



**Abschlussbericht zum BMBF-
Forschungsvorhaben:**

**TOFFEE – Aufbereitung und Aktivierung
von Tonböden für ressourceneffiziente
Geopolymer-Baustoffe**

KMU-Innovativ: Ressourceneffizienz und Klimaschutz

Vorhabenlaufzeit: 01.02.2022 – 31.01.2024

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Beteiligte und berichtende Verbundpartner:

Brameshuber + Uebachs Ingenieure GmbH

Jakobstraße 12
52064 Aachen



MC-Bauchemie Müller GmbH & Co. KG

Am Kruppwald 1-8
46238 Bottrop



IMM Maidl & Maidl Beratende Ingenieure GmbH & Co. KG

Konrad-Zuse-Str. 18
44801 Bochum



STUVA e. V.

Mathias-Brüggen-Str. 41
50827 Köln



Technische Hochschule Köln

Betzdorfer Str. 2
50679 Köln



Inhalt

I.	Kurzbericht	4
I.1	Aufgabenstellung.....	4
I.2	Überblick zur Planung und zum Ablauf des Vorhabens	5
I.3	Wesentliche wissenschaftlich-technische Ergebnisse	6
I.4	Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen/Stellen	7
II.	Eingehende Darstellung des Forschungsprojektes „TOFFEE“	8
II.1	Eingehende Darstellung der Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele.....	8
II.1.1	AP 1 Anforderungsanalyse	8
II.1.2	AP 2 Bodenaufbereitung.....	10
II.1.3	AP 3 Bestimmung der material- und baustofftechnologischen Eigenschaften	19
II.1.4	AP 4 Bindemittelaktivierung	40
II.1.5	AP 5 Anwendungstechnisches Konzept.....	45
II.1.6	AP 6 Ergebnisverbreitung	51
II.1.7	AP 7 Projektmanagement	51
II.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	52
II.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	52
II.4	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	53
II.5	Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens	53
II.6	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen	53
II.7	Literatur	54

I. Kurzbericht

I.1 Aufgabenstellung

Die übergeordnete Zielsetzung des Projekts TOFFEE war die Entwicklung innovativer, ressourceneffizienter Baustoffe auf der Basis von tonhaltigen Böden. Diese Entwicklung soll dazu beitragen, die Entsorgung großer Mengen an Bodenmaterialien aus Grund- und Tunnelbauprojekten auf Deponien zu vermeiden. Um dieses Gesamtziel zu erreichen, wurden wesentliche Teilziele und Einzelinnovationen definiert, die sich in der Arbeitspaketstruktur widerspiegeln. Zu den wichtigsten Teilzielen gehörten die Bodenaufbereitung, die Bestimmung der optimalen Calcinierungstemperatur, die Bestimmung der Reaktivität, die Bindemittelaktivierung und das anwendungstechnische Konzept. Die Partner im Projekt erarbeiteten wichtiges Knowhow für die Umsetzung der Zielstellung.

Zu Beginn des Projekts war es entscheidend, die spezifischen geotechnischen Eigenschaften der Bodenmassen, i. e. ihre granulometrische und mineralogische Zusammensetzung sowie ihre Konsistenz, zu bewerten. Ziel war es, auf den jeweiligen Verwendungszweck abgestimmte, geeignete Verfahren zur Aufbereitung der Böden zu bestimmen. Dementsprechend waren die Projektpartner für die Entwicklung von Konzepten zur Bodenbewertung und -bearbeitung verantwortlich. Dazu musste festgestellt werden, ob eine einfache Trocknung der Böden ausreichend ist oder ob eine weitergehende thermische Behandlung mittels Flash-Calcinator notwendig ist. Darüber hinaus war es wichtig, Methoden zu entwickeln, mit denen die relevanten Bodenparameter in den verschiedenen Projektphasen von der Planung bis zur Ausführung zuverlässig und wirtschaftlich ermittelt werden können. Dienstleistungen, die die natürlichen Eigenschaften der Böden mit den Anforderungen der Industrie an den Rohstoff Boden in Einklang bringen, waren bis dato nicht verfügbar.

Für die breite Einführung der innovativen Technologie war eine zuverlässige Bestimmung der Reaktivität der thermisch aufbereiteten bzw. calcinierten tonhaltigen Böden notwendig. Ein Hauptziel für das Projekt war es, durch einfache Analytik konkrete Aufbereitungs- und Aktivierungsparameter festzulegen. Hierbei musste beachtet werden, dass Bodenmaterial aus Bauprojekten deutlich inhomogener angetroffen wird als Material aus industriell genutzten Lagerstätten. Ein weiteres Ziel war es, Verwertungsmöglichkeiten sowohl innerhalb des Bauprojekts als auch auf dem freien Markt zu untersuchen.

Ein entscheidender Aspekt für die technische Umsetzung der Gesamtidee war die ausreichende Aktivierung der tonigen Bodenbestandteile zur Erzeugung eines Geopolymer-Bindemittels. Dafür mussten die Projektpartner komplexe bauchemische und mineralogische Zusammenhänge untersuchen, die zusätzlich von der Bodenaufbereitung beeinflusst werden. Um leistungsfähigere Bindemittel-Aktivator-Kombinationen zu ermitteln, mussten gezielt und ergebnisoffen Untersuchungen durchgeführt werden, die weit über die bis dahin bekannten Stoffe bzw. Stoffkombinationen hinausgingen.

Für die breite Einführung der Technologie „Geopolymer-Baustoff auf Basis von Tonböden“ war die Entwicklung eines anwendungstechnischen Gesamtkonzepts von großer Bedeutung. Dies umfasste die Prozessanalyse, die alle verfügbaren Daten aus den vorhergehenden Punkten zusammenführt. Die Projektpartner, die bereits im Bereich der Prozessdatenanalyse im Tunnelbau tätig waren, sollten ihr Portfolio erweitern und signifikante Verwertungspotentiale erschließen.

Zu Beginn des Projekts war bekannt, dass alkaliaktivierte Bindemittel oder Geopolymere seit der Erteilung des ersten Patents im Jahr 1908 erforscht wurden. Technische Umsetzungen waren jedoch bis dato nur begrenzt erfolgt. Im Zuge der Diskussion um die Verringerung des Ressourcenbedarfs und der CO₂-Emissionen bei der Zementherstellung intensivierte sich die Forschung über diese Bindemittel. Bisherige Anwendungen fokussierten sich jedoch hauptsächlich auf granuliertem Hochofenschlacken und Flugaschen. Abgesehen vom Projekt TOFFEE sind keine Forschungsarbeiten bekannt, die ausschließlich tonhaltige Böden als Basis für Geopolymere nutzen.

Insgesamt zielte das Projekt TOFFEE auf folgende wesentliche Innovationen ab: die Entwicklung von Geopolymer-Bindemitteln auf der Basis von tonhaltigen Böden, die ohne Zement und Kalk auskommen; die Entwicklung neuartiger Aktivatoren, die möglicherweise auch ohne Flash-Calcinierung wirksam sind; und die Bereitstellung ressourceneffizienter Baustoffe auf Basis dieser Bindemittel und Aktivatoren. Diese Innovationen sollen eine umweltfreundlichere und ressourceneffizientere Herstellung von Baustoffen ermöglichen, die unabhängig von konventionellen Lagerstätten ist.

1.2 Überblick zur Planung und zum Ablauf des Vorhabens

Ende Dezember 2021 gingen den Verbundpartnern die Zuwendungsbescheide zu. Bereits am 22. Februar 2022 wurde mit den Arbeiten mit einer Kick-off-Besprechung begonnen. In dieser Sitzung wurde beschlossen, dass jeden ersten Dienstag im Monat eine Videokonferenz als Jour-Fixe stattfindet, bei der die Ergebnisse dokumentiert werden. Diese regelmäßigen Abstimmungstermine wurden konsequent eingehalten und gewährleisteten eine kontinuierliche und enge Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern und dem Projektträger.

Zusätzlich fanden spezifische Arbeitstreffen statt: Am 10. August 2022 bei der MC-Bauchemie, am 13. Dezember 2022 bei der STUVA und am 22. März 2023 bei der TH Köln. Diese Treffen intensivierten die Kooperation und ermöglichten eine vertiefte Diskussion über spezielle Themen.

Ein bedeutender Meilenstein war der Workshop am 17. Januar 2024 zum Thema „Verwertung von Tunnelausbruchmaterial – Kreislaufwirtschaft, Ressourceneffizienz, Nachhaltige Innovationen“. In diesem Workshop wurden Grundlagen und Rahmenbedingungen erörtert bzgl. der Verwertbarkeit von Ausbruchmaterial, die frühzeitige Berücksichtigung durch Bauherren und Planer sowie die daraus resultierenden Aufgaben für Bauunternehmen. Ebenfalls stand die Umsetzung nachhaltiger Innovationen im Fokus. Bereits erlangte Erkenntnisse und Ergebnisse des FuE-Projekts „TOFFEE“ zur Nutzung von Tonböden für Geopolymer-Baustoffe wurden intensiv behandelt. Es wurde diskutiert, wie solche Materialien in die Praxis integriert werden können, um Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit zu fördern.

Während des gesamten Vorhabens wurden die Ergebnisse kontinuierlich veröffentlicht, um die gewonnenen Erkenntnisse und Fortschritte einer breiten Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen. Bereits im September 2023 präsentierten Müller et al. auf dem SGI-Congress in Italien das Potenzial von Tunnelaushubmaterial als zusätzliches Zementmaterial. Weitere Ergebnisse zur Reduktion von Primärbaustoffen wurden von Budach et al. auf den Fachsektionstagen Geotechnik im gleichen Monat vorgestellt. Im Januar 2024 folgten mehrere Vorträge auf dem STUVA-Workshop in Köln, in denen die Verwertung von Ausbruchmaterial und die Ergebnisse des Projekts TOFFEE detailliert erörtert

wurden. Schließlich wurden im Frühjahr 2024 die Fortschritte in renommierten Konferenzen und Veröffentlichungen, wie der RILEM Annual Week und dem Tunnelbau Taschenbuch, vorgestellt, um die wissenschaftliche und praktische Relevanz der Arbeit weiter zu unterstreichen.

I.3 Wesentliche wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Im Rahmen des Forschungsvorhabens TOFFEE wurde die Entwicklung ressourceneffizienter Baustoffe aus tonhaltigen Böden angestrebt. Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass feinkörnige tonhaltige Böden aus dem Tunnelbau hochwertig wiederverwertet werden können, um den steigenden Anforderungen an eine ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft gerecht zu werden. Dabei lag der Schwerpunkt der Untersuchungen auf geotechnischen Baustoffen mit vergleichsweise geringen Festigkeitsanforderungen, wie beispielsweise Ringspaltmörtel.

Untersucht wurden verschiedene Lagerstättentone und tonhaltige Böden aus Bauprojekten hinsichtlich ihrer Eignung als Klinkersubstitute durch Calcinierung. Die Aufbereitungsprozesse umfassten Trocknung zur Entfernung von Oberflächenwasser, Klassierung, Mahlung zur erforderlichen Korngröße und Calcinierung zur Aktivierung des Materials als Geopolymer-Bindemittel bei Temperaturen zwischen 600°C und 850°C. Die Eignung der feinkörnigen Böden hängt stark von ihrem Gehalt an Tonmineralien wie Kaolinit, Smektit/Montmorillonit und Illit ab. Eine fundierte Bewertung der Wirksamkeit dieser calcinierten Tone in Geopolymeren erfordert die Analyse des Anteils und der Art der Tonmineralien mittels Röntgendiffraktometrie (XRD).

Für Laborversuche wurden kleinere Mengen an Böden unter kontrollierten Bedingungen vorbereitet, wobei die thermische Behandlung in einem Muffelofen sowie einem eigens dafür gebauten Calcinator stattfand. Diese Versuche zielten darauf ab, den Zusammenhang zwischen Bodencharakteristika, Tonmineralogie und Prozessparametern in Bezug auf die Festigkeitsentwicklung der hergestellten Materialien detailliert zu analysieren.

Für großtechnische Aufbereitungsanlagen wurden drei Konzepte identifiziert: eine Variante mit einem Flash-Calcinator, eine mit einer Mahl-/Calcinierungskombinationsmühle und eine dritte mit einem Drehrohrofen. Die calcinierten Materialien wurden zum einen als teilweiser Zementersatz in Mörtelmischungen verwendet. Die Entwicklung der Druckfestigkeit zeigte, dass calcinierte Tone, insbesondere bei niedrigeren Substitutionsraten, die Festigkeit von Zementmörtel erreichen oder übertreffen können. Zudem offenbarten rheologische Untersuchungen, dass calcinierte Tone bei reduzierter Fließmittelzugabe eine ähnliche Verarbeitbarkeit wie reiner Zementleim aufweisen, was ihre Eignung als Zementersatzstoff unterstreicht.

Des Weiteren wurden Untersuchungen zur Verwendung von calciniertem Ton als Bindemittel zusammen mit Natrium- oder Kaliummetasilikat als Aktivator zur Herstellung von Mörteln durchgeführt. Beide Aktivatoren erwiesen sich als geeignet, eine ausreichende Festigkeitsentwicklung zu initiieren, müssen jedoch auf die Eigenschaften des calcinierten Materials abgestimmt sein. Eine weitere Optimierung der Bindemittelzusammensetzung, beispielsweise durch Beimischung von Kalksteinmehl oder Gips, zeigte einen positiven Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des ausgehärteten Geopolymermörtels.

Die Versuche belegen, dass aus geeignetem Tunnelausbruchmaterial hergestellte calcinierte Tone eine nachhaltige Alternative zu traditionellem Zement als Bindemittel für Ringspaltmassen im maschinellen Tunnelbau bieten, wodurch Ressourceneffizienz und CO₂-Einsparungen ermöglicht werden. Die Anforderungen an die Druckfestigkeit von 0,5 N/mm² für Ringspaltmassen wurden erreicht, und der Einsatz bei Baustoffen mit höheren Festigkeitsanforderungen erscheint realisierbar.

Die Planung eines Bodenaufbereitungskonzepts für die Schritte Trocknung, Mahlung und Calciniierung erfordert die frühzeitige Einbindung in Planfeststellungsverfahren unter Berücksichtigung aller relevanten Akteure und genehmigungsrechtlichen Anforderungen. Trotz der ökologischen Vorteile und der Energieeffizienz der thermischen Aufbereitung von Tonböden gegenüber der traditionellen Zementherstellung, stellt die Anwendung im Baustellenmaßstab aufgrund kleinerer Umsatzmengen eine Herausforderung dar, wobei eine CO₂-Einsparung von ca. 25% möglich ist und weitere Einsparungen durch Optimierung wahrscheinlich sind.

I.4 Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen/Stellen

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde eine enge Zusammenarbeit mit verschiedenen bedeutenden Verbänden angestrebt, um sicherzustellen, dass die neuesten Informationen stets verfügbar sind und die Interessen der Branche berücksichtigt werden. Zu allen Arbeitstreffen und dem abschließenden Workshop wurden daher regelmäßig Vertreter der Autobahn GmbH des Bundes, des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, des Bundesverbands der Deutschen Ziegelindustrie e. V. sowie des Verbands für Dämmsysteme, Putz und Mörtel e. V. eingeladen. Durch diese kontinuierliche Einbindung wurden wichtige Impulse für die Projektarbeit gewonnen und eine breite Akzeptanz der Projektergebnisse gefördert.

II. Eingehende Darstellung des Forschungsprojektes „TOFFEE“

II.1 Eingehende Darstellung der Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Das Thema der Verwertung von Bodenaushub und Tunnelausbruchmaterial hat in den letzten Jahren im Rahmen der Kreislaufwirtschaft und aufgrund der Verknappung von verfügbaren Deponiekapazitäten zunehmend an Bedeutung gewonnen [Thi20]. Tunnelausbruchmaterial wird teilweise auf Deponien abgelagert, anstatt das ohnehin bauseits gewonnene Material im Sinne der Kreislaufwirtschaft zu verwerten und damit einerseits der Tunnelbauindustrie ressourcenschonender zu gestalten, andererseits aber auch der stetig verknappenden Verfügbarkeit von Deponien entgegenzuwirken.

Im Lockergestein werden Tunnel üblicherweise mit Tunnelbohrmaschinen mit flüssigkeits- oder erddruckgestützter Ortsbrust hergestellt. Nicht selten erfolgen Vortriebe in heterogenen Baugrundverhältnissen, in denen tonhaltige Böden anzutreffen sind. Der natürlich anstehende Boden wird hierbei verfahrensbedingt verändert, zum Beispiel mit Bentonit aus der Stützflüssigkeit oder durch Zugabe von Konditionierungsmitteln. Dies hat zur Folge, dass das Ausbruchmaterial möglicherweise aufbereitet werden muss, bevor dieses verwertet oder beseitigt werden kann. Während grobkörnige Lockergesteine z. B. als Rezyklat in der Industrie oder als Material für den Erd- und Straßenbau genutzt werden können [Thi20], ist die Verwertung von bindigen Materialien häufig schwieriger [Bud24].

II.1.1 AP 1 Anforderungsanalyse

Geopolymer-Baustoffe auf Basis von calcinierten Tonen sind im Baubereich für Einsatzgebiete mit geringeren Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften vielfältig vorstellbar. Neben dem angedachten Einsatz als Ringspaltmörtel für Tunnel mit Tübbingauskleidung, auch für beispielsweise Verfüllbaustoffe, Bausteine im Garten und Landschaftsbau oder im Straßenbau und Tunnelbau in Bereichen des Fahrbahnunterbaus.

