren Bereichen der

¹ KS = Klärschlamm

² MEKS = Mechanisch entwässertes Klärschlamm

³ TKS = Trockenklärschlamm

Rohmahlanlage bzw. im Bereich des Abgasfilters. In **Tabelle 3** sind die Quecksilbergehalte im Reingas sowie die Klärschlammmassenströme und deren Anteil an der Feuerungswärmeleistung dargestellt.

Tabelle 3: Quecksilbergehalte im Reingas sowie die Klärschlamm-Massenströme und deren Anteil an der Feuerungswärmeleistung

	Werk A			Werk B		Werk C	
	ohne KS	MEKS	gran. TKS	ohne KS	gem. TKS	ohne KS	gran. TKS
KS (t/h)	-	8	4	-	2,7	-	1
Anteil an FWL⁴ (%)	-	5	11	-	6,8	-	7,8
Hg-Reingas (mg/m³)	0,013	0,014	0,01	<0,01	<0,01	0,011	0,025 (DB)

Die während der Ofenversuche durchgeführten Quecksilberbilanzen für den äußeren und inneren Bilanzraum ergaben, dass die Klärschlämmeinsätze zwar grundsätzlich zu geringfügig höheren Quecksilbereinträgen führen, dass diese jedoch im jeweiligen Ofenbetrieb zu keiner Überschreitung des in Deutschland gültigen Quecksilber-Grenzwertes von 0,03 mg/m³ (Tagesmittelwert) führten. Die ausgebildeten Quecksilberkreisläufe wurden durch die jeweiligen Betriebsweisen der Ofenanlagen effektiv entlastet.

Einflüsse auf die Produkteigenschaften

Für die Produktuntersuchungen wurden Klinkerproben hinsichtlich ihrer Phasenzusammensetzung charakterisiert, um schlüssige Differenzierungen der Klinkerproben im Hinblick auf den Einsatz von Klärschlamm als Sekundärbrennstoff zu treffen. Bestimmt wurden die chemische Zusammensetzung der Klinker bzw. die röntgendiffraktometrisch ermittelten Phasenzusammensetzungen. Des Weiteren wurden lichtmikroskopische Untersuchungen der Klinkerproben durchgeführt. Die aus dem produzierten Klinker hergestellten Zemente wurden zusätzlich auf ihre Zementeigenschaften untersucht. Dazu wurden Zemente mit 3 M.-% Sulfatträgeranteil hergestellt und eine Sulfatoptimierung durchgeführt. In **Tabelle 4** sind die wichtigsten Klinkerphasenanteile sowie Druckfestigkeiten des Zementmörtels für alle Ofenversuche dargestellt.

Tabelle 4: Klinkerphasen und Druckfestigkeit der Zementmörtel

	Werk A			Werk B		Werk C	
	ohne KS	MEKS	gran. TKS	ohne KS	gem. TKS	ohne KS	gran. TKS
Alit, C₃S (M.-%)	70,3	61,5	62,7	72	70,8	67,7	60,4
Belit, C₂S (M.-%)	8,3	16,2	15,8	13,2	13,9	18,6	25,7
C₂AF (M.-%)	5	6,7	6,6	11,1	11,2	4,3	5,1
C₃A kub. (M.-%)	8,6	4,7	7,6	2,4	2,7	4,1	4,8
C₃A orth. (M.-%)	1,5	4,8	2,6	0,2	> 0,01	4,8	3,3
Druckf. 28 Tagen (MPa)	58,4	59,7	60,2	58,3	50,3	67,6	63,9
Druckf. 90 Tagen (MPa)	61,3	63,4	65,8	66,2	66,1	75	69,7

⁴ FWL = Feuerungswärmeleistung

An allen Bilanztagen mit Klärschlammeinsatz wurde im Klinker ein leicht verringerter Alit- und erhöhter Belitanteil festgestellt. Die Festigkeitsuntersuchungen zeigen für zwei Analysen nach 28 Tagen geringfügig verminderte Druckfestigkeiten, die nach 90 Tagen weitgehend wieder ausgeglichen waren. Für einen Ofenversuch waren die Festigkeiten nach 28 Tagen weitgehend gleich und nach 90 Tagen nur geringfügig höher. Die festgestellten Unterschiede sind so gering, dass ein signifikanter Einfluss auf die Produkte durch den Klärschlammeinsatz ausgeschlossen werden kann.

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die oben erwähnten Sensitivitätsanalysen ergaben, dass die akquirierbare Klärschlammmenge und das Annahmementgelt für Klärschlamm sowie die Auslastung der zu errichtenden Anlagen für die Wirtschaftlichkeit des Klärschlammeinsatzes in der Zementindustrie entscheidend sind. Die Untersuchungen wurden für den Fall durchgeführt, dass Steinkohle, Braunkohle oder - zum Vergleich - Tiermehl substituiert wird. In **Bild 2** sind die Ergebnisse für die drei untersuchten Konzepte dargestellt.

