

Möglichkeiten zur Prognose des Festigkeitsbeitrags calcinierter Tone im Zement

Maximilian Panzer, Sebastian Scherb, Nancy Beuntner, Karl-Christian Thienel

Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Universität der Bundeswehr München, Werner-Heisenberg-Weg 39, Neubiberg, 85579 Deutschland, maximilian.panzer@unibw.de

KURZFASSUNG:

In diesem Artikel wird speziell die Eignung von illitischen, smectitischen und gemeinen Tonen als SCM untersucht und mit 1:1 dominierten Tonen verglichen. Die Reaktivität von elf verschiedenen Tonen wurde anhand von R^3 -Tests und Druckfestigkeitsprüfungen an Mörteln mit sechs verschiedenen Zementen bewertet. Der Festigkeitsbeitrag von 2:1 dominierten Tonen erwies sich als relevant. Dies gilt insbesondere für calcinierten Illit nach 2 Tagen und für calcinierten Smectit nach 28 Tagen. Ein signifikanter Anstieg der Festigkeit wurde bei den 1:1 dominierten Tonen erst nach 28 Tagen beobachtet. Der Festigkeitsbeitrag der calcinierten Tone variierte in Abhängigkeit vom verwendeten Zement. Ein mathematisches Modell korreliert die Mineralogie und die Partikelgröße der Tone mit dem Aktivitätsindex der Bindemittelmischungen, sodass eine Vorhersage der Festigkeit nach 2 und 28 Tagen möglich ist. Dies gelingt auch mit dem R^3 -Test, da die freigesetzte Reaktionswärme während des Tests mit dem Aktivitätsindex der entsprechenden Bindemittelmischung korreliert.

1 Einleitung

Tone sind keineswegs das „eine“ Material schlechthin. Das gilt entsprechend auch für calcinierte Tone. Natürlich vorkommende Tone sind in ihrer Zusammensetzung sehr unterschiedlich, und auch innerhalb einer Lagerstätte kann es zu erheblichen Schwankungen kommen. Tonminerale werden aufgrund ihrer Schichtstruktur aus tetra- und oktaedrischen Schichten in 1:1-, 2:1- und 2:1:1- Schichtsilicate eingeteilt. [1]

In der Literatur finden sich unterschiedliche Aussagen über den frühen Druckfestigkeitsbeitrag von calciniertem Illit, Smectit und Kaolinit im zementären Systemen. Häufig ist der frühe Festigkeitsbeitrag von kaolinitischen Tonen am höchsten, gefolgt von illitischen Tonen. [5-11]. Im Gegensatz dazu

herrscht in der Literatur Einigkeit über den Festigkeitsbeitrag der drei Tonminerale im zementgebundenen System nach 28 Tagen, welcher in der Reihenfolge Illit - Smectit - Kaolinit zunimmt [5, 6, 10-14]

Demnach besitzen Kaolinite in Bezug auf die Druckfestigkeit ein deutlich höheres Potenzial als Illite und Smectite. Viele Forschungsarbeiten haben sich auf kaolinitische (1:1 dominierte) Tone spezialisiert, während illitische und smectitische (2:1 dominierte) Tone in den Hintergrund gerieten. Aus europäischer Sicht ist dies nicht zufriedenstellend, da 1:1 dominierte Tone in Afrika, Asien und Südamerika häufig, in Europa jedoch nur selten und in geringen Mengen vorkommen [15]. Stattdessen finden sich in Europa oft 2:1 dominierte oder gemeine Tone, die aus Mischungen unterschiedlicher

Tabelle 1 Physikalische Parameter der Zemente

Parameter	Norm	CEM I 52,5R (bs)	CEM I 52,5R (ft)	CEM I 42,5N	CEM I 42,5R	CEM II/A-LL 32,5R	CEM I 42,5R SRO
d' [μm]	[2]	11,9	12,4	31,9	26,9	27,9	16,6
Blaine SSA [cm^2/g]	[3]	5630	6225	2742	3340	3507	4820
f_{2d} [N/mm^2]	[4]	41,0	44,1	19,0	24,3	20,5	27,5
f_{28d} [N/mm^2]	[4]	71,0	68,3	55,3	54,8	50,0	56,5

Tabelle 2 Mineralogische Zusammensetzung der Rohtone (teilweise aus [16-18])

Ton	Tongruppe	Calcinierungstemperatur	Mineralogie der Rohtone [Gew.-%]					
			Kaolinit	Smectit	Smectit-Illit	Illit	Muscovit	Inert
PP	1:1 dominanter Ton	600 °C	93					7
FUP	1:1 dominanter Ton	800 °C	71			13		15
GFU	1:1 dominanter Ton	500 °C	55			9		35
RKUP	1:1 dominanter Ton	800 °C	45			3		52
GUS	Gemeiner Ton	520 °C	31	5		15	23	26
CT7	Gemeiner Ton	750 °C	23		32	5		35
OC	Gemeiner Ton	680 °C	20		38		6	34
Sml	2:1 dominanter Ton	840 °C	11	33		33		23
III-E	2:1 dominanter Ton	840 °C	10			67	7	16
III-A	2:1 dominanter Ton	840 °C	7			67	5	21
Smk	2:1 dominanter Ton	840 °C	7	54		4		35