Als vorrangiges Anwendungsfeld für die Entwicklung von Bindemitteln unter Verwendung von calcinierten Tonen im Projekt TOFFEE wurden Ringspaltmassen, die im Zuge maschineller Tunnelvortriebe benötigt werden, identifiziert. Die zu erzielenden Festigkeiten erscheinen auf Basis der im ersten Jahr vorliegenden Ergebnisse gut erreichbar. Ein weiterer Vorteil ist, dass das zentrale Ziel von TOFFEE, anfallende Böden nach einer Aufbereitung auf der Baustelle an Ort und Stelle wieder verwenden zu können, erreicht werden kann. Dies stellt energetisch und transporttechnisch eine optimale Lösung dar. Als Anforderung an die Druckfestigkeit wurde ein Wert von 0,5 N/mm² identifiziert. Als weitere wichtige Randbedingung wurde die Pumpfähigkeit als essenzielles Kriterium erkannt. Daher wird der Größtkorndurchmesser auf 8 mm begrenzt.

Eine Anwendung der calcinierten Tone als höherwertiger Baustoff, beispielsweise als Bindemittel für Mauersteine oder Betonwerksteine, wird ebenfalls angestrebt, wobei dabei jedoch wesentlich höhere Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften bestehen (> 0,5 N/mm²) und eine konstante Qualität mit den auf Baustellen anzutreffenden wechselnden Ausgangsstoffen eine zusätzliche Herausforderung darstellen.

Auch beim Einsatz von Geopolymer-Baustoffen sind grundsätzlich die gängigen technischen Normen und Regelwerke des jeweiligen Einsatzgebietes zu beachten. Bisher werden Rezepturen für Ringspaltmaterialien auf die projektspezifischen Randbedingungen und auf empirischer Basis zusammengestellt. Technisch bindende Regel- oder Normenwerke sind zu Ringspaltmaterialien kaum vorhanden. Generell stehen sich die Forderungen nach guter Förderung und langen Verarbeitungszeiten, also langer und guter Pumpbarkeit ohne Entmischungseffekte, der Forderung nach schneller Steifigkeitsentwicklung und Scherfestigkeit, sobald das Material den Ringspalt erreicht hat, gegenüber.

Für den Prozess der Calcinierung und damit auch für dieses Forschungsvorhaben geeignete Bodenarten sind prinzipiell Böden mit einem möglichst hohen Anteil an tonigen Bestandteilen. Hinsichtlich der granulometrischen und mineralogischen Zusammensetzung der Ausgangsböden dokumentieren vorangegangene Studien, dass für den erfolgreichen Prozess der Calcinierung und damit auch für dieses Forschungsvorhaben geeignete Bodenarten einen Gesamtanteil an Tonmineralen von mindestens 40% benötigen [Scr18a, Beu17, Han22]. Tonminerale sind Schichtsilikate, die überwiegend in einer Größe $< 2 \mu\text{m}$ vorkommen. Wichtigstes und bestuntersuchtes Tonmineral zur Aktivierung durch Calcinierung ist Kaolinit, da kaolinitreiche Tone nach der Temperierung die höchsten puzzolanischen Eigenschaften aufweisen und deshalb als Klinkerersatzstoff von großem Interesse sind [Scr18a, Beu19]. Als weitere Tonminerale, die nach erfolgreicher Calcinierung einen Beitrag zu den späteren Festigkeitseigenschaften liefern, sind Illit/Muskovit, Montmorillonit, Glimmer und Smektit zu nennen [Jas20, Ove24]. Die Aktivierbarkeit bzw. die Ausbildung festigkeitserzeugender Phasen nach der Calcinierung hängt somit einerseits maßgeblich vom Gehalt der zuvor erwähnten thermisch aktivierbaren Schichtsilikate ab. Andererseits stellen auch die Korngrößenverteilung (d.h. der Anteil von Feinkorn $< 20 \mu\text{m}$) des Bodens sowie die Verfahrenstechnik der Calcinierung Faktoren dar, die die Reaktivität beeinflussen. Die mineralogische Zusammensetzung der Böden kann im Vorfeld der Calcinierung z.B. mittels XRD-Analyse oder IR-Spektroskopie bestimmt werden.

Zudem muss die Betrachtung der akzeptablen Kosten im Gesamtmaßstab einer Baumaßnahme erfolgen. Die Kosten für die Bodenaufbereitung eines hier betrachteten Ringspaltmörtels mit den Aufbereitungsschritten Trocknung, Klassierung, Mahlung, Calcinierung, und Aktivierung des Bodens müssen dem Einsparpotenzial gegenübergestellt werden [Lie23]. Dazu zählen der Wegfall von Deponiekosten sowie der Wegfall für die Kosten und Anlieferung der durch Baustellenaushubmaterial ersetzten Ringspaltmörtelbestandteile. Auch ist durch die Einsparung von Zement und den damit verbundenen Wegfall der CO₂-Besteuerung zusätzliches Einsparpotenzial zu erwarten.

Der maßgebende Faktor ist die generelle Eignung des vorliegenden Bodens zur Bindemittelaktivierung und damit als Grundlage eines Geopolymer-Baustoffs. Die Anforderungen an den Geopolymer-Baustoff sind vorab festzulegen und hängen vom Einsatzgebiet ab. Bei geeignetem Boden ist eine gesamtheitliche Betrachtung aller Aspekte, die in Zusammenhang mit der Bodenaufbereitung und der Nutzung des Geopolymer-Baustoffs stehen, durchzuführen. Dies sollte insbesondere in Bezug auf den Kosten-Nutzen-Faktor sowie das mögliche CO₂-Einsparpotenzial erfolgen. Außerdem können baubetriebliche Aspekte wie der Platzbedarf der Anlage sowie logistische Vorgänge eine Rolle spielen. Eine gesamtheitliche Betrachtung ist somit immer nur individuell für das jeweilige Bauprojekt, bei dem der Boden entnommen wird, sowie dem angedachten Einsatzbereich des Geopolymer-Baustoffs möglich.

Als prinzipiell für den Prozess der Calciniierung geeignet wurden Böden identifiziert, die einen Feinkornanteil der Korngröße $< 20 \mu\text{m}$ von mindestens 20 % aufweisen. Zudem sollte eine Mahlfeinheit der gesamten Probe mit einer Partikelgröße $< 30 \mu\text{m}$ vor der Temperierung erreicht werden, die typischerweise mittels Mörsern hergestellt wird [Gar22]. Sind Korngrößen von maximal 3 mm zu erwarten, können diese auch mittels Walzenbrecher zerkleinert werden [Scr18b]. Hinsichtlich der textuellen und mineralogischen Zusammensetzung der Ausgangsböden dokumentieren frühere Studien zudem, dass für den Prozess der Calciniierung und damit auch für dieses Forschungsvorhaben geeignete Bodenarten tonhaltige Böden mit einem möglichst hohen Anteil an Tonmineralen benötigt werden. Obwohl derzeit keine spezifischen Kriterien vorliegen, die die Verwendung kaolinitischer Tone als Quelle für Zementersatzstoffe adressieren, wurde ein Mindestgehalt an Kaolinit-Tonmineralien von 40 % vorgeschlagen [Hay23, Alu15]. Diese Angabe basiert auf dem Mindestanteil an reaktivem Material, das in einer vom 30-prozentigen Ersatz von Portlandzement durch calcinierten kaolinitischen Ton bestimmten Mörtelmischung erforderlich ist, um eine mit herkömmlichem Portlandzement vergleichbare mechanische Leistung zu erreichen. Böden mit einem hohen Sulfatgehalt (Pyrit, Alunit, etc.) sind von der Calciniierung auszuschließen, da diese den Calciniierungsprozess von Kaolinit negativ beeinflussen [Scr18a, Ove24].

Die optimale Temperatur zur erfolgreichen Calciniierung von tonigem Material hängt von verschiedenen Faktoren wie der Art des Tonminerals, den gewünschten Eigenschaften des Endprodukts und der spezifischen Anwendung in der Zement- und Betontechnologie ab. Hierbei zeigt sich, dass für die puzzolanischen und damit festigkeitsbildenden Eigenschaften der temperierten Tone die Dauer der thermischen Behandlung sowie die Höhe der Calciniierungstemperatur in Abhängigkeit von der jeweiligen Tonmineral-Vergesellschaftung gezielt festzulegen sind [Trü19, Beu17, Han22].

II.1.2 AP 2 Bodenaufbereitung

II.1.2.1 Auswahl an Böden und geotechnische Eigenschaften der Böden

Zahlreiche Studien [Scr18a, Beu17, Han22, Jas20] dokumentieren, dass sich Metakaolin, als der am besten geeignete Ausgangsstoff für die Produktion von Zementen mit calciniertem Tonanteil erweist. Kaolinit kommt jedoch in hochreiner Form nur in einer begrenzten Anzahl von Lagerstätten vor und wird vorrangig in der Keramik- und Papierindustrie eingesetzt, sodass die Verfügbarkeit nicht ausreicht, um den Bedarf der Baustoffindustrie zu decken. Generell ist Ton ein weltweit weit verbreitetes Material, das günstig und leicht zugänglich ist. Gleichzeitig handelt es sich um ein Material mit einer großen Vielfalt hinsichtlich der mineralogischen Zusammensetzung, weshalb sich in jüngster Vergangenheit zahlreiche Studien mit der Analyse der Möglichkeit der Verwendung von natürlichen, polymineralischen Tonen für die Herstellung als Bindemittel mittels Calciniierung befassen [Ove24]. In diesem Hinblick durchgeführte Untersuchungen [Jas20, Trü19] führten zu einem erhöhten Fokus auf einer alternativen Gruppe von puzzolanischen Materialien, calciniertem Ton aus polymineralischen Tonvorkommen.

Aus diesem Grund bestand Bedarf, Tone aus lokal verfügbaren natürlichen Tonvorkommen, die neben Kaolinit auch andere Tonminerale enthalten, die bei entsprechender Aktivierung das Potenzial haben, puzzolanische Aktivität zu entwickeln, zu beschaffen und zu calcinieren. Bezüglich der untersuchten Ausgangsmaterialien liegt in der vorliegenden Studie daher besonderer Fokus auf Materialien aus aktuellen Infrastruktur- oder Tunnelbaumaßnahmen, da diese im Vergleich zu

Lagerstättentonen einerseits eine erhöhte Verfügbarkeit aufweisen und lokal anfallen, andererseits aber erwartungsgemäß auch Böden mit variabler Tonmineralogie repräsentieren. Insgesamt wurden 13 Böden untersucht. So wurden zum einen qualitätsgesicherte Lagerstättenmaterialien untersucht, die sich durch Sortenreinheit, außerordentlich hohe Tonmineralgehalte und entsprechende Feinkörnigkeit auszeichnen. Bei den Lagerstättenmaterialien handelt es sich um tertiäre Tone, die aus Tongruben aus dem Rheinischen Schiefergebirge stammen. Aufgrund ihrer homogenen chemischen und physikalisch-technischen Eigenschaften finden die untersuchten Lagerstättentone vorrangig in der Keramik- und Papierindustrie Verwendung. Hierbei handelt es sich um folgende Materialien:

- Lagerstättenboden 1: LS1 Grafschaft M1-Ton
- Lagerstättenboden 2: LS2 Grafschaft EE-Ton
- Lagerstättenboden 3: LS3 Tongrube Alfter-Witterschlick "Weisser Ton"

Als weitere qualitätsgesicherte Materialien wurden folgende kommerzielle Tone beschafft:

- kaolinhaltiger Ton "Secursol" (Sackware) und
- Metakaolin "Centrilit" (Sackware, calciniert).

Zudem konnten Böden aus unterschiedlichen großen Tunnel- und Infrastrukturbauprojekten beschafft und in das Untersuchungsprogramm mit einbezogen werden. Das Ziel bestand dabei darin, ein breites Spektrum an sogenannten polymineralischen Böden zu untersuchen, die sich durch unterschiedliche Zusammensetzungen der verschiedenen Schichtsilikate und Anteile an Quarz, Feldspäten und Organik auszeichnen.

Besonderer Fokus wurde auf Tunnelbauaushubmaterialien gelegt. Die im Rahmen des Forschungsprojekts untersuchten feinkörnigen und tonhaltigen Böden aus Infrastrukturbauprojekten sind:

- Tunnelbauboden TB1 FT: (Frankfurter Ton)
- Tunnelbauboden TB2 PM: (Pariser Mergel)
- Tunnelbauboden TB3 LC: (London Clay)

Aus weiteren Infrastrukturbaumaßnahmen wurden zudem folgende Böden beschafft und untersucht:

- Infrastrukturprojektboden IS1.1 und 1.2: (Hochwasserrückhaltebecken (HWR) Emscher) – Hier wurde aufgrund der ausgeprägten Heterogenität (feinkörniges Material tritt in „Tonlinsen“ auf) zwischen zwei unterschiedliche Bodenvarianten unterschieden
- Infrastrukturprojektboden IS2: Nähe Osnabrück
- Infrastrukturprojektboden IS3: „Bochum“ (Abdichtungsschicht für Erdwälle)
- Infrastrukturprojektboden IS4: A44 (Bau eines Regenrückhaltebeckens)

- Infrastrukturprojektboden IS5: Emschermergel

II.1.2.2 Geotechnische Voruntersuchungen / bodenmechanische Charakterisierung der Ausgangsmaterialien

Die geotechnischen Untersuchungen der Referenzmaterialien beinhalten unterschiedliche Versuche zur Bestimmung von bodenmechanischen Kenngrößen wie der Korngrößenverteilung nach DIN EN ISO17892-4 [DIN17a], des natürlichen Wassergehalts nach DIN EN ISO 17892-1 [DIN15], der Zustandsgrenzen nach DIN EN ISO 17892-12 [DIN18], dem Wasseraufnahmevermögen nach Enslin/Neff in Anlehnung an DIN EN ISO 18132 [DIN12a], der undränierten Scherfestigkeit mittels der Fallkegelmethode nach DIN EN ISO 17892-6 [DIN17b] und des Glühverlustes nach DIN 18128 [DIN02]. Zudem erfolgte eine Einstufung der Böden in Bodengruppen nach DIN 18196 [DIN23].

Die in Laborversuchen im Labor für Geotechnik und Tunnelbau der TH Köln bestimmten geotechnischen Parameter sind zusammenfassend in Tabelle 1 dargestellt. Die Einteilung in Bodengruppen zeigt ein breites Spektrum von überwiegend feinkörnigen Böden, das von leicht- und mittelplastischen Tonen (TL/TM), über ausgeprägt plastischen Tone (TA) bis mittelplastischen Schluffe und Tone (UM/TM), hin zu leicht oder hochplastischen Schluffen (UL/UA) reicht. Vereinzelt wurden gemischtkörnige Böden mit Schluff (SU) oder Tonanteil (ST) oder organische Böden (OT) bestimmt (vgl. Tabelle 1). Die Kornverteilungen aller untersuchten Ausgangsmaterialien sind Abbildung 1 zu entnehmen.

Aus AP1 geht das Anforderungsprofil an Böden, die zur Calcinierung geeignet sind (d.h. Mindestanteile an tonigem Material bzw. Anteile maßgeblicher Tonminerale wie Kaolinit, Illit/Muskovit, Smektit bzw. Montmorillonit und Glimmer), hervor. Da diese Tonminerale bei Böden mit hohem Tonanteil auftreten, liegt der Fokus für die weiteren Betrachtungen auf Böden mit den Bodengruppen TL, TM und TA nach DIN 18196 [DIN23]. Zur genaueren Spezifizierung der Tonminerale und Tonanteile erfolgte für ausgewählte Böden eine Charakterisierung und Quantifizierung der Tonmineralogie mittels Röntgendiffraktometrie (XRD). Aus der Korngrößenanalyse der untersuchten Referenzmaterialien geht hervor, dass die Böden IS1.2, IS2, IS3, IS4 und IS5 die Mindestanforderung am Feinkornanteil der Korngröße $< 20 \mu\text{m}$ von mindestens 20% nur unzureichend erfüllen (vgl. Tabelle 1 bzw. Abbildung 1). Aus diesem Grund wurden diese Materialien von weiteren Untersuchungen ausgeschlossen.

