

Liapor GmbH & Co. KG
Industriestraße 2
91352 Hallerndorf/Pautzfeld

„Liament“
Entwicklung einer Prozessführung zur Herstellung
eines Betonzusatzstoffs auf Basis von calciniertem
Ton mit Potenzial zur Ressourcenschonung und
Energieeinsparung

Abschlussbericht für ein F&E-Vorhaben,
gefördert unter dem Aktenzeichen Az: 29083
von der
Deutsche Bundesstiftung Umwelt

von

Wolfgang Fuchs

Juli 2013

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	29083	Referat	21/2	Fördersumme	125.000,00 €
----	--------------	---------	-------------	-------------	---------------------

Antragstitel **Entwicklung einer Prozessführung zur Herstellung eines
Betonzusatzstoffs auf Basis von calciniertem Ton mit Po-
tenzial zur Ressourcenschonung und Energieeinsparung**

Stichworte **calcinierter Ton, Betonzusatzstoff, Verfahren**

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
26 Monate	07.03.2011	07.05.2013	Abschluss

Zwischenberichte mit den Mittelanforderungen

Bewilligungsempfänger	Liapor GmbH & Co.KG Industriestrasse 2 91352 Hallerndorf-Pautzfeld	Tel 09545 448 0 Fax 09545 448 83
		Projektleitung Wolfgang Fuchs
		Bearbeiter Wolfgang Fuchs

Kooperationspartner Liapor GmbH & Co. KG ist alleiniger Antragsteller bzw. Bewilli-
gungsempfänger

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Calcinierte Tone bieten sich als alternativer Betonzusatzstoff an. Verglichen mit der Herstellung von Zement ist der Energieeinsatz für das Herstellen geringer. Für das Calcinieren werden in diesem Vorhaben keine reinen Tone wie Kaolin verwendet, sondern es sind Tone zu nutzen, die für die Blähtonproduktion ungeeignet sind und deponiert werden müssten oder es sind die bereits gebrannten Restmengen aus der Blähtonproduktion aufzubereiten. Der erhoffte ökologische Vorteil hängt eng mit der Verfahrenstechnik bei der Aufbereitung beider Einsatzstoffe zusammen. Ziel des Vorhabens ist es, die Eignung der Mischung aus calciniertem Ton und Blähtonresten zu ermitteln und die einzelnen Verfahrensschritte bei der Aufbereitung für den Einsatz als Betonzusatzstoff zu optimieren.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Der eingesetzte Ton ist ein Gemisch. Im Labormaßstab werden deshalb zunächst die vorhandenen Tone bei verschiedenen Temperaturprofilen calciniert. Versuchsparameter sind unter anderem Aufheizgeschwindigkeit, Haltedauer, Ofenatmosphäre, Rohstofffeuchte und –zusammensetzung. In begleitenden chemisch-mineralogischen Untersuchungen werden das Ausgangsmaterial und die neu gebildeten Phasen charakterisiert und Vorgaben für weitere Laborversuche gewonnen. Ziel ist es, ökologisch und technisch optimale Produktionsbedingungen für den calcinierten Ton zu finden. Dazu müssen die Erkenntnisse aus dem Labor auf die Produktionsanlage übertragen und dort bestätigt werden. Die vorhandenen Produktionsanlagen müssen für das Calcinieren zum Teil umgebaut werden. Im Weiteren ist ein Konzept für das Mischen, Mahlen und Sichten des calcinierten Tons und der Blähton-Restmengen zu erstellen. Die Eigenschaften des neu gewonnenen Betonzusatzstoffs werden im Labor in betontechnologischen Versuchen überprüft, bevor die Eignung großtechnisch in Kundenversuchen getestet wird.

Ergebnisse und Diskussion

Für die Optimierung der Prozessführung wurde zunächst für den zu calcinierenden Ton die Brenntemperatur gesucht, bei der der verwendete Rohnton die höchste Leistungsfähigkeit als Betonzusatzstoff aufweist. Die Optimierung erfolgte aus ökologischen und ökonomischen Gründen zunächst im Laborofen. Die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf die großtechnische Produktionsanlage wurde überprüft und bestätigt. Für die Auswertung mussten verschiedene Messverfahren genutzt werden. Mit Hilfe der Röntgenfluoreszenzanalyse und der Röntgendiffraktometrie wurde zunächst das Ausgangsmaterial charakterisiert. Die für die weitere Optimierung interessanten Temperaturbereiche wurden im nächsten Schritt durch den Einsatz der Differenzialthermoanalyse identifiziert und die Zusammensetzungen der nach diesen Vorgaben erzeugten calcinierten Tone erneut mit der Röntgendiffraktometrie untersucht. Die Ergebnisse wurden dann nach der Rietveld-Methode mit einer eigens angepassten Datenbank ausgewertet. Aus den Versuchen konnte für das vorhandene Ausgangsmaterial gezeigt werden, dass eine optimale Leistung als Betonzusatzstoff bei einer großtechnischen Brenntemperatur von 720 °C erreicht wird.

Die Puzzolanität des calcinierten Tons wurde über den Verbrauch an Calciumhydroxid nachgewiesen. Ein weiteres Zeichen für die gesteigerte Reaktivität war der Gehalt an eluierbaren Silicium- und Aluminiumionen, der ebenfalls bei der identifizierten Brenntemperatur maximal wurde.

Für die Optimierung der Prozessführung wurde der Einfluss der Korngröße des Aufgabematerials an zwei extremen Varianten untersucht. Unterschiede ergaben sich durch die Temperaturgradienten, denen die Rohntonbrocken beim Brennen ausgesetzt wurden. Für die praktisch relevanten Korngrößen war der Unterschied allerdings unbedeutend. Ähnlich verhielt es sich mit dem Einfluss der Ausgangsfeuchte. Auch hierbei wurde ein Effekt beobachtet, der allerdings auf die äußere Schicht begrenzt blieb und sich nach dem Mahlen nicht mehr nachweisen ließ. Die Bedeutung der Zusammensetzung des Ausgangstons wurde im Vergleich mit anderen Rohntonen deutlich. Ein Calcinieren dieser Tone bei sonst gleichen Randbedingungen lieferte abweichende, in der Regel schlechtere Ergebnisse. Die hochgebrannten Tone wurden hier nicht betrachtet, weil ihre Brenntemperatur durch den Herstellprozess des Ausgangsmaterials vorgegeben ist, die deutlich über den verschiedenen Umwandlungstemperaturen liegt.

Zusätzlich zur Optimierung der Brenntemperatur wurde der Einfluss der Mahltechnik für den calcinierten und den amorphen Ton untersucht. Das calcinierte Material lässt sich besser mahlen als das amorphe Material. Für das Mahlen eignen sich sowohl die untersuchten Kugel- als auch die Walzenmühlen. Für die Partikelverteilung der nach dem Brennen gemahlene Tone ist ein d_{50} -Wert unter 15 µm anzustreben. Die im Werk vorhandene Walzenschüsselmühle reicht mit ihrem statischen Sieb nicht aus, um diese Anforderung mit einem vertretbaren Durchsatz zu erfüllen. Für eine ökologische Optimierung ist ein getrenntes Mahlen anzustreben, da so die Mischung aus calciniertem und amorphem Ton optimal den Erfordernissen der Anwender angepasst werden kann.

Für die Herstellung der calcinierten Tone sind nur geringfügige Umbauten und Ergänzungen erforderlich. Die Steuerung des zusätzlichen Bypasses kann ohne größeren Aufwand in die vorhandene Prozessführung integriert werden. Schwierigkeiten mit der Beschickung der Eimerelevatoren konnten durch den Einbau einer Umlenkschaufel beseitigt werden.

Die optimierte Brenntemperatur steigert die Leistungsfähigkeit des calcinierten Tons insbesondere im Hinblick auf die Festigkeit nach 28 Tagen. In verschiedenen Versuchen konnte ein Aktivitätsindex von mehr als 100 % nachgewiesen werden. Dieses Leistungsvermögen erhöht das Potenzial für das ökologisch interessante Gemisch aus calciniertem und amorphem Ton, die es gestattet, mit dem ursprünglich als Optimum erhofften Mischungsverhältnis CT : AT von 20 : 80 einen wettbewerbsfähigen Betonzusatzstoff zu erhalten, der dazu beiträgt, den Einsatz nicht erneuerbarer Primärenergie im Beton abzusenken. Die gebrannten Tone bestätigten getrennt und als Mischung in Spritzbetonversuchen und in der Herstellung von Betonsteinen ihre Leistungsfähigkeit.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Ausgewählte Ergebnisse wurden auf dem Heidelberger BetonTECHNOLOGENTag 2012 in München am 14. März 2012 im Rahmen eines Vortrags vorgestellt.

Fazit

Das Energieeinsparpotenzial und die Möglichkeit zur Ressourcenschonung wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens durch die untersuchten Maßnahmen optimiert und konnten gegenüber der Ausgangssituation auf das als Optimum angesehene Niveau angehoben werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
2	Phase I: Vorbereitungsphase und mineralogische Optimierung	10
3	Arbeitspaket 1: Vorversuche Laborofen	10
3.1.1	Auswahl und Beschaffung des Laborofens	10
3.1.2	Einfahren des Laborofens (Einstellen der Ofenatmosphäre)	11
3.1.3	Vergleich der Zusammensetzung der calcinierten Tone aus dem Laborofen mit dem großtechnisch hergestellten Material aus den Vorversuchen (u. a. mittels eigener RFA)	11
3.2	<i>Arbeitspaket 2: Materialoptimierung und Phasenanalyse</i>	13
3.2.1	Calcinieren von Tönen im Laborofen	13
3.2.2	Variation der Aufheizgeschwindigkeit, Haltedauer, Ofenatmosphäre	13
3.2.3	Variation der Korngröße und -verteilung des aufzugebenden Rohtons	13
3.2.4	Variation der Feuchte des Rohtons (Winter- bzw. Sommersituation)	15
3.2.5	Variation der Rohton-Zusammensetzung (Sensitivitätsstudie)	16
3.2.6	Identifizieren der ökologisch und technisch optimalen Brenntemperatur und der zugehörigen verfahrenstechnischen Randbedingungen	17
3.2.7	Begleitende chemisch-mineralogische Untersuchung zur Kontrolle der Eigenschaften und als Vorgabe für die weiteren Versuche	18
3.2.8	Identifizieren eines optimalen Mischungsverhältnisses aus calciniertem und hochgebranntem Ton	19
4	Phase II: Entwicklung des Herstellverfahrens	20
4.1	<i>Arbeitspaket 3: Entwicklung des Herstellverfahrens</i>	20
4.1.1	Entwicklung eines Konzepts für die Eingangsprüfung	20
4.1.2	Entwicklung eines Konzepts für den Rohton-Transport zum Ofen	21
4.1.3	Entwicklung eines Konzepts für das Brechen/Sichten	23
4.1.4	Vorversuche für das Mahlen mit unterschiedlichen Mühlentypen	23
4.1.5	Vorversuche für das Mahlkonzept (getrennt/zusammen Mahlen)	25
4.1.6	Begleitende Untersuchung der Kornverteilung/Oberfläche/Reaktivität	25
4.2	<i>Arbeitspaket 4: Einkauf/Beschaffung (Make or Buy Analyse)</i>	27
4.2.1	Entscheidung, was muss zugekauft werden, was kann selbst gefertigt oder an bestehenden Anlagen modifiziert werden?	27
4.3	<i>Arbeitspaket 5: Fertigung eigener Komponenten</i>	28
4.4	<i>Arbeitspaket 6: Entwicklung Steuerung und Regelung</i>	28
5	Phase III: Betontechnologische Untersuchungen	28
5.1	<i>Arbeitspaket 7: Betontechnologische Untersuchungen</i>	28
5.1.1	Prüfung auf betonschädliche Bestandteile	28
5.1.2	Sulfate, Chloride	28
5.1.3	Frischbetonuntersuchung	28
5.1.4	Abbindeverhalten	29
5.1.5	Rheologische Eigenschaften	29
5.1.6	Festbetonuntersuchung	31
5.1.7	k-Wert	31
6	Phase IV: Kundenversuche	32
6.1	<i>Arbeitspaket 8: Kundenversuche</i>	32
6.1.1	Spritzbeton	32
6.1.2	Fertigteilwerk	34
7	Phase V: Projektabschluss	36
7.1	<i>Arbeitspaket 9: Verfahrensoptimierung, technische Dokumentation</i>	36
8	Fazit	36

Verzeichnisse

Bilder

Bild 1:	Labordrehrohrofen im neuen Anbau	11
Bild 2:	Vergleich der Korngrößen des Rohtons für die Laborversuche	14
Bild 3:	Großtechnisch im Vorversuch hergestelltes Korn mit deutlich unterschiedlich oxidierten Bereichen (Länge des Bildausschnitts im Original: 3 cm)	14
Bild 4:	Vergleich von calcinierten Tonen nach einer gezielten Vortrocknung (links) und mit üblichem Ausgangsfeuchtegehalt (rechts)	16
Bild 5:	Dünnschliff eines calcinierten Tonpartikels mit oxidiertem Randzone (rotbraun); Länge des Bildausschnitts: 3 mm	16
Bild 6:	Leistungsfähigkeit unterschiedlich zusammengesetzter Tone	17
Bild 7:	Thermogravimetrische Auswertung für den Lias-Delta Ton	18
Bild 8:	Auswirkung verschiedener Mischungsverhältnisse aus calciniertem und amorphem Ton auf die Leistungsfähigkeit von Mörtel	19
Bild 9:	Bypass in der bestehende Anlage (links) und Anschluss an den Zulauf hinter dem ersten Granulierteller (rechts)	22
Bild 10:	Aufsicht auf den Zulauf zum Becherwerk mit provisorisch installierter Umlenkschaukel (rechts im Bild, mit Schraubzwingen arretiert)	23
Bild 11:	Kornverteilungen verschiedener Mühlen für den calcinierten Ton	24
Bild 12:	Kornverteilungen verschiedener Mühlen für den hochgebrannten Ton	24
Bild 13:	Vergleich der Kornverteilungen eines hochgebrannten (AT1) und eines calcinierten Tons (CT3)	25
Bild 14:	Zusammenhang zwischen Aktivitätsindex und Löslichkeit der Al- und Silonen	27
Bild 15:	Auswirkungen verschiedener calcinierter und amorpher Tone auf das Abbindeverhalten eines CEM I 42,5 R	29
Bild 16:	Auswirkung des calcinierten Tons auf den Verlauf der Konsistenz	30
Bild 17:	Auswirkung des Gehalts an calcinierten Ton auf die Konsistenz	30
Bild 18:	Vergleich der auf die 28-Tage-Festigkeit des Referenzmörtels bezogenen Prismendruckfestigkeitswerte von Mörteln mit verschiedenen calcinierten und amorphen Tonen	31
Bild 19:	Vergleich der Aktivitätsindizes verschiedener calcinierter und amorpher Tone	32
Bild 20:	Frühfestigkeiten der erzeugten Spritzbetone, Grenzlinien A und B spannen den Bereich J1 auf (21)	33
Bild 21:	Festigkeitsentwicklung der untersuchten Spritzbetone (21)	34
Bild 22:	Vergleich der mittleren Wassereindringtiefen (21)	34
Bild 23:	Druckfestigkeit der Versuche mit Betonpflastersteinen	35
Bild 24:	Spaltzugfestigkeit der Versuche mit Betonpflastersteinen	36

Tabellen

Tabelle 1: Eigenschaften ausgewählter Labor-Drehrohröfen	10
Tabelle 2: Ergebnisse der Untersuchungen der calcinierten Tone aus dem Vorversuch und dem Laborofen mittels Röntgenfluoresenzanalyse	12
Tabelle 3: Ergebnisse der Untersuchungen mittels Röntgendiffraktometrie für großtechnisch in Vorversuchen und im Laborofen calcinierte Tone	13
Tabelle 4: Ergebnisse der Untersuchungen mittels Röntgendiffraktometrie von im Laborofen mit unterschiedlicher Ausgangsgröße calcinierten Tonen	15
Tabelle 5: Ergebnisse begleitender Untersuchungen	19
Tabelle 6: Ergebnisse der Untersuchungen mittels Röntgenfluoresenzanalyse für verschiedene Tone	20
Tabelle 7: Ergebnisse der Untersuchungen mittels Röntgendiffraktometrie für verschiedene Tone	21
Tabelle 8: Gegenüberstellung der Oberflächen und Reaktivität zweier calcinierter und eines amorphen Tons	26
Tabelle 9: Glühverluste nach DIN EN 196-2 (15)	28
Tabelle 10: Gehalt an Chlorid und Sulfat nach DIN EN 196-2 (15)	28
Tabelle 11: Wasseranspruch calcinierter und amorpher Tone sowie verschiedener Zemente	29
Tabelle 12: Untersuchte Varianten der Bindemittelzusammensetzung	35

Begriffe und Definitionen

AT	amorpher (hoch gebrannter) Ton
CT	calciniertes (niedrig gebranntes) Ton
DTA	Differenzialthermoanalyse
ICP-OES	optische Emissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma
TG	Thermogravimetrie
XRD	Röntgendiffraktometrie

Zusammenfassung

Der Einsatz von Abraum aus einem Tonvorkommen, der für die Blähtonproduktion nicht geeignet ist, sowie die gezielte Aufbereitung von bereits gebrannten Blähtonrestmengen wurden mit dem Ziel untersucht, aus der Kombination beider Materialien einen möglichst leistungsfähigen und ökologisch vorteilhaften alternativen Betonzusatzstoff zu erzeugen.