Tonminerale bestehen und zudem inerte Stoffe wie Quarz enthalten [16]. Aus diesem Grund werden in dieser Studie bewusst 2:1 dominierte und gemeine Tone untersucht und 1:1 dominierten Tonen gegenübergestellt. Damit sollen auch nicht 1:1 dominierte Tone hinsichtlich ihres Festigkeitsbeitrages analysiert werden, damit sie dauerhaft in der Zement- und Betonindustrie eingesetzt werden können und nicht zu Unrecht ausgeschlossen werden.

Der Schwerpunkt der Forschungsarbeit liegt auf zwei Fragen: Inwieweit tragen verschiedene calcinierte Tonminerale zur Druckfestigkeit der Bindemittelmischungen nach 2 und 28 Tagen bei? Korreliert dieser Festigkeitsbeitrag mit spezifischen Toneigenschaften?

Zu diesem Zweck wurden elf verschiedene Tone ausgewählt und in calcinierter Form mittels Wärmefreisetzung im Kalorimeter auf ihre Reaktivität untersucht. Der Festigkeitsbeitrag jedes calcinierten Tons wird durch Druckfestigkeitsprüfungen von Mörtelprismen mit sechs verschiedenen Zementen nach 2 und 28 Tagen bewertet. Dabei wird die Leistung von 2:1 dominierten Tonen mit der von 1:1 dominierten Tonen unter Berücksichtigung der Tonmineralogie verglichen. Die Druckfestigkeitsergebnisse werden in Bezug zur gemessenen Wärmefreisetzung der calcinierten Tone im R³-Test gesetzt, um daraus Vorhersagen für die Festigkeiten zu treffen. Die Statistiksoftware JMP wird genutzt, um Korrelationen zwischen der Druckfestigkeit und der Tonmineralogie und damit eine weitere Möglichkeit zur Vorhersage der Festigkeit zu finden.

2 Materialien und Methoden

2.1 Zemente und Tone

Es wurden fünf Portlandzemente und ein Portlandkalksteinzement verwendet. Die physikalischen Parameter der Zemente sind in Tabelle 1 aufgeführt. Die untersuchten Tone stammen mit Ausnahme von PP aus Deutschland. Sie unterscheiden sich stark in ihrer Zusammensetzung. Tabelle 2 zeigt die Mineralogie der Rohtone. Quarz, Karbonate und andere Begleitminerale wurden als inert zusammengefasst. Die physikalischen Eigenschaften der gemahlene calcinierten Tone (Metatone) sind in Tabelle 3 zusammen mit Quarz aufgeführt.

Tabelle 3 Physikalische Parameter der gemahlene calcinierten Tone und des Quarzes

Material	Partikelgröße [µm]			BET SSA [m ² /g]
	d ₁₀	d ₅₀	d ₉₀	
PP	1,0	4,8	39,2	18
FUP	3,5	60,9	253,7	8
GFU	1,7	12,6	29,5	26
RKUP	0,9	4,2	40,9	8
GUS	1,9	12,3	31,8	27
CT7	1,9	12,5	33,8	6
OC	1,7	12,8	67,6	36
Sml	1,6	14,8	68,2	51
III-E	1,9	15,8	54,6	71
III-A	1,7	15,6	64,2	67
Smk	1,4	14,4	60,6	38
Quarz	3,1	40,6	123,7	1

Für alle Untersuchungen wurden die Tone als calciniertes und gemahlene Material verwendet. Eine zusätzliche Sulfatträgerzugabe zum binären Bindemittel erfolgte nicht.

Tabelle 4 Kumulative Wärmefreisetzung von calcinierten Tonen und Quarz im R³-Test nach 24 Stunden, 168 Stunden und deren Differenz Δ

Material		PP	FUP	GFU	RKUP	GUS	CT7	OC	Sml	Ill-E	Ill-A	Smk	Quarz
Tongruppe*		1:1	1:1	1:1	1:1	Gem.	Gem.	Gem.	2:1	2:1	2:1	2:1	
Kumulative Wärmefreisetzung [J/g _{SCM}]	24 h	776	373	254	434	281	141	143	154	150	134	123	7
	168 h	917	538	463	628	315	424	258	300	242	237	380	14
	Δ	141	165	209	194	34	283	115	146	92	103	257	7

2.2 Experimentelle Untersuchungen

Die Reaktivität der Metatone wurde als Wärmefreisetzung im R³-Test nach DIN EN 17979 [19] mit einem isothermen Kalorimeter TAM Air (TA Instruments) gemessen. Die Versuche wurden nach 168 Stunden beendet und die Ergebnisse auf 1 g SCM normiert.