Tabelle 1: Geotechnische Parameter der Referenzböden

Interne Bezeichnung			LS1	LS2	LS3	IS1.1	IS1.2	IS2	IS3	IS4	IS 5	TB	TB2	TB3	Secur- sol
Herkunft / Lokalität			GS – M1	GS - EE	Alfter	HWR-Emscher		Nähe Oсна- brück	Bo- chum	A 44	Em- scher- mergel	FT	PM	LC	
Parameter	Symbol	Einheit	-												
Korngrößenvertei- lung	D	[T-U-S-K]	44-56- 0-0	65-35- 0-0	60-33- 7-0	18-56- 25-1	9-50- 36-5	5-21- 64-10	9-61- 23-7	9-47- 27-14	0-30- 65-5	55-37- 8-0	9-53- 32-6	57-38- 5-0	58-35- 7-0
Wassergehalt	w	%	16,26	20,33	4,09	19,79	36,93	38,40	19,96	21,30	3,10	38,98	54,73	23,21	41,59
Wasseraufnahme- vermögen	w _a		33,67	61,00	62,33	53,33	55,00	63,50	41,00	34,00	44,50	72,00	56,83	73,20	63,50
Wasserbindegrad	w _{bc}		48,30	33,32	62,33	37,11	67,15	60,47	50,05	31,90	6,97	54,14	96,30	31,6	65,85
Schrumpfgrenze	w _s		19,19	19,12	17,62	18,03	21,00	-	19,62	15,69	-	26,51	32,1	20,61	26,18
Casagrande															
Fließgrenze	w _l	%	34,90	48,30	55,30	50,40	41,00	-	25,70	20,20	-	61,90	62,50	57,80	58,18
Ausrollgrenze	w _p		22,40	24,50	22,50	18,40	22,60		21,20	18,90		36,40	26,40	28,11	25,00
Plastizitätszahl	I _p		12,50	23,80	32,80	32,00	18,40		4,50	1,30		25,50	36,10	29,69	33,18
Konsistenzzahl	I _c	-	1,43	1,17	1,56	0,96	0,22		1,27	-0,80		0,90	0,22	1,17	0,44
Fallkegel															
Fließgrenze	w _l	%	33,50	46,70	51,70	46,50	40,40	-	25,70	20,30	-	55,00	58,00	52,60	57,25
Ausrollgrenze	w _p		22,30	24,50	22,50	18,40	22,60		21,20	18,90		36,50	26,40	28,11	25,00
Plastizitätszahl	I _p		11,20	22,20	26,20	12,60	17,80		4,50	1,40		18,50	31,60	24,49	32,25
Konsistenzzahl	I _c	-	1,55	1,19	1,81	0,89	0,20		1,27	-0,76		0,87	0,10	1,20	0,45
Verh. Lc Casagrande / Fallkegel		-	0,78	0,98	0,86	1,08	1,10		1,00	1,05		1,03	2,20	0,97	0,98
Glühverlust	TOC	%	4,90	3,93	6,96	6,97	4,12	4,31	6,16	2,45	2,12	7,04	3,62	6,24	7,20
Bodengruppe nach DIN 18196			TL	TN	TM / TA	TA	TM	UM / TM	ST / UL	SU	SU	OT / UA	UA	TA	

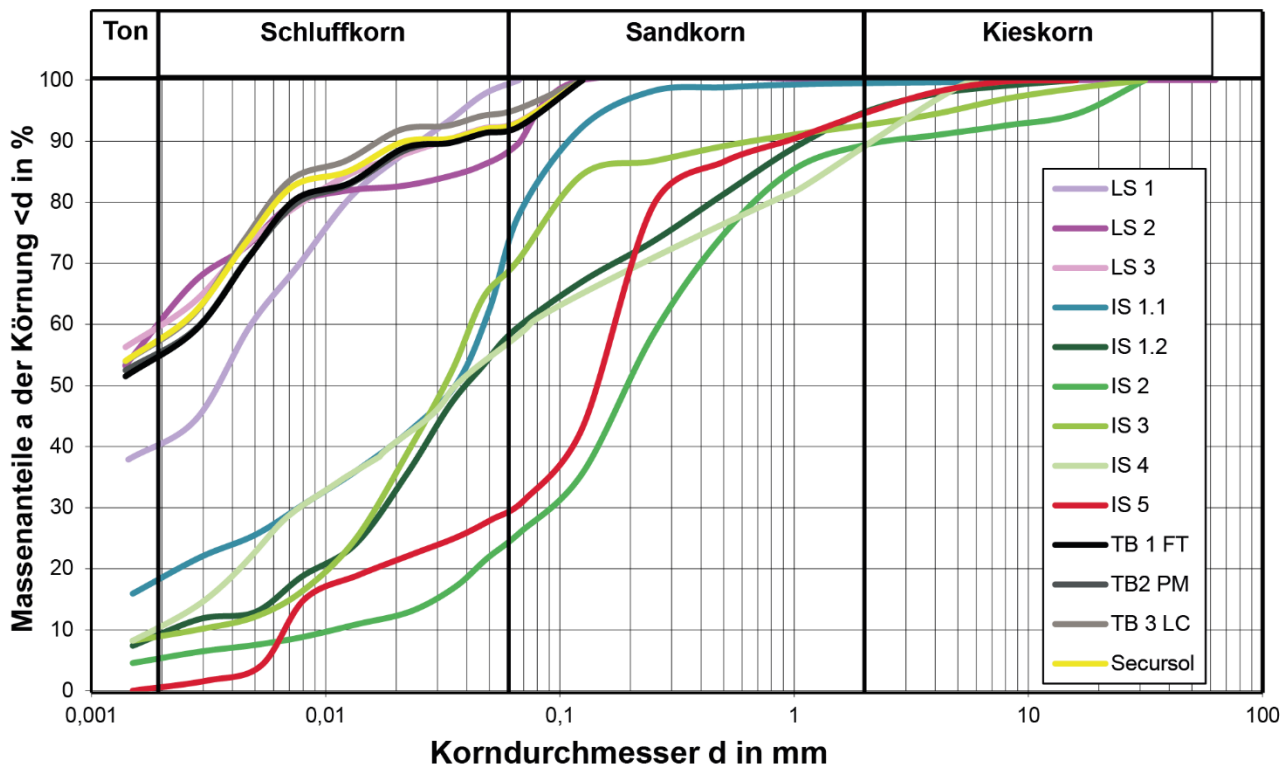


Abbildung 1: Kornverteilungskurven der untersuchten Ausgangsmaterialien

II.1.2.3 Grundlagen des Calcinierungsprozesses

Für die Entwicklung von Festigkeitseigenschaften von Tonen ist eine Trocknung und Calcinierung erforderlich. Daher werden nachfolgend die Aufbereitungsschritte des Tonbodenmaterials mit thermischer Behandlung zur Erzeugung von Geopolymerbindemitteln aufgeführt. Die notwendigen Aufbereitungsschritte der Calcinierung von tonhaltigen Böden, hängen dabei maßgeblich von den physikalischen Eigenschaften der Böden (Feuchtegehalt, maximale Korngrößen etc.) ab.

Die generellen Einzelprozessschritte zur Bodenaufbereitung sind:

1. Trocknung des Ausbruchsmaterialies zur Entfernung des Oberflächenwassers als vorbereitender Schritt zur Calcinierung
2. Klassierung durch Siebung in Abhängigkeit vom Tonanteil des Ausbruchsmaterialies
3. Mahlung des Ausbruchsmaterialies auf die zur Calcinierung benötigten Korngröße
4. Calcinierung zum Austreiben des chemisch gebundenen Wassers des Ausbruchsmaterialies

Auf Grundlage einer Literaturrecherche wurden drei mögliche Konzipierungen einer Aufbereitungsanlage für Tonbodenmaterialie mittels Calcinierung identifiziert, welche im Folgenden Abschnitt beschrieben werden.

Bei der ersten Variante wird das tonhaltige Bodenmaterial nach Trocknung und Mahlung bei Temperaturen von bis zu 850 °C mit einem Flash-Calcinator thermisch behandelt. Eine Prinzipskizze

dieser Variante ist in Abbildung 2 dargestellt und die wesentlichen Prozessschritte nachfolgend beschrieben.

- Trocknung und Mahlung des Teiles des tonhaltigen Ausbruchsmaterialies, dass zum Geopolymer-Bindemittel weiterverarbeitet wird (Entfernung des Oberflächenwassers mittels Drehrohtrockner oder Fließbettrockner und mobiler Brechanlage) zur Beschickung des Aufgabesilos
- Calciniierung, thermische Behandlung des tonhaltigen Ausbruchsmaterialies zum Austreiben des chemisch gebundenen Wassers mittels Flash-Calcinator
- Zusammenführung des Geopolymer-Bindemittels mit gelieferter Gesteinskörnung und Transport zum Silo zur späteren alkalischen Aktivierung

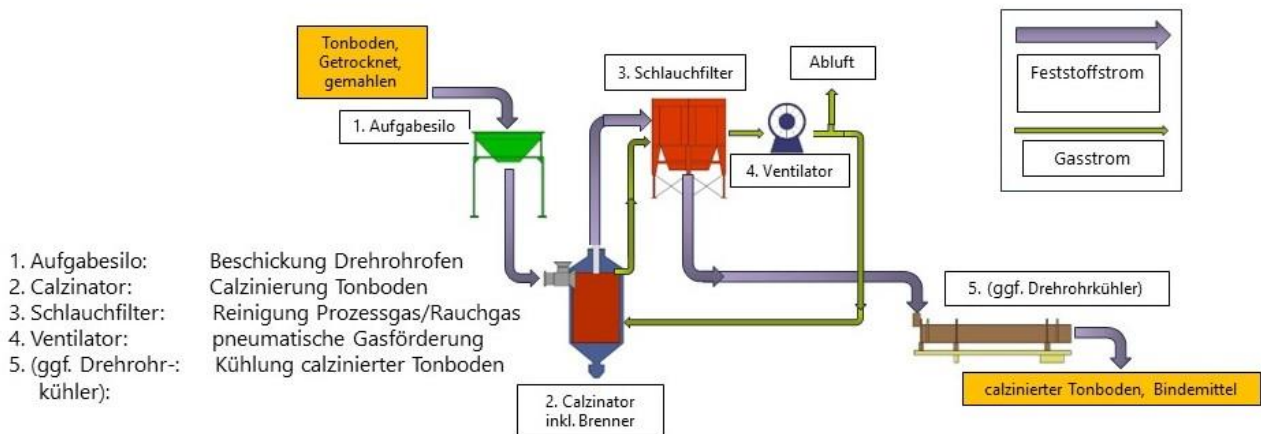


Abbildung 2: Prinzipskizze der ersten Variante einer Aufbereitungsanlage für tonhaltige Böden in Anlehnung an /Pet23a/

Bei der zweiten Variante wird das tonhaltige Bodenmaterial in einer Mahlung/Calcination-Kombinationsmühle während des Mahlprozesses zeitgleich thermisch behandelt. Hier sind jedoch nur Temperaturen von bis zu max. 650 °C möglich. Ein vorgeschalteter Trocknungsprozess zur Entfernung des Oberflächenwassers ist bei dieser Variante weiterhin notwendig, da zu feuchtes tonhaltiges Aufgabematerial zum Verkleben und Verbacken der Mühle führt. Durch die Kombination von Mahlen und Calcinieren in einer Anlage entfällt der sonst separat auszuführende Schritt des Mahlens mittels einer mobilen Brechanlage. Eine Prinzipskizze der zweiten Variante ist in Abbildung 3 dargestellt und die wesentlichen Prozessschritte nachfolgend beschrieben.

- Trocknung des tonhaltigen Ausbruchsmaterialies mittels Drehrohtrockner oder Fließbettrockner zur Beschickung des Aufgabesilos
- Mahlung und Calciniierung des Ausbruchsmaterialies in einer Mahlung/Calcination-Kombinationsmühle
- Zusammenführung des Geopolymer-Bindemittels mit gelieferter Gesteinskörnung und Transport zum Silo zur späteren alkalischen Aktivierung

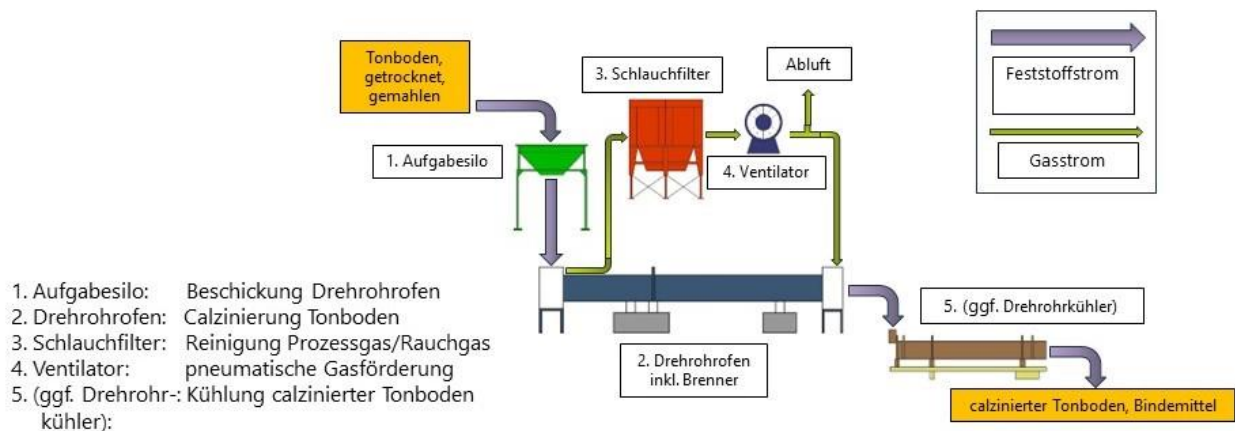


Abbildung 4: Prinzipskizze der dritten Variante einer Aufbereitungsanlage für tonhaltige Böden in Anlehnung an [Pet23a]

II.1.2.4 Definition der durchgeführten Einzelschritte zur Aufbereitung der Referenzböden

Für die gezielte Variation von Böden bzw. den Randbedingungen zur Calcinierung sind verschiedene umfangreiche Variationen erforderlich. Dazu bieten sich Laborversuche in kleinem Maßstab an, um die Zusammenhänge zwischen Böden bzw. Tonmineralogie und deren Anteil und Prozesskenngößen in Bezug auf eine spätere Festigkeitsentwicklung hergestellter Materialien zu analysieren. Daher erfolgte im Labor für Geotechnik und Tunnelbau der TH Köln die Aufbereitung der Böden mittels automatischer mechanischer Mörsern im Achatmörser.

Seitens STUVA erfolgte die Bewertung der Variation möglicher Aufbereitungsverfahren zwecks Optimierung und im Hinblick auf spätere Baustellentauglichkeit. Diese beinhalten:

- Kugelmühle im Mischer,
- Nassverfahren und
- Walzenbrecher 3 mm / 1 mm

Zur Durchführung von Versuchsreihen zur Calcinierung im Labor eignet sich der sogenannte Muffelofen, mit dem geringe, aber für Laborversuche ausreichende Mengen an calciniertem Material reproduzierbar hergestellt werden können. Dabei wurden folgende Variationen beim Muffelofen vorgesehen:

- Temperatur (600°C - 850°C)
- Temperierdauer (1h - 4 h)

Durch die STUVA erfolgte die Konzeptionierung, die Planung und der Bau eines Calcinator im Technikum-Maßstab zur Herstellung calcinierter Tonböden. Eine Skizze dieses Calcinator ist in Abbildung 5 dargestellt.

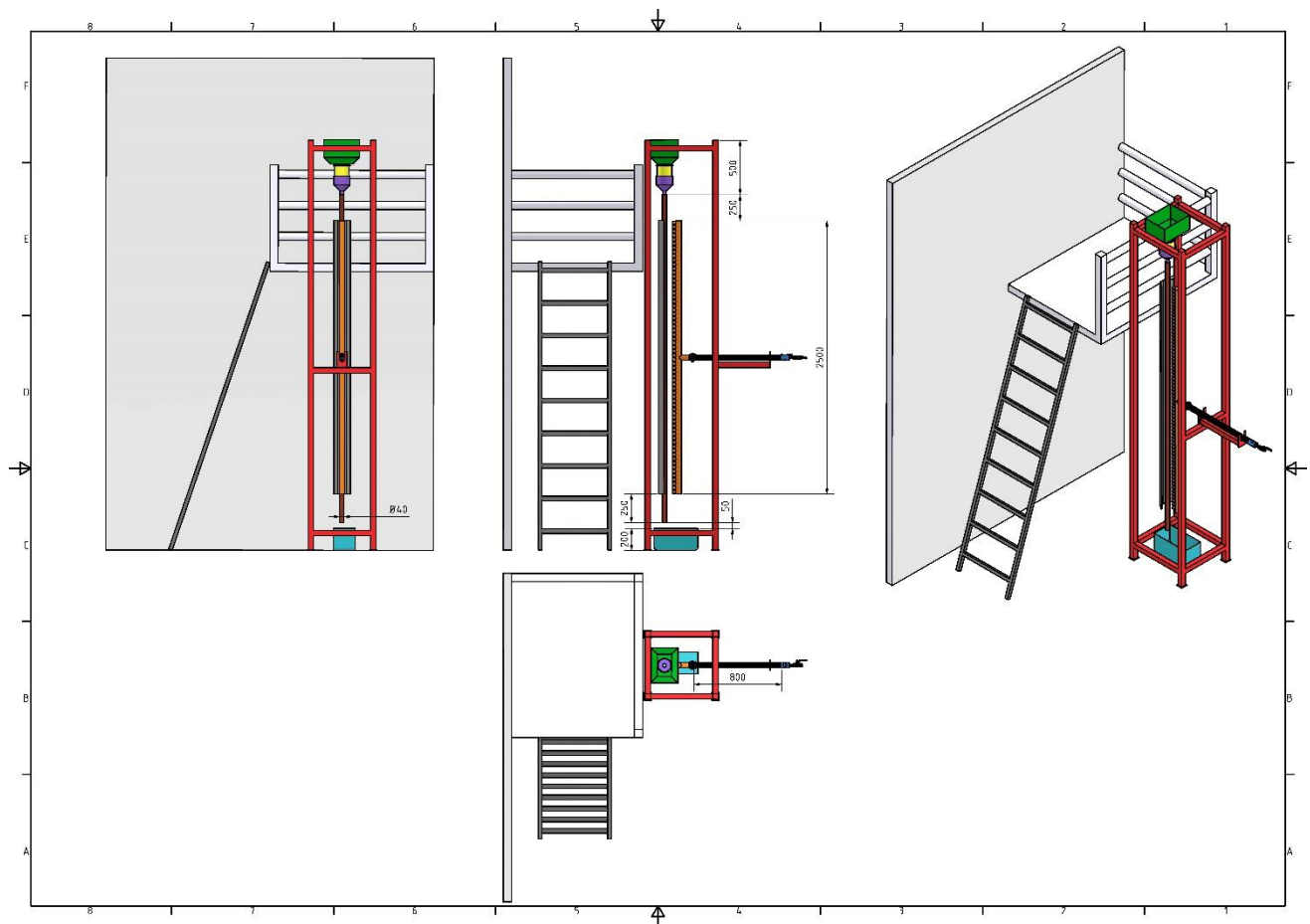


Abbildung 5: Skizze der Calcinator im Technik-Maßstab bei der STUVA

Mit diesem Technik-Calcinator wurden Tonböden für Parameterstudien zwecks Ermittlung des Einflusses von Betriebsparametern auf den Calciniierungserfolg durchgeführt. Tabelle 2 zeigt eine Zusammenfassung der auf unterschiedliche Weise calcinierten Proben auf Basis verschiedener Ausgangsmaterialien und mittels unterschiedlicher Calciniierungsvarianten (Muffelofen und Calcinator im Technikumsmaßstab) bei ausgewählten Calciniierungstemperaturen und Temperierdauern.

