

Materialcharakterisierung regionaler Sekundärrohstoffe zur Entwicklung nachhaltiger Bindemittelsysteme für Betonfertigteile

Manuel Neumaier, Florian Hüller, Daniel Jansen, Christina Kunzmann, Daniel Vollprecht

Angaben zur Veröffentlichung / Publication details:

Neumaier, Manuel, Florian Hüller, Daniel Jansen, Christina Kunzmann, and Daniel Vollprecht. 2026. "Materialcharakterisierung regionaler Sekundärrohstoffe zur Entwicklung nachhaltiger Bindemittelsysteme für Betonfertigteile." In *Tagungsband: 15. DGAW-Wissenschaftskongress; Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft am 24. und 25. Februar 2026 an der Hochschule Pforzheim*, edited by Anke Bockreis, Martin Faulstich, Sabine Flamme, Kathrin Greiff, Martin Kranert, David Laner, Mario Mocker, et al., 257–61. Innsbruck: innsbruck university press. <https://doi.org/10.15203/99106-187-8>.



RESSOURCEN
NEU
DENKEN.

Deutsche Gesellschaft für Abfall- und Kreislaufwirtschaft e.V.

Tagungsband

15. DGAW-WISSENSCHAFTSKONGRESS

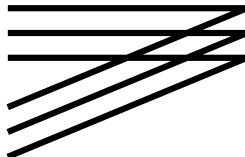
Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft

am 24. und 25. Februar 2026

an der Hochschule Pforzheim

In Zusammenarbeit mit

HS PF



15. DGAU-WISSENSCHAFTSKONGRESS

Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft

Anke Bockreis, Martin Faulstich, Sabine Flamme, Kathrin Greiff,
Martin Kranert, David Laner, Mario Mockler, Michael Nelles,
Peter Quicker, Gerhard Rettenberger, Vera Susanne Rotter,
Jörg Woidasky (Hg.)

Wissenschaftliche Organisation

Prof. Dr.-Ing. Anke Bockreis (Univ. Innsbruck)
Prof. Dr.-Ing. Martin Faulstich (INZIN e.V.)
Prof. Dr.-Ing. Sabine Flamme (FH Münster)
Prof. Dr. Kathrin Greiff (RWTH Aachen University, ANTS)
Prof. Dr.-Ing. Martin Kranert (i. R. Univ. Stuttgart)
Prof. Dr. David Laner (Univ. Kassel)
Prof. Dr. Mario Mockler (OTH Amberg-Weiden)
Prof. Dr. mont. Michael Nelles (Univ. Rostock/DBFZ Leipzig)
Prof. Dr.-Ing. Peter Quicker (RWTH Aachen University, TEER)
Prof. Dr.-Ing. Gerhard Rettenberger (i. R. HS Trier)
Prof. Dr.-Ing. Vera Susanne Rotter (TU Berlin)
Prof. Dr.-Ing. Jörg Woidasky (HS Pforzheim)

Deutsche Gesellschaft für Abfall- und Kreislaufwirtschaft e.V.
DGAW
Von-der-Heydt-Straße 2
10785 Berlin
Tel.: 030.84 59 14 77
E-Mail: info@dgaw.de
www.DGAW.de

© *innsbruck* university press, 2026
Universität Innsbruck
1. Auflage
Alle Rechte vorbehalten.
innsbruck university press, Karl-Schönherr-Straße 3, 6020 Innsbruck
Tel. +43 512 507-31700, iup@uibk.ac.at, www.uibk.ac.at/iup
www.uibk.ac.at/iup
ISBN 978-3-99106-187-8
DOI 10.15203/99106-187-8
Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Materialcharakterisierung regionaler Sekundärrohstoffe zur Entwicklung nachhaltiger Bindemittelsysteme für Betonfertigteile