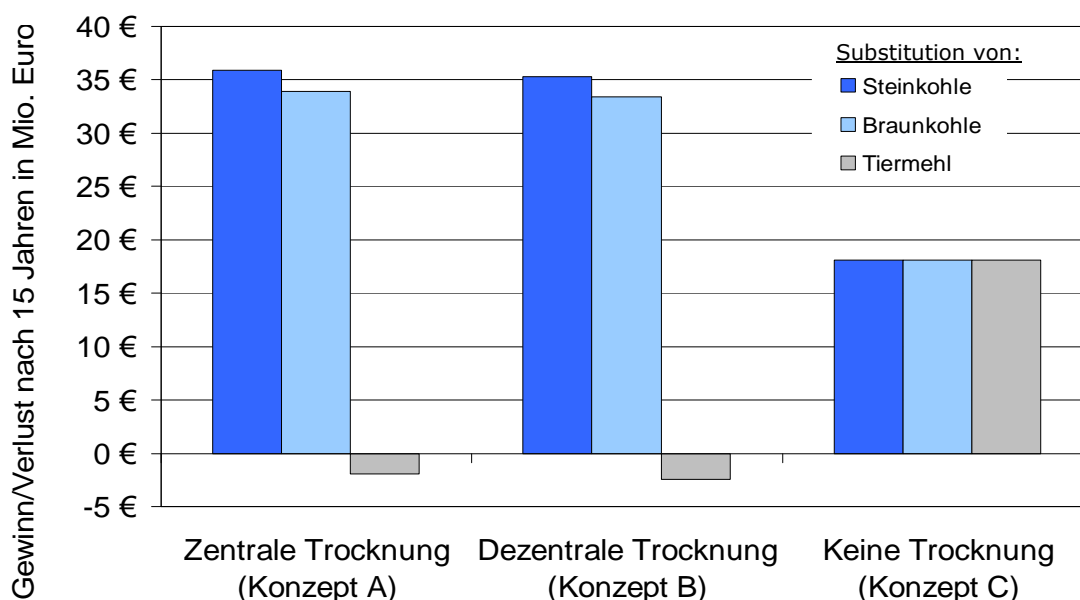


Bild 2: Vergleich der Konzepte mit den verschiedenen Szenarien

Eine zentrale Trocknung ist dabei unter den getroffenen Annahmen unwesentlich rentabler als eine dezentrale Trocknung. Es ist jedoch zu beachten, dass beim Trocknungskonzept (B), der dezentralen Trocknung, ein theoretischer Zustand (große Mengen TKS in der unmittelbaren Umgebung) angenommen wurde, was zu niedrigen Transportkosten für den TKS führt. Der biogene Brennstoff Tiermehl kann in keinem der betrachteten Fälle wirtschaftlich durch Klärschlamm ersetzt werden. Nur wenn das Entsorgungsentgelt auf über 50 EUR/t (MEKS) ansteigt, kann sich auch die Substitution von Tiermehl durch TKS rentieren.

Während die Klärschlammmenge vergleichsweise präzise ermittelt werden kann, da das Aufkommen auch über die nächsten Jahre weitgehend konstant bleiben wird, können die Annahmementgelte für Klärschlamm hingegen nur schwer kalkuliert werden. Unbekannt und nicht präzise vorauszusehen ist zudem der zukünftige Anfallzustand von Klärschlamm

(MEKS oder TKS). Ein landwirtschaftliches Ausbringungsverbot könnte unter Umständen - wie in der Schweiz - zu einer verstärkten Trocknung an Kläranlagen führen. Eine zentrale Trocknung im Zementwerk würde sich dann als unwirtschaftlich erweisen, da nur unzureichende Marktkapazitäten im nahen Umfeld an MEKS vorhanden wären. Auch die Transportkosten wären höher, da für eine ausreichende Menge an MEKS größere Transportwege notwendig wären.

Die Entwicklung der Annahmgebühren hängt stark von dem Angebot der Entsorgungsmöglichkeiten ab. Wenn im Rahmen des CO₂-Emissionshandels die Minderungspflicht verschärft wird und damit die Preise für CO₂-Emissionszertifikate steigen, wird Klärschlamm als biogener Brennstoff sowohl für Kraftwerke als auch für Zementwerke noch interessanter; die Nachfrage steigt, die Entsorgungsentgelte sinken. Da Kraftwerke jedoch auch zur Effizienzsteigerung angehalten sind und die Verfeuerung von MEKS den Wirkungsgrad senkt (je nach Wassergehalt keine oder geringe Substitution von Brennstoffen), kann es für Kraftwerksbetreiber wirtschaftlicher sein, die Effizienz zu steigern und auf den Klärschlammeinsatz zu verzichten. Dann würde wiederum die Nachfrage sinken und die Zuzahlungen steigen. Auch ein Verbot der landwirtschaftlichen Verwertung hätte Auswirkungen auf die Entsorgungsentgelte. Der Wegfall dieses volumetrisch wichtigen Entsorgungsweges für entwässerten Klärschlamm würde das Entsorgungsangebot (Reduzierung auf thermische Behandlungen) bei gleich bleibender Nachfrage verknappen. Folglich würden kurzfristig die Entsorgungsentgelte für entwässerten Klärschlamm steigen und der Bau weiterer dezentraler Trocknungsanlagen attraktiver werden.