Mörtelprismen wurden nach DIN EN 196-1 [4] hergestellt und nach 2 und 28 Tagen geprüft, um den Festigkeitsbeitrag der calcinierten Tone zu bestimmen. Der Zement wurde durch 20 Gew.-% calcinierten Ton ersetzt. Der Aktivitätsindex (AI) wurde berechnet, indem die Druckfestigkeit der Bindemittelmischung ins Verhältnis zu der des Referenzzements gesetzt wurde.

2.3 Statistische Berechnungen

Die Statistiksoftware JMP (SAS Institute) wurde in Kapitel 4.2 verwendet, um eine Korrelation zwischen Mineralogie und Partikelgröße der calcinierten Tone und ihrem Festigkeitsbeitrag in Form des Aktivitätsindex zu finden. Für die Berechnung der einzelnen Parameter α_i der Variablen i wurde die Methode der kleinsten Standardquadrate gewählt. Dabei wird nach dem höchsten Bestimmtheitsmaß R^2 gesucht. Die Interpretation des resultierenden R^2 -Koeffizienten orientiert sich an [20]. Ein R^2 -Koeffizient über 0,7 wird als hohe Korrelation und über 0,9 als sehr hohe Korrelation angesehen.

Als mathematisches Modell dient eine lineare Gleichung mit den Tonmineralgehalten und der Partikelgröße der calcinierten Tone in Form von d_{50} :

$$AI_{JMP} = \alpha_0 + \alpha_K \cdot K + \alpha_S \cdot S + \alpha_{IS} \cdot IS + \alpha_I \cdot I + \alpha_{d_{50}} \cdot d_{50} \quad (1)$$

α_i sind die von der Software berechneten Parameter zur Gewichtung der Variablen. Der Gehalt der Tonminerale (K: Kaolinit, S: Smectit, IS: Illit-Smectit-Mischschicht, I: Illit) im Rohton wird in der Einheit Gew.-% und der Teilchendurchmesser d_{50} in der

Einheit μm verwendet. GUS und GFU enthalten Illit, aber da dieses Tonmineral bei den niedrigen verwendeten Calciniertemperaturen nicht ausreichend aktiviert wurde, wird es als inertes Mineral betrachtet. Muscovit wird aufgrund seiner mangelnden Reaktivität ebenfalls als inertes Material angesehen [21, 22]. Quarz selbst hat als inertes Material nur einen Einfluss über $\alpha_{d_{50}}$ d. h. der Parameter von Quarz ist 0 ($\alpha_Q = 0$).

3 Ergebnisse

3.1 Reaktivität der calcinierten Tone im R³-Test

Die kumulative Wärmefreisetzung der calcinierten Tone in R³-Tests nach 24 und 168 Stunden sowie deren Differenz sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Die im R³-Test ermittelten schnelleren und höheren Reaktivitäten von 1:1 dominierten Metatonen gegenüber den 2:1 dominierten Metatonen stehen im Einklang mit den zeitabhängigen Aluminium- und Siliziumionenlöslichkeiten von Metakaolinit, Metallit und Metasmectit in [14].

3.2 Druckfestigkeiten

Die berechneten Aktivitätsindizes der Bindemittelmischungen nach 2 (leere Symbole) und 28 Tagen (gefüllte Symbole) werden zum Vergleich ihrer Leistungsfähigkeit herangezogen (Abbildung 1). Für die meisten Metatone werden die höchsten Aktivitätsindizes nach 2 Tagen mit CEM I 52,5R (ft) und CEM I 52,5 (bs) und die niedrigsten Aktivitätsindizes mit CEM I 42,5R SR0 erreicht. Die eng beieinander liegenden Kurven weisen auf geringe Unterschiede der Aktivitätsindizes der Zemente hin. Für alle Metatone werden die höchsten Aktivitätsindizes nach 28 Tagen mit einem Kalksteinzementgemisch erreicht. Dies unterstreicht die starken Synergieeffekte zwischen Kalksteinmehl und calcinierten Tonen, wie sie z. B. aus [23, 24] bekannt sind. In den meisten Fällen wurde der niedrigste