Abstract: In dieser Masterarbeit wurde die mechanochemische Aktivierung regionaler Tone aus bergbaulichen Reststoffströmen untersucht und deren Eignung als klimafreundliche Zement- bzw. Klinkersatzstoffe hinsichtlich des Einflusses auf strukturelle, physikalische und reaktive Eigenschaften bewertet. Die mechanochemische Aktivierung führte zu einer deutlichen Veränderung der Partikeleigenschaften: Die spezifische BET-Oberfläche wurde verringert und die Korngrößenverteilung in den größeren Bereich verschoben. Strukturelle Untersuchungen mittels Rietveld-Analyse belegten eine erfolgreiche Amorphisierung der Kristallstruktur. Diese strukturellen Veränderungen führten zu einer gesteigerten Reaktivität der Tone, die sich in einer erhöhten Wärmeentwicklung widerspiegeln. Gleichzeitig konnte die Wasseraufnahme signifikant reduziert und die Verarbeitbarkeit der Materialien deutlich verbessert werden. In Mörtelsystemen resultierte der Einsatz der mechanochemisch aktivierten Tone in einer erhöhten Druckfestigkeit, womit die Eignung als Klinker- oder Zementsubstitut nachgewiesen wurde.

1 Einleitung

Die Herstellung von Betonfertigteilen stellt einen zentralen Bestandteil der modernen Bauindustrie dar. Um die für eine effiziente Produktion erforderlichen hohen Frühfestigkeiten bei gleichzeitig verbesserter Verarbeitbarkeit zu erreichen, kommen neben den üblichen Komponenten wie Sand, Zement und Gesteinskörnung zunehmend feine Zusatzstoffe wie Kalksteinmehl zum Einsatz (Bentz et al., 2017). Die Produktion dieses hochwertigen Kalksteinmehls erfordert die Abtrennung von Verunreinigungen, wobei insbesondere Mergel und Lehm als Nebenprodukte anfallen. Im Kalksteinbruch Wiesenhofen handelt es sich dabei überwiegend um Verwitterungslehm, während bei der Sandgewinnung zusätzlich große Mengen an Sedimentationston entstehen. Diese Materialien finden derzeit keine wirtschaftliche Verwendung, sodass ihre Deposition mit erheblichen Kosten verbunden ist. In den vergangenen Jahren wurde die Nutzung von Tönen als Zementersatzstoff durch thermische Aktivierung intensiv diskutiert, insbesondere bei Materialien mit hohem Kaolinitgehalt (Overmann et al., 2024). Allerdings ist dieses Verfahren aufgrund des hohen Energiebedarfs, der begrenzten Skalierbarkeit und des damit verbundenen CO₂-Ausstoßes ökologisch und ökonomisch herausfordernd. Eine vielversprechende Alternative stellt die mechanochemische Aktivierung dar, bei der die Tone unter Einsatz hoher mechanischer Energie in Kugel- oder Ringmøhlen vermahlen werden. Durch die mechanochemische Aktivierung werden kristallin vorliegende Aluminosilikate teilamorphisiert, so dass die Si- und Al-Ionen für die Hydratphasenbildung in Bindemittelsystemen zur Verfügung stehen und somit zur Festigkeitsentwicklung beitragen (Baki et al., 2024). Gleichzeitig bewirkt das Aufbrechen der Schichtminerale eine veränderte Wasserverteilung im Gefüge, was sowohl die Verarbeitbarkeit als auch die Hydratationsprozesse positiv beeinflusst (Zhang et al., 2025). Diese Effekte eröffnen neue Perspektiven für die nachhaltige Nutzung bislang ungenutzter Nebenprodukte der Rohstoffgewinnung. Die vorliegende Arbeit widmet sich der umfassenden Untersuchung dieser Potenziale. Im Fokus stehen die physikalische Parti-

kelanalyse, die Bewertung der Verarbeitbarkeit sowie die Analyse der Festigkeitsentwicklung unter Einsatz mechanochemisch aktivierter Tone. Ziel ist es, die Eignung dieser Materialien als Bestandteil innovativer Bindemittelsysteme zu prüfen und damit einen Beitrag zur Ressourcenschonung und Emissionsminderung in der Bauindustrie zu leisten.