Für die prozesstechnische Optimierung lag der Schwerpunkt auf dem Calcinieren der noch nicht gebrannten Tone aus dem Abraum. Diese wurden im Labormaßstab bei unterschiedlichen Maximaltemperaturen calciniert. Weitere Versuchsparameter waren die Aufheizgeschwindigkeit, Haltedauer, Ofenatmosphäre, Rohntonfeuchte und -zusammensetzung. In begleitenden chemisch-mineralogischen Untersuchungen wurde das Ausgangsmaterial charakterisiert und die beim Calcinieren neu entstandenen Phasen untersucht. Aus diesen Versuchen konnten die optimalen Randbedingungen für das Calcinieren des vorhandenen Rohstoffs abgeleitet werden.

Für das Calcinieren mussten in der vorhandenen Produktionsanlage mehrere Ein- und Umbauten vorgenommen werden. Diese Maßnahmen konnten mit dem werkseitigen Personal umgesetzt werden. Die notwendigen Änderungen der Prozessführung wurden ebenfalls in Eigenleistung in die Steuerung der bestehenden Anlage integriert.

Die aufgrund der chemisch-mineralogischen Ergebnisse erhoffte Leistungssteigerung des calcinierten Tons wurde in betontechnologischen Versuchen im Labor im Vergleich zu den Ergebnissen aus Vorversuchen bestätigt. Es gelang sowohl die Erhärtungsgeschwindigkeit als auch das Festigkeitsniveau für den calcinierten Ton zu steigern. Diese Optimierung gestattet es nun, ein Gemisch aus calciniertem und amorphem Ton herzustellen, das über eine große Leistungsfähigkeit verfügt und zudem eine ökologisch attraktive Alternative als partielles Substitut für Zement bietet.

Die betontechnologischen Erkenntnisse aus den Laborversuchen wurden in der Praxis überprüft. In Zusammenarbeit mit einem Baustoffhersteller wurde in einer bewährten Spritzbetonrezeptur der calcinierte als Bindemittelbestandteil im Austausch gegen die verwendete Flugasche eingesetzt. Der mit dem calcinierten Ton modifizierte Spritzbeton war der Ausgangsrezeptur ebenbürtig und im Hinblick auf das Versinterungspotenzial sogar überlegen. In einem zweiten Praxisversuch wurde ein CT/AT-Gemisch in Betonpflastersteinen eingesetzt. Mit der optimierten Rezeptur konnten die mechanischen Eigenschaften um 20 % verbessert und gleichzeitig der nicht erneuerbare Primärenergiebedarf um 4 % gesenkt werden.

1 Einleitung

Die Liapor GmbH & Co. KG produziert seit Jahrzehnten den Liapor-Blähton. Bei dessen Produktion fallen im Zuge des Abbaus Abraum und bei der Produktion Restmengen an, die bisher nicht verwendet werden können und daher entsorgt oder deponiert werden müssen. Für ein ökologisch und wirtschaftlich handelndes Unternehmen ergab sich daraus die Frage, wie Abraum und Restmengen vermieden oder genutzt werden könnten. Zugleich kommt aus der Betonindustrie die Frage nach einem leistungsfähigen ökologischen Betonzusatzstoff, der als Alternative für die gängigen Betonzusatzstoffe wie Steinkohlenflugasche und Hüttensand dienen könnte, die als industrielle Nebenprodukte anfallen. Deren Quantität hängt von der Nachfrage nach dem jeweiligen Hauptprodukt (Energie aus Steinkohleverstromung bzw. Stahl) ab und unterlag in den letzten Jahren deutlichen Schwankungen, die phasenweise zu einer spürbaren Verknappung des Marktangebotes führten (1, 2).

Die positive Wirkung der feinen Bestandteile von Liapor-Brechsand ist seit Jahren bekannt. Die puzzolane Leistungsfähigkeit des Liapor-Tons wurde in Vorversuchen ausgelotet, in denen gemahlene Blähton-Restmengen und zusätzlich calcinierter Abraum-Ton genutzt wurde. Beide Materialien übertrafen in ihrer Leistungsfähigkeit sowohl getrennt als auch in Mischung die Erwartungen an ihre Reaktivität.

Mit der sich abzeichnenden Nutzungsoption als Betonzusatzstoff eröffnen sich mehrere umweltrelevante Vorteile:

- Vermeiden des Deponierens von Blähton-Restmengen,
- Schonen natürlicher Ressourcen durch den Einsatz bisheriger Abraummassen als Basis für den calcinierten Ton,
- Nutzen der in den Blähton-Restmengen steckenden thermische Energie für die Herstellung einer Bindemittelkomponente und
- Verringerung der CO₂-Emissionen des Baustoffs Beton durch Senkung des nicht erneuerbaren Primärenergiebedarfs.

Im Rahmen des Forschungsprojektes sollte die Voraussetzung für eine großtechnische Umsetzung der Laborerkenntnisse geschaffen werden. Im ersten Schritt war dazu an einer Laboranlage die optimale Produktionsbedingung unter technischen und ökologischen Gesichtspunkten für das Calcinieren des Tons zu finden. Die Ergebnisse sollten schrittweise auf die Produktionsanlage übertragen werden. Begleitet werden sollten die Brennversuche von chemisch-mineralogischen und mechanischen Prüfungen. Nach der brenntechnischen Optimierung war die weitere Aufbereitung, insbesondere das Mahlen wieder unter technischen und ökologischen Gesichtspunkten zu optimieren. Mit der endgültigen Mischung aus gemahlenem Blähton und calciniertem Ton waren im Labor die betontechnologischen Eigenschaften, die Dauerhaftigkeit und die Umweltverträglichkeit zu prüfen. Die praktische Eignung sollte sich in verschiedenen betontechnischen Anwendungen in Feldversuchen bei potenziellen Kunden erweisen.

Dieser Abschlussbericht stellt die erzielten Ergebnisse vor.

Hauptteil

2 Phase I: Vorbereitungsphase und mineralogische Optimierung

2.1 Arbeitspaket 1: Vorversuche Laborofen

2.1.1 Auswahl und Beschaffung des Laborofens

Der zu beschaffende Laborofen musste verschiedene Anforderungen erfüllen, die in einem Anforderungsprofil festgelegt wurden. Grundsätzlich kam als Laborofen nur ein Drehrohrföfen in Frage, da nur so ein Übertragen der Laborergebnisse auf Produktionsöfen zu erwarten war. Der Rohrquerschnitt musste ausreichend groß für eine Aufgabekorngröße von ca. 10 mm sein. Die Beheizung sollte in mehrere Zonen unterteilt sein, um die Möglichkeiten der mehrteiligen Blähtonöfen zu simulieren. Die mögliche Maximaltemperatur musste sich ebenfalls an den Gegebenheiten der Produktionsöfen orientieren. Verschiedene Anbieter kamen mit ihren Laboröfen in die engere Auswahl. Einen Überblick der Eigenschaften gibt Tabelle 1.

Tabelle 1: Eigenschaften ausgewählter Labor-Drehrohröfen

Hersteller	MUT Advanced Heating	Xerion	Nabertherm	GERO GmbH
Typ	DRO 100/ 1000-1300	XROTATE	RSR 80/500/11	F 150- 1000/13
Systemabmessungen l/b/h [mm]	2300/ 800/ 1800	2300/ 1200/ 1400	1075/ 475/ 390	1200/ 520/ 590
max. Ofenraum- temperatur [°C]	1300	1600	1100	1350
Innenraum Ofen (\varnothing x l) [mm]	100 x 1000	100 x 1000	70 x 1140	150 x 1000
Regelkonstanz [K]	+/- 2	+/- 2	+/- 2	+/- 1
Temperatur- homogenität [K]	+/- 10	+/- 5	+/- 10	+/- 8
Heizrate [K/min]	\leq 10	\leq 5	\leq 5	\leq 10
Heizzonen	3	3	3	3
Anschlusswert [kW]	25	8	3,4	12

Den Anforderungen entsprach der Ofen F 150-1000/13 der Firma Gero am besten. Für die Aufstellung wurden spezielle Anforderungen hinsichtlich der Ausstattung des Raumes gestellt. Zum Einen benötigt der Ofen einen ausreichend hohen Raum, um durch Schrägstellen des Rohrs die Durchlaufgeschwindigkeit flexibel regulieren zu können. Zusätzlich ist ein leistungsstarker Abzug erforderlich, der die entweichenden Ofengase sicher abführen kann. Da die vorhandenen Räumlichkeiten nicht für die Randbedingungen für die Aufstellung erfüllten, musste ein neuer Anbau an das Laborgebäude erstellt werden. Bild 1 zeigt den installierten Laborofen mit Unterbau zum Einstellen der Neigung im neuen Anbau an das bestehende Laborgebäude.



Bild 1: Labordrehrohrföfen im neuen Anbau

2.1.2 Einfahren des Laborofens (Einstellen der Ofenatmosphäre)

Das Einfahren des Laborofens gestaltete sich zunächst sehr schwierig. Es kam immer wieder zu Anbackungen am Rohr, bis die richtige Kombination aus Rohtonauflabemenge und Temperaturgradient gefunden wurde. Letzterer wird über die Heizleistung, den gewählten Neigungswinkel des Ofens und die Drehgeschwindigkeit des Ofenrohrs bestimmt. Schwierigkeiten bereiteten auch immer wieder auftretende Undichtigkeiten der Wasserkühlung, die zu einer Zwangsabschaltung der Anlage führten, weil das Wasser in den Schaltschrank lief. Ein weiteres Problem war die Zuführung des Rohtons aus dem Aufgabebehälter in den Ofen. Die ursprünglich eingesetzte Förderschnecke lieferte zuviel Material. Die Zufuhr konnte nicht auf die gewünschte Geschwindigkeit gedrosselt werden. Die zweite Schnecke zerquetschte den Ton und setzte die Förderleitung zu. Die Zuführung bestimmt letztlich die mögliche Größe des zu calcinierenden Materials.

2.1.3 Vergleich der Zusammensetzung der calcinierten Tone aus dem Laborofen mit dem großtechnisch hergestellten Material aus den Vorversuchen (u. a. mittels eigener RFA)

Aus den Vorversuchen stand noch eine Charge für weitere Untersuchungen zur Verfügung. Diese wurde mit Material aus dem Laborofen mit Hilfe der Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) untersucht und verglichen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Es sind zwar geringe Unterschiede vorhanden, doch kann im

Prinzip von einer guten Übereinstimmung gesprochen werden. Das Ergebnis ist nicht weiter verwunderlich, weil in beiden Fällen der gleiche Rohstoff zum Einsatz kam. Auf die chemische Zusammensetzung wirkt sich der verwendete Ofen nicht aus.

Tabelle 2: Ergebnisse der Untersuchungen der calcinierten Tone aus dem Vorversuch und dem Laborofen mittels Röntgenfluoreszenzanalyse

	Vorversuch	Laborofen
Oxide	[%]	[%]
Na ₂ O	0,07	0,61
MgO	2,17	2,40
Al ₂ O ₃	24,86	25,31
SiO ₂	55,58	54,79
P ₂ O ₅	0,33	0,32
SO ₃	0,36	0,49
K ₂ O	3,57	3,61
CaO	4,29	4,29
TiO ₂	1,17	1,05
Cr ₂ O ₃	0,02	0,02
MnO	0,13	0,13
Fe ₂ O ₃	7,39	7,60
NiO	0,01	0,01
ZnO	0,01	0,02
SrO	0,02	0,02
BaO	0,04	0,04
Σ, korrigiert	100	100

Die zuvor mittels RFA untersuchten calcinierten Tone wurden zusätzlich mit Hilfe der Röntgendiffraktometrie (XRD) analysiert und nach Rietveld auf Basis einer eigens angepassten Datenbank ausgewertet. Die Ergebnisse sind Tabelle 3 in dargestellt. Hinter einzelnen Bezeichnungen verbergen sich zum Teil Mineralgruppen. So bezeichnet „Mica“ Muskovit und Paragonit, die „sekundären Silikate“ umfassen Ringwoodit, Gehlenit, Wollastonit, Mullit, Hercynit, Diopsid und Epidot und die „primären Silikate“ stehen für das ursprüngliche Gehlenit und Epidot. Unter den „Eisenerzen“ sind Pyrit, Rutil, Magnetit und Maghemit zusammengefasst und schließlich stehen die „Sulfate“ für Gips und Anhydrit. Zwischen dem großtechnisch calcinierten Ton aus dem Vorversuch und dem Laborofenton sind nur minimale Unterschiede zu erkennen. Mit beiden Anlagen kann also grundsätzlich ein vergleichbarer Mineralbestand erreicht werden.

Der amorphe Anteil fällt bei beiden Tönen sehr groß aus. Dies hängt mit der feinen Struktur des Ausgangstons zusammen, die dazu führt, dass keine registrierbaren Röntgenreflexe an den Gitterebenen entstehen.