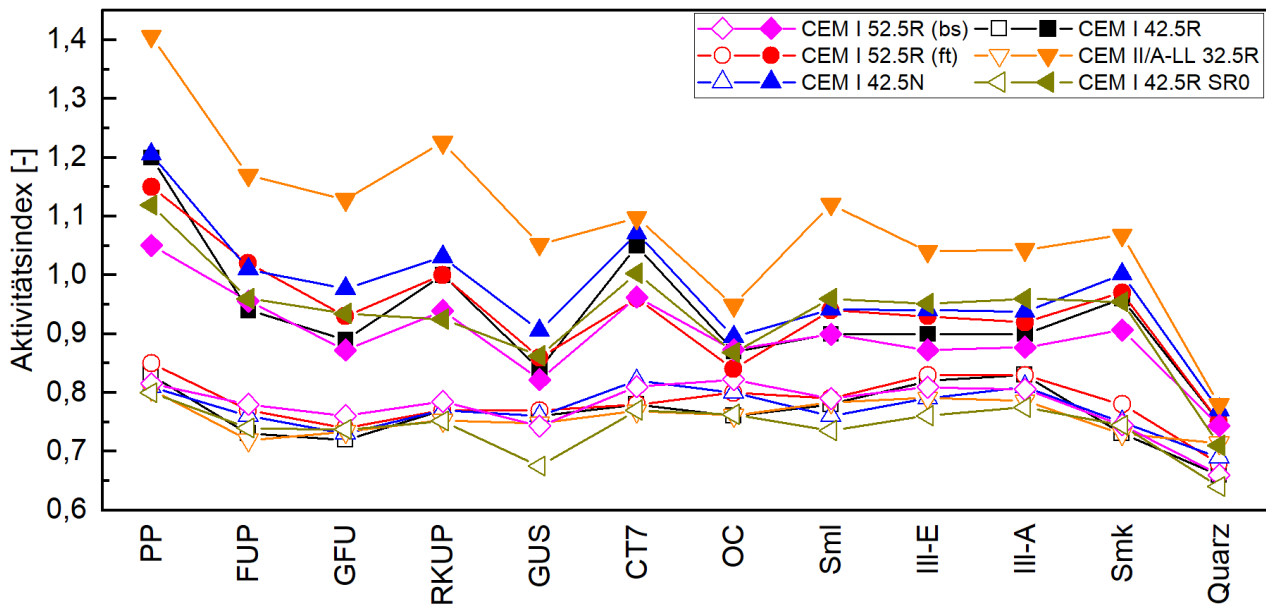


Abbildung 1 Aktivitätsindex von Mörtelprismen mit einem Austauschgrad von jeweils 20 Gew.-% calciniertem Ton in verschiedenen Zementen nach 2 (leere Symbole) und 28 Tagen (gefüllte Symbole) gemäß DIN EN 196-1 [4]. Die Verbindungslinien haben keine physikalische Bedeutung

Aktivitätsindex nach 28 Tagen bei der Verwendung von CEM I 52,5R (bs) erzielt. Nach 28 Tagen gibt es innerhalb einer Bindemittelmischung und zwischen den verschiedenen Bindemittelmischungen größere Unterschiede im Aktivitätsindex als nach 2 Tagen.

Tagen. Zum Vergleich wird Quarz in die Darstellung aufgenommen. In diesem Fall werden die Aktivitätsindizes über alle sechs Zemente gemittelt. Eine separate Analyse für die einzelnen Zemente ergibt vergleichbare Ergebnisse und wird daher hier nicht dargestellt.

4 Diskussion

4.1 Unterscheidung des Festigkeitsbeitrags anhand der Tonmineralogie

Illitische und smectitische Tone können auf Grundlage ihrer strukturellen Eigenschaften als 2:1 dominierte Tone betrachtet werden. Ihr Beitrag als Metatone zur Festigkeit im Mörtel unterscheidet sich jedoch beträchtlich, sodass die Aktivitätsindizes der beiden Bindemittelmischungen bei einer gemeinsamen Gruppierung nicht zufriedenstellend gemittelt sind. Daher ist eine Unterscheidung der 2:1 dominierten Tone in illitische und smectitische Tone nach 2 und 28 Tagen notwendig. Auf III-A (67 Gew.-% Illit) und Smk (54 Gew.-% Smectit) wird im Folgenden näher eingegangen. Die Gruppe der 1:1 dominierten Tone (66 Gew.-% Kaolinit) wurde als repräsentativ für Kaolinit für einen Vergleich mit Illit und Smectit ausgewählt.

Abbildung 2 zeigt die entsprechenden Tone und Tongruppen mit Aktivitätsindex nach 2 und 28

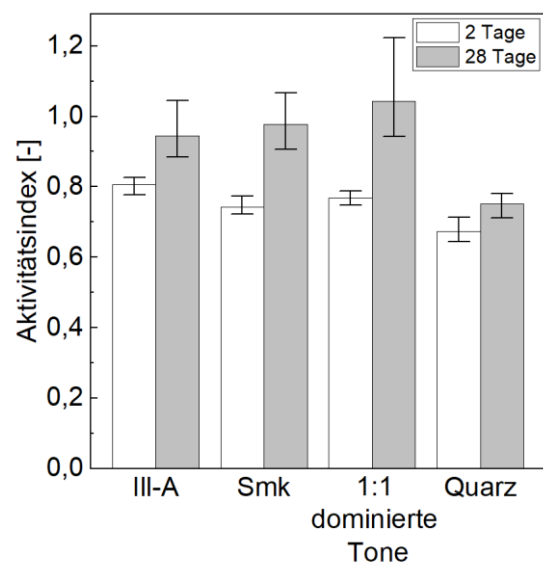


Abbildung 2 Aktivitätsindizes von Mörtelprismen mit III-A, Smk, 1:1 dominierten Tonen und Quarz nach 2 und 28 Tagen, gemittelt über alle Zemente