Für Kläranlagen ist die Garantie der Entsorgungssicherheit von großer Bedeutung. Ein Zementwerk hat üblicherweise eine jährliche Laufzeit von ca. 300 Tagen. Eine Entsorgungssicherheit für 365 Tage im Jahr wäre also nur mit sehr großen Speicherkapazitäten und damit verbundenen Investitionskosten möglich. Da auch andere Mitverbrenner keine ununterbrochene Abnahme gewährleisten können, könnte die Akquirierung im Verbund (Kraftwerke – Zementwerke) erfolgen. Der Klinkerbrennprozess ist neben der Verwertung in der Landwirtschaft der einzige Entsorgungsweg, in dem neben der energetischen auch eine stoffliche Verwertung stattfindet. Eine Phosphatrückgewinnung aus den Aschen, die in Monoverbrennungsanlagen anfallen, wird derzeit zwar getestet, ist aber noch nicht flächendeckend umgesetzt. Ob Konzept (A) oder (C) umgesetzt wird, hängt vor allem von der Ofenanlage des Zementwerkes ab. Wenn keine Kühlerabluft zur Trocknung zur Verfügung steht, bleibt Konzept (C) als wirtschaftliche Alternative. Zuvor sollte allerdings eine präzise Evaluierung der maximalen verfahrenstechnisch einsetzbaren und der im Umkreis anfallenden Klärschlammengen erfolgen, um eine höchstmögliche Auslastung der Anlagen zu gewährleisten.

4 Zusammenfassung

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wurden die Auswirkungen des Einsatzes von Klärschlamm in der Zementindustrie untersucht. Wesentliches Ziel der Untersuchungen war, Möglichkeiten und Grenzen einer wirtschaftlichen und umweltverträglichen Verwertung von Klärschlamm als alternativer Sekundärstoff in der Zementindustrie aufzuzeigen. Für die dabei durchgeführten Ofenversuche wurden keine signifikanten Einflüsse auf den jeweiligen Ofenbetrieb festgestellt. Versuche zur Optimierung der Brennereinstellung über die Primärluft ergaben geringe Einflussmöglichkeiten auf die Feuerung. Bei Klärschlammeinsatz im Bereich von 10 % der Feuerungswärmeleistung wurde keine signifikante Beeinträchtigung der Betriebsbedingungen ermittelt.

Mit Hilfe von Energiebilanzen wurde festgestellt, dass der Einsatz von Trockenklärschlamm bis zu max. 10 % der Feuerungswärmeleistung, keinen signifikanten Einfluss auf den spezifischen Brennstoffenergiebedarf hat. Die Werte lagen bei durchschnittlich 3600 kJ/kg Klinker. Der Einsatz von mechanisch entwässertem Klärschlamm im Calcinator erhöhte wegen des höheren Wassereintrags den erforderlichen klinkerspezifischen Brennstoffeinsatz um ca. 250 kJ/kg Klinker.

Für den äußeren und inneren Bilanzraum wurden bei Klärschlammeinsatz geringfügig höhere Quecksilbereinträge festgestellt, die emissionsseitig zu keiner Überschreitung des in Deutschland gültigen Quecksilber-Grenzwertes von 0,03 mg/m³ (Tagesmittelwert) führten. Die ausgebildeten Quecksilberkreisläufe wurden durch die jeweiligen Betriebsweisen der Ofenanlagen entlastet.

Untersuchungen der hergestellten Zementklinker zeigten an allen Bilanztagen mit Klärschlammeinsatz einen leicht verringerten Alit- und erhöhten Belitanteil. An den aus den Klinkern ermahlenden Zementen wurden Festigkeitsuntersuchungen durchgeführt, die nur geringfügig veränderte Druckfestigkeiten aufzeigen. Ein signifikanter Einfluss des Klärschlammeinsatzes auf die Produkte ist somit unter den gegebenen Bedingungen ausgeschlossen.

Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ergab, dass der direkte Einsatz von mechanisch entwässertem Klärschlamm unter den heutigen Randbedingungen für deutsche Zementwerke wirtschaftlich ist. Die Verbrennung von Trockenklärschlamm ist sowohl bei Trocknung im Zementwerk, als auch bei einer dezentralen Trocknung in Kläranlagen ökonomisch möglich, wenn Braun- und Steinkohle substituiert werden. Größte Risikofaktoren für die Wirtschaftlichkeit sind jeweils die akquirierbare Klärschlammmenge, die respektive Auslastung der zu errichtenden Anlagen sowie das Annahmeentgelt für den Klärschlamm.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht, da eine sehr gute technisch-wissenschaftliche Basis für den umweltverträglichen und wirtschaftlichen Einsatz von Klärschlamm als Sekundärstoff in der Zementindustrie geschaffen wurde. Klärschlamm ist bei unterschiedlichen Einsatzqualitäten und –möglichkeiten als alternativer Sekundärstoff unter den gewählten stofflichen und betrieblichen Bedingungen sehr gut geeignet. Die Mitverbrennung von Klärschlamm ist als umweltverträgliche Verwertungsmöglichkeit einzustufen.