Tabelle 3: Ergebnisse der Untersuchungen mittels Röntgendiffraktometrie für groß-technisch in Vorversuchen und im Laborofen calcinierte Tone

Probenbezeichnung	Vorversuch	Laborofen
Kristalle	[%]	[%]
Carbonat	0	0,2
Quartz	18,4	17,6
Mica	4,5	3,1
Illit	1,6	1,9
Chlorit	0	0
Kaolinit	0	0
sekundärer Feldspat	0,6	1,5
primärer Feldspat	4,3	2,8
sekundäres Silikat	2,5	4,2
primäres Silikat	0	0
amorph	65,5	65,5
Hematit	0,5	0,7
Eisenerze	1,0	1,4
Sulfate	1,1	1,1
Σ, korrigiert	100,0	100,0

2.2 Arbeitspaket 2: Materialoptimierung und Phasenanalyse

2.2.1 Calcinieren von Tonen im Laborofen

2.2.2 Variation der Aufheizgeschwindigkeit, Haltedauer, Ofenatmosphäre

Für die Variation der Aufheizgeschwindigkeit werden beim calcinierten Ton enge Grenzen durch den Zwang zu einem wirtschaftlichen Prozess gesetzt. Dazu muss eine möglichst hohe Tonnage auf den Drehrohrofen der Anlage aufgegeben werden. Damit diese auf die gewünschte Temperatur aufgeheizt werden kann, muss eine ausreichend hohe Aufheizgeschwindigkeit eingehalten werden. Im einteiligen Laborofen lässt sich diese Situation nicht nachstellen, weil ein hoher Temperaturgradient beim Aufheizen mit einem schnellen Einlaufen in die Heizzone einhergeht. Gleichzeitig wird dadurch jedoch auch die Verweildauer in der Heizzone verkürzt. Für das Calcinieren ist eine ausreichende Verweildauer im Bereich der Maximaltemperatur wichtig. Daher bildet letztere Größe die Vorgabe für die Steuerung des Laborofens.

Eine Einstellung der Ofenatmosphäre ist mit der gewählten Anlage möglich. Wegen der bereits genannten Probleme war es erforderlich, jederzeit einen Einblick in den Ofen zu haben. Daher wurden noch keine Versuche mit unterschiedlichen Ofenatmosphären durchgeführt.

2.2.3 Variation der Korngröße und -verteilung des aufzugebenden Rohtons

Für die Vorversuche wurde der Ton nach der Anlieferung aus der Grube nur noch mit dem vorhandenen Grobbrecher auf ein Größtkorn von etwa 100 mm zerkleinert und ohne weitere Aufbereitung auf die Ofenanlage aufgegeben. Derartige Korngrößen können im Laborofen nicht verwendet werden. Für die weitere Beurteilung war es erforderlich, die Auswirkung einer verringerten Korngröße auf die Ergebnisse beurteilen zu können. Zu diesem Zweck wurde Rohton in zwei sehr unterschiedlichen Korngrößen (Bild 2) im Labor calciniert. Die grobe Körnung repräsentiert die obere Gren-

ze der noch möglichen Aufnahme im Querschnitt des Laborofens bei einer manuellen Aufgabe des Rohtons, wobei sich im Material ein deutlicherer Temperaturgradient ausbildet, als er in der späteren Produktion zu erwarten ist. Dadurch liegt nach dem Aufmahlen ein Mineralphasengemisch vor, das großtechnisch nicht entstehen kann. Zudem bereitet eine derart großes Korn Schwierigkeiten bei der automatischen Zuführung zum Laborofen.



Bild 2: Vergleich der Korngrößen des Rohtons für die Laborversuche

Die feine Probe bildet die untere Grenze für die Größe des Aufgabematerials. Dieses Material wird homogen über den Kornquerschnitt temperiert, was bei den Vorversuchen nicht beobachtet wurde (Bild 3). Zudem ist der oxidierte Anteil größer als bei der großtechnischen Fertigung. Der Vorteil der homogenen Temperatur ist nur bedingt gegeben, da sich diese Situation im großtechnischen Maßstab nicht einstellt.



Bild 3: Großtechnisch im Vorversuch hergestelltes Korn mit deutlich unterschiedlich oxidierten Bereichen (Länge des Bildausschnitts im Original: 3 cm)

Der Vergleich zwischen den beiden Korngrößen erfolgt am calcinierten und anschließend aufgemahlene Material über die mit Hilfe der XRD ermittelten Mineralphasen. Die Ergebnisse sind für drei ausgewählte Maximaltemperaturen in Tabelle 4 zusammengestellt. Die Maximaltemperatur von 880 °C entspricht in etwa der Maximaltemperatur aus dem Vorversuch. Die anderen Stufen wurden so gewählt, dass sie im Bereich ausgeprägter Umwandlungsprozesse der vorhandenen Tonbestandteile liegen (3-8). Die Ergebnisse können daher sowohl untereinander als auch mit der großtechnischen Herstellung verglichen werden. Der Vergleich zwischen den beiden

Korngrößen lässt Unterschiede erkennen, die auf den geringeren Energieeintrag in das grobe Korn im Vergleich zur feineren Körnung zurückgehen. Dies ist letztlich verursacht worden durch die begrenzte Heizleistung und die kurze Heizzone des Laborofens. Die Umwandlungsprozesse verlaufen zwischen beiden Probekörnungen versetzt ab. Der Vergleich mit dem großtechnisch hergestellten Material (s. Tabelle 3) liefert bei 880 °C eine bessere Übereinstimmung mit der feineren Körnung.

Tabelle 4: Ergebnisse der Untersuchungen mittels Röntgendiffraktometrie von im Laborofen mit unterschiedlicher Ausgangsgröße calcinierten Tonen

Probenbezeichnung	Laborofen grob			Laborofen ≤ 4 mm		
	560 °C	720 °C	880 °C	560 °C	720 °C	880 °C
Kristalle	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Carbonat	1,7	0,9	0	1,6	0,5	0
Quartz	16,1	20,5	17,2	18,1	20,5	18,1
Mica	10,7	9,2	0,9	10,7	7,3	0,4
Illit	3,5	5,8	1,7	3,1	4,1	1,6
Chlorit	0,5	0	0	0,4	0	0
Kaolinit	1,2	0	0	2,3	0	0
sek. Feldspat	0,8	2,4	2,7	0	0	3,6
prim. Feldspat	7,7	7,8	5,5	4,1	3,3	2,8
sek. Silikat	0	1,8	7,2	0,6	1,2	7
prim. Silikat	0,3	0,3	0,8	0	0	0
Amorph	55,6	48,9	61,5	57,1	61,7	64,1
Hematit	0,3	0,6	0,1	0,1	0,4	0,7
Eisenerze	0,5	0,5	1	1,7	0,4	0,5
Sulfate	0,9	1,3	1,1	0,3	0,6	1,1
Σ	99,8	100,0	99,7	100,1	100,0	99,9

2.2.4 Variation der Feuchte des Rohtons (Winter- bzw. Sommersituation)

Die Ausgangsfeuchte des Rohtons kann je nach Jahreszeit erheblich variieren. In den Wintermonaten ist eher mit einer höheren Feuchtigkeit zu rechnen. Im Sommer trocknet der Ton mitunter stark aus. Die Unterschiede in der Ausgangsfeuchte des Tons sind natürlich nicht auf die jahreszeitlichen Schwankungen begrenzt, sondern können auch während längerer Niederschlags- oder Trockenperioden im Sommer entstehen. Je nachdem wie hoch die Ausgangsfeuchtigkeit ist, wird mehr oder weniger Wasser in den Ofen eingetragen und muss dort zunächst ausgetrieben werden. Die Energie für diesen Vorgang wird der Prozessenergie im Vorwärmer entzogen und kann somit zumindest das Aufheizprofil im Ofen beeinflussen. Der Unterschied ist im Labormaßstab am fertig calcinierten Ton optisch deutlich zu erkennen (Bild 4). Durch das Vortrocknen bildet sich eine andere, mehr ins bräunliche gehende Brennhaut des calcinierten Tons aus, während beim unbehandelten Ton mit einer üblichen Lagerfeuchte der Farbton stärker ins rötliche geht. Dieser Effekt reicht jedoch nicht sehr tief in das Material hinein (Bild 5) und macht sich daher später auch nicht bei den Eigenschaften des aufgemahlten Materials bemerkbar.



Bild 4: Vergleich von calcinierten Tonen nach einer gezielten Vortrocknung (links) und mit üblichem Ausgangsfeuchtegehalt (rechts)

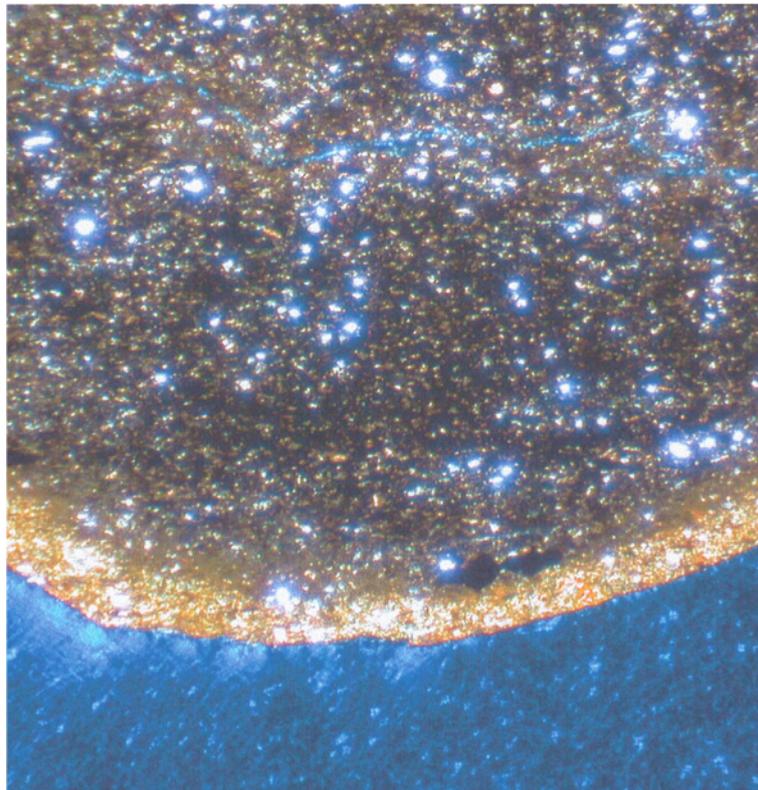


Bild 5: Dünnschliff eines calcinierten Tonpartikels mit oxidierter Randzone (rotbraun); Länge des Bildausschnitts: 3 mm

2.2.5 Variation der Rohton-Zusammensetzung (Sensitivitätsstudie)

Die Zusammensetzung der Tone hat einen deutlichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des calcinierten Materials in zementären Systemen. Bild 6 zeigt dies für zwei Lias-Delta-Rohtone, die aus unterschiedlichen Gruben stammen. Die mit CT2 be-

zeichnete Probe ist der Referenzton, der bereits im Vorversuch verwendet wurde (Tabelle 2). TCT2 stammt aus der Lias-Grube in Tuningen und wurde in gleicher Weise aufbereitet. Die chemisch-mineralogische Zusammensetzung ist in Tabelle 6 (TUN) und Tabelle 7 wiedergegeben. Beide Tone wurden bei gleicher Temperatur calciniert. Ihre Kornverteilungen stimmen überein. Deutliche Unterschiede sind in der XRD beim merklichen höheren Gehalt an Mica (Muskovit und Paragonit) des TCT2 und dem andererseits deutlich höheren amorphen Anteil des CT2 zu erkennen. Diese unterschiedliche Zusammensetzung macht sich bei der gegebenen Mahlfineinheit jenseits von 28 Tagen (Cem II/A-LL 32,5 R; Z : CT = 80 : 20) durch eine deutlich abweichende Festigkeitsentwicklung bemerkbar.

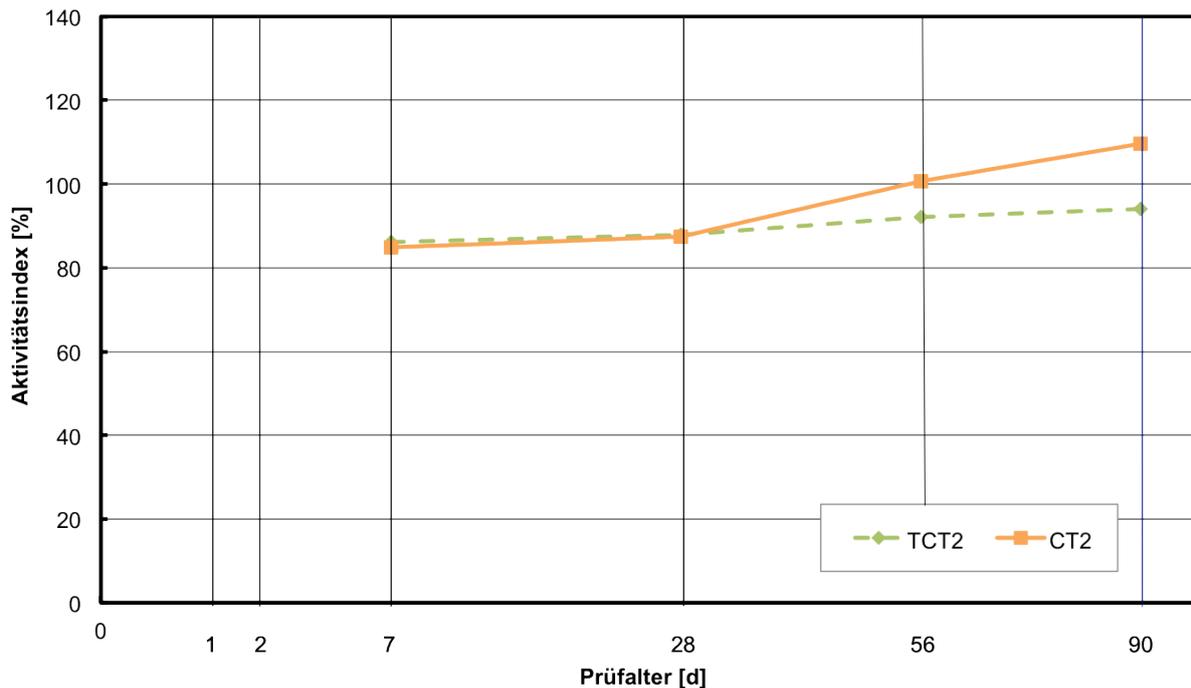


Bild 6: Leistungsfähigkeit unterschiedlich zusammengesetzter Tone

Innerhalb eines Vorkommens sind die Unterschiede in der Zusammensetzung deutlich geringer, als zwischen den beiden dargestellten Tönen, die für die Sensitivitätsstudie bewusst gewählt wurden. Dennoch müssen die Unterschiede in der späteren Produktion durch verschiedene Homogenisierungsschritte möglichst gering gehalten werden. Hier können die Maßnahmen (z. B. Mischbett) zum Einsatz kommen, die bereits für die normale Blähtonproduktion verwendet werden.

2.2.6 Identifizieren der ökologisch und technisch optimalen Brenntemperatur und der zugehörigen verfahrenstechnischen Randbedingungen

Die optimale Brenntemperatur richtet sich für das Calcinieren des Tons nach der mineralischen Zusammensetzung des Ausgangsmaterials. Die Röntgenfluoreszenzanalyse und die Röntgendiffraktometrie eignen sich in Kombination zur Identifikation der entstehenden Phasen. Es ist in der Regel mit diesen Verfahren jedoch nur möglich, jeweils eine Probe mit ihrer spezifischen Zusammensetzung und der gegebenenfalls durchgeführten Vorbehandlung (z. B. Temperierung) zu analysieren. Damit die XRD-Untersuchungen gezielt durchgeführt werden können, wird der jeweils ausgewählte Ton zunächst mit Hilfe der Differentialthermoanalyse (DTA) und einer parallel durchgeführten Thermogravimetrie (TG) einer ersten Beurteilung unterzogen. Die DTA ist eine bewährte Methode zur Materialanalyse (9). Sie nutzt den charakteristischen

Die Ergebnisse der begleitenden Untersuchungen sind in Tabelle 5 für drei Temperaturen aus dem interessierenden Temperaturbereich zusammengefasst. Die Werte lassen die höchste Reaktivität bei einer Temperatur von etwa 720 °C erwarten. Dies deckt sich mit den anderen Untersuchungsergebnissen (8).