Tabelle 2: Darstellung der Referenzböden, die nach variabler Aufbereitung in unterschiedlicher Calciniertemperatur bei Temperaturen zwischen 600°C und 850°C bei variabler Temperierdauer behandelt wurden

Probenbezeichnung	interne Bezeichnung	Aufbereitungsvariante	Calciniertmethode	Calciniertemperatur	Temperierdauer	
	-			°C	h	
LS1	M1-Ton	Walzenbrecher 3 mm / 1 mm	Muffelofen	600	1	
LS2	EE-Ton-2h	Achatmörser			800	2
LS2	EE-Ton-4h					4
IS 1.1	Emscher					2
TB2 PM	PM					4
TB1 FT	FT-THK					2
TB1 FT	FT-STUVA	Walzenbrecher 3 mm / 1 mm			Calcinator	850
TB1 FT	FT-FLASH	Achatmörser	Muffelofen	800	2	
TB3 LC	LC			650	1	
Sackware	Secursol			650	1	

II.1.3 AP 3 Bestimmung der material- und baustofftechnologischen Eigenschaften

II.1.3.1 Mineralogische Charakterisierung der Materialien

II.1.3.1.1 Mineralogische Charakterisierung der Ausgangsstoffe

Zur mikrostrukturellen Charakterisierung der Materialien wurden in einem externen Labor röntgendiffraktometrische Analysen (XRD) an ausgewählten Materialien durchgeführt, die die Bestimmung der in den untersuchten Böden enthaltenen Mineralphasen zum Ziel hatten. Dabei wurden zwei Lagerstättentone (LS1 Und LS2), zwei Böden aus großen Infrastrukturbaumaßnahmen (IS 1.1 und IS 3), das Referenzmaterial „Secursol“ (Sackware), sowie drei Böden aus Tunnelbaumaßnahmen (TB1, TB2 und TB3) untersucht.

Mit Kenntnis der kristallinen Phasenbestandteile ist anschließend eine Ermittlung der quantitativen Zusammensetzung mittels Rietveld-Verfeinerung möglich. Diese hat die Bestimmung der anteiligen Tonmineralogie und auch die Ermittlung der Anteile an Nebenmineralphasen wie Quarz, Feldspat, Glimmer, Schwerminerale und organischem Anteil der Ausgangsmaterialien zum Ziel. Im Zuge der XRD-Analysen wurden folgende Bearbeitungsschritte durchgeführt:

in einem ersten Schritt wurde eine repräsentative Teilprobe (ca. 1 – 2 g Material) mittels spezieller XRD-Mikronisierungsmühle unter Zugabe von Ethanol als Kühlflüssigkeit und Beimengung von 20% Korundpulver, welches als interner Laborstandard diente, aufgemahlen.

- daraufhin erfolgte eine Eindampfung der in Schritt 1 hergestellten Suspensionen und eine erneute Homogenisierung des Probenmaterials, aus dem Pulverpresslinge erstellt wurden.

- die Messung der Proben erfolgte mittels Cu-K α -Strahlung im Winkelbereich von $2-92^{\circ} 2\Theta$, bei einer Schrittweite von $0,02^{\circ} 2\Theta$ und einer Zählzeit von 5 Sekunden pro Messschritt.
- die aus der XRD-Analyse hervorgehenden Beugungsdiagramme wurden anschließend auf Grundlage der umfassenden BGMN-Referenzdatenbank für Pulver-XRD ausgewertet, um eine qualitative Phasenzusammensetzung der Probe zu bestimmen. Basierend auf der Identifizierung der vorliegenden Mineralphasen erfolgte anschließend die quantitative Bestimmung der Phasenanteile mittels Rietveld-Verfeinerung.

Die aus den röntgendiffraktometrischen Untersuchungen hervorgehende anteilige Mineralogie der untersuchten Rohmaterialien ist in Tabelle 3 dargestellt. Tonminerale sind in grüner Farbe hervorgehoben. Mineralphasen, die bei den uncalcinierten Bodenarten keine Anteile aufweisen, sind aufgeführt, da diese in der darauffolgenden Tabelle 4 Anteile aufweisen, die auf die Neubildung von Mineralphasen im Zuge der Temperierung zurückzuführen sind.

Ergebnisse der Analysen der Rohböden zeigen mittels Rietveld-Verfeinerung bestimmte variabel anteilige Zusammensetzungen hinsichtlich der Tonminerale Kaolinit, Smektit/ Montmorillonit sowie Illit/Muskovit. Allgemein dokumentieren die Ergebnisse der XRD-Analysen, dass sich die Lagerstättenmaterialien erwartungsgemäß durch hohe Anteile an Tonmineralen auszeichnen. Diese Anteile variieren zwischen ca. 51% (LS1), über 65% (LS2) bis hin zu 76% (Sackware Secursol). Hervorzuheben sind hier zudem hohe Anteile an Kaolinit. Im Gegensatz dazu weisen die weiter untersuchten, aus großen Infrastrukturmaßnahmen stammenden Rohböden deutlich reduzierte Anteile an Tonmineralen auf (Gesamtanteil Tonminerale 25-27%; siehe Tabelle 3). Bemerkenswert ist hier zudem das generelle Fehlen von Kaolinit. Der gesamte Anteil an Tonmineralen der Böden aus Tunnelbaumaßnahmen variiert zwischen 42% (Boden TB1), 47% (Boden TB2) und 53% (Boden TB3). Die Böden TB1 – TB3 weisen nur vergleichbar geringe Anteile an Kaolinit auf (5-8%), sind jedoch von hohen Anteilen an Illit/Muskovit (14-22%) und Smektit (20-25%) gekennzeichnet.

Tabelle 3: Aus XRD-Analysen hervorgehende quantitative Mineralzusammensetzung (Prozentanteile) der untersuchten Ausgangsstoffe (quantitative Verteilung der Haupttonminerale in grüner Farbe hervorgehoben)

Probenbezeichnung	LS1 (*)	LS2 (*)	Secursol (*)	IS1.1 (*)	IS3 (*)	TB1 FT (*)	TB2 PM (*)	TB3 LC (*)
Quarz	45,7	20,2	21,7	46,1	51,5	10,9	6,7	27,8
K-Feldspat	2,0	3,4	-	4,2	12,4	4,3	4,2	7,4
Plagioklas	-	1,0	-	5,6	7,8	-	1,5	4,0
Illit/Muskovit	32,5	32,7	22,7	7,6	20,8	14,3	21,9	19,8
Smektit	-	13,3	18,8	19,9	-	21,9	19,8	25,5
Kaolinit	18,0	19,4	34,3	-	-	5,0	5,0	7,9
Chlorit	-	-	-	-	5,0	-	-	-
Siderit				12,4	-	0,3	-	-
Ankerit/Dolomit				1,2	-	1,7	11,1	3,2
Kalzit			-		1,7	25,2	29,2	1,6
Anhydrit		-				-		
Bassanit	-					1,3	-	-
Gypsum						-		
Pyrit			0,6			1,9	0,6	1,5
Hämatit					0,8			
Goethit		8,3	-					-
Anatas	13,0	1,7						1,3
Rutil	0,5		1,9	-				
Ankermanit						-		
Grossit							-	
Brownmillerit								
Diopsid		-						-
Perovskit			-					
amorphe Organik						13,2		
amorphes Alumosilikat						-		
gesamt	100	100	100	100	100	100	100	100
Summe Tonminerale	50,5	65,4	75,8	27,5	25,8	41,5	47,6	53,2

* Böden im uncalcinierten Zustand

II.1.3.1.2 Mineralogische Charakterisierung der calcinierten Tone

Die durchgeführten XRD-Analysen an den calcinierten Tonen dienten in erster Linie dazu, den röntgenamorphen Anteil in den jeweiligen Proben mittels Rietveld-Verfeinerung zu bestimmen. Die

tonhaltigen Böden wurden unter variablen Calcinierebedingungen (Temperatur 600°C – 850°C) sowie über unterschiedliche Zeiträume calciniert (Temperierdauer 1 – 4 h; siehe Tabelle 2). Anschließend wurden an den calcinierten Produkten die Anteile an amorphen Silikatphasen sowie Anteile an möglichen Restbestandteilen an Tonmineralen quantifiziert. Die Wirksamkeit der Calciniierung der Tonproben wurde auf Grundlage des Phasenüberganges der Tonminerale in amorphe Kieselsäure (amorphe Alumosilikate), die primär als Produkt der kollabierten Tonminerale angesehen wird, bewertet. Die Ergebnisse der röntgendiffraktometrischen Analysen der calcinierten Böden sind in Tabelle 4 dargestellt. Tonmineralphasen sind in grüner Farbe hervorgehoben

Bei den calcinierten Lagerstättentonen LS1 und LS2 zeigen die Ergebnisse der Rietveld-Verfeinerung, dass bei Boden LS1 nur Restanteile von Kaolinit (<5%) nachzuweisen sind, während bei beiden Calciniervarianten (2h bei 800°C und 4 h bei 800°C) Kaolinit vollständig in amorphe Kieselsäure umgewandelt wurde. Smektit und Illit/Muskovit konnten unter den gegebenen Calcinierebedingungen hingegen nur unvollständig in amorphe Phasen überführt werden.

Beim Boden TB1 (Frankfurter Ton) ließ sich nach der 4-stündigen Temperierung bei 800°C kein Kaolinit mehr nachweisen. Bis auf Spuren von Illit (ca. 4%) ist die Illit-Smektit-Wechselagerung in amorphe Kieselsäure übergegangen. Der dennoch relativ gering ausfallende amorphe Anteil von rund 30% kann damit erklärt werden, dass die Probe signifikante Anteile von Mineralneubildungen wie Akermanit/Gehlenit (10%) und Diopsid (9,3%) aufweist. So hat sich der ursprüngliche Pyrit komplett zersetzt, und es haben sich Spuren von Sulfiden (Gips und Anhydrit) sowie von Hämatit gebildet.

Am calcinierten Boden TB2 (Pariser Mergel) ließ sich nach 4-stündiger Calciniierung bei 800°C ein vollständiger Phasenübergang der Tonminerale Kaolinit und Smektit in amorphe Kieselsäure nachweisen. Lediglich Reste von Illit (4%) konnten in der temperierten Probe festgestellt werden. Die Temperierung resultierte zudem in der vollständigen Zersetzung der Karbonate. Daneben weist die calcinierte Probe zum Teil deutliche Mineralneubildungen auf (Siehe Tabelle 4). So können Anteile von Ankermanit (10%), Anhydrit (9%), Diopsid (9%) und untergeordnet auch Hämatit (3%) nachgewiesen werden. Diese Neubildungen stammen aus dem hohen Karbonatgehalt, da reaktive Phasen wie CaO und MgO in Verbindung mit amorphem Alumosilikat die Bildung von Silikaten und Oxiden signifikant beeinflussen.

Tabelle 4: Quantitative Mineralzusammensetzung der calcinierten Produkte gemäß XRD-Analysen

Proben- bezeichnung	LS1 (*)	LS2 (*)	Secursol (*)	IS1.1 (*)	IS3 (*)	TB1 FT (*)	TB2 PM (*)	TB3 LC (*)
Quarz	49,5	25,1	25,6	26,6	13,7	12,2	7,5	27,7
K-Feldspat	2,6	3	2,6	-	3,6	4,5	2,1	8,4
Plagioklas	-	1	1	-	-	15,7	1,2	3,3
Illit/Muskovit	24,1	26,2	26,4	18	9,2	4,9	4,2	18,8
Smektit	-	-	-	17,9	8	-	-	17,3
Kaolinit	4,4	-	-	2,8	-	-	-	-
Chlorit	-	-	-	-	-	-	-	-
Siderit	-	-	-	-	-	-	-	-
Ankerit/Dolomit	-	-	-	-	-	-	-	-
Kalzit	-	-	-	-	-	-	-	1,5
Anhydrit	-	-	-	-	5,8	9,2	2,5	-
Bassanit	-	-	-	-	-	-	-	-
Gypsum	-	-	-	-	1,6	1,0	1,3	-
Pyrit	-	-	-	-	0,9	-	-	-
Hämatit	-	10,1	9,7	-	2,7	2,6	2,2	1,8
Goethit	-	-	-	-	-	-	-	-
Anatas	1,0	0,013	1,0	-	-	-	-	1,5
Rutil	0,7	-	-	1,9	-	-	-	-
Ankermanit	-	-	-	-	-	10,4	31,3	-
Grossit	-	-	-	-	-	-	1,1	-
Brownmillerit	-	-	-	-	-	-	1,4	-
Diopsid	-	-	-	-	-	9,3	14,2	-
Perovskit	-	-	-	-	-	-	2,8	-
amorphe Organik	-	-	-	-	-	-	-	-
amorphes Alumosilikat	17,5	33,3	33,7	32,8	44,5	30,2	28,2	19,7
gesamt	100	100	100	100	100	100	100	100
Summe Tonminerale	28,5	26,2	26,4	38,7	0,8	4,9	4,2	36,1

Obwohl der bei 650°C für 1 Stunde thermisch behandelte Boden TB3 (London Clay) einen deutlich reduzierten Tonmineralanteil aufweist, sind nach dem Calcinieren lediglich 20% der Tonminerale in amorphe Kieselsäuren übergegangen. Während Kaolinit vollständig in eine amorphe Kieselsäure-Phase umgewandelt wurde, lässt sich ein noch immer recht hoher Anteil der Illit-Smektit-Wechselagerung von ca. 36% feststellen. Ursächlich ist vermutlich die nur vergleichsweise geringe Calciniertemperatur und -dauer. Die Karbonate haben sich ebenfalls nur unvollständig zersetzt. Als Mineralneubildung lassen sich Spuren von Hämatit und Anatas in der Probe nachweisen, was

möglicherweise aus der thermischen Zersetzung von Pyrit hervorgehende Oxidationserscheinung resultiert.

II.1.3.2 Bestimmung der Korngröße der calcinierten Böden aus Tunnelbauprojekten

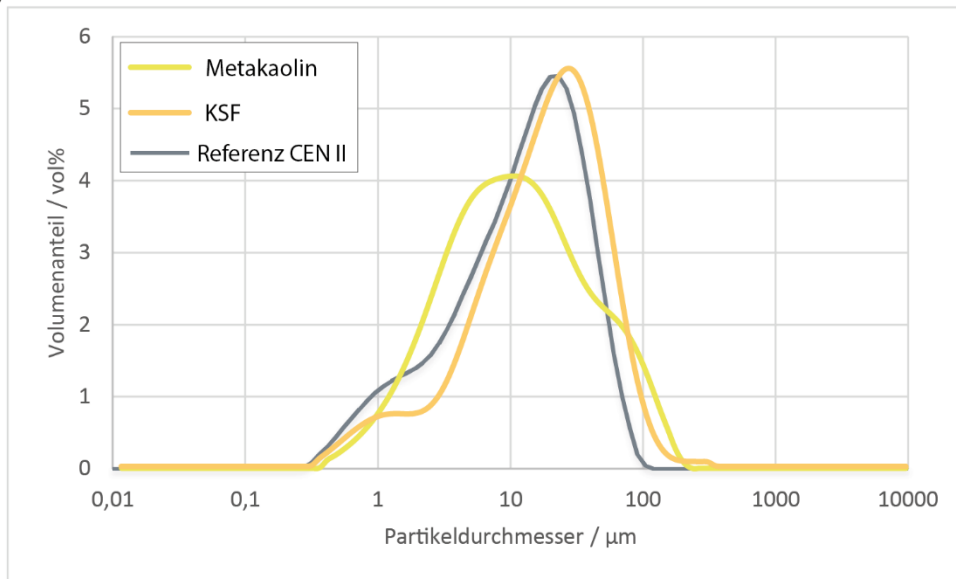
Basierend auf dem Wissensstand bezüglich der Mechanismen des Füllereffekts und der puzzolanischen Reaktion [Scr18a] stellt die Korngrößenverteilung einen entscheidenden Parameter bei der Untersuchung von Zementersatzmaterialien dar. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde die Analyse der Partikelgröße für die aus Tunnelbaumaßnahmen stammenden calcinierten Tone TB1 FM, TB2 PM und TB3 LC mithilfe der Laserbeugungstechnik durchgeführt. Außerdem wurden der schrittweise zu ersetzende Zement CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N sowie die Referenzmaterialien Kalksteinfüller und Metakaolin analysiert. Zu diesem Zweck wurde ein Laserpartikelanalysator Mastersizer Hydro 2000MU (A) von Malvern Panalytical genutzt, der mit einem Laserbeugungssensor ausgestattet ist. Die Messungen wurden an feuchten Proben unter Verwendung von entionisiertem Wasser als Dispergierungsmittel durchgeführt. Die Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 6 A&B dargestellt.