Illit-A weist nach 2 Tagen den höchsten und Smk den niedrigsten Aktivitätsindex der hier untersuchten Tonminerale auf. 1:1 dominierte Tone liegen dazwischen. Der Festigkeitsbeitrag der Tonminerale nach 2 Tagen nimmt in folgender Reihenfolge zu: Smectit - Kaolinit - Illit. Verschiedene Studien kamen zu unterschiedlichen Ergebnissen für den frühen Festigkeitsbeitrag der verschiedenen Tonminerale. Metakaolinit leistet den höchsten Beitrag zur Festigkeit, gefolgt von Metaillit und Metasmectit [5, 7-9]. Die bekannte Reihenfolge der frühen Reaktivität (Metakaolinit > Metaillit > Metasmectit), die in verschiedenen Reaktivitätstests [14, 16, 25] festgestellt und auch hier in den R^3 -Tests bestätigt wurde, spiegelt sich hier allerdings nicht in den Festigkeiten der Mörtel wider. Die hohe Anfangsreaktivität von Metakaolinit tritt auch im zementären System auf, gleichzeitig wird aber die Alithydratation behindert [20]. Im Gegensatz dazu reagiert Metaillit selbst weniger, hat aber einen geringeren Einfluss auf die Alithydratation. Dementsprechend sind die Aktivitätsindizes nach 2 Tagen plausibel.

Nach 28 Tagen nimmt der Festigkeitsbeitrag der calcinierten Tone in folgender Reihenfolge zu: Illit - Smectit - Kaolinit, was im Einklang mit anderen Studien steht [5, 12-14]. Die schnellere und stärkere Freisetzung von Ionen ist ein Grund für die gute Leistung von Metakaolinit [5, 26, 27]. Hinzu kommt seine schnelle Reaktivität: [14] berichtet von einer fast vollständigen Reaktion von Metakaolinit nach 28 Tagen in der hydratisierten Calciumhydroxidpaste. Im Gegensatz dazu erreichte Metaillit zeitgleich nur einen Reaktionsgrad von weniger als 30 Gew.-% und Metasmectit von weniger als 60 Gew.-%. Dies steht im Einklang mit der vorliegenden Studie, die eine höhere Reaktivität für Smectit als für Illit in Bezug auf die eigenen R^3 -Tests nach 168 Stunden und die Mörtelfestigkeiten nach 28 Tagen ergab.

4.2 Korrelation zwischen Tonmineralogie und Druckfestigkeit

Unter Einbeziehung der Partikelgröße der calcinierten Tone konnte mit der Statistiksoftware JMP eine Beziehung zwischen dem Gehalt der verschiedenen Tonminerale und dem Aktivitätsindex hergestellt werden. Tabelle 5 zeigt die - über alle Zemente gemittelten - berechneten Parameter α_i der Variablen i nach 2 und 28 Tagen. Die R^2 -Koeffizienten von

0,96 und 0,88 verdeutlichen eine sehr hohe und hohe Korrelation. Eine separate Analyse für die einzelnen Zemente ergibt zwar andere Parameter, aber ähnliche Bestimmtheitsmaße. Die Vorzeichen der Parameter sind nachvollziehbar. Das positive Vorzeichen für die Tonminerale bedeutet, dass der Aktivitätsindex mit zunehmendem Gehalt steigt. Das Vorzeichen von $\alpha_{d_{50}}$ ist negativ, weil der Aktivitätsindex mit geringerer Partikelgröße (höherem d_{50}) abnimmt.

Tabelle 5 Berechnete Parameter α_i der Variablen i nach 2 und 28 Tagen, basierend auf dem mit den Mörtelprismen gemessenen Aktivitätsindex, gemittelt über alle Zemente (K: Kaolinit, S: Smectit, IS: Illit-Smectit-Mischschicht, I: Illit)

Variable i	2 Tage α_i	28 Tage α_i
0	0,7111	0,8028
K	0,0011	0,0040
S	0,0006	0,0028
IS	0,0017	0,0022
I	0,0015	0,0020
d_{50}	-0,0010	-0,0017
Bestimmtheitsmaß R^2	0,96	0,88

Ein Vergleich der Parameter α_i der Tonminerale untereinander nach 2 bzw. 28 Tagen gibt Aufschluss über deren Stellenwert und damit auch über den jeweiligen Festigkeitsbeitrag. Nach JMP steigt der Beitrag nach 2 Tagen in der Reihenfolge Smectit < Kaolinit < Illit und nach 28 Tagen in der Reihenfolge Illit < Smectit < Kaolinit. Dies sind die gleichen Reihenfolgen, wie sie auf der Basis von Mörtelprismen mit den verschiedenen Tönen in Kapitel 4.1 gefunden wurden. Für einen bereits in dieser Studie verwendeten Zement könnte nun mit Hilfe von Gleichung 1 für einen neuen Ton der zu erwartende Aktivitätsindex von Mörtelprismen bei einem zu 20 Gew.-% substituierten Bindemittel bestimmt werden.