Tabelle 5: Ergebnisse begleitender Untersuchungen

Prüfmethode			Brenntemperatur		
			600 °C	720 °C	820 °C
Chapelle-Test	Ca(OH) ₂ -Gehalt	mg	452	547	475
ICP-OES	Al-Ionen	mMol/g	1,91	2,37	0,77
	Si-Ionen	mMol/g	3,53	4,88	2,07

2.2.8 Identifizieren eines optimalen Mischungsverhältnisses aus calciniertem und hochgebranntem Ton

Der calcinierte und der amorphe Ton unterscheiden sich nach den bisher vorliegenden Ergebnissen in erster Linie in der Geschwindigkeit des Festigkeitsanstiegs in Kombination mit Zement. Dies wird unter anderem aus den Kurven in Bild 8 deutlich. Darin sind die Aktivitätsindizes verschiedener Bindemittelkombinationen dargestellt. Der Aktivitätsindex bezeichnet das Verhältnis der Druckfestigkeit eines Mörtels aus einem Bindemittelgemisch zu einem Prüfzeitpunkt im Verhältnis zum gleichaltrigen Referenzmörtel. Die Kurven zeigen die Unterschiede für einen Substitutionsanteil von 20 % des Zementgewichts in Kombination mit einem CEM I 42,5 R. Die Mischung mit dem calcinierten Ton (CT5) übertrifft nach etwa 14 Tagen die Referenz. Dieses Niveau erreicht der amorphe Ton (AT1) erst nach etwa 40 Tagen.

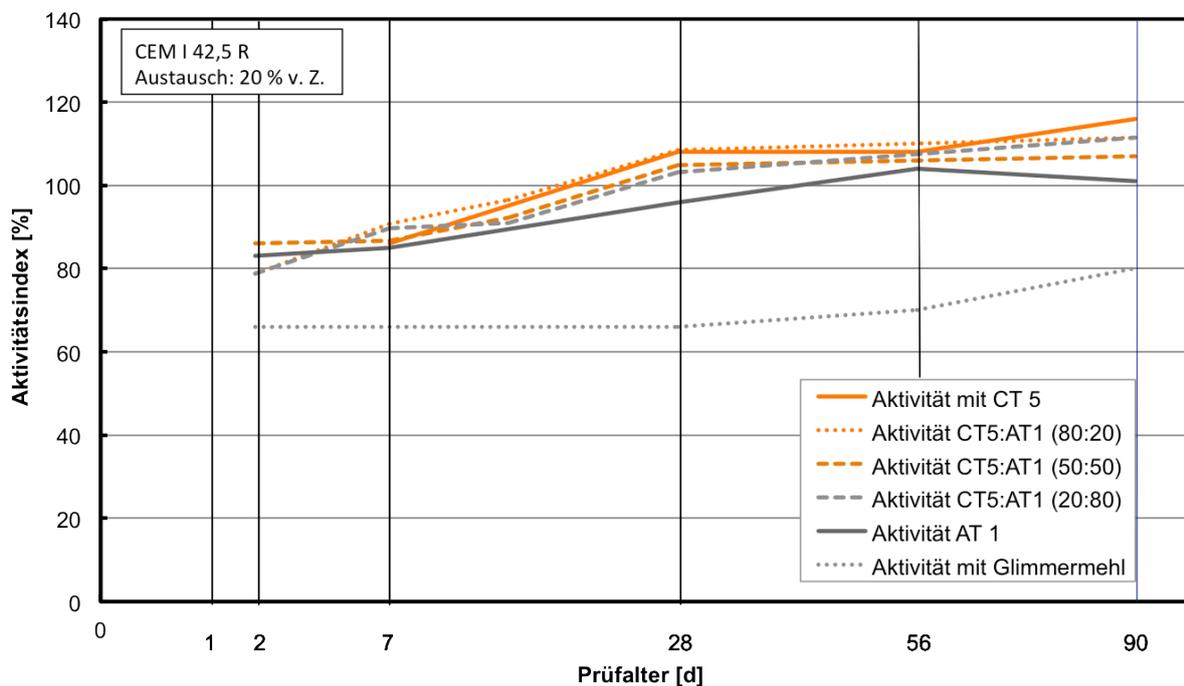


Bild 8: Auswirkung verschiedener Mischungsverhältnisse aus calciniertem und amorphem Ton auf die Leistungsfähigkeit von Mörtel

Die Leistungsfähigkeit beider Tone wird offensichtlich im Vergleich mit der Kurve für die Mischung des Zements mit Glimmermehl. Dieser inerte Zusatzstoff wurde wegen seiner dem gebrannten Ton sehr ähnlichen Kornform und -verteilung gewählt. Die Kurve der Mörtel mit Glimmermehl liegt bis zu einem Alter von 28 Tagen unterhalb

von 70 %. Die Spanne zwischen dieser Kurve und denen mit den Tonen geht auf die puzzolane Reaktivität der gebrannten Tone zurück.

In vielen Bereichen des Betonbaus wird eine möglichst hohe Frühfestigkeit gewünscht. Dem wird eher der calcinierte Ton gerecht. Unter ökologischen Gesichtspunkten ist ein möglichst hoher Anteil des amorphen Tons anzustreben. Die Mischung beider Tone liefert für den verwendeten Zement bereits für eine Mischung CT : AT von 20 : 80 einen Aktivitätsindex von 100 % nach 28 Tagen und gleichzeitig eine deutlich verbesserte Frühfestigkeit.

Das Ziel einer späteren ökologischen Optimierung ist eine weitere Steigerung des Anteils an amorphem Ton.

3 Phase II: Entwicklung des Herstellverfahrens

3.1 Arbeitspaket 3: Entwicklung des Herstellverfahrens

3.1.1 Entwicklung eines Konzepts für die Eingangsprüfung

Eine Reihe verschiedener Rohtone wurden mit Hilfe der Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6 zusammengestellt. Es waren zwar geringe Unterschiede vorhanden, doch ließen sich aus diesen Unterschieden keine Rückschlüsse auf die spätere Leistungsfähigkeit ableiten.

Tabelle 6: Ergebnisse der Untersuchungen mittels Röntgenfluoreszenzanalyse für verschiedene Tone

Probenbezeichnung	RT	MAT	KLO	BUR	TUN
Oxide	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Na ₂ O	0,33	0,36	0,18	0,47	0,24
MgO	2,41	3,05	1,05	2,99	1,83
Al ₂ O ₃	22,60	19,87	21,83	19,19	21,06
SiO ₂	50,45	49,54	49,08	51,89	49,46
P ₂ O ₅	0,19	0,12	0,30	0,22	0,19
SO ₃	1,10	0,49	0,00	0,00	0,42
K ₂ O	2,97	3,67	1,82	2,49	3,30
CaO	3,62	4,14	0,57	1,64	1,95
TiO ₂	1,04	0,95	2,25	1,23	1,11
Cr ₂ O ₃	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02
MnO	0,09	0,15	0,13	0,12	0,12
Fe ₂ O ₃	6,68	9,04	12,41	8,42	11,08
NiO	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
ZnO	0,02	0,02	0,01	0,01	0,12
SrO	0,03	0,02	0,01	0,02	0,02
BaO	0,04	0,04	0,09	0,05	0,04
Σ, unkorrigiert	91,58	91,48	89,78	88,79	90,98

Die zuvor mittels RFA untersuchten Tone wurden zusätzlich mit Hilfe der Röntgendiffraktometrie (XRD) analysiert und nach Rietveld (13) auf Basis einer eigens ange-

passten Datenbank ausgewertet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 dargestellt. Im Gegensatz zu den Ergebnissen der RFA werden bei diesem Verfahren die Unterschiede zwischen den verschiedenen Tonen deutlicher. Für die Leistungsfähigkeit in zementären Systemen sind hierbei in erster Linie die Tonminerale Kaolinit, Illit und Chlorit von Bedeutung (3-8). Die mit der Rietveld-Methode berechneten Gehalte geben allerdings nur einen Teil der Wahrheit wieder. Sie können nicht die Zusammensetzung des als „amorph“ deklarierten Anteils erschließen. In diesem subsumieren sich sehr feine und damit röntgenamorphe Tonpartikel, die wesentlich zur Reaktivität der gebrannten Tone beitragen können. Dennoch liefert die Verbindung aus XRD und Rietveld-Analyse Hinweise für die Brauchbarkeit der Tone, da sich der amorphe Anteil vornehmlich aus den identifizierten Tonen zusammensetzt. Je höher deren Anteil, desto höher wird anteilig auch ihr Gehalt im amorphen Anteil sein.

Tabelle 7: Ergebnisse der Untersuchungen mittels Röntgendiffraktometrie für verschiedene Tone

Probenbezeichnung	RT	MAT	KLO	BUR	TUN
Kristalle	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Quartz	18,8	15,3	24,9	31,6	16,8
Calcit	1,1	0,7			0,1
Kaolinit	9,7	5,7	7,8	10,0	9,0
Illit	5,8	6,8	3,1	2,5	6,0
Chlorit	2,4	6,3	1,0	1,7	3,2
Gips	2,0	1,1	0,9		
Anhydrit	1,8				
Orthoklas	0,2				
Hematit					0,1
Rutil	0,6		0,2	0,3	
Muskovit	6,0	26,7	18,7	26,7	8,2
Paragonit	4,7	4,3	4,5	4,3	22,0
Albit	1,5		3,3		0,2
Magnetit					0,2
Amorph	45,3	33,1	27,3	33,1	31,4
Σ, unkorrigiert	99,9	100,0	99,9	100,0	99,9

3.1.2 Entwicklung eines Konzepts für den Rohton-Transport zum Ofen

Diese Maßnahme ist nur für die Produktion des niedriggebrannten (calcinierten) Tons erforderlich. Der Rohton wird wie üblich am Grobbrecher angeliefert und dort mit der bestehenden Einrichtung auf eine Korngröße von maximal 100 mm zerkleinert. Dieser Schritt ist weiterhin erforderlich, um auf die bestehenden Transportwege zurückgreifen zu können. Das Material wird dann in der Rohtonlagerhalle in Halden abgesetzt. Den entscheidenden Unterschied zur Produktion von Liapor-Blähton stellt der nächste Transportschritt dar. Hier muss ein Bypass an der Tonmühle und den Granuliertellern vorbei aufgebaut werden (Bild 9 links). Dieser Bypass wird durch eine Kette von mehreren Förderbändern hergestellt. Der Materialstrom des letzten Förderbandes in dieser Kette mündet unterhalb des Auslaufs des ersten Granuliertellers ein (Bild 9 rechts). Ab dieser Übergabestelle kann wieder die vorhandene Infrastruktur genutzt werden.



Bild 9: Bypass in der bestehende Anlage (links) und Anschluss an den Zulauf hinter dem ersten Granulierteller (rechts)

Eine weitere Änderung ist am Zulauf zum Becherwerk erforderlich. In den großtechnischen Versuchen kam es wiederholt dazu, dass die Becher aus der Führung sprangen und dadurch das Becherwerk blockierte und kein Material mehr in den Ofen aufgegeben werden konnte. Die Versuche mussten dann jeweils abgebrochen und das Becherwerk wieder gerichtet werden. Als Ursache wurde eine sehr stark einseitige Beladung der Becher und damit eine ausgeprägt außermittige Belastung des Becherwerks festgestellt. Diese entsteht bei der Zuführung des scholligen Materials (Bild 4) zum Becherwerk. Im Gegensatz zu den runden Liapor-Granalien verlagern sich die Rohntonbrocken aufgrund ihrer ungleichmäßigen Form nicht auf dem Förderband im Vorlauf, sondern bleiben vornehmlich auf einer Seite liegen und fallen dann exzentrisch in die Becher. Abhilfe konnte durch den Einbau einer Umlenk-schaufel geschaffen werden (Bild 10). Der Materialstrom wird durch die Schaufel so zentriert, dass der Lauf des Becherwerkes nicht mehr beeinträchtigt wird.



Bild 10: Aufsicht auf den Zulauf zum Becherwerk mit provisorisch installierter Umlenkschaufel (rechts im Bild, mit Schraubzwingen arretiert)

3.1.3 Entwicklung eines Konzepts für das Brechen/Sichten

In den Versuchen reichte es aus, wenn der Rohton durch den vorhandenen Grobbrecher zerkleinert wurde. Eine weitere Aufbereitung war vor dem Brennen nicht erforderlich. Nach dem Brennen konnte der calcinierte Ton ohne weiteres Vorbrechen auf die Mühle gegeben und gemahlen werden.

Der hochgebrannte Ton aus den verwertbaren Restmengen muss vor dem Mahlen grundsätzlich nicht gebrochen werden, sofern eine ausreichende Menge auf die Walze aufgegeben wird. Im entstehenden Mahlbett können auch die vorhandenen Kugeln sicher gemahlen werden.

Der Mahlprozess kommt nur dann ohne einen Sichter aus, wenn die Anforderungen an die erzeugte Kornverteilung nicht zu hoch sind. Durch einen Sichter kann die Qualität des Materials und die Leistungsfähigkeit der vorhandenen Mühle gesteigert werden. Dies hätte einen deutlich positiven Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit. Mit der vorhandenen Mahl- und Sichertertechnik kann das gewünschte Ziel nicht erreicht werden.

3.1.4 Vorversuche für das Mahlen mit unterschiedlichen Mühlentypen

Für die Mahlung wurden Versuche mit verschiedenen Mühlentypen durchgeführt. Den Ausgangspunkt bildete eine Walzenschüsselmühle, da diese der bestehenden Situation in der Anlage in Pautzfeld entspricht. Hinzu kamen drei weitere Walzenschüsselmühlen und zwei Kugelmühlen. Die mit den verschiedenen Mühlen erreichten Kornverteilungen zeigt Bild 11 am Beispiel des calcinierten Tons (CT) und Bild 12 für den amorphen Ton (AT). Die hochgebrannten Tone wurden großtechnisch nur mit Walzenschüsselmühlen aufbereitet. Die abgebildeten Kornverteilungen wurden nass mit einem Laser-Streulichtspektrometer Horiba LA-950 der Firma Retsch gemessen.