Tabelle 5: Zusammenfassende Tabelle der granulometrischen Eigenschaften der untersuchten Materialien (d₁₀, d₅₀ und d₉₀-Werte in µm)

Material	d ₁₀	d ₅₀	D ₉₀
Referenzzement CEN II	1,603	12,154	37,186
Kalksteinfüller KSF	3,028	17,999	54,243
Metakaolin	2,032	10,118	58,893
LS1 FT: 800°C - 2h	2.588	48.760	746.106
LS2 PM: 800°C - 2h	4.287	64.393	629.845
LS3 LC: 650°C - 2h	4.087	53.048	450.714

Die in Abbildung 6 A&B dargestellten Ergebnisse des direkten Vergleichs der Korngrößenverteilung des Referenzzements mit den Referenzmaterialien Kalksteinfüller (KSF) und Metakaolin lassen sich ähnliche Korngrößenverteilungen der Materialien erkennen. Wie Tabelle 5 entnommen werden kann, zeigen die untersuchten Referenzmaterialien ähnliche Partikelgrößenverteilungen, die mit einem d₁₀ zwischen ca. 1,6 bis ca. 3 µm, einer mittleren Partikelgröße d₅₀ von etwa 10-18 µm und einem d₉₀ von weniger als 60 µm in der gleichen Größenordnung liegen. Dem gegenüberstehend sind die untersuchten calcinierten Materialien von einer generell gröberen Kornlinie bestimmt (Tabelle 5). Während die d₁₀-Werte gegenüber den Referenzmaterialien nur geringfügig erhöht sind, sind die mittleren Partikelgrößen (d₅₀-Werte) bereits deutlich gröber, wohingegen die d₉₀-Werte bis zu 20-fach größer sind. Sie zeichnen sich zudem durch das Vorhandensein zweier Maxima aus, die mit einer bimodalen Verteilung einhergehen (Abbildung 6 B). Es konnte festgestellt werden, dass lediglich ca. 5% der Partikel eine Größe unter 10 µm haben. Daraus wird deutlich, dass aufgrund der auftretenden Partikelagglomeration die Partikelfeinheit auch mit Nachmahlen mittels automatischem Achatmörser bei den calcinierten Tonen nicht abnimmt und selbst durch das Nachmahlen die Partikelfeinheit calcinierter Produkte nur unzureichend verbessert werden kann.

A)



B)

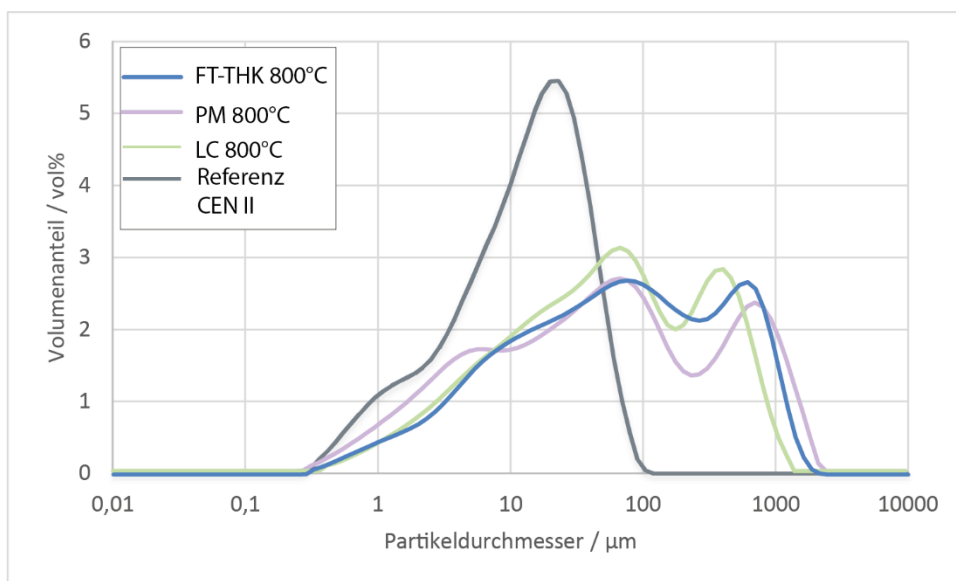


Abbildung 6: A) Kornverteilungen des untersuchten Referenzzements CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N und der Referenzmaterialien Kalksteinfüller (KSF) und Metakaolin. B) Kornverteilungen der calcinierten Tone im direkten Vergleich zum Referenzmörtel

II.1.3.3 Bestimmung der Rohdichte der untersuchten Materialien nach DIN-EN 1097

Von den drei ausgewählten tonhaltigen Böden aus Tunnelbaumaßnahmen und vom Lagerstättenmaterial LS2 wurden Rohdichten mittels Pyknometerverfahren bestimmt. Dabei wurde die Rohdichte auf ofentrockener Basis nach DIN 1097-7 [DIN22] durch das Verhältnis des Gewichts der ofentrockneten Probe zum Volumen, welches die Probe inklusive der Volumina innerer geschlossener Hohlräume und wasserzugänglicher Hohlräume aufweist, ermittelt. Zu diesem Zweck

wurden die Proben in einem ersten Schritt auf Massenkonzanz getrocknet. Anschließend wurde eine Menge von ca. 10 g des getrockneten Probematerials gemörsert und in ein Kapillarpyknometer mit bekanntem Volumen eingebracht.

Der Untersuchungsumfang beinhaltet sowohl die Bestimmung Rohdichten der Rohböden als auch die der temperierten Produkte. Pro Variante wurden jeweils drei Kapillarpyknometer vorbereitet und untersucht. Für das Verfahren nach DIN EN 1097-7 [DIN22] wurden Pyknometer mit bekanntem Volumen und eine Prüflüssigkeit mit bekannter Dichte verwendet.

Zu diesem Zweck wurden vorab alle verwendeten Pyknometer trocken und mit Wasser gewogen. Zusätzlich wurde auch die jeweilige Temperatur des Wassers erfasst. Im Anschluss wurden die Volumina der jeweiligen Pyknometer bestimmt, woraufhin etwa 10 g Material abgewogen und in das Pyknometer gefüllt wurden, was bis zur Hälfte mit Wasser befüllt wurde. Anschließend wurden die Proben im Vakuum-Exsikkator mindestens 30 Minuten bei weniger als 3,0 kPa entlüftet. Die graphische Darstellung der Rohdichten der Ausgangsstoffe und ihrer calcinierten Produkte ist Abbildung 7 zu entnehmen.

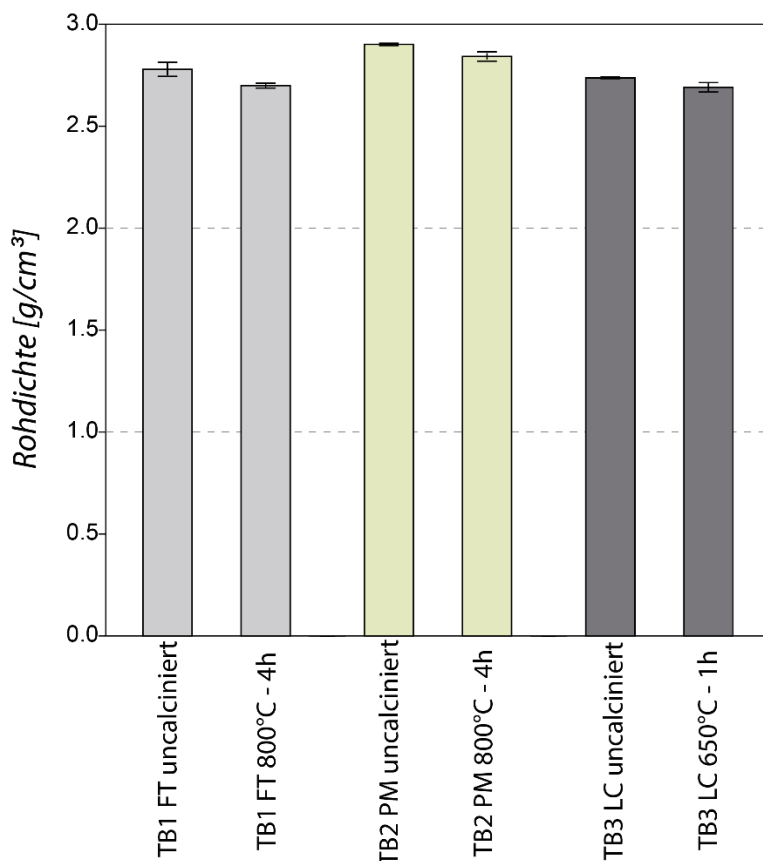


Abbildung 7: Darstellung der Rohdichten der untersuchten Materialien jeweils vor und nach der Calciniierung

Die Rohmaterialien weisen Rohdichten im Bereich von 2,78 g/cm³ (Probe TB1 FT), 2,90 g/cm³ (Probe TB2 PM) und 2,74 g/cm³ (Probe TB3 LC) auf. Bei den calcinierten Proben ist generell eine geringe Abnahme der Rohdichten zu verzeichnen. So weisen die calcinierten Materialien Rohdichten auf, die

von PM: 2,84 g/cm³ (TB2 PM), über 2,70 g/cm³ (TB1 FT) bis hin zu 2,69 g/cm³ (TB3 LC) reichen. Die Gewichtsabnahme infolge Calcinerung beträgt somit zwischen 2% (Proben TB2 PM und TB3 LC) und 3 % (TB1 FT).

Im Vergleich zu einer angenommenen Rohdichte eines handelsüblichen Portlandhütten-, Hochofen-, Portlandschiefer- oder Portlandkalksteinzements von 3,0 g/cm³ [IZB] liegen die untersuchten calcinierten Produkte damit im Bereich von natürlichen Gesteinskörnungen und nur geringfügig unterhalb der des verwendeten Zements CEM II/C-M (S-LL) von 2,75-3,20 g/cm³ [Dyc23].

II.1.3.4 Untersuchung der rheologischen Eigenschaften von calcinierten Böden an Leimen

Die Eignung und Wirksamkeit der calcinierten Tonböden als teilweiser Zementersatz wurde hinsichtlich der Verarbeitbarkeit bzw. Rheologie mit Hilfe eines Rotationsviskosimeters an Bindemittelleimen untersucht. Neben einem Referenzleim mit 100 % Zement als Bindemittel wurden Leime mit 80 M.-% Zement und 20 M.-% calciniertem Ton hergestellt. Um die rheologischen Eigenschaften der calcinierten Tone als Bindemittel in Beton vergleichend zu bewerten, wurden anstelle von calciniertem Ton inerte Kalksteinfüller bzw. reines Metakaolin zugegeben. Die Leime wurden zunächst mit einem konstanten Wasserbindemittelwert (w/b) von 0,50 hergestellt. Die Rezepturen der untersuchten Leime sind in Tabelle 6 dargestellt.

Wie frühere Studien zeigen, kann der Zusatz von calciniertem Ton die rheologischen Eigenschaften von zementbasierten Systemen erheblich beeinflussen [Nai20]. Diese Effekte sind bei reinem Metakaolin und Substitutionsraten > 20 % aufgrund eines erhöhten Wasserbedarfs besonders ausgeprägt. Zur vergleichbaren Bewertung wurden die untersuchten Leime mit einem Hochleistungsfließmittel auf Basis von Polycarboxylatether (PCE) auf ein einheitliches Setzfließmaß von 210 ± 20 mm auf dem Hägermann-Tisch eingestellt. Die Mischungen wurden nach DIN EN 196-1 [DIN16] bei 21,0 ± 1,0 °C hergestellt und nach intensiver Homogenisierung wurden die Leime mittels eines Rotationsviskosimeters (Viskomat NT, Schleibinger) charakterisiert. Abbildung 8 zeigt die rheologischen Ergebnisse in Form des Konsistenzfaktors und des Fließexponenten (Viskosität) in Anlehnung an das Herschel-Bulkley-Modell.

Tabelle 6: Leimrezepturen unter Variation von Art bzw. Zusammensetzung des Bindemittels und variabler Fließmittelzugabe

Leimprobe	Einwaage			Fließmittel- zugabe
	Zement	Wasser	Zusatzstoff	
	[g]	[g]	[g]	[%] bez. Zement
Referenz CEM II/C S-LL	851,0	425,5	-	-
TB1 FT/TB2 PM/ TB3 LC (20%)	680,8	425,5	170,2	0,5
Metakaolin (20%)	680,8	425,5	170,2	5,0
KSF (20%)	680,8	425,5	170,2	-

Während zum Erreichen des Ziel-Setzfließmaßes die Leime mit calcinierten Tonen eine Fließmittelzugabe von 0,5 M.-% bezogen auf den Zementgehalt erforderten und der Leim mit inertem Kalksteinfüller keine Fließmittelzugabe benötigte, war bei Leim mit reinem Metakaolin eine erhöhte Fließmittelmenge von 5 M.-% bezogen auf den Zementgehalt erforderlich, wobei nur ein reduziertes Setzfließmaß von 190 mm erreicht werden konnte. Der Wasseranspruch der calcinierten Tonproben war folglich deutlich geringer als der des Metakaolins und lag in der Größenordnung von Zement bzw. Kalksteinmehl.

Insgesamt zeigte sich an den Leimen mit calcinierten Tonen eine ähnliche Rheologie wie beim reinen Zementleim bzw. dem Leim mit Kalksteinmehl (s. Abbildung 8). Die calcinierten Illit-reichen und Smektit-reichen Materialien TB1 FT und TB3 LC zeichnen sich durch einen begrenzten Wasseranspruch aus. Dagegen wies die Mischung mit reinem Metakaolin anhand eines erhöhten Konsistenzfaktors und reduziertem Fließexponenten auf einen deutlich zäheren Leim und damit eine geringere Verarbeitbarkeit hin. Auf Grundlage der rheologischen Kenngrößen, Konsistenzfaktor und Fließexponent, ließen sich bei den Mischungen mit calcinierten Tonproben zwar charakteristische Unterschiede feststellen. Allerdings sind diese Unterschiede betontechnologisch als unproblematisch zu bewerten, da diese sich durch Einsatz von Fließmitteln aussteuern lassen.

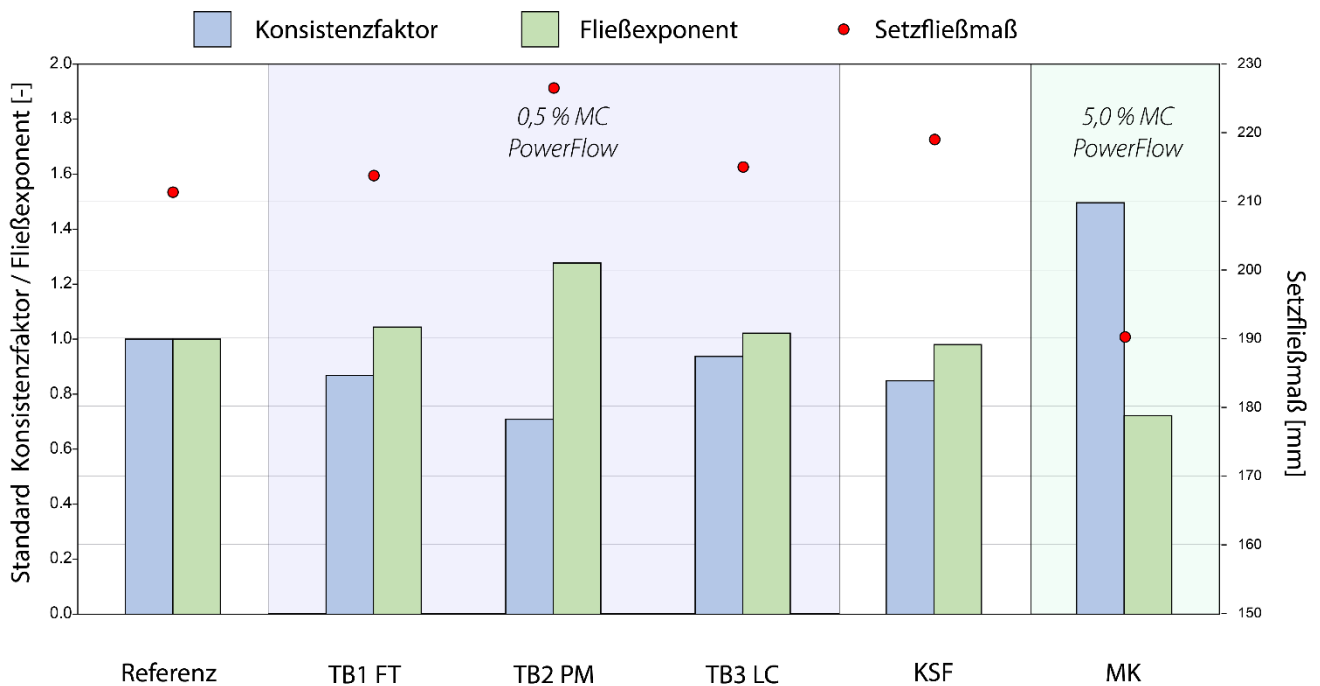


Abbildung 8: Rheologische Kenngrößen und Setzfließmaße der untersuchten Leime

II.1.3.5 Untersuchung der Festigkeitseigenschaften von calcinierten Böden an Mörteln

Die calcinierten Materialien wurden anschließend als Bestandteil bzw. teilweiser Zementersatz in Mörtelmischungen eingesetzt, um deren Beitrag zur Festigkeitsentwicklung in Abhängigkeit der unterschiedlichen Proben calcinierter Böden zu erfassen und zu bewerten. Als Referenz wurde ein reiner Zementmörtel (ohne calcinierten Ton) herangezogen. Als weitere Referenzmaterialien zur vergleichenden Gegenüberstellung mit calcinierten Tonen dienten zum einen reiner Metakaolin (kommerzielles Produkt „Centrilit“ der Firma MC-Bauchemie) sowie inertes Kalksteinmehl.

Die Versuchsmatrix sah vor, ausgehend von der Rezeptur eines reinen Zementmörtels, den Zement in den untersuchten Mörtelmischungen sukzessive durch calcinierten Ton bzw. den Referenzmaterialien in Anteilen von 10 M.-%, 20 M.-%, 30 M.-% und 40 M.-% zu substituieren, wobei die weiteren Mischungsbestandteile konstant gehalten wurden. Als Zement wurde ein ökoeffizienter CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N eingesetzt.