2 Methodik

2.1 Materialzusammensetzung

Zur vergleichenden Untersuchung wurden die Tonproben zunächst bis zur Massekonstanz getrocknet und in einer Schlagkreuzmühle desagglomeriert. Die chemische Zusammensetzung wurde an Pulverpresslingen mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA, Rigaku Supermini 200) und die mineralogische Zusammensetzung an texturarmen Präparaten mittels Röntgenbeugung (XRD, Siemens AG D5000) und Auswertung mittels Rietveld-Verfeinerung (BGMN) bestimmt.

2.2 Aktivierung

Anschließend erfolgte die mechanochemische Aktivierung eines Teilvolumens mittels Planetenkugelmühle (Fritsch Pulverisette 5) bei 450 min^{-1} über 2 h mit 15 Wolframcarbid-Kugeln (20 mm Durchmesser). Um das während der Mahlung freigesetzte interkristalline Wasser zu entfernen, wurde die Probe nach der Hälfte der Mahldauer erneut getrocknet. Zum Vergleich wurde ein weiterer Teil der Tone bei 700 °C für 30 min kalziniert.

2.3 Verarbeitungseigenschaften

Mit den aktivierten Tönen sowie den Ausgangsproben wurden Mörtelproben gemäß DIN EN 196-1 hergestellt, wobei jeweils 20 % des Zements ersetzt wurde. An diesen Proben wurden mithilfe eines Rotationsrheometers (Viskomat NT) sowie eines Hägermann-Trichters mit Setzfließmaßplatte die rheologischen Eigenschaften untersucht. Das Setzfließmaß wurde zu drei Zeitpunkten (5 min, 30 min, 60 min) nach Wasserzugabe bestimmt. Parallel wurden mittels Rheometer die Fließgrenze und die relative Viskosität ermittelt.

2.4 Physikalische Partikelanalyse

Die Korngrößenverteilung wurde mittels Lasergranulometrie bestimmt. Zusätzlich wurde die spezifische Oberfläche nach der BET-Methode (3P Micro 300) ermittelt. Hierfür wurden die Proben eingewogen, bei 250 °C für eine Stunde evakuiert und anschließend mit Stickstoff als Adsorbat analysiert.

2.5 Reaktivitätsanalyse

Die puzzolanische Aktivität wurde durch den R^3 -Test und die isotherme Wärmeflusskalorimetrie bewertet. Die Wärmeentwicklung wurde aufgezeichnet und zur Beurteilung der Reaktivität herangezogen. Ergänzend wurde die Wärmefreisetzung in einem Zementleimsystem bei 20 °C über 7 d gemessen. Ergänzend wurden Versuche im Mörtelsystem durchgeführt, um die Wirkung der aktivierten Tone unter praxisnahen Bedingungen zu bewerten. Hierbei wurden in einer firmeninternen Rezeptur jeweils 10 % und 20 % des Zements durch die Tonproben ersetzt. Die Mörtelproben wurden gemäß DIN EN 196-1 hergestellt und gelagert. Die Biegezugfestigkeit der jeweiligen Mörtelproben wurde im Dreipunktbiegeversuch bestimmt, die Druckfestigkeit wurde an den verbleibenden Halbkörpern geprüft.

3 Ergebnisse

3.1 Materialzusammensetzung

Die Elementaranalyse mittels RFA zeigt, dass die untersuchten Tonproben überwiegend aus SiO_2 und Al_2O_3 bestehen, siehe Tabelle 1. Anteile nicht direkt erfassbarer Komponenten, insbesondere CO_2 und H_2O , wurden unter der Bezeichnung „Balance“ zusammengefasst. Durch die ergänzende mineralogische Analyse mittels XRD konnten neben Quarz als Hauptkomponente verschiedene Schichtsilikate wie die tonmineralogische Phasen Illit-Smektit, Kaolinit und weitere 2, 3 und 4-Schichtsilikate identifiziert werden – Karbonatische Phasen wie Calcit waren, insbesondere beim Verwitterungslehm, nur in geringen Mengen nachweisbar. Die durch die mechanochemische Aktivierung verwertbaren Tonminerale Illit-Smektit sowie Kaolinit sind zu einem Anteil von 25-30 % in beiden Tönen vertreten.