4.3 Korrelation zwischen kumulativer Wärmefreisetzung und Druckfestigkeit

Schließlich werden die Messungen des R^3 -Tests mit den Aktivitätsindizes der Mörtelprismen verglichen. Der Aktivitätsindex nach 2 Tagen wird mit der kumulativen Wärmefreisetzung nach 24 Stunden (Abbildung 3a) verglichen. Die gute Korrelation bei Verwendung von 1:1 dominierten Tönen in

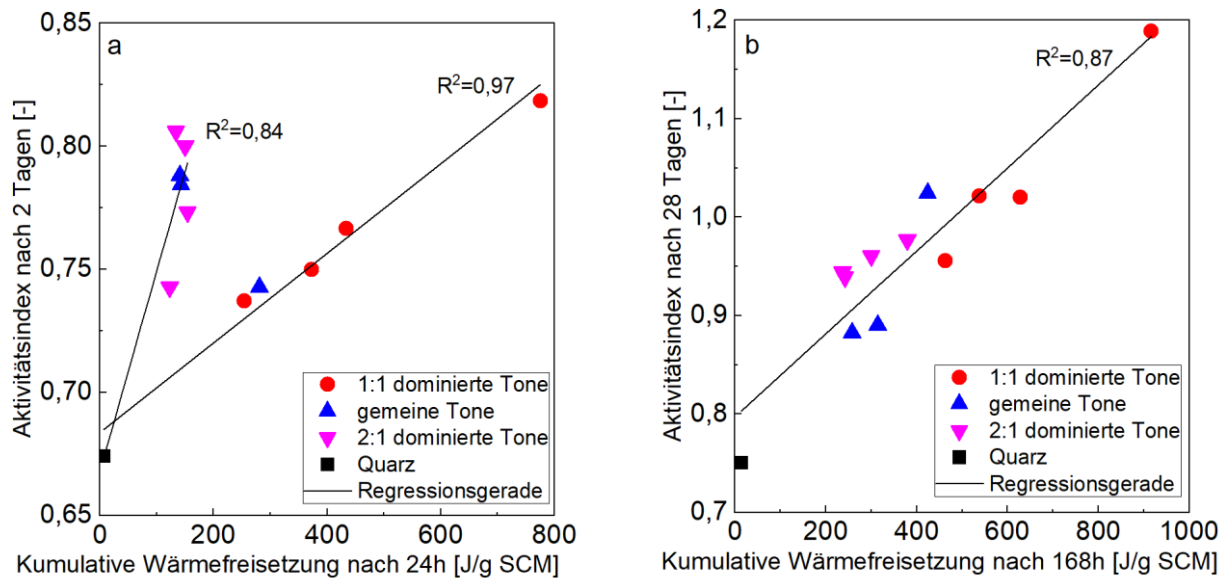


Abbildung 3 Aktivitätsindex der Mörtelprismen nach 2 (a) und 28 Tagen (b), gemittelt über alle Zemente, in Abhängigkeit von der kumulativen Wärmefreisetzung der calcinierten Tone in R^3 -Tests nach 24 und 168 Stunden. Zwei Regressionslinien wurden für Tone mit einem Kaolinitgehalt von mehr oder weniger als 30 Gew.-% mit Quarz in (a) gebildet, eine Regressionslinie für alle Tone und Quarz in (b)

[25] wird bestätigt, jedoch liegen 2:1 dominierte Tone und auch gemeine Tone nicht auf derselben Regressionslinie. Sie müssen daher gesondert betrachtet werden. Die hohe Frühreaktivität der 1:1 dominierten Tone im R^3 -Test tritt in deren Bindemittelmischungen zwar auf, aber zeitgleich wird die Alithydratation erheblich behindert [21]. Der Aktivitätsindex nach 28 Tagen korreliert mit der kumulativen Wärmefreisetzung nach 168 Stunden (Abbildung 3b). Eine einzige Regressionsgerade passt in dem Fall gut zu allen untersuchten Tönen.