Die Zusammensetzung der untersuchten Bindemittel wurden wie folgt gewählt:

- 1350 g Normsand
- 450 g Bindemittel (Zement + ggf. Zusatzstoff)
- 225 ml Wasser.

Bei der Herstellung der Mörtelprismen wurde ein konstanter w/z-Wert von 0,50 eingehalten. Zur Beurteilung der Reaktivität wurde die Festigkeiten bzw. die Festigkeitsentwicklung der unterschiedlichen calcinierten Tone (in Kombination mit Zement) anhand von Mörteldruckfestigkeiten

von Normprismen im Alter von 7, 28 und 91 Tagen nach DIN EN 196-1 [DIN16] ermittelt, und mit der des reinen Zementmörtels bzw. der Mörtel mit den Referenzmaterialien (Metakaolin, Kalksteinfüller) verglichen.

Die ermittelten Druckfestigkeiten in einem Probenalter von 7, 28 Tagen und 91 Tagen sind mit den absoluten Werten in den Abbildung 9 bis Abbildung 11 und neben Angaben zu relativen Druckfestigkeiten, bezogen auf den Referenzmörtel, in Tabelle 7 dokumentiert.

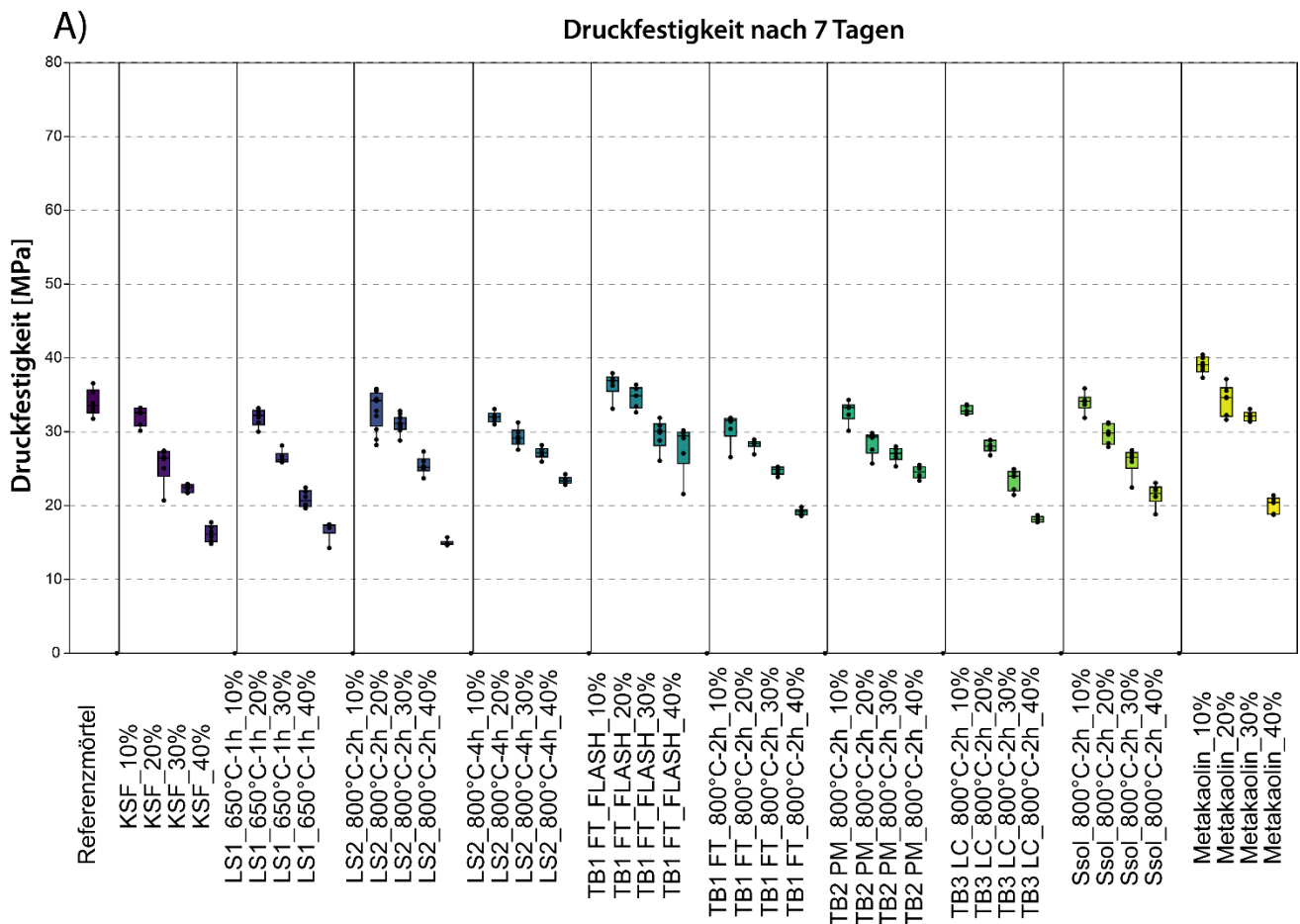


Abbildung 9: Druckfestigkeiten des Referenzmörtels und der Mörtel mit variablen Anteilen an calcinierten Tonen bzw. Referenzmaterialien Metakaolin und Kalksteinfüller (KSF) für unterschiedliche Substitutionsraten im Alter von 7 Tagen

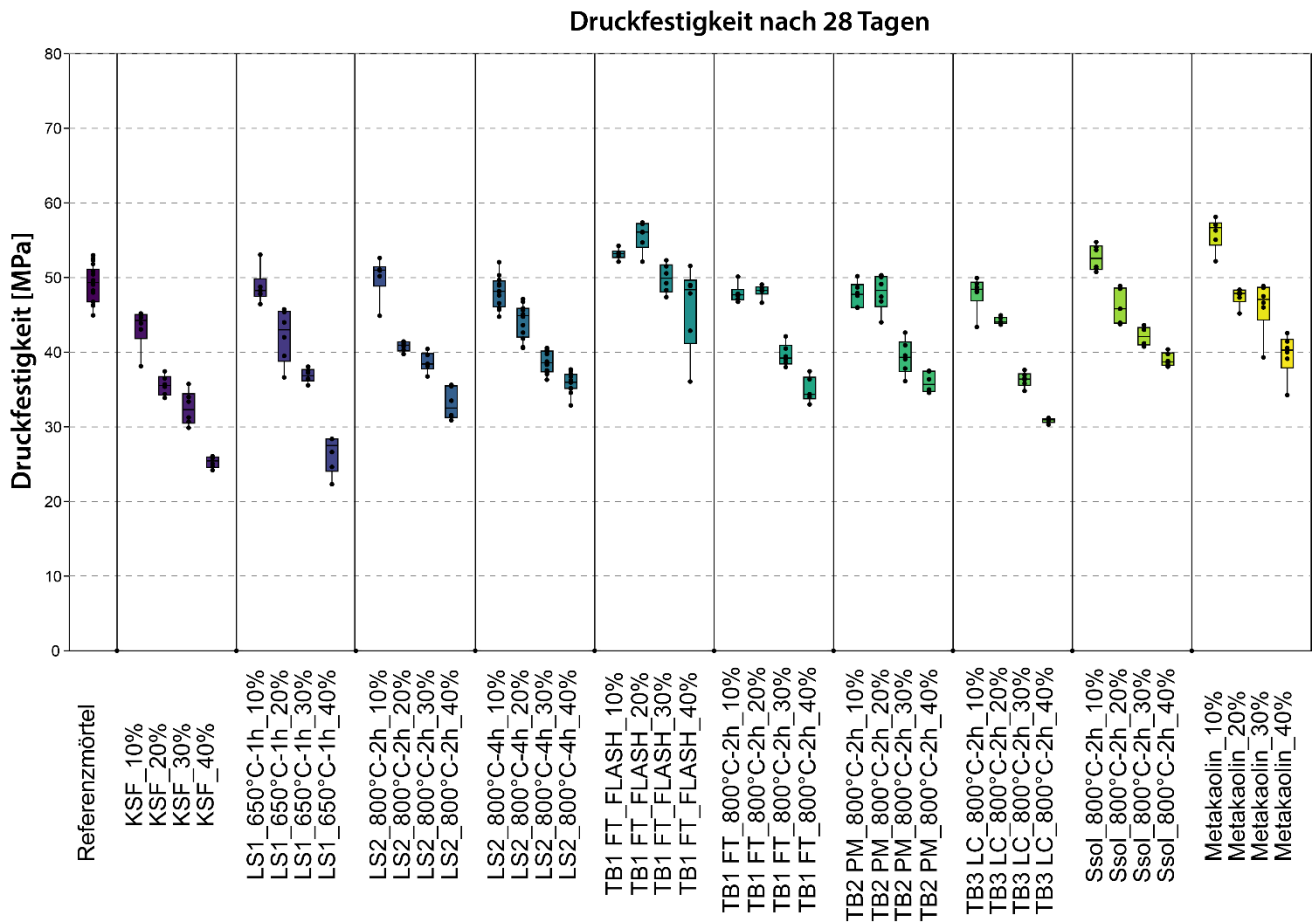


Abbildung 10: Druckfestigkeiten des Referenzmörtels und der Mörtel mit variablen Anteilen an calcinierten Tonen bzw. Referenzmaterialien Metakaolin und Kalksteinfüller (KSF) für unterschiedliche Substitutionsraten im Alter von 28 Tagen

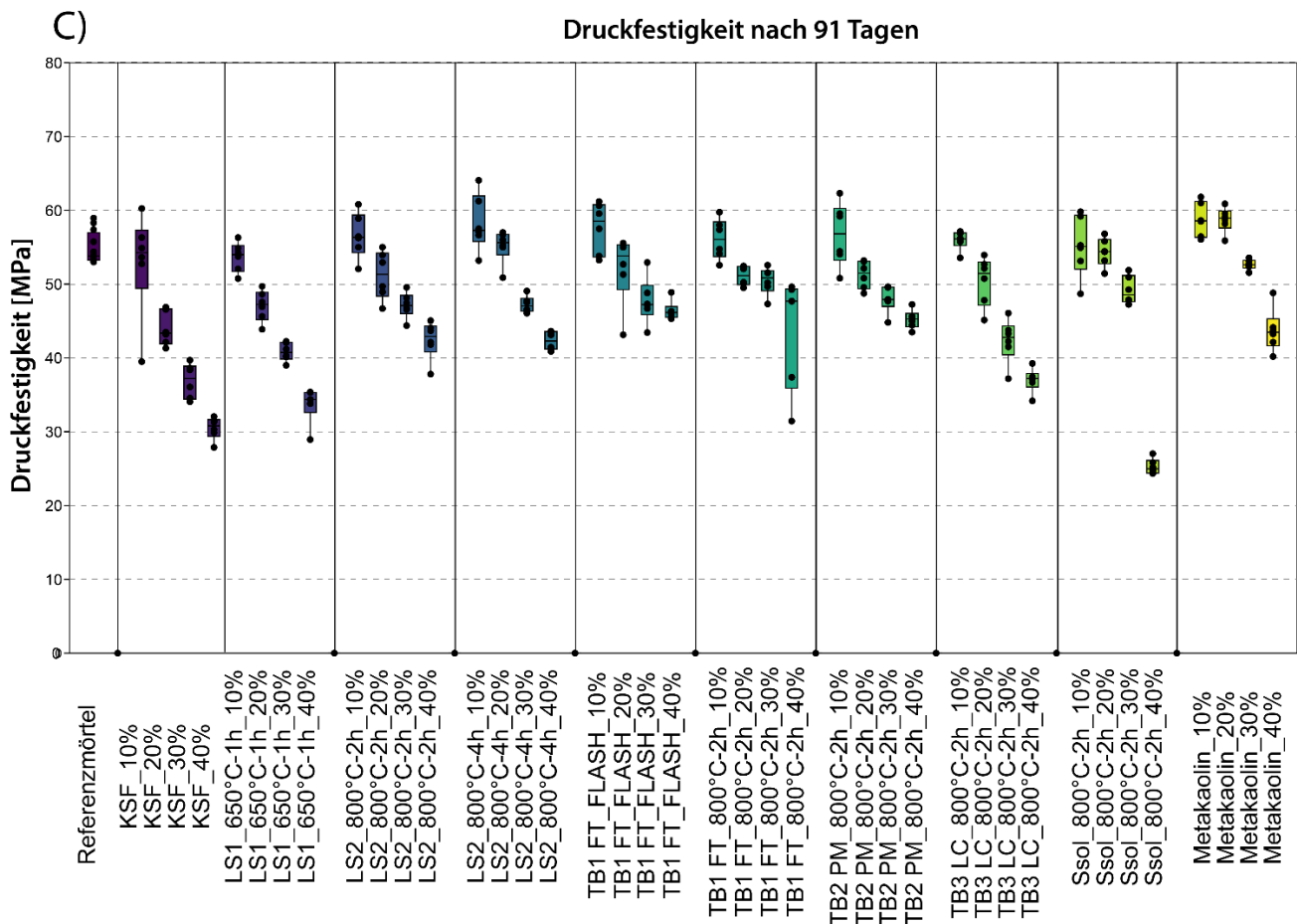


Abbildung 11: Druckfestigkeiten des Referenzmörtels und der Mörtel mit variablen Anteilen an calcinierten Tonen bzw. Referenzmaterialien Metakaolin und Kalksteinfüller (KSF) für unterschiedliche Substitutionsraten im Alter von 91 Tagen

Tabelle 7: Mittlere Druckfestigkeiten der untersuchten Mörtel (absolut und relativ zum Referenzmörtel) der untersuchten Mörtel im Probestalter von 7, 28 und 91 Tagen

Material	Anteil am Bindemittel	Druckfestigkeit im Alter von					
		7 Tagen		28 Tagen		91 Tagen	
	%	N/mm ²	RI %	N/mm ²	RI %	N/mm ²	RI %
Referenzmörtel	0	33,91	100	49,17	100	54,89	100
KSF	10	32,1	94,66	43,31	88,08	43,31	78,90
	20	25,55	75,35	35,54	72,28	36,14	65,84
	30	22,34	65,88	32,49	66,08	32,49	59,19
	40	16,17	47,69	25,29	51,43	25,29	46,07
LS1	10	31,95	94,22	48,76	99,17	53,67	97,78
	20	26,5	78,15	42,2	85,82	47,05	85,72
	30	20,86	61,52	36,88	75,01	40,82	74,37
	40	16,78	49,48	26,45	53,79	33,7	61,40
LS2	10	30,97	91,33	50,13	101,95	56,57	103,06
	20	30,97	91,33	40,79	82,96	51,2	93,28
	30	25,41	74,93	38,63	78,56	47,14	85,88
	40	14,93	44,03	33,06	67,24	42,43	77,30
TB2 PM	10	32,78	96,67	47,71	97,03	56,72	103,33
	20	28,51	84,08	47,96	97,54	51,25	93,37
	30	26,94	79,45	39,35	80,03	47,92	87,30
	40	24,51	72,28	35,95	73,11	45,23	82,40
TB1 FT-THK	10	30,61	90,27	47,86	97,34	56,09	102,19
	20	28,27	83,37	48,18	97,99	51,11	93,11
	30	24,75	72,99	39,61	80,56	50,47	91,95
	40	19,15	56,47	34,92	71,02	43,84	79,87
TB3 LC	10	32,92	97,08	47,91	97,44	56,24	102,46
	20	28,03	82,66	44,19	89,87	52,67	95,96
	30	23,51	69,33	36,33	73,89	48,09	87,61
	40	18,14	53,49	30,85	62,74	46,91	85,46
Metakaolin MK	10	39,04	115,13	55,97	113,83	58,74	107,01
	20	34,3	101,15	47,49	96,58	58,73	107,00
	30	32,1	94,66	46,16	93,88	52,65	95,92
	40	20,11	59,30	39,66	80,66	43,7	79,61

Aus den Festmörteluntersuchungen geht hervor, dass die Druckfestigkeiten der Mörtel mit Anteilen an calciniertem Ton im Prüfaller von 7 Tagen alle unter der Druckfestigkeit des reinen Zementmörtel (Referenzrezeptur) liegen und nur geringfügige Abweichung zu den Mörteln mit Kalksteinfüller aufweisen. Im Gegensatz zum Kalksteinfüller ist bei Einsatz der calcinierten Böden ein verspäteter Festigkeitsbeitrag im Alter von 28 und 91 Tagen zu verzeichnen, was auf einen verzögerten Festigkeitsbeitrag der calcinierten Tone als puzzolanische Zusatzstoffe hinweist. Für einen

Substitutionsgrad von 10% werden für alle calcinierten TBM-Böden nach 91 Tagen Druckfestigkeiten erreicht, die der Festigkeit des reinen Zementmörtels entspricht. Eine Substitutionsrate von 20% führt sowohl nach 28 Tagen als auch nach 91 Tagen zu Festigkeiten, die noch in der Größenordnung des reinen Zementmörtels liegen.

Bei den Untersuchungen zeigte sich erwartungsgemäß für alle untersuchten Mörtelmischungen ein Festigkeitsanstieg zwischen einem Alter von 7 und 28 Tagen, wobei kein nennenswerter Einfluss der untersuchten calcinierten Tone festzustellen war. Von den insgesamt neun untersuchten calcinierten Tonen erreichten bzw. überschritten fünf Proben nach 28 Tagen die Festigkeit des reinen Zementmörtels (Referenzrezeptur) bis Substitutionsraten von 20 M.-% zu erreichen bzw. teilweise sogar zu übertreffen. Bei Substitutionsraten über 20 M.-% nahmen die Festigkeiten gegenüber der Referenz mit zunehmender Zementersatzrate ab, wobei eine signifikante Abhängigkeit der Art des calcinierten Tones auf die Festigkeitseinbuße des Mörtels zu erkennen war.