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung der untersuchten Tonproben – Angaben in ma -%

Material	SiO_2	Al_2O_3	Balance	Fe_2O_3	CaO	K_2O	MgO	TiO_2	SO_3
Verwitterungslehm	53,3	18,0	16,5	6,6	0,5	2,1	1,1	0,9	0,1
Sedimentationston	41,5	21,3	16,4	6,8	6,4	3,2	2,0	0,9	0,7

3.2 Verarbeitungseigenschaften

Die rheologische Untersuchung zeigt einen Anstieg des Drehmoments und damit einen Anstieg der Viskosität für Tone ohne Aktivierung aufgrund deren Wasseraufnahme aus der wässrigen Suspension, siehe Abb. 1 links (blaue Messkurve). Bei Proben nach mechanischer Aktivierung bleibt die Viskosität und damit die Verarbeitbarkeit des Mörtels hingegen auf einem mit der Referenz vergleichbaren Niveau, was auf die Amorphisierung der Tonminerale zurückzuführen ist, in deren Schichten sich nach der Aktivierung kein Wasser mehr anlagern kann (rote Kurve).

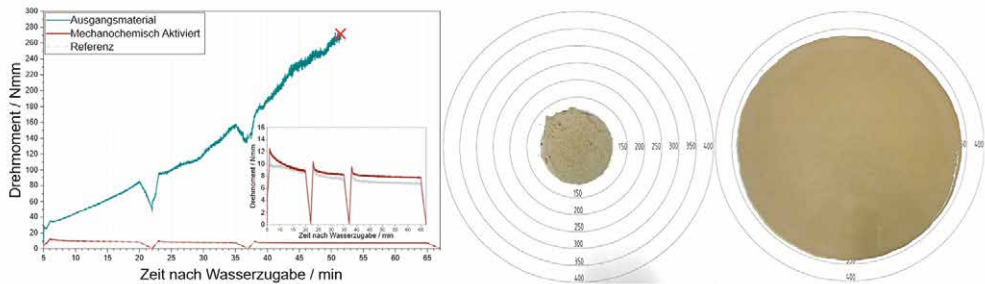


Abbildung 1: Vergleich der rheologischen Eigenschaften im Mörtelsystem: Links der zeitliche Verlauf des Drehmoments; mittig das Setzfließmaß unter Verwendung der Ausgangstone; rechts das Setzfließmaß bei Nutzung der mechanochemisch aktivierten Töne (Angaben in mm).

3.3 Physikalische Partikelanalyse

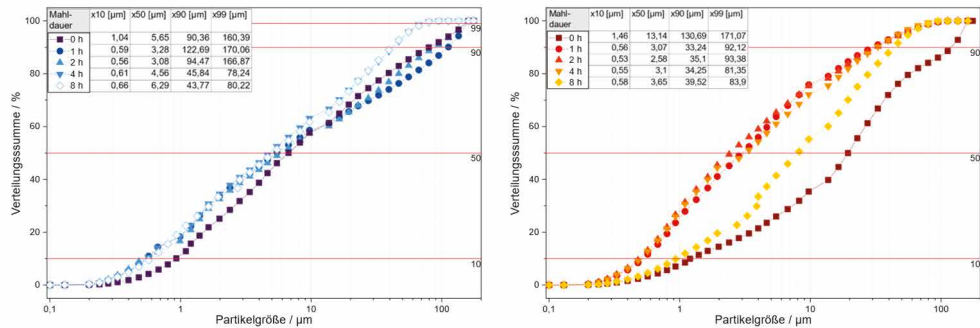


Abbildung 2: Korngrößenverteilungen der untersuchten Tone abhängig von ihrer Mahldauer: links der Sedimentationston; rechts der Verwitterungslehm.