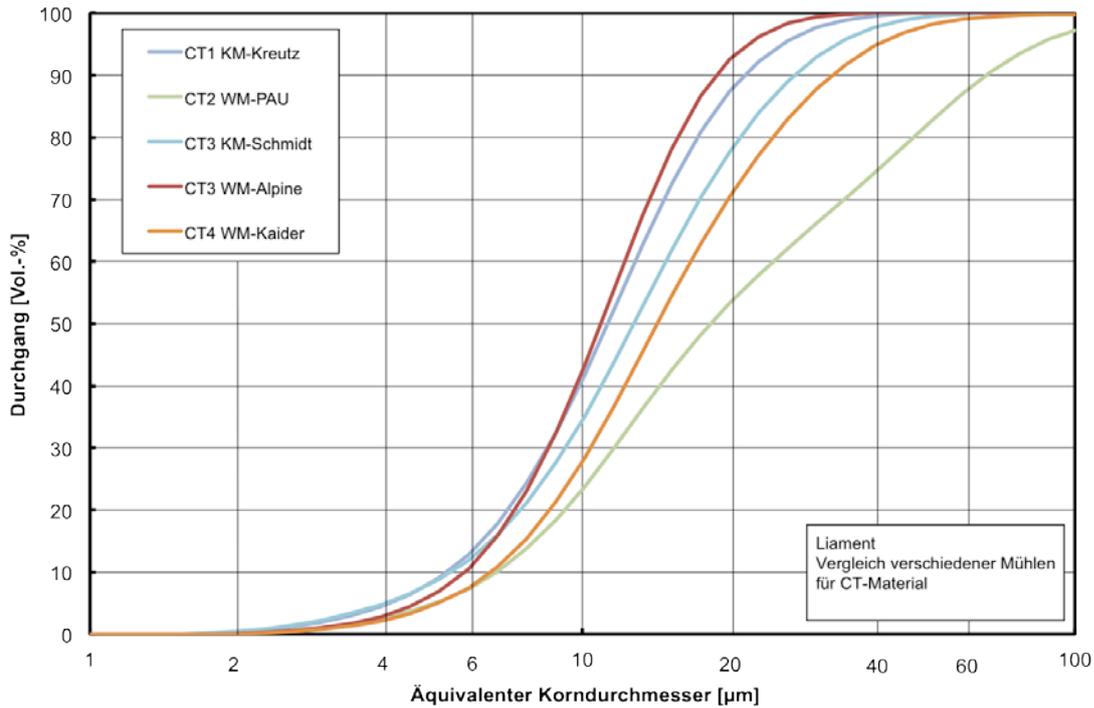


Bild 11: Kornverteilungen verschiedener Mühlen für den calcinierten Ton

Die mit der vorhandenen Mühle im Werk Pautzfeld (WM-PAU) erzeugten Kornverteilungen sind sowohl für den calcinierten Ton als auch für den amorphen hochgebrannten Ton deutlich gröber als die Kornverteilungen, die mit anderen Mahlaggregaten erzeugt wurden. Aus den Betonversuchen (Kapitel 4.1) wurde im Nachgang deutlich, dass ein d_{50} -Wert unter 15 μm anzustreben ist.

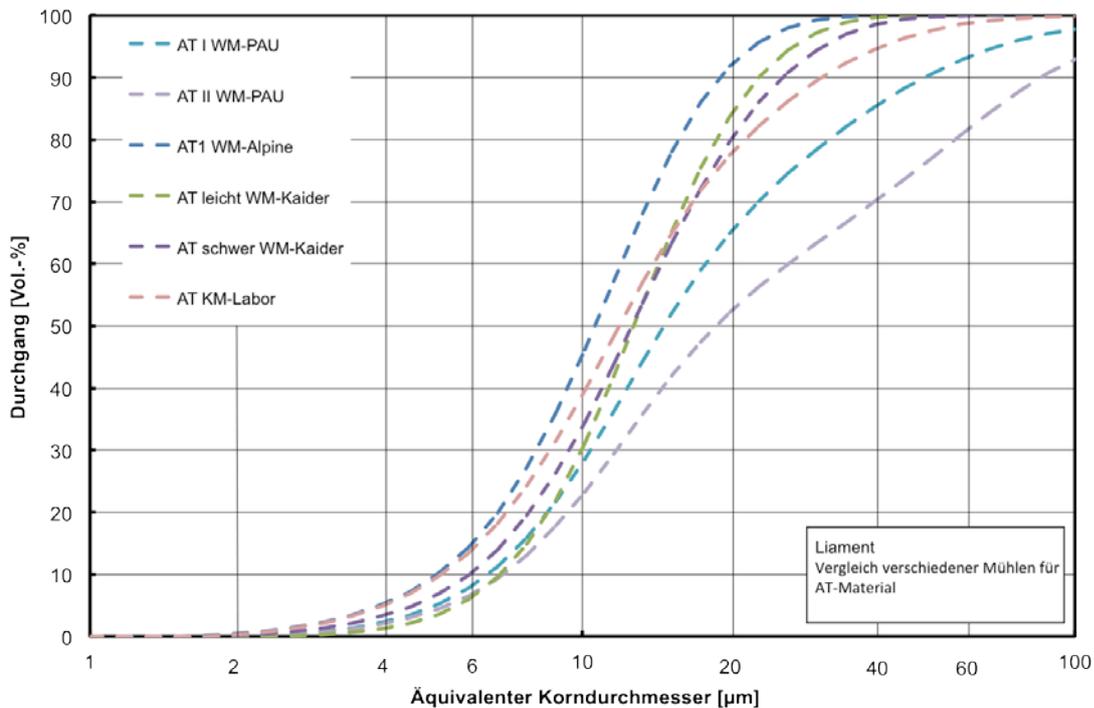


Bild 12: Kornverteilungen verschiedener Mühlen für den hochgebrannten Ton

3.1.5 Vorversuche für das Mahlkonzept (getrennt/zusammen Mahlen)

Der hochgebrannte und der calcinierte Ton weichen in mehreren Charakteristika voneinander ab. Der erste Unterschied besteht in der unterschiedlichen Kornform. Während der hochgebrannte Ton noch aus vielen Kugeln besteht, ist der calcinierte Ton vornehmlich plattig. Diese unterschiedliche Kornform führt bei einer gemeinsamen Vermahlung zu einer Inhomogenität. Als weiteres Argument gegen eine gemeinsame Vermahlung kommt die unterschiedliche Härte der beiden gebrannten Töne hinzu. Der hochgebrannte Ton lässt sich aufgrund seiner glasig-amorphen Struktur schlechter mahlen und reichert sich bei einer gemeinsamen Vermahlung vermehrt im groben Anteil an. Daraus resultiert in Summe eine ungünstigere Kornverteilung als bei einer getrennten Vermahlung zu erzielen wäre. Durch ein getrenntes Vermahlen und ein nachfolgendes Mischen der beiden gebrannten Töne kann das beschriebene Problem umgangen werden. Bild 13 zeigt am Beispiel der Mahlungen in einer Walzenmühle, wie gut die Kornverteilungen eines hochgebrannten Tons (AT1) und eines calcinierten Tons (CT3) übereinstimmen können.

Ein wesentlicher Grund für eine getrennte Vermahlung ist die Möglichkeit, später ökologisch optimierte Mischungsverhältnisse CT : AT mit einem möglichst hohen AT-Anteil anbieten zu können (s. S. 19). Das Mischungsverhältnis kann für die jeweilige Anwendung angepasst werden. Dieser möglichen Flexibilität sind natürlich praktische Grenzen gesetzt.

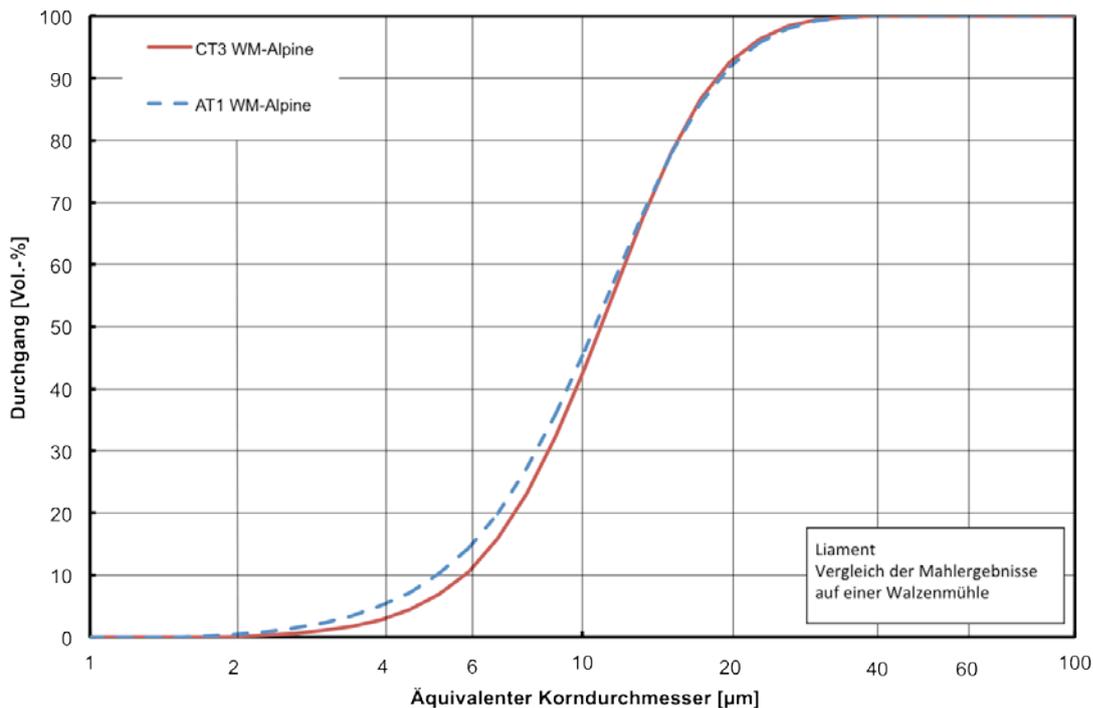


Bild 13: Vergleich der Kornverteilungen eines hochgebrannten (AT1) und eines calcinierten Tons (CT3)

3.1.6 Begleitende Untersuchung der Kornverteilung/Oberfläche/Reaktivität

Die Optimierung der Brenntemperatur erfolgte mit dem Ziel, die Reaktionsfähigkeit des calcinierten Tons zu erhöhen. Die gesteigerte Wirksamkeit wird bei sonst gleichem Rohstoffmaterial über die unterschiedlich große spezifische Oberfläche erreicht. Mit steigender spezifischer Oberfläche können Si- und Al-Ionen schneller in Lösung gehen. Dies muss sich dann in einer höheren Festigkeit widerspiegeln. Die spezifische Oberfläche wird mit dem BET-Verfahren (14) bestimmt. Als Maß für die Reakti-

vität wird der Aktivitätsindex nach 28 Tagen aufgeführt. Der Referenzzement war ein CEM I 42,5 R mit einer Normdruckfestigkeit von 65 MPa nach 28 Tagen.

Bei den calcinierten Tonen weist CT1 eine höhere Oberfläche auf als CT4. Dies geht jedoch primär auf die unterschiedlichen Kornverteilungen zurück (vgl. Bild 11). Die Unterschiede zwischen den beiden calcinierten Tonen und dem amorphen Ton beruhen nicht auf der Kornverteilung (vgl. Bild 11 und Bild 13). Durch das Brennen bei höheren Temperaturen kommt es zu Versinterungsprozessen, wodurch die Oberfläche des amorphen Tons verringert wird.

Tabelle 8: Gegenüberstellung der Oberflächen und Reaktivität zweier calcinierter und eines amorphen Tons

		CT4	CT1	AT
Brenntemperatur	°C	750	850	1000
BET-Oberfläche	m ² /g	4,4	5,5	1,4
Al-Ionen	w/w%	2,51	1,04	0,15
Si-Ionen	w/w%	3,47	2,43	0,79
Aktivitätsindex nach 28 d	%	107,2	95,4	86,9

In der unteren Zeile der Tabelle 8 ist der Aktivitätsindex für die drei gebrannten Tone aufgeführt. Er bezeichnet das Verhältnis der Festigkeit eines Mörtels unter Verwendung eines Bindemittelgemisches (hier: CEM I 42,5 R : CT bzw. AT = 80 : 20) zu einem Referenzmörtel, der ausschließlich mit dem Zement hergestellt wurde. Aus dem Vergleich der Aktivitätsindizes mit dem bezogenen Gehalt der in Lösung gegangenen Al- und Si-Ionen wird ein klarer Zusammenhang deutlich. Je mehr Al- und Si-Ionen freigesetzt werden können, desto mehr trägt der gebrannte Ton zur Festigkeit bei. Dieser Einfluss übertrifft den Einfluss der Mahlfineinheit, wie der Vergleich der beiden calcinierten Tone (Tabelle 8) belegt.

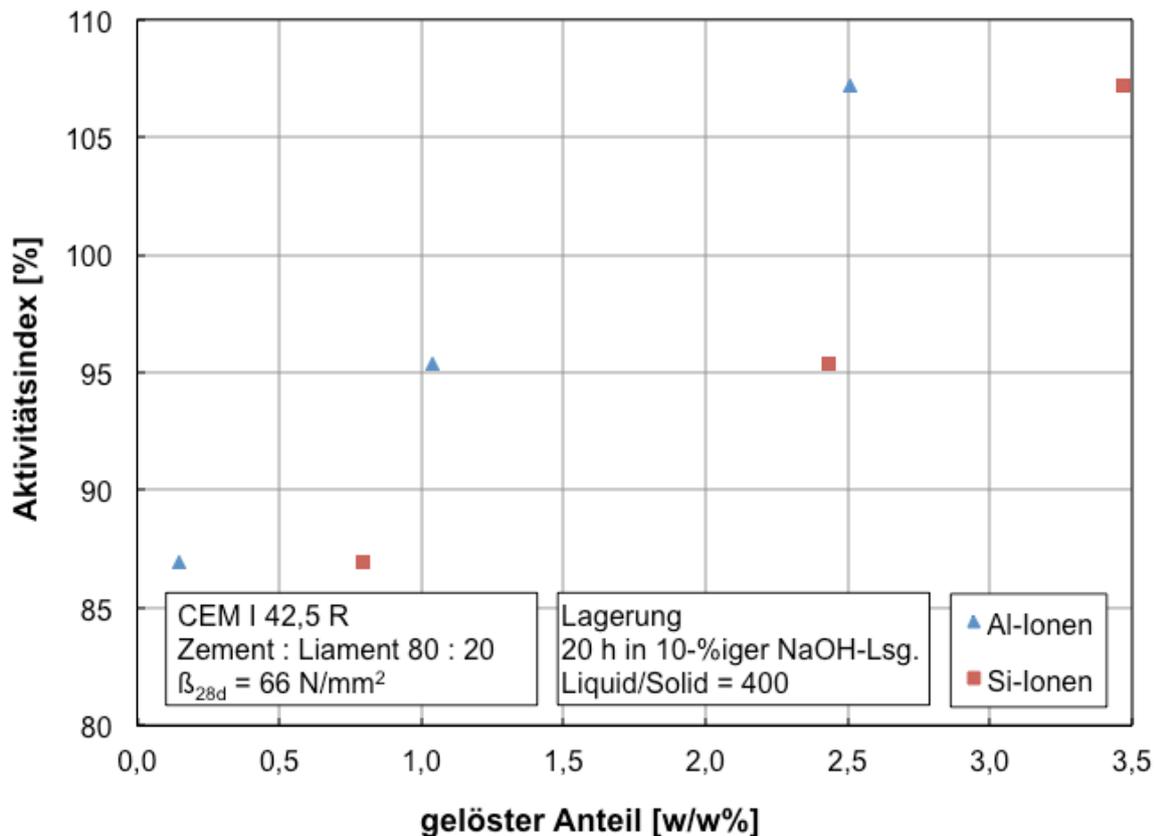


Bild 14: Zusammenhang zwischen Aktivitätsindex und Löslichkeit der Al- und Si-Ionen

3.2 Arbeitspaket 4: Einkauf/Beschaffung (Make or Buy Analyse)

3.2.1 Entscheidung, was muss zugekauft werden, was kann selbst gefertigt oder an bestehenden Anlagen modifiziert werden?

Die großtechnischen Versuche in der Anlage ließen sich ohne größere Umbauten bewerkstelligen. Der zunächst nur provisorisch installierte Bypass kann mit eigenen Mitteln zu einer festen Einrichtung in die bestehende Anlage integriert werden.