II.1.3.6 Indirekte Bewertung der Aktivität

Die puzzolanische Eigenschaften bzw. der Festigkeitsbeitrag der unterschiedlichen calcinierten Tone wurde mittels Aktivitätsindex RI in Anlehnung an DIN EN 450-1 [DIN12b] bewertet. Bei diesem Verfahren wird die Reaktivität RI anhand von Druckfestigkeiten im Vergleich zu einem Referenzmörtel in unterschiedlichem Alter beurteilt:

$$RI = R_c(a) / R_c(\text{ref}) * 100 \%$$

mit:

R_c(a): Druckfestigkeit in [N/mm²] von genormten Mörtelprismen mit einem Bindemittelanteil bestehend aus 80 M.-% CEM II/C-M (S-LL) Zement und 20 M.-% calciniertem Ton

R_c(ref): Druckfestigkeit [in N/mm²] von genormten Mörtelprismen mit einem Bindemittelanteil bestehend aus 100 M.-% des Referenzzements CEM II/C-M (S-LL)

Die Reaktivitäten RI der untersuchten Mörtel wurden auf Basis der der Ergebnisse der Festigkeitsuntersuchungen (vgl. Tabelle 7) bestimmt und sind in Tabelle 8 dokumentiert bzw. in Abbildung 12 dargestellt.

Tabelle 8: Aktivitätsindex RI von Mörteln mit 20 M.-% calcinierten Tonen (in Anlehnung an DIN EN 196-1 [DIN16])

Material	Aktivitätsindex RI im Alter von		
	7 Tagen in %	28 Tagen in %	91 Tagen in %
KSF 20%	75,35	72,28	80,03
LS1 20%	78,15	85,82	85,87
LS2 20%	91,33	82,96	93,28
TB1 FT 20%	83,37	97,99	93,11
TB2 P 20%	84,08	97,54	93,37
TB3 LC 20%	82,66	89,87	95,96
MK 20%	101,15	96,58	107,00

Alle Mörtel mit calcinierten Böden weisen im Alter von 7 Tagen relative Festigkeiten zwischen 82 % und 84% auf. Demgegenüber liegt die Festigkeit des Mörtels mit Metakaolins auf dem Niveau des reinen Zementmörtels.

Nach 28 Tagen reichen die Festigkeiten der Mörtel mit calcinierten Böden aus Tunnelbaumaßnahmen an die des reinen Zementmörtels mit relativen Festigkeiten zwischen 90 % (London Clay) und 98% (Pariser Mergel und Frankfurter Ton) nahe heran. Mörtel, die aus Lagerstätten tonen calcinierte Tone enthalten, erreichen relative Festigkeiten von 86% (LS 1) bzw. 83% (LS2).

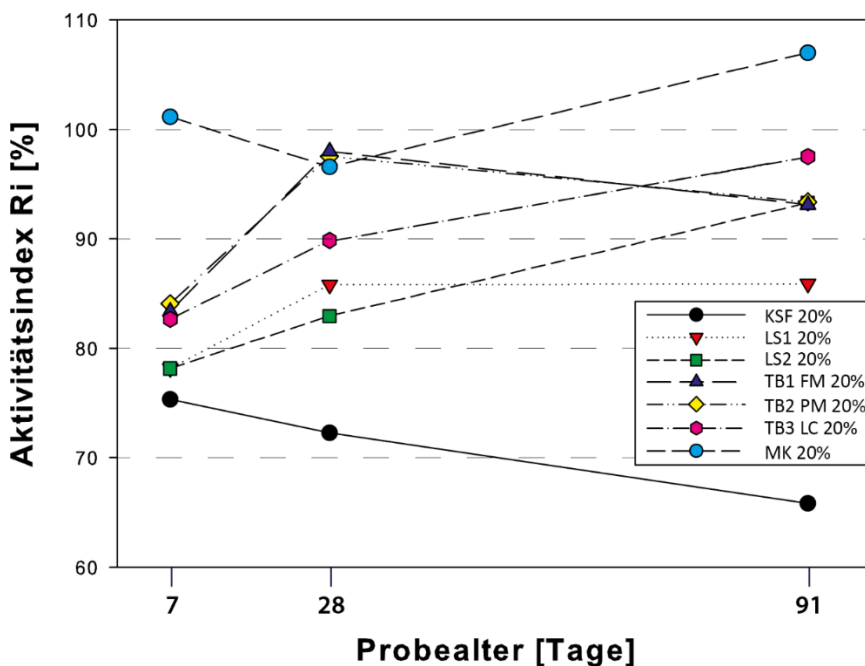


Abbildung 12: Zeitliche Entwicklung der Aktivitätsindizes RI

Im Prüfalalter von 91 Tagen erreichen die Mörtel mit calcinierten Böden aus Lagerstättenvorkommen Druckfestigkeiten, die unterhalb des Referenzmörtels liegen oder diese annähernd erreichen (LS1 =

86% bzw. LS2 = 93%). Mörtel mit calcinierten Tonen aus Tunnelbaumaßnahmen erreichen ebenfalls nahezu die gleichen relativen Druckfestigkeiten wie der reine Zementmörtel (TB1 FM = 93%, TB2 PM = 93% und TB3 LC = 96%). Mörtel mit reinem Metakaolin übertrifft dagegen die Druckfestigkeit des Referenzmörtels signifikant (107%).

Die im Vergleich zum reinen Metakaolin verringerte Puzzolanität der calcinierten Böden lässt sich u. a. auf einen geringeren Anteil an amorpher Kieselsäure zurückführen.

II.1.3.7 Zusammenfassung der Erkenntnisse hinsichtlich der Reaktivität der calcinierten Tone aus Tunnelbaumaßnahmen

Im Fokus des Forschungsprojekts TOFFEE stand die Bewertung der Eignung von feinkörnigen Böden aus großen Infrastrukturbaumaßnahmen und Tunnelbaugroßprojekten, die sich aufgrund ihrer weitreichenden lokalen und globalen Verfügbarkeit als vielversprechend erweisen. Nichtsdestotrotz stellen derartige Tone, die von geringer Sortenreinheit bestimmt sind, sich allerdings hinsichtlich ihrer mineralogischen Zusammensetzung als sehr komplex dar. Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass der Einsatz von calcinierten Tonen als Zementersatzstoff im Sinne der Nachhaltigkeit im Bausektor vielversprechende Chancen für die zentralen Themen der Rohstoffknappheit und der CO₂-Emissionsreduzierung bietet. Die erlangten Erkenntnisse hinsichtlich der Eignung der untersuchten Böden lässt sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Erwartungsgemäß sind die Frühfestigkeiten der Mörtelmischungen, die calcinierte Tone enthalten, aufgrund der verzögerten puzzolanischen Reaktion im frühen Alter von 7 Tagen gegenüber der Referenzmischung gering. So lagen mit Ausnahme des Mörtels mit Metakaolin alle untersuchten Mörtel mit calcinierten Tonen auf dem gleichen Festigkeitsniveau des Mörtels mit dem inerten Zusatzstoff Kalksteinfüller (rd. 80 % relative Druckfestigkeit). Es zeigte sich, dass sich der Festigkeitsbeitrag der calcinierten Tone umso früher entwickelt, je höher der amorphe Anteil im calcinierten Ton ist. So wiesen Mischungen mit geringerem amorphem Anteil wie LS1 (18 % amorphe Kieselsäure) und TB3 LC (20 % amorphe Kieselsäure) tendenziell niedrigere Reaktivitäten auf (7-Tage RI = 78% bzw. 7-Tage RI = 83%) als calcinierte Tonböden mit höherem amorphem Anteil, wie z. B. LS2 (33 % amorphe Kieselsäure; 7-Tage RI=91%). Calcinierte Tone mit moderatem Anteil an amorpher Kieselsäure wie TB1 FM (30%) und TB2 PM (28%) sind hinsichtlich der Frühfestigkeiten im Mittelfeld anzusiedeln (7-Tage RI = 83% bzw. 84%). Im Vergleich dazu weist Mörtel mit reinem Metakaolin eine dem Referenzzement entsprechende Frühfestigkeit auf (7-Tage RI=101%).
- Im Probenalter von 28 Tagen liegen die relativen Festigkeiten aller Mörtel mit calcinierten Tonen zwischen 83-98% des Referenzmörtels. In Bezug auf die Zusammensetzungen der Rohböden ist hinsichtlich der Festigkeitsbildung kein direkter Zusammenhang zwischen dem Anteil an Kaolinit und Nebenanteilen von Illit/Muskovit und Smektit festzustellen. Lagerstättenton LS1 enthält neben Restanteilen von Kaolinit (4%) noch relativ hohe Anteile an Illit/Muskovit (33%), was sich auch im relativ niedrigen Festigkeitsbeitrag (RI=86%) abzeichnet. Der von hohen Nebenanteilen bestimmte Boden LS2 PM (Illit/Muskovit = 23% & Smektit = 19%) weist die geringste Festigkeitsbildung auf (RI=83%), während Boden LS1 FM (Illit/Muskovit = 14% & Smektit = 20%) eine relative Festigkeit von 98% erreicht. Der aus einer Tunnelbaumaßnahme stammende Rohboden TB3 LC besitzt hohe Anteile an Smektit (26%),

und entwickelt eine Festigkeit von 90% des Referenzmörtels. Reines Metakaolin zeichnet sich in allen Prüfaltern durch Festigkeiten aus, die dem Referenzzement entsprechen bzw. diesen übertreffen. Somit lässt sich feststellen, dass die Anwesenheit von Metalliten und Metasmektiten mit relativ niedrigen Frühfestigkeiten einhergeht.

- Nach 91 Tagen erreichen alle calcinierten Böden Festigkeiten zwischen 86% und 96% des Referenzmörtels. Hier ist hervorzuheben, dass der Lagerstättenton LS1 mit 86% den geringsten relativen Festigkeitsbeitrag erreicht. Dies kann auf den geringen Anteil amorpher Phasen von knapp 18% zurückgeführt werden. Die aus Tunnelbaumaßnahmen stammenden Böden erreichen wie auch Boden LS2 Festigkeitsaktivitätsindizes von 93 bis 96%. Zudem deuten die Festigkeitsentwicklungen aller Mischungen an, dass mit fortschreitender Alter mit weiteren Zunahmen, ggf. auch über das Festigkeitsniveau des Referenzmörtels hinaus, zu rechnen ist.
- Die calcinierten Böden enthalten außer Tonmineralen in der Hauptsache Quarz (Boden 1 = 7%; Boden 2 = 11%, Boden 3 = 27%), aber auch Feldspäte und untergeordnet Schwerminerale. Hier lässt sich jedoch kein direkter Zusammenhang auf die Festigkeitsentwicklung ableiten. Im Gegensatz zu den Lagerstättentonen LS1 und LS2 (ohne Karbonatanteil) weisen die Böden aus Tunnelbaumaßnahmen erhöhte Anteile von Karbonaten (TB1 FT = 27% und TB2 PM = 40%) auf. Diese tendenziell von höheren festigkeitsbildenden Eigenschaften gekennzeichneten Tonböden deuten vermutlich den in vorangegangenen Studien dokumentierten Zusammenhang zwischen erhöhtem Karbonatanteil und erhöhter Reaktivität in Zementsystemen mit calcinierten Tonen [Trü19] an. Der grundsätzlich geringere Festigkeitsbeitrag bei Probe TB3 LC (Karbonatanteil = 19%, Anteil amorpher Phasen = 20%) wird hingegen vermutlich aus der Kombination eines niedrigeren Anteils an amorphen Phasen und geringen Karbonatanteilen hervorgerufen.
- Die Ergebnisse legen nahe, dass in Abhängigkeit von der Art des Tonmaterials unterschiedliche Temperaturen zur thermischen Aktivierung und zur Erzeugung eines möglichst hohen Anteils amorpher Phasen erforderlich sind. Für Kaolinit-dominierte Tonböden wie LS1 und LS2 liegen die geeigneten Calciniertemperaturen bei 600 bis 650°C, während die Tonböden aus Tunnelbaumaßnahmen mit hohem Illit-Muskovit und Smektit-Anteilen bestimmten Tonböden aus Tunnelbaumaßnahmen höhere Temperaturen zwischen 800 bis 850°C erfordern.

II.1.3.8 Einfluss von Mahlfeinheit und Calciniermethode auf festigkeitsbildende Eigenschaften

In die Untersuchungen zum Einfluss von unterschiedlichen Verfahren der Probenaufbereitung und unterschiedlichen Calciniermethoden wurde das Material TB1 Frankfurter Ton herangezogen. Das Probenmaterial wurde einerseits auf unterschiedliche Art hinsichtlich der Partikelgröße vor der Calcinierung aufbereitet und untersucht (siehe auch Kapitel II.1.2 und Tabelle 2). Während das Material TB1 in der Variante TB1 FT_STUVA mittels Walzenbrecher auf eine Feinheit von 1-3 mm gebracht wurde, wurde das Material TB1 FT_THK mithilfe eines automatisierten Achatmörser vom Typ Fritsch Pulverisette deutlich feiner gemahlen. Die beiden Materialien von abweichender Partikelgröße wurden anschließend bei identischen Calcinierebedingungen von 800°C für 2 h im

Muffelofen temperiert. Zur Bewertung des Einflusses unterschiedlicher Calciniermethoden bzw. Ofentypen wurde, das mittels Walzenbrecher aufbereitete Material zusätzlich in einem Flash-Calcinator bei einer Temperatur von 850°C temperiert. Im Vergleich zur Temperierung im Muffelofen zeichnet sich der Flash-Calcinator im Technikum-Maßstab durch relativ kurze Verweildauern des vorher per Walzenbrecher aufbereiteten tonigen Materials von ca. 10 s aus.

Die Bewertung der Reaktivität, der mit unterschiedliche Arten Calciniermethoden hergestellten Materialien erfolgte anhand von Druckfestigkeiten nach DIN EN 196-1 [DIN16] im Alter von 7, 28 und 91 Tagen an Mörtelprismen, die gemäß den in Tabelle 6 aufgeführten Mischungsverhältnissen hergestellt wurden. Hierbei fand auch ein Vergleich zum Referenzmörtel statt. Die graphische Darstellung der Ergebnisse der Vergleichsuntersuchungen sind Abbildung 13 zu entnehmen. Absolute mittlere Druckfestigkeiten und Reaktivitätsindizes sind in Tabelle 9 dokumentiert.

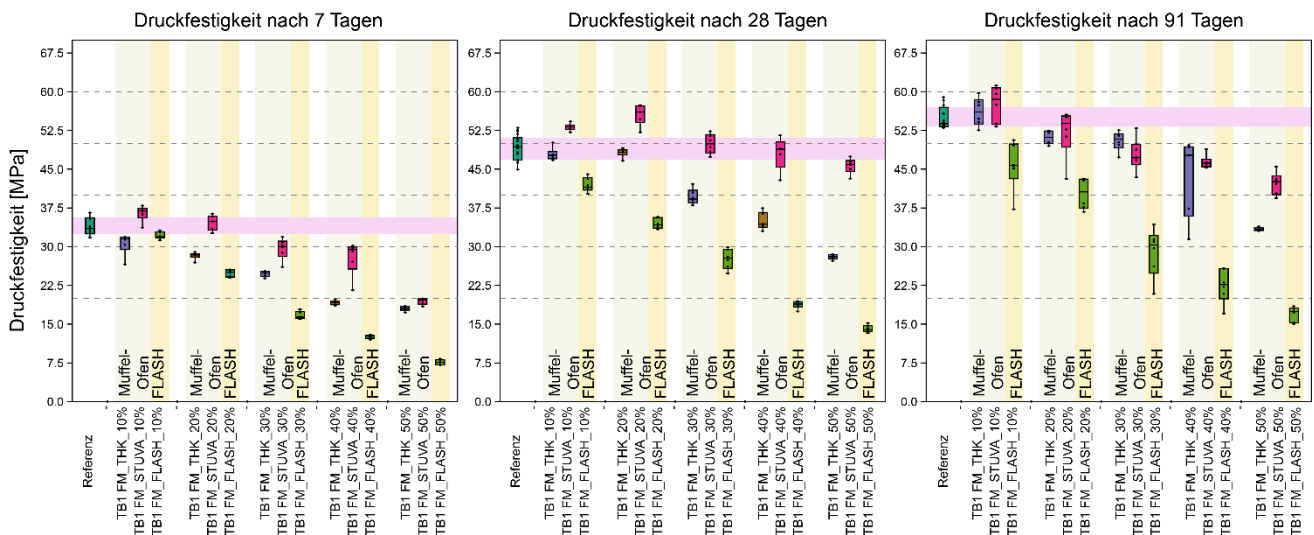


Abbildung 13: Einfluss von unterschiedlicher Mahlfeinheit der nicht temperierten Materialien (Materialien TB1 FM_THK und TB1 FM_STUVA) und Einsatz eines Flash-Calcinators (per Walzenbrecher aufbereitetes Material TB1 FM_FLASH) auf Druckfestigkeiten in Probealtern von 7, 28 und 91 Tagen

Die im Muffelofen temperierten Materialien TB1 FM_THK und TB1 FM_STUVA zeigten in allen Prüfaltern sowie in allen Substitutionsraten tendenziell höhere Druckfestigkeiten als das per Flash-Calcinator temperierte Materialien TB1 FM_FLASH. Bis zu einem Substitutionsgrad von 20% erreichen die Festigkeiten der im Muffelofen temperierten Materialien grundsätzlich die Druckfestigkeit des Referenzmörtels.