Die zementabhängigen Aktivitätsindizes der Tone in Abbildung 1 machen deutlich, dass der Aktivitätsindex einer Bindemittelmischung mit calciniertem Ton nicht durch Messung der kumulativen Wärmefreisetzung des calcinierten Tons im R^3 -Test ohne Weiteres vorhergesagt werden kann. Die Leistung der calcinierten Tone in einer Bindemittelmischung hängt zu sehr von den jeweils verwendeten Zementen ab. Sobald eine Regressionslinie für einen bestimmten Zement erstellt wurde, lässt sich der Festigkeitsbeitrag eines neuen calcinierten Tons mit demselben Zement eindeutig vorhersagen - zumindest nach 28 Tagen.

5 Schlussfolgerung

In dieser Studie wurden elf verschiedene calcinierte Tone in Kombination mit sechs Zementen

untersucht. Ziel war es, den Einfluss des jeweiligen Tons und letztlich Tonminerals auf den Beitrag zur Druckfestigkeit im Mörtel zu ermitteln und den individuellen Druckfestigkeitsbeitrag calcinierter Tone aus deren Reaktivität im R^3 -Test abzuschätzen.

Um Aussagen zum individuellen Druckfestigkeitsbeitrag liefern zu können, erwies sich neben einer Unterscheidung in gemeine, 1:1 und 2:1 dominierte Tone eine Differenzierung der 2:1 dominierten Tone in illitische und smectitische Tone als notwendig. Illitische und smectitische Tone verhalten sich zu unterschiedlich, um gemeinsam als 2:1 dominierte Tone betrachtet zu werden. 2:1 dominierte und gemeine Tone zeigen einen signifikanten Festigkeitsbeitrag im Mörtel, sodass sie neben 1:1 dominierten Tönen auch als SCM eine zukunftsfähige Ressource darstellen. Der Kaolinitgehalt kann nicht als alleiniges Kriterium für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit eines calcinierten Tons im zementären System herangezogen werden, insbesondere nicht für die Frühfestigkeit. Die untersuchten illitischen Tone führen in Bindemittelmischungen zu einer höheren Festigkeit nach 2 Tagen als 1:1 dominierte Tone. Die eigenständige Reaktion der smectitischen Tone entwickelt sich langsamer, ist aber deutlich und übertrifft nach 28 Tagen sogar die der illitischen Tone. Die 1:1 dominierten Tone weisen nach 28 Tagen die höchsten Festigkeiten auf.

Die Mineralogie der Tone korreliert gut mit der Druckfestigkeit von Mörteln, die in Bindemittelmischungen eingesetzt wurden, wenn man zugleich die mittlere Partikelgröße d_{50} berücksichtigt. Diese Korrelation ist jedoch abhängig vom Zement, da ein calcinierter Ton in verschiedenen Zementen unterschiedliche Aktivitätsindizes liefert. Sobald die Parameter der Variablen (Tonminerale, Partikelgröße) für einen Zement bekannt sind, kann der erwartete Festigkeitsbeitrag eines neuen Tons in Mischungen mit diesem Zement abgeschätzt werden.

Der R^3 -Test von calcinierten Tonen weist eine hohe Korrelation mit den Mörteldruckfestigkeiten von Bindemittelmischungen mit calcinierten Tonen nach 28 Tagen auf. Unter Berücksichtigung der Zementabhängigkeit kann die Festigkeit für diesen Zeitpunkt vorhergesagt werden. Bei den 2-Tage-Festigkeitswerten ist eine Differenzierung nach dem Primärphasengehalt des Tons erforderlich. 1:1 dominierte Tone haben eine höhere kumulative Wärmefreisetzung im R^3 -Test als 2:1 dominierte Tone und liegen dementsprechend auf einer anderen Regressionslinie. Wenn nur die kumulative Wärmefreisetzung eines calcinierten Tons im R^3 -Test gemessen wird, ohne seine Tongruppenzugehörigkeit zu kennen, kann der Aktivitätsindex seiner Bindemittelmischung nach 2 Tagen nicht vorhergesagt werden.

Da der Festigkeitsbeitrag der calcinierten Tone je nach verwendetem Zement variiert, ist eine weitere Studie erforderlich, um eine Aussage über den Einfluss des Zements auf die Reaktion der calcinierten Tone zu treffen.