Anders sieht die Situation bei der Mühle aus. Das vorhandene Aggregat hat mehrere Nachteile. Zunächst einmal ist die erreichbare Feinheit zu gering. Als vereinfachendes Kriterium kann der Durchgang bei $32 \mu\text{m}$ herangezogen werden. Die vorhandene Mühle erreicht nur einen Durchgang von 70 – 85 %. (s. Bild 11 und Bild 12). Eine Möglichkeit zur Steigerung des Durchgangs ist eine verringerte Frischgutauflage auf die Mühle. Durch diese Maßnahme wird die Leistung der Mühle drastisch reduziert und so die Herstellkosten signifikant erhöht. Die nächste Option ist der Austausch des vorhandenen statischen Sichters gegen einen dynamisch arbeitenden Sichter. Diese Investition bringt zwar eine erhöhte Leistung, doch wird die Kapazität weiterhin durch die vorhandene Mühle begrenzt. Die beste Variante ist die Anschaffung einer neuen Mühle. Das Mahlaggregat kann optimal an die Anforderungen hinsichtlich Feinheit und Kapazität angepasst werden. Es muss zugleich mit einem dynamischen Sichter ausgestattet werden. Die Entscheidung für die zu verwendende Mahltechnik muss sich nicht nur an der zu erzielenden Kornverteilung orientieren, sondern wird ganz entscheidend vom Verschleißwiderstand bestimmt. Insbesondere der hochgebrannte Ton AT hat sich als sehr abrasiv erwiesen.

Damit das bevorzugte Konzept der getrennten Vermahlung umgesetzt werden kann, sind separate Silos sowie eine Misch- und Dosiereinrichtung zu installieren. Derartige Einrichtungen stehen in der Anlage derzeit nicht zur Verfügung.

3.3 Arbeitspaket 5: Fertigung eigener Komponenten

Für die Ausbildung des Materialbypasses konnte auf vorhandene Gerätschaften zurückgegriffen werden. Für die zunächst provisorisch montierte Umlenkschaufel (Bild 10) kann in der eigenen Schlosserei ein passendes Teil gebaut werden, dass bei der Produktion von calciniertem Ton immer wieder eingesetzt werden kann.

Umbauten an der Mühle müssen durch Fremdfirmen ausgeführt werden und können von den eigenen Monteuren begleitend unterstützt werden.

3.4 Arbeitspaket 6: Entwicklung Steuerung und Regelung

Die Steuerung und Regelung des Bypasses wurde entwickelt und konnte in die vorhandene Anlage integriert werden.

4 Phase III: Betontechnologische Untersuchungen

4.1 Arbeitspaket 7: Betontechnologische Untersuchungen

4.1.1 Prüfung auf betonschädliche Bestandteile

Durch den Brennprozess und die dabei gewählten Mindesttemperatur von ca. 750 °C enthielt weder der calcinierte noch der amorphe Ton organische Bestandteile, die den Erhärtungsprozess stören könnten. Die Glühverluste (Tabelle 9) liegen deutlich unter der Grenze, die zum Beispiel im Rahmen bauaufsichtlicher Zulassungen für gebrannte Tone gefordert werden.

Tabelle 9: Glühverluste nach DIN EN 196-2 (15)

	CT	AT
Glühverlust in M.-%	1,23	0,74

4.1.2 Sulfate, Chloride

Bei den chemischen Kennwerten sind die Chloride und Sulfate von Interesse. Sie wurden nach DIN EN 196-2 (15) bestimmt (Tabelle 10). Der Gehalt an Chlorid ist unkritisch. Der Gehalt an Sulfat ist recht hoch und könnte im Rahmen einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung Probleme bereiten.

Tabelle 10: Gehalt an Chlorid und Sulfat nach DIN EN 196-2 (15)

	CT	AT
Chlorid in M.-%	0,01	0,01
Sulfat in M.-%	1,3	1,3

4.1.3 Frischbetonuntersuchung

Die gebrannten Tone haben eine sehr große Oberfläche. Damit einher geht ein sehr hoher Wasseranspruch nach Punkte (16), der etwa 50 % über dem der verwendeten Zemente liegt (Tabelle 11). Aufgrund des hohen Wasseranspruchs muss überprüft werden, wie sich das Ansteifverhalten mit der Zeit verändert (s. Kap. 4.1.5).

Tabelle 11: Wasseranspruch calcinierter und amorpher Tone sowie verschiedener Zemente

	CEM I 42,5 R	CEM II/B-S 42,5 R	CEM II/A-LL 32,5 R	CT1	CT5	AT1
Wasseranspruch in M.-%	23,4	25,7	24,3	36,4	36,7	35,8

4.1.4 Abbindeverhalten

Das Abbindeverhalten verschiedener calcinierter und amorpher Tone wurde nach (17) ermittelt und mit dem als Referenz genutzten CEM I 42,5 R verglichen. Erstarrungsbeginn und Erstarrungsende waren mit einer Ausnahme gegenüber dem reinen Zementleim etwas erhöht (Bild 15).

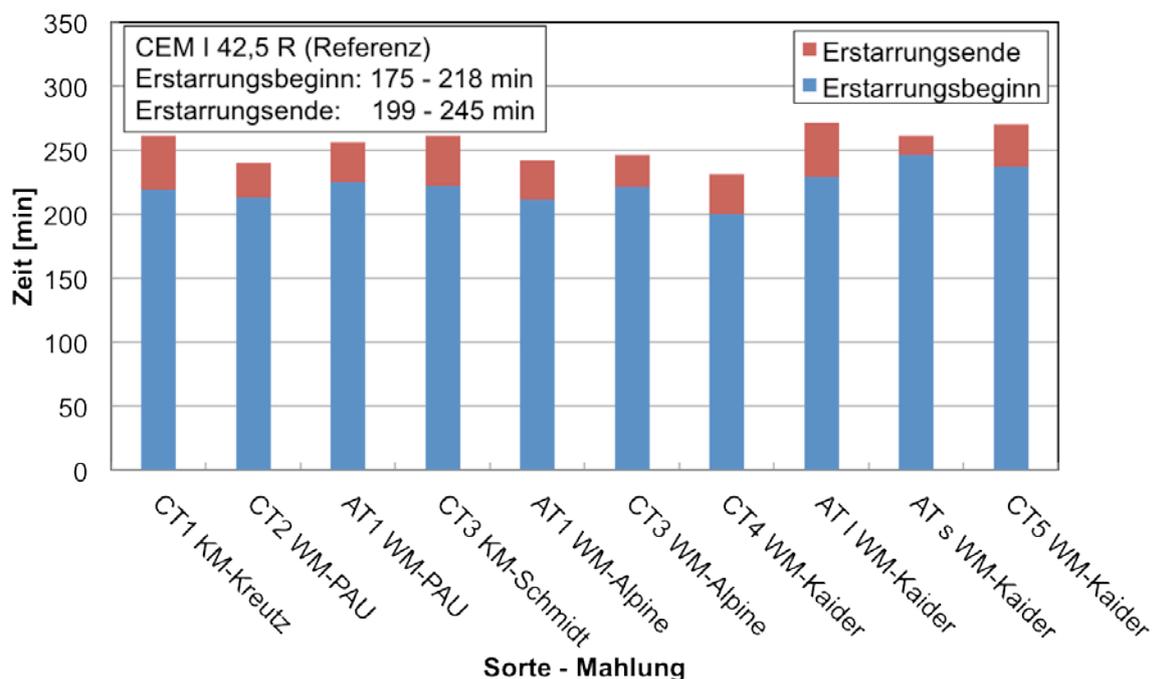


Bild 15: Auswirkungen verschiedener calcinierter und amorpher Tone auf das Abbindeverhalten eines CEM I 42,5 R

4.1.5 Rheologische Eigenschaften

Wegen des hohen Wasseranspruchs der gebrannten Tone müssen für die baupraktische Umsetzung die Auswirkungen auf die rheologischen Eigenschaften näher untersucht werden. Üblicherweise wird bei Beton hierzu die Konsistenz betrachtet. Als Maß für die Konsistenz wird hier das Ausbreitmaß herangezogen. Die Änderung des Ausbreitmaßes ist in Bild 16 für die ersten 45 Minuten dargestellt. Es wurden zwei Referenzmischungen mit unterschiedlichen Zementen hergestellt und jeweils mit Betonen verglichen, deren Bindemittel aus einer Kombination Zement : calcinierter Ton = 80 : 20 bestanden. Die Ausgangskonsistenz war zunächst bei den Betonen durch den calcinierten Ton niedriger, was auf den höheren Wasseranspruch zurückzuführen ist. Eine Angleichung der Ausgangskonsistenz mit Hilfe von Fließmittel wurde bewusst nicht vorgenommen. Im weiteren Verlauf war der Konsistenzverlust der Betone mit dem calcinierten Ton etwas geringer als bei den ausschließlich mit Zement hergestellten Betonen.

Höhere Austauschraten von Zement gegen calcinierten Ton sollen zur Verbesserung der Ökobilanz umgesetzt werden. Die Auswirkung des höheren Wasseranspruchs

durch einen steigenden Gehalt an calciniertem Ton wurde in Mörtelversuchen nach DIN EN 196-1 (18) überprüft. Mit drei unterschiedlichen Zementen wurde dabei eine annähernd lineare Abnahme der Ausgangskonsistenz mit steigendem Gehalt an calciniertem Ton festgestellt (Bild 16). Das Verhalten des Bindemittelgemisches aus Zement und calciniertem Ton lässt sich demnach gut prognostizieren.

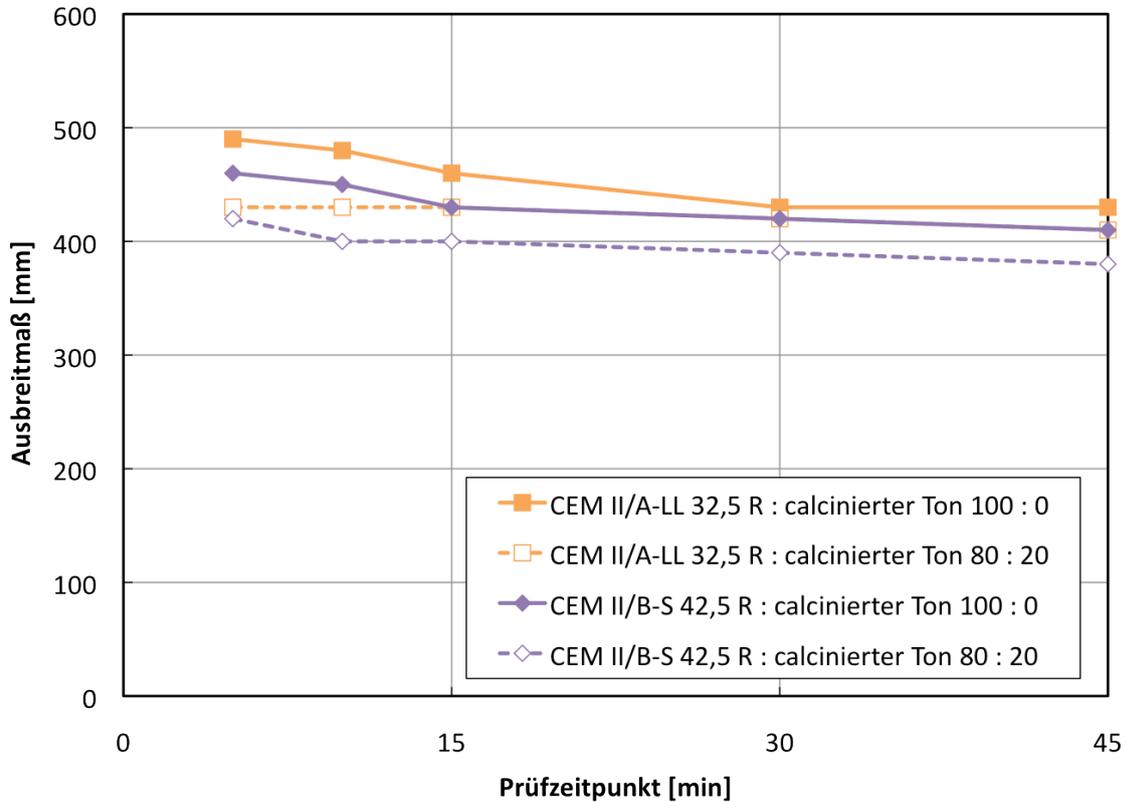


Bild 16: Auswirkung des calcinierten Tons auf den Verlauf der Konsistenz

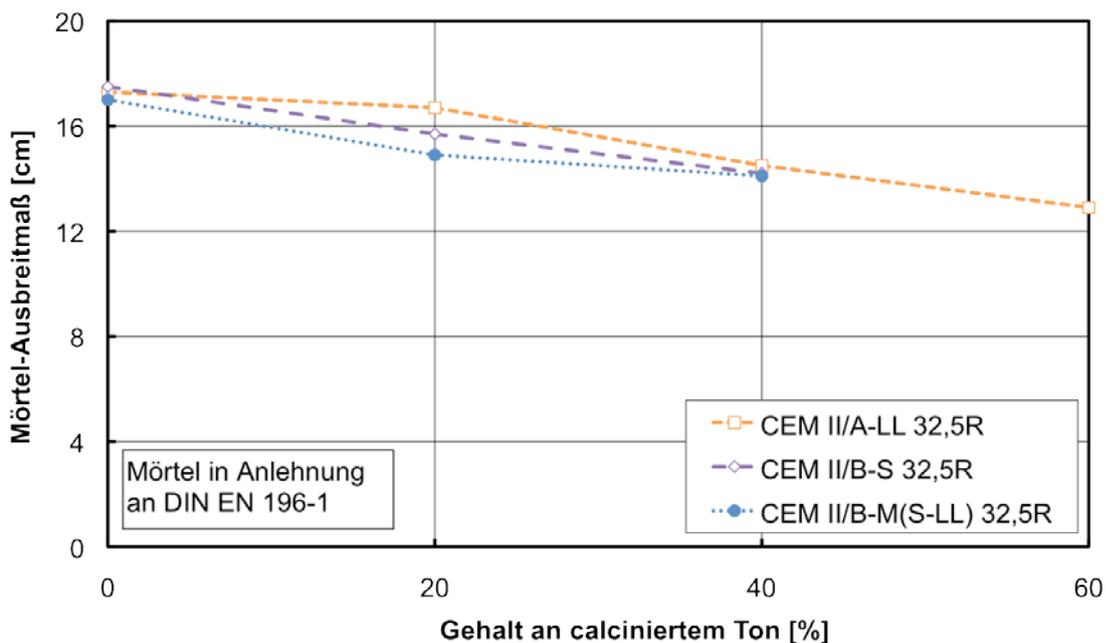


Bild 17: Auswirkung des Gehalts an calcinierten Ton auf die Konsistenz

4.1.6 Festbetonuntersuchung

Für die verschiedenen gebrannten Tone wurde die Festigkeitsentwicklung in der Regel bis zu einem Alter von 90 Tagen untersucht. Durch die Optimierung der Brenntemperatur konnte im Laufe des Forschungsvorhabens die Leistungsfähigkeit der calcinierten Tone als reaktiver Betonzusatzstoff deutlich gesteigert werden. Die Unterschiede verdeutlicht Bild 18. Zu Beginn des Projektes wurde die Festigkeit des Referenzmörtels nach 28 Tagen erreicht (CT1). Durch die Optimierung der Brenntemperatur ist dies nun bereits nach 14 Tagen der Fall (CT4/CT5). Gleichzeitig steigt die nach 28 Tagen erreichte Festigkeit nochmals an. Beim amorphen Ton kann die Leistungsfähigkeit durch eine optimierte (feinere) Mahlung erreicht werden. Hier gelingt es, die Festigkeit des Referenzmörtels nach 28 Tagen zu erreichen (AT1), während zu Beginn des Forschungsvorhabens dieses erst nach etwa 6 Wochen gelang (AT schwer/AT leicht).