Die Auswertung der BET-Oberfläche ergab eine Absenkung der aktiven Oberfläche bei zunehmender Mahldauer (Tab. 2). Die Mahlkörper erzeugen beim Aufprall genügend Energie, um eine mechanisch induzierte Sinterung zu realisieren. Gleichzeitig tendieren die Partikel durch Van der Waals Kräfte Agglomerate zu bilden (Tole et al., 2019).

Tabelle 2: BET-Oberfläche der beiden Tone abhängig von der Mahldauer – Angaben in m^2/g

Material / Mahldauer	0 h	1 h	2 h	4 h	8 h
Verwitterungslehm	38,0	26,0	15,3	10,9	9,1
Sedimentationston	36,2	41,7	32,5	13,2	9,0

3.4 Reaktivitätsanalyse

Die Reaktivitätsanalyse zeigte nach 7 d eine um etwa $20 \text{ J/g}_{\text{Bindemittel}}$ erhöhte Wärmefreisetzung der mechanochemisch aktivierten Tone im Vergleich zur Ausgangsprobe. Diese Steigerung ist auf die partielle Amorphisierung der Tonminerale zurückzuführen, wodurch reaktive Aluminium und Silikatphasen leichter verfügbar werden und eine verstärkte puzzolanische Reaktion begünstigt wird.

Im Mörtelsystem erreichte die Referenz ohne Zementersatz einen Wert von 72–76 MPa nach 28 d. Bei 20 % Zementsubstitution lagen die mechanochemisch aktivierten Tone mit 72–74 MPa nahezu auf Referenzniveau, während kalzinierte Tone (65–70 MPa) und Ausgangstone (47–53 MPa) im Vergleich geringere Festigkeiten aufwiesen.

Danksagung

Ich danke der Firmengruppe Max Bögl für die Möglichkeit, diese Arbeit im Rahmen der betrieblichen Forschung durchzuführen. Mein Dank gilt dem gesamten Team für die Unterstützung während der Bearbeitung

sowie den Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls *Recycling und Chemical Engineering* an der Universität Augsburg für die wertvolle Zusammenarbeit und fachliche Begleitung.

Ebenso möchte ich den Mitarbeitenden des Geozentrums Nordbayerns an der FAU Erlangen-Nürnberg für ihre Kooperation und die Bereitstellung ihrer Expertise danken, die maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Literatur/Quellen

- DIN EN 196-1 (2016): Prüfverfahren für Zement – Teil 1: Bestimmung der Festigkeit. Deutsche Fassung EN 196-1:2016. Berlin, Beuth Verlag.
- Baki, V. A.; Ke, X.; Heath, A.; Calabria-Holley, J.; Terzi, C. (2024): Improving the pozzolanic reactivity of clay, marl and obsidian through mechanochemical or thermal activation. In: *Mater. Struct.* 57 (1).
- Bentz, D. P.; Ferraris, C. F.; Jones, S. Z.; Lootens, D.; Zunino, F. (2017): Limestone and silica powder replacements for cement: early-age performance. In: *Cem. Concr. Compos.* 78: 43–56.
- Overmann, S.; Vollpracht, A.; Matschei, T. (2024): Reactivity of calcined clays as SCM – A review. In: *Mater.* 17 (2).
- Tole, I.; Habermehl-Cwirzen, K.; Cwirzen, A. (2019): Mechanochemical activation of natural clay minerals: an alternative to produce sustainable cementitious binders – review. In: *Mineral. Petrol.* 113 (4): 449–462.
- Zhang, J.; Peng, Y.; Wang, C.; Zhang, W.; Luo, X. (2025): Interlayer water absorption expansion and surface hydration properties of montmorillonite and kaolinite. In: *Miner. Eng.* 234: 109713.

Kontakt

B. Sc. Manuel Neumaier, Masterand

Max Bögl Bauservice GmbH & Co. KG / Universität Augsburg

Tel.-Nr. : +49 1520 8752088

E-Mail: mneumaier@max-boegl.de / manuel.neumaier@uni-a.de