6 Literatur

- Alujas Diaz, A., et al., *Properties and occurrence of clay resources for use as supplementary cementitious materials: a paper of RILEM TC 282-CCL*. Materials and Structures, 2022. **55**: p. 139.
- DIN 66145, *Darstellung von Korn-(Teilchen-)größenverteilungen RRSB-Netz / Graphical representation of particle size distribution; RRSB-grid*. 1976. p. 3.
- DIN EN 196-6, *Prüfverfahren für Zement - Teil 6: Bestimmung der Mahlfineinheit (Methods of testing cement - Part 6: Determination of fineness)*. 2019, Beuth Verlag: Berlin, Germany. p. 21.
- DIN EN 196-1, *Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit (Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength)*. 2016, Beuth-Verlag: Berlin, Germany. p. 31.
- Fernandez, R., F. Martirena, and K.L. Scrivener, *The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: a comparison between kaolinite, illite and montmorillonite*. Cement and Concrete Research, 2011. **41**(1): p. 113-122.
- Sowoidnich, T., et al., *Reaktivitätsuntersuchungen von calcinierten Tonen mit geringem Metakaolingehalt*, in *ce/papers*. 2023. p. 400-404.
- He, C., E. Makovicky, and B. Osbæck, *Thermal stability and pozzolanic activity of calcined illite*. Applied Clay Science, 1995. **9**(5): p. 337-354.
- He, C., E. Makovicky, and B. Osbæck, *Thermal treatment and pozzolanic activity of Na- and Ca-montmorillonite*. Applied Clay Science, 1996. **10**(5): p. 351-368.
- He, C., E. Makovicky, and B. Osbæck, *Thermal stability and pozzolanic activity of calcined kaolin*. Applied Clay Science, 1994. **9**(3): p. 165-187.
- Msinjili, N.S., et al., *Comparison of calcined illitic clays (brick clays) and low-grade kaolinitic clays as supplementary cementitious materials*. Materials and Structures, 2019. **52**(5): p. 94.
- Danner, T., G. Norden, and H. Justnes, *Calcareous smectite clay as a pozzolanic alternative to kaolin*. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2019: p. 1-18.
- He, C., B. Osbæck, and E. Makovicky, *Pozzolanic reactions of six principal clay minerals: activation, reactivity assessments and technological effects*. Cement and Concrete Research, 1995. **25**(8): p. 1691-1702.
- Danner, T., *Reactivity of Calcined Clays*, in *Faculty of Natural Science and Technology, Department of Natural Sciences and Engineering*. 2013, NTNU: Trondheim. p. 229.
- Trümer, A., *Calcinierte Tone als Puzzolane der Zukunft - Von den Rohstoffen bis zur Wirkung im Beton*, in *Fakultät Bauingenieurwesen*. 2020, Bauhaus-Universität Weimar: Weimar. p. XXI, 200.

15. Ito, A. and R. Wagai, *Global distribution of clay-size minerals on land surface for biogeochemical and climatological studies*. Scientific Data, 2017. **4**(1): p. 170103.
16. Maier, M., N. Beuntner, and K.-C. Thienel, *Mineralogical characterization and reactivity test of common clays suitable as supplementary cementitious material*. Applied Clay Science, 2021. **202**: p. 105990.
17. Beuntner, N., *Zur Eignung und Wirkungsweise calcinierter Tone als reaktive Bindemittelkomponente in Zement (On the suitability and mode of action of calcined clays as reactive binder components in cement)*, in *Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften*. 2017, Universität der Bundeswehr München: Neubiberg. p. 207.
18. Sposito, R., N. Beuntner, and K.-C. Thienel, *Characteristics of components in calcined clays and their influence on the efficiency of superplasticizers*. Cement and Concrete Composites, 2020. **110**(103594).
19. DIN EN 17979 - Entwurf, *Reaktivität von Zementbestandteilen - Verfahren zur Bestimmung der Hydratationswärme und des chemisch gebundenen Wassers (Reactivity of cement constituents - Heat of hydration and bound water methods)*. 2023, Beuth-Verlag GmbH: Berlin, Germany. p. 31.
20. Kundt, G., H. Krentz, and Ä. Glass, *Epidemiologie und Medizinische Biometrie (Epidemiology and Medical Biometry)*. Berichte aus der Statistik. 2011, Aachen: Shaker Verlag. 246.
21. Scherb, S., et al., *Reaction kinetics during early hydration of calcined phyllosilicates in model cement systems*. Cement and Concrete Research, 2024. **175**: p. 107356.
22. Sposito, R., et al., *Early hydration behavior of blended cementitious systems containing calcined clays and superplasticizer*, in *15th International Congress on the Chemistry of Cement*, J. Gemrich, Editor. 2019, Research Institute of Binding Materials Prague: Prague, Czech Republic. p. 10.
23. Maraghechi, H., et al., *Performance of Limestone Calcined Clay Cement (LC3) with various kaolinite contents with respect to chloride transport*. Materials and Structures, 2018. **51**(5): p. 125.
24. Antoni, M., et al., *Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone*. Cement and Concrete Research, 2012. **42**(12): p. 1579-1589.
25. Avet, F., et al., *Development of a new rapid, relevant and reliable (R³) test method to evaluate the pozzolanic reactivity of calcined kaolinitic clays*. Cement and Concrete Research, 2016. **85**: p. 1-11.
26. Hollanders, S., et al., *Pozzolanic reactivity of pure calcined clays*. Applied Clay Science, 2016. **132–133**: p. 552-560.
27. Werling, N., et al., *Solubility of Calcined Kaolinite, Montmorillonite, and Illite in High Molar NaOH and Suitability as Precursors for Geopolymers*. Clays and Clay Minerals, 2022. **70**.