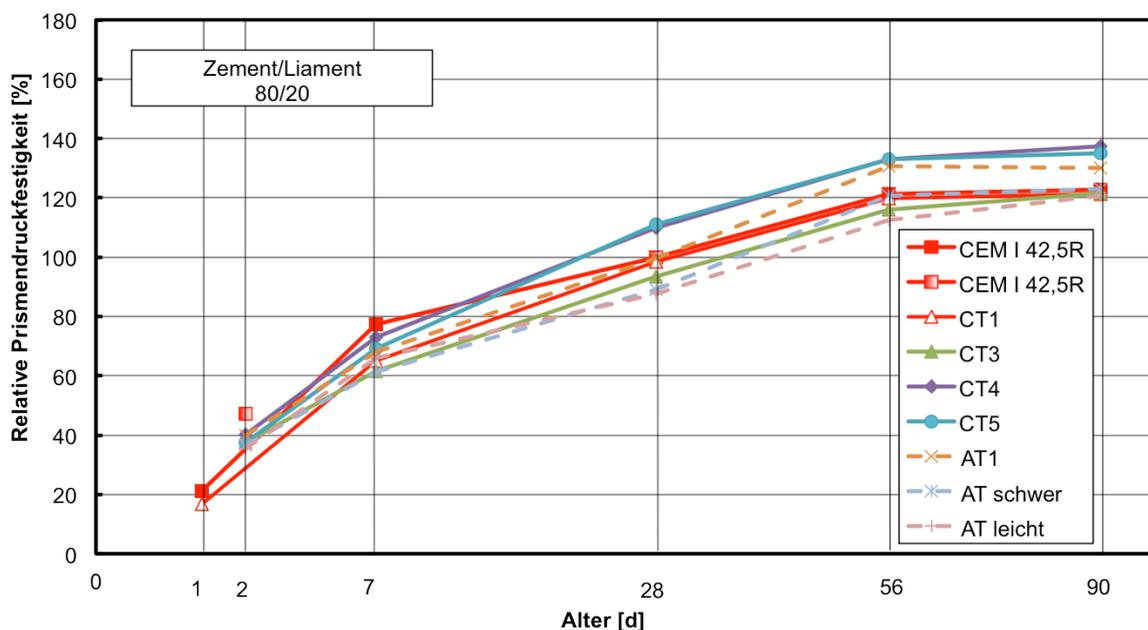


Bild 18: Vergleich der auf die 28-Tage-Festigkeit des Referenzmörtels bezogenen Prismendruckfestigkeitswerte von Mörteln mit verschiedenen calcinierten und amorphen Tonen

4.1.7 k-Wert

Die Leistungsfähigkeit der gebrannten Tone kann über den k-Wert beschrieben werden. Ein k-Wert von 1,0 besagt, dass der gebrannte Ton bei dem gewählten Austauschverhältnis den betreffenden Zement im Verhältnis 1 : 1 ersetzen kann. Die entsprechende Information kann aus der Darstellung des Aktivitätsindex (Bild 19) entnommen werden. Durch die Optimierung wird mit dem calcinierten Ton CT 5 für den CEM I 42,5 R ein k-Wert von fast 1,1 erreicht.

Die Ergebnisse eröffnen die Möglichkeit, den calcinierten und den amorphen Ton im Verhältnis 20 : 80 großtechnisch zu mischen und die im Forschungsantrag erhoffte maximale Leistungsfähigkeit und zugleich die damit verbundene Energieeinsparung tatsächlich zu erzielen.

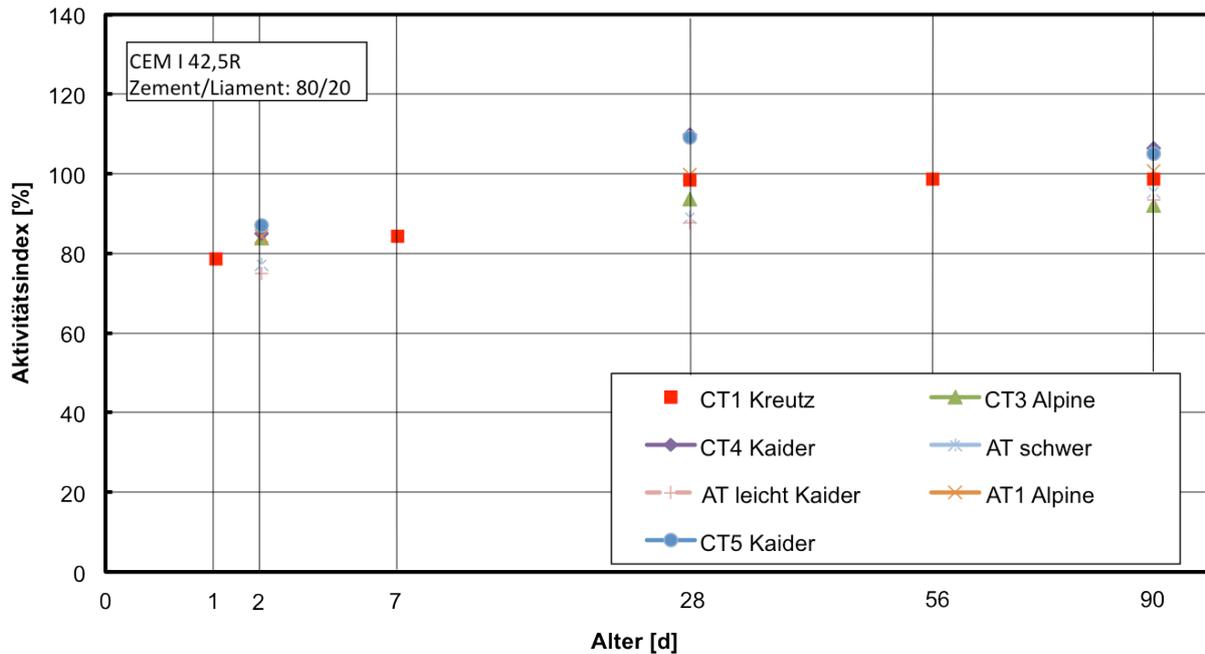


Bild 19: Vergleich der Aktivitätsindizes verschiedener calcinierter und amorpher Tone

5 Phase IV: Kundenversuche

5.1 Arbeitspaket 8: Kundenversuche

5.1.1 Spritzbeton

Die Eignung von Liament sollte im Rahmen großtechnischer Versuche überprüft werden. In einem Versuch wurde die Eignung als Zusatzstoff im Spritzbeton untersucht. Für diese Betone wird eine möglichst hohe Frühfestigkeit gefordert, weshalb grundsätzlich nur ein calcinierter Ton in Frage kommt. Die Versuche erfolgten in Zusammenarbeit mit dem Südbayerischen Portland-Zementwerk Gebr. Wiesböck & Co. KG, Rohrdorf und dem Institut für Werkstoffe des Bauwesens der Universität der Bundeswehr München. Im Rohrdorfer Spritzstollen wurden ein flugaschehaltiger Spritzbeton als Referenz und zwei Liament-haltige Spritzbetone zum Vergleich im Trockenverfahren gespritzt. Der verwendete Spritzbeton fällt in die Kategorie J1 (19) „Spritzbeton J1 eignet sich für den Auftrag von dünnen Lagen auf trockenem Untergrund. Es werden keine besonderen statischen Anforderungen in den ersten Stunden gestellt“ (20). Ein Vorteil ist die geringe Staubeentwicklung und der verminderte Rückprall. Die Ergebnisse der Frühfestigkeit zeigt Bild 20. Die beiden blauen Linien „A“ und „B“ grenzen den Bereich der Spritzbetonkategorie J1 ein. Die Ausgangsrezeptur (SB-FA-0128) basierte auf einem CEM II/A-S 42,5 R und besaß ein Verhältnis Zement : Flugasche von 0,78 : 0,22. Für die erste Rezeptur mit calciniertem Ton (SB-CT1-0129) wurde die Flugasche 1:1 ausgetauscht. In einem weiteren Versuch (SB-CT2-0130) wurde das Verhältnis etwas zugunsten des calcinierten Tons verschoben (Zement : CT von 0,75 : 0,25.).

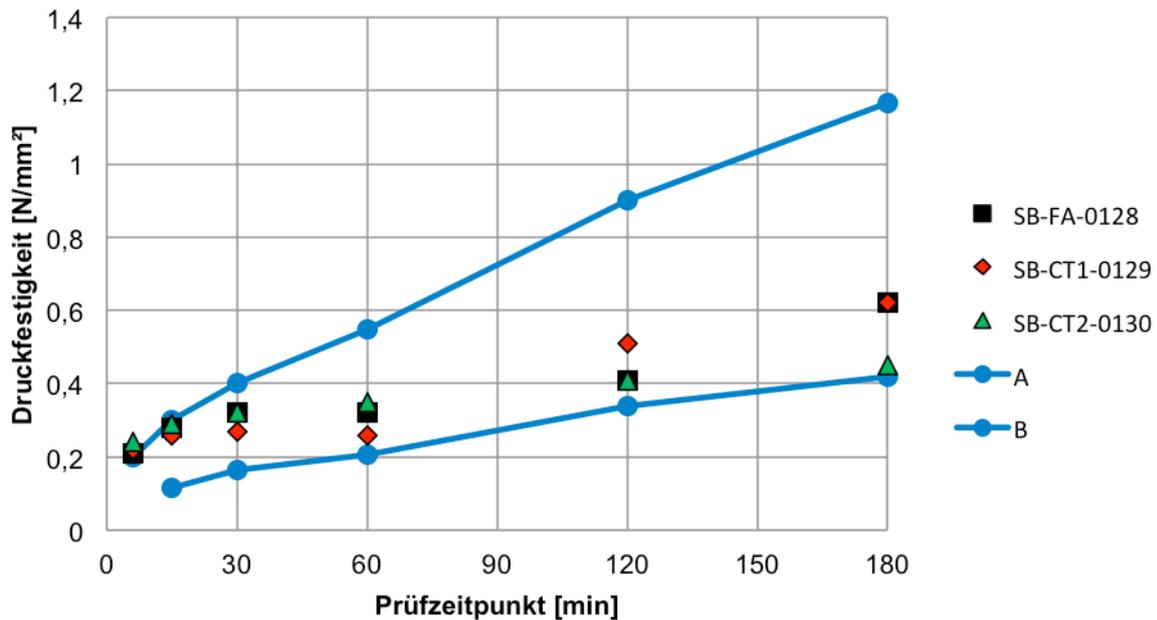


Bild 20: Frühfestigkeiten der erzeugten Spritzbetone, Grenzlinien A und B spannen den Bereich J1 auf (21)

Anhand der Frühfestigkeiten kann der Spritzbeton nach der Substitution der Flugasche durch den calcinierten Ton CT weiterhin in die Spritzbetonkategorie J1 eingestuft werden. Die Frühfestigkeitswerte des Flugasche-haltigen Spritzbetons bewegen sich bis zum Prüfzeitpunkt nach drei Stunden zwischen den Werten der CT-haltigen Spritzbetone.

Die weitere Festigkeitsentwicklung der Spritzbetone zeigt Bild 21 bis zu einem Alter von 90 Tagen. Die Festigkeitsentwicklung der CT-haltigen Spritzbetone verläuft bis 28 d langsamer als die der Referenz. Danach wird der Referenzspritzbeton zumindest von einem CT-haltigen Beton übertroffen, während der zweite (SB-CT2-0130) keinen signifikanten Festigkeitszuwachs nach 7 Tagen aufweist und auf vergleichsweise niedrigem Niveau verharrt. Als Ursache für die beobachtete geringe Festigkeit der CT-haltigen Spritzbetone wird die nicht vorhandene Erfahrung der Spritzdüsenführers mit einem derartigen Zusatzstoff vermutet. Daher wurden die CT-haltigen Spritzbetone mit zu wenig Wasser gespritzt und konnten ihre Leistungsfähigkeit nicht entfalten. Für diese These spricht der marginale Festigkeitszuwachs der letzten Spritzbetonrezeptur (SB-CT2-0130).

Ein wichtiger Aspekt für die Versuche war die Frage der Dichtheit des Spritzbetongefüges, die mit Hilfe der Wassereindringtiefe geprüft wurde. Dichte Spritzbetone werden insbesondere dort benötigt, wo der Spritzbeton ohne eine zwischenliegende Abdichtung auf die Felswand aufgebracht wird und später durch kalkreiches Bergwasser die Gefahr eines Versinterns der Abflussleitungen besteht. Die beiden CT-haltigen Spritzbetone schneiden bei dieser Prüfung deutlich besser ab als die Referenz (Bild 22) und erfüllen die Anforderungen hinsichtlich der Dichtheit.

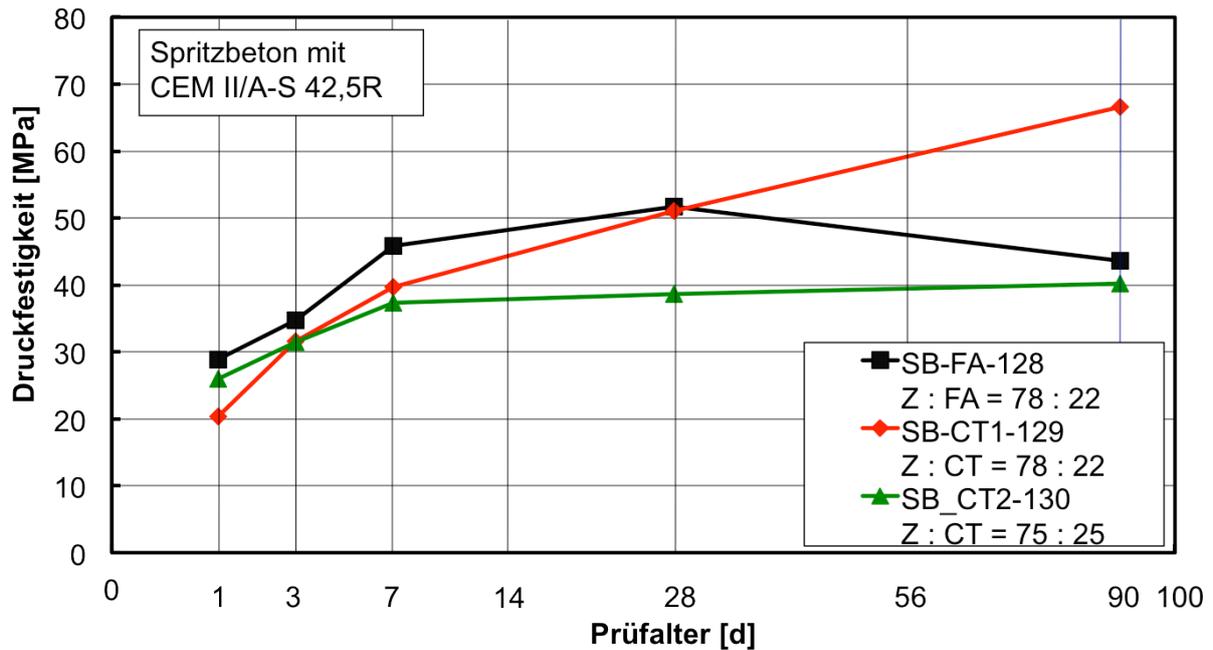


Bild 21: Festigkeitsentwicklung der untersuchten Spritzbetone (21)
Wassereindringtiefe [cm]

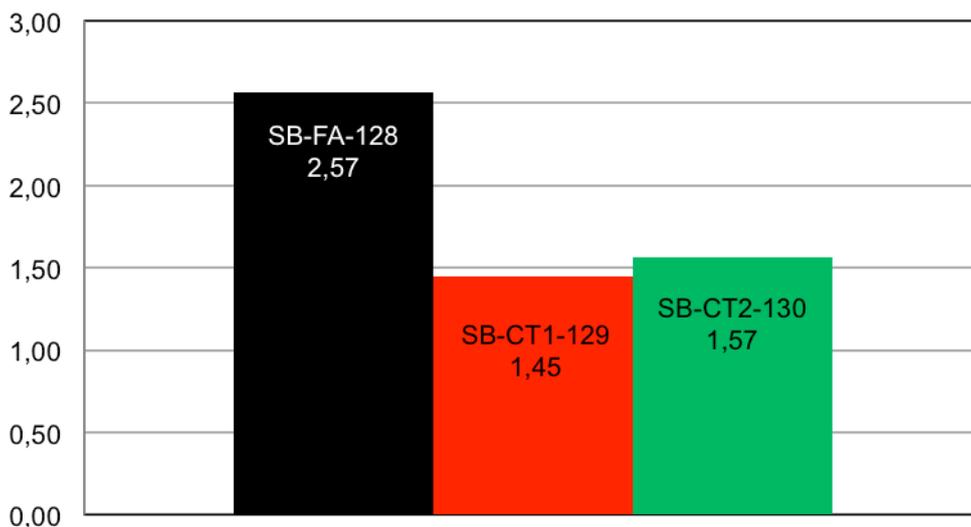


Bild 22: Vergleich der mittleren Wassereindringtiefen (21)

5.1.2 Fertigteilwerk

Wegen der geringeren Frühfestigkeit ist der Einsatz in Fertigteilwerken zunächst auf Anwendungen beschränkt, bei denen die Betonfertigteile nicht zu einem möglichst frühen Zeitpunkt über eine ausreichende Festigkeit verfügen müssen, um sie aus der Schalung herausheben zu können. Diese Einschränkung gibt es zum Beispiel nicht bei Betonwaren. Hier sind neben der Grünstandfestigkeit, der Anrechenbarkeit auf den Bindemittelgehalt und eine mögliche Reduzierung des Zementanteils noch andere Eigenschaften von Bedeutung. Dazu zählte früher die Anforderung an die Druckfestigkeit, die inzwischen durch Anforderungen an die Spaltzugfestigkeit abgelöst wurde (22). Die charakteristische Spaltzugfestigkeit darf danach nicht geringer sein als 3,6 MPa und kein Einzelwert weniger als 2,9 MPa betragen.

Ein kleine Menge des optimierten gebrannten Tons wurde als 50 : 50 Gemisch (CT : AT) von der Firma Herrmann, Eisenberg im Rahmen einer Versuchsreihe ein-

gesetzt. Ziel der Versuche war es, für das üblicherweise eingesetzte Gesteinsmehl eine wirtschaftliche Alternative zu finden. Drei Varianten der Bindemittelzusammensetzung wurden im Rahmen einer ersten Studie untersucht (Tabelle 12). Den größten ökologischen Vorteil liefert die Serie 2. Der Vergleich erfolgt auf der Basis der Angaben zum Bedarf an nicht erneuerbarer Primärenergie aus dem Forschungsantrag (23). Sie bringt gegenüber der Ausgangsrezeptur (Serie 1) bereits teilweise eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften (s. Bild 23 und Bild 24). Mit der Serie 3 konnte insbesondere die wichtige Spaltzugfestigkeit deutlich erhöht werden. Bei dieser Serie ist der ökologische Vorteil nicht so groß wie bei der Serie 2. Die vorhandene Leistungsreserve (s. Bild 24) lässt allerdings noch Raum für weitere ökologische und ökonomische Optimierungsschritte.

Tabelle 12: Untersuchte Varianten der Bindemittelzusammensetzung

Bindemittelkomponente		Serie		
		1	2	3
CEM I 42,5 R (ft)	kg/m ³	318	224	270
Gesteinsmehl	kg/m ³	102	38	-
Gebrannter Ton	kg/m ³	-	144	132
Nicht erneuerbare Primärenergie	MJ/t	1385	1136	1323

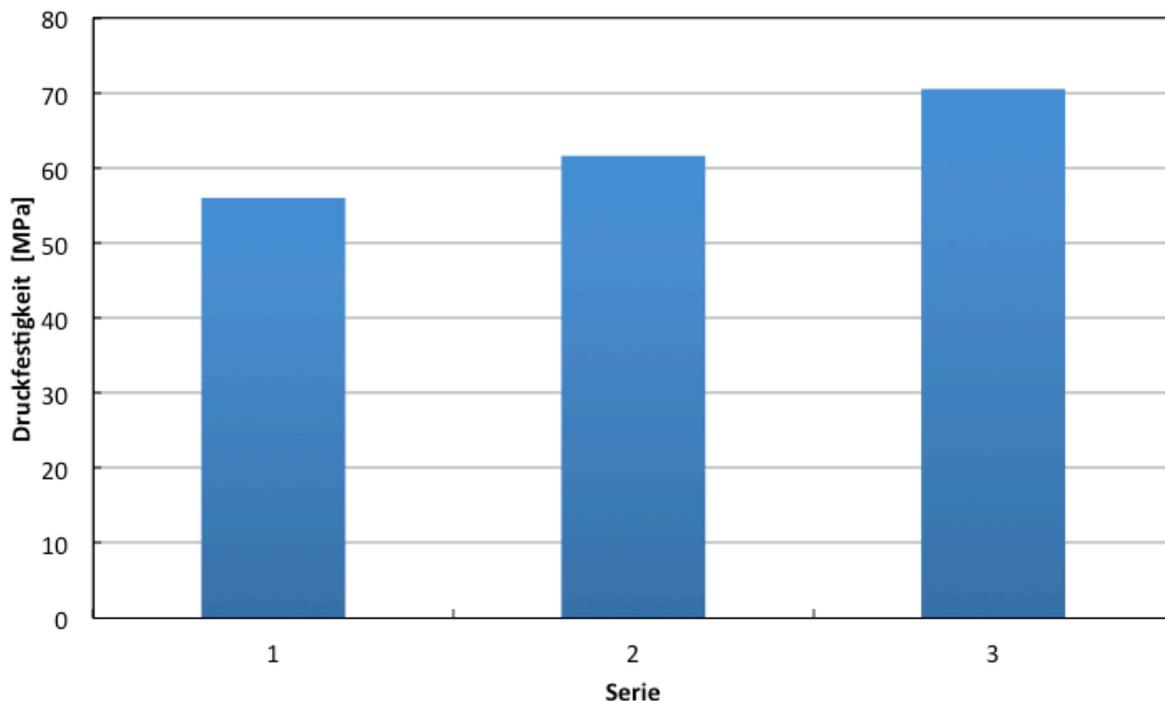


Bild 23: Druckfestigkeit der Versuche mit Betonpflastersteinen

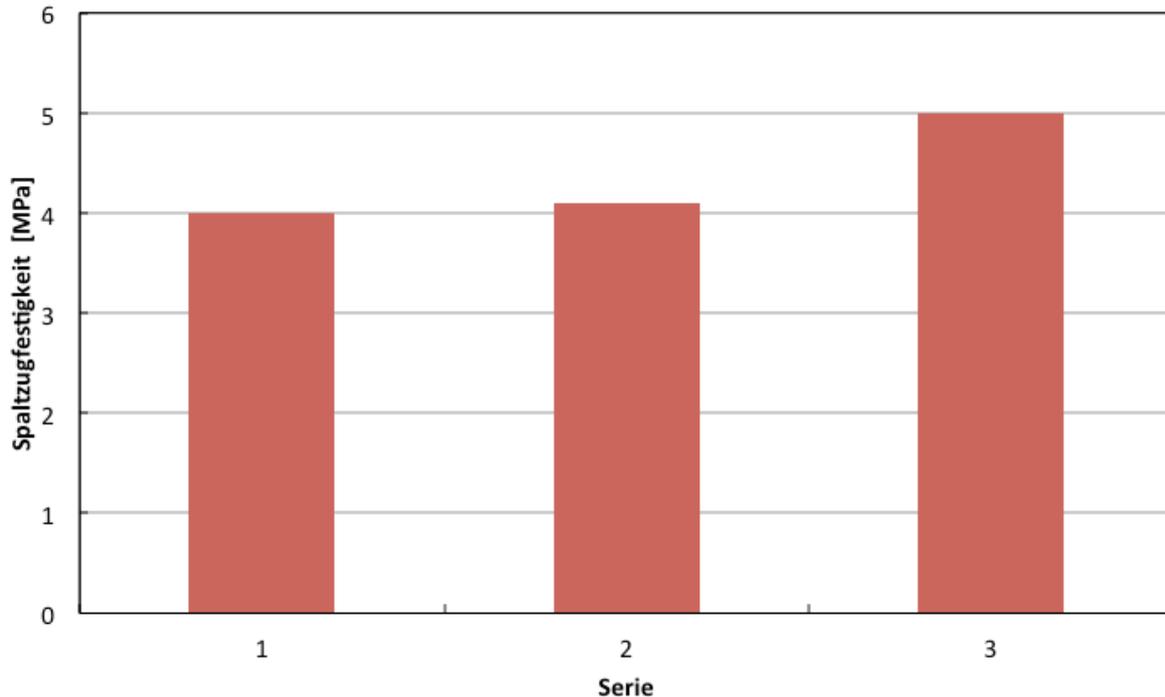


Bild 24: Spaltzugfestigkeit der Versuche mit Betonpflastersteinen

6 Phase V: Projektabschluss

6.1 Arbeitspaket 9: Verfahrensoptimierung, technische Dokumentation

Aus den Kundenversuchen konnten zwei wesentliche Informationen für die weitere Optimierung mitgenommen werden. Zum Einen wird eine Steigerung der Frühfestigkeit vor allem in den ersten 24 Stunden gewünscht, damit in Fertigteilwerken eine Festigkeit erreicht wird, die für das Abheben der Elemente aus der Schalung erforderlich ist. Diese Steigerung kann nach den vorliegenden Ergebnissen nicht mehr über eine Optimierung der Brenntemperatur erreicht werden. Als Möglichkeit bietet sich eine feinere Aufmahlung an, die allerdings mit deutlich höheren Kosten verbunden ist. Ob dieser Ansatz zielführend ist, kann im Rahmen des Vorhabens nicht abschließend geklärt werden.

Der zweite Optimierungsschritt betrifft eine weitere schrittweise Erhöhung des Anteils an amorphem Ton. Diese Maßnahme ist aus ökologischer erwünscht, geht allerdings einher mit einer geringeren Frühfestigkeit und steht damit dem zuvor genannten Optimierungsschritt entgegen. Es ist angesichts der vorliegenden Ergebnisse jedoch durchaus möglich, dass sich genügend Anwendungen finden lassen, für die dieses ökologisch optimierte Material interessant ist.

Die Verfahrensschritte, die dabei zur Optimierung der Prozessführung erforderlich sind, konnten mit der vorliegenden Untersuchung identifiziert und dokumentiert werden.

7 Fazit

Die verbesserte Prozessführung, insbesondere die optimierte Brenntemperatur, hat die Leistungsfähigkeit der calcinierten Tone deutlich gesteigert. Dies kommt in den

verschiedenen Laborergebnissen und den Anwendungsbeispielen deutlich zum Ausdruck. Zugleich wird es zukünftig so möglich sein, die ökologischen Vorteile (Senkung des Bedarfs an nicht erneuerbarer Primärenergie) weiter auszubauen. Von seinen Eigenschaften her bietet die Kombination aus amorphem und calciniertem Ton eine ökologisch und technisch interessante Alternative zu den derzeit am Markt etablierten Betonzusatzstoffen.

8 Literatur

1. Christensen E, Bergmann H, Langnickel U, Meier H-J, Mohrbach L, Weißelmann C. Stromerzeugung 2011/2012 - Zahlen und Fakten. Essen: VGB Powertech e.V.; 2011. Available from: http://www.vgb.org/daten_stromerzeugung.html.
2. Arne S. Unter Strom. LUX. 2013(Juni):30-3.
3. He C, Makovicky E, Osbaeck B. Thermal treatment and pozzolanic activity of Na- and Ca-montmorillonite. Appl Clay Sci. 1996;10(5):351-68.
4. He C, Makovicky E, Osbaeck B. Thermal stability and pozzolanic activity of calcined kaolin. Appl Clay Sci. 1994;9(3):165-87.
5. He C, Makovicky E, Osbaeck B. Thermal treatment and pozzolanic activity of sepiolite. Appl Clay Sci. 1996;10(5):337-49.
6. He C, Makovicky E, Osbaeck B. Thermal stability and pozzolanic activity of raw and calcined mixed-layer mica/smectite. Appl Clay Sci. 2000;17(3-4):141-61.
7. He C, Makovicky E, Osbaeck B. Thermal stability and pozzolanic activity of calcined illite. Appl Clay Sci. 1995;9(5):337-54.
8. He C, Osbaeck B, Makovicky E. Pozzolanic reactions of six principal clay minerals: Activation, reactivity assessments and technological effects. Cement Concrete Res. 1995;25(8):1691-702.
9. Wikipedia. Differenz-Thermoanalyse. 2013 [updated 05.07.2013]; Available from: <http://de.wikipedia.org/wiki/Differenz-Thermoanalyse>.
10. Wikipedia. Thermogravimetrische Analyse. 2013 [updated 03.06.2013]; Available from: http://de.wikipedia.org/wiki/Thermogravimetrische_Analyse.
11. AFNOR. AFNOR 18513 Pozzolanic Addition for Concrete - Metakaolin - Definitions, Specifications and Conformity Criteria. Annex A (Chapelle test modified)2012.
12. Wikipedia. Atomspektroskopie. 2013 [updated 15.5.2013]; Available from: <http://de.wikipedia.org/wiki/Atomspektroskopie>.
13. Rietveld HM. An Algol Program for the Refinement of Nuclear and Magnetic Structures by the Profile Method. Reactor Centrum Nederland, 1969.
14. DIN. DIN ISO 9277 Bestimmung der spezifischen Oberfläche von Feststoffen durch Gasadsorption nach dem BET-Verfahren. Berlin: DIN; 2003. p. 19.
15. DIN. DIN EN 196-2 Prüfverfahren für Zement-Teil 2: Chemische Analyse von Zement. 2012.
16. Puntke W. Wasseranspruch von feinen Kornhaufwerken. beton. 2002;52(5):242-8.
17. DIN. DIN EN 196-3 Prüfverfahren für Zement-Teil 3: Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit. 2009.
18. DIN. DIN EN 196-1 Prüfverfahren für Zement- Teil 1: Bestimmung der Festigkeit. 2005.
19. Betonverein Ö. Richtlinie Spritzbeton. Wien1989.
20. Girmscheid G. Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau. Berlin: Ernst; 2000. XVIII, 658 S. p.

21. Lange S. Auswirkung calcinierter Tone auf die Eigenschaften von Spritzbeton. Neubiberg: Universität der Bundeswehr München; 2013.
22. DIN. DIN EN 1338 Pflastersteine aus Beton. 2003. p. 66.
23. Fuchs W. Liament - Entwicklung einer Prozessführung zur Herstellung eines Betonzusatzstoffs auf Basis von calciniertem Ton mit Potenzial zur Ressourcenschonung und Energieeinsparung. Hallerndorf/Pautzfeld: Deutsche Bundesstiftung Umwelt; 2010. p. 20.