Tabelle 9: Mittlere Druckfestigkeiten (absolut und relativ zum Referenzmörtel) der unterschiedlichen Varianten der Probe TB1 FM im Probestalter von 7, 28 und 91 Tagen

Material	Anteil am Bindemittel	Druckfestigkeit im Alter von					
		7 Tagen		28 Tagen		91 Tagen	
	%	N/mm ²	RI %	N/mm ²	RI %	N/mm ²	RI %
Referenzmörtel	0	33,91	100	49,17	100	54,89	100
TB1 FM_THK	10	30,6	90,3%	47,9	97,3%	56,1	102,2%
	20	28,3	83,4%	48,2	98,0%	51,1	93,1%
	30	24,8	73,0%	39,6	80,6%	50,5	92,0%
	40	19,2	56,5%	34,9	71,0%	43,8	79,9%
	50	14,1	41,5%	28,0	57,0%	33,4	60,8%
TB1 FM_STUVA	10	36,5	97,1%	53,2	108,1%	57,7	105,1%
	20	35,7	82,7%	55,6	113,1%	52,2	95,0%
	30	30,3	69,3%	49,9	101,5%	47,7	86,9%
	40	27,9	53,5%	46,0	93,6%	46,4	84,5%
	50	19,4	57,3%	45,7	92,8%	42,3	77,0%
TB1 FM_FLASH	10	32,1	94,8%	42,0	85,3%	45,7	83,2%
	20	24,9	73,5%	34,5	70,1%	40,3	73,4%
	30	16,7	49,1%	27,6	56,1%	28,9	52,7%
	40	12,6	37,1%	18,8	38,2%	22,5	40,9%
	50	7,6	23,8%	14,1	33,6%	16,9	30,8%

Mit höheren Substitutionsraten ist eine mäßige Abnahme der Mörtelfestigkeit zu verzeichnen. Von den im Muffelofen temperierten Materialien zeigt das gröbere Material TB1 FM STUVA (Aufbereitung per Walzenbrecher) einen höheren Festigkeitsbeitrag als das feinere Material (Aufbereitung mit Mörsermühle/Pulverisette). Dieses Resultat steht im Kontrast zu Ergebnissen vorangegangener Studien [Gar22, Tol19], die einen Zusammenhang von hoher Mahlfineinheit des Ausgangsmaterials und Zunahme der Reaktivität dokumentieren. Womöglich kann die in dieser Studie festgestellte erhöhte Reaktivität bei nur grob (d.h. per Walzenbrecher auf eine Partikelgröße von 1-3 mm) gebrochenem calcinierten Rohmaterial mit der Entstehung eines sogenannter Keimbildungseffekts erklärt werden [Lud15], die eine Beschleunigung der Reaktion der Klinkerphasen bewirken kann [Trü19].

Das im Flash-Calcinator temperierte Material zeichnet sich durch Druckfestigkeiten aus, die bei allen Substitutionsraten und Prüfaltern generell unter denen des Referenzmaterials und auch unterhalb denen der im Muffelofen temperierten Materialien liegen. Dieses Verhalten kann auf eine zu kurze Verweildauer des Materials im Flash-Calcinator zurückgeführt werden [Beu17, Han22, Beu19].

II.1.4 AP 4 Bindemittelaktivierung

Neben der Untersuchung der Eignung von calcinierten Tonböden als teilweiser Zementersatz wurde auch die Möglichkeit einer alkalischen Aktivierung erforscht. Dabei wird der calcinierte Ton als

Geopolymerbindemittel ohne Zement verwendet. Um den notwendigen alkalischen Lösungsprozess für die Reaktion zu initiieren, können verschiedene Aktivatoren, also alkalische Lösungen, eingesetzt werden [Buc12]. Dieser Lösungsprozess löst dann die Reaktion des Bindemittels aus, wodurch die Reaktionsprodukte kondensieren können. Häufig verwendete Aktivatoren sind Natriumcarbonat (Na_2CO_3), Natriumhydroxid (NaOH), Natriumsilikate ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$) und Natriumsulfat (Na_2SO_4). Alternativ können auch entsprechende Kaliumverbindungen genutzt werden [Shi06]. Diese Aktivatoren haben unterschiedliche Reaktionsmechanismen: NaOH -Lösungen führen typischerweise zu einer stärkeren Auflösung, während KOH eine schnellere Geopolymerisation und in der Regel bessere mechanische Eigenschaften bewirkt. Zur Aktivierung von Tonmineralen sollten alkalische Lösungen mit einem pH-Wert von ≥ 14 verwendet werden. In weiteren Studien wurden Verhältnisse von Aktivator zu Bindemittel von bis zu 0,55 untersucht. Bei der Auswahl der Aktivatorsysteme sollten jedoch auch Nachhaltigkeitsaspekte berücksichtigt werden, da die CO_2 -Emissionen der Aktivatoren relativ hoch sein können und somit die spätere Nachhaltigkeitsbewertung des Betons maßgeblich beeinflussen [Buc12, Ada12].

Im Rahmen der Untersuchungen wurde die allgemeine Möglichkeit der Verwendung des calcinierten Tons aus Tunnelbaumaßnahmen – basierend auf den mechanischen Eigenschaften – im Mörtelmaßstab untersucht. Als potenzielles Anwendungsgebiet wurde ein Ringspaltmörtel für Tunnel mit Tübbingauskleidung identifiziert. Dies führte zu der Anforderung, dass die Geopolymermörtel eine Druckfestigkeit von $0,5 \text{ N/mm}^2$ nach einem Tag aufweisen sollten.

Tabelle 10: Mischungszusammensetzung der untersuchten Geopolymermörtel

Ausgangsstoff	Zugabemenge in g
CEN-Normsand	1350
Calciniertes Ton und Aktivator	450
Wasser	225

In der ersten Versuchsserie wurde die optimale Calciniertemperatur der tonhaltigen Böden bestimmt, um diese anschließend als Precursor, also als Ausgangsmaterialien, die durch chemische Reaktionen zur Bildung des Geopolymermörtels beitragen, zu verwenden. Diese kann aufgrund der abweichenden Aktivierungsmethode von der optimalen Calciniertemperatur zur Nutzung als anteiligen Zementersatz abweichen (vgl. Kapitel II.1.3). Die Proben des London Clay (TB3 LC) wurden bei $600 \text{ }^\circ\text{C}$, $700 \text{ }^\circ\text{C}$ und $800 \text{ }^\circ\text{C}$ und die Proben des Frankfurter Tons (TB1 FT) bei $600 \text{ }^\circ\text{C}$, sowie $800 \text{ }^\circ\text{C}$ entsprechend des in Kapitel II.1.2 erläuterten Vorgehens im Muffelofen calciniert. Analog zu den Untersuchungen zum anteiligen Zementersatz orientierten sich die anschließenden experimentellen Untersuchungen des calcinierten Materials an der DIN EN 196-1 [DIN16], wobei der Zement durch eine Kombination aus calciniertem Ton und Aktivator ersetzt wurde. In dieser ersten Versuchsserie wurde ein Kaliumsilikat als Aktivator in einer Dosierung von 10 M.-% des Gesamtbindemittelgehalts verwendet. Die Herstellung, Lagerung und Prüfung der Normprismen zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften erfolgte gemäß [DIN16]. Die Druckfestigkeit wurde in einem Probekörperalter von einem Tag geprüft. Die Mischungszusammensetzung ist in Tabelle 10 dargestellt. Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsuntersuchungen in einem Probenalter von einem Tag sind in Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 11: Druckfestigkeiten der Geopolymermörtel in einem Probenalter von 1 Tag in Abhängigkeit der Calciniertemperatur

Calciniertemperatur in °C	Druckfestigkeit im Probenalter von 1 Tag in N/mm ²	
	Frankfurter Ton	London Clay
600	1,21	0,42
700	Nicht bestimmt	0,06
800	0,68	Nicht messbar

Bei Verwendung des Frankfurter Tons, konnte bei einer Calciniertemperatur von 600 °C nach einem Tag eine Druckfestigkeit von 1,21 N/mm² bestimmt werden. Bei einer Calciniertemperatur von 800 °C verringerte sich die messbare Druckfestigkeit auf 0,68 N/m². Bei Verwendung des London Clay konnte ein vergleichbares Verhalten beobachtet werden. Hier sinkt die Druckfestigkeit in einem Probenalter von einem Tag ebenfalls mit zunehmender Calciniertemperatur, so dass sich bei einer Calciniertemperatur von 800 °C nach einem Tag keine messbare Druckfestigkeit ausbildete. Daher wurden alle weiteren Untersuchungen zur alkalischen Aktivierung mit Material durchgeführt, welches gemäß des in Kapitel II.1.2 dargestellten Vorgehens bei 600 °C calciniert wurde.

Im Rahmen der zweiten Versuchsserie wurde der geeignete Aktivator sowie Aktivatorgehalt zur alkalischen Aktivierung der calcinierten Tone herausgearbeitet. Als alkalische Aktivatoren wurden ein Natriumsilikat mit einem Mol-Verhältnis von Natriumoxid (Na₂O) zu Siliziumdioxid (SiO₂) von 1:1 und ein Kaliumsilikat (Betol K57 M) verwendet. Der Aktivatorgehalt wurde bei den Versuchsserien variiert und betrug 2 M.-%, 6 M.-%, 10 M.-%, 33 M.-% oder 36 M.-% bezogen auf den Gesamtbindemittelgehalt von 450 g Die Untersuchung einer Aktivatordosierung von 33 M.-% bzw. 36 M.-%, bezogen auf den Gesamtbindemittelgehalt, hat vorwiegend akademischen Charakter. Solch hohe Zugabemengen sind im Rahmen von Baumaßnahmen ökonomisch meist nicht umsetzbar. Die Herstellung, Lagerung und Prüfung der Normprismen zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften erfolgte analog zu den Untersuchungen der ersten Serie Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abbildung 14 dargestellt.

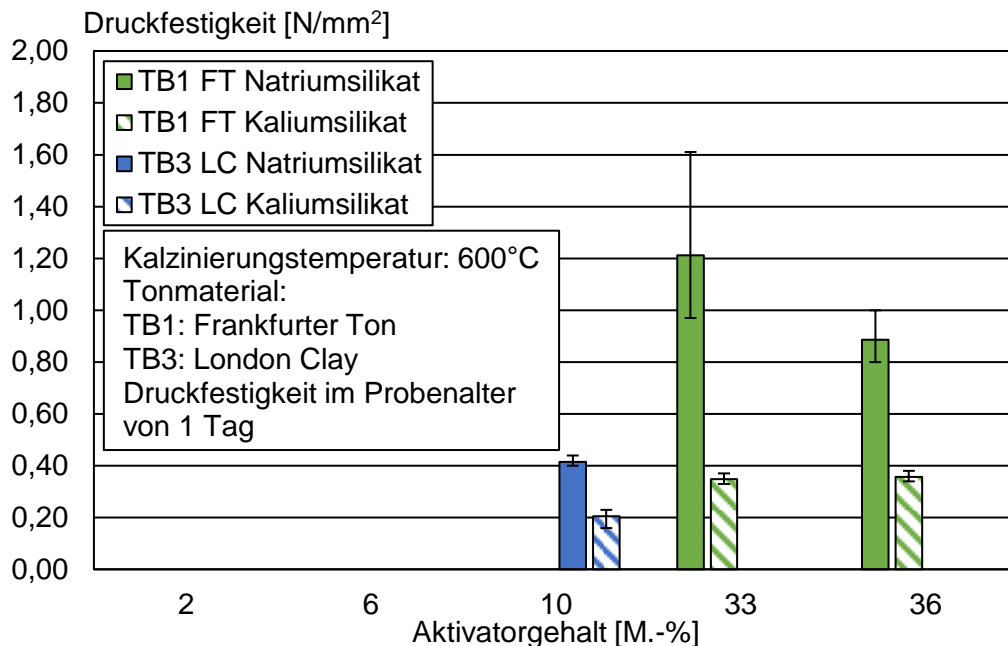


Abbildung 14: Druckfestigkeiten der untersuchten Geopolymermörtel in Abhängigkeit des Aktivatorgehalts in einem Probenalter von 1 Tag

Bei Aktivator dosierungen von 2 M.-% und 6 M.-% des Gesamtbindemittelgehalts bildeten sich unabhängig von der Art des Aktivators und des verwendeten calcinierten Tons keine messbaren Druckfestigkeiten aus. Bei Verwendung des calcinierten London Clay als Precursor konnten bei einem Aktivatorgehalt von 10 M.-% des Kaliumsilikat sowie des Natriumsilikat messbare Druckfestigkeiten generiert werden. Diese liegen jedoch mit rd. 0,4 N/mm² bei Verwendung des Natriumsilikat bzw. mit rd. 0,2 N/mm² bei Verwendung des Kaliumsilikat als Aktivator unterhalb der Anforderungen an einen Ringspaltmörtel. Hier wird jedoch schon erkennbar, dass sich Natriumsilikat tendenziell besser für die Ausbildung von Frühfestigkeiten der untersuchten Probe des London Clay eignet. Bei einer Erhöhung der Aktivator dosierung auf 33 M.-% bzw. 36 M.-% des Gesamtbindemittels können beim London Clay keine messbaren mechanischen Eigenschaften ermittelt werden. Dies könnte auf die gleichzeitige Reduzierung des Gehalts an calcinierten Ton zurückzuführen sein, die mit der Erhöhung des Aktivatorgehaltes einhergeht.

Bei der Verwendung des Frankfurter Tons als Precursor können die Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften eines Ringspaltmörtel teilweise erfüllt werden. Bei einer Dosierung von bis zu 10 M.-% der jeweiligen Aktivatoren bilden sich noch keine messbaren Druckfestigkeiten nach einem Tag aus. Bei einem Aktivatorgehalt von 33 M.-% und 36 M.-% des Gesamtbindemittels erreicht der Geopolymermörtel eine Druckfestigkeit von rd. 1,2 N/mm² bzw. rd. 0,9 N/mm², wenn Natriumsilikat als Aktivator verwendet wird. Hier resultiert eine Erhöhung des Aktivatorgehalts von 33 M.-% auf 36 M.-% in einer Reduzierung der Druckfestigkeit von rd. 0,3 N/mm², was mit der simultanen Reduktion des Gehaltes an calciniertem Ton begründet werden kann. Auch beim Frankfurter Ton deutet sich eine geringere Eignung des Kaliumsilikat als Aktivator im Vergleich zum Natriumsilikat an. Hier beträgt die Druckfestigkeit nach einem Tag rd. 0,35 N/mm² bei einer Aktivator dosierung von 33 M.-% bzw. 36 M.-% des Gesamtbindemittels.

In der dritten Versuchsserie wurde der Einfluss einer Zugabe von Kalksteinmehl (KSM) und/oder Gips auf die mechanischen Eigenschaften der Geopolymermörtel untersucht. Hierbei wurden 20 M.-% bzw. 40 M.-% des calcinierten Tons durch Kalksteinmehl substituiert. Gleichzeitig wurden Gipsgehalte von 2,5 M.-% und 5,0 M.-% bezogen auf den Gesamtbindemittelgehalt untersucht. Die Herstellung, Lagerung und Prüfung der Probekörper erfolgte analog zum Vorgehen der vorangegangenen Prüfserien. Die Ergebnisse dieser Versuchsserie sind in Abbildung 15 dargestellt.

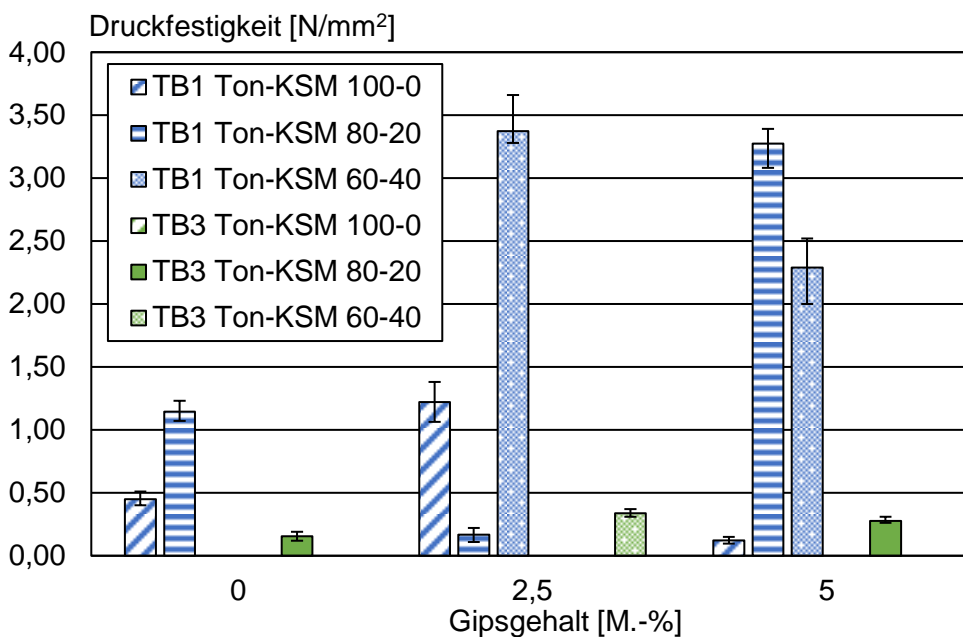


Abbildung 15: Druckfestigkeiten der Geopolymermörtel bei Zugabe von Gips und/oder Substitution des calcinierten Tons durch Kalksteinmehl

Bei der vollständigen Verwendung des London Clay als Precursor ("TB3 Ton-KSM 100-0"), führt auch eine Zugabe von Gips zu keinen messbaren Druckfestigkeiten in einem Probenalter von 1 Tag. Bei einer gleichzeitigen anteiligen Substitution des London Clay durch Kalksteinmehl kann eine minimale Verbesserung der mechanischen Eigenschaften beobachtet werden ("TB3 Ton-KSM 80-20" bzw. "TB3 Ton-KSM-60-40"). Die Werte liegen jedoch noch im Grenzbereich der messbaren Druckfestigkeiten, weshalb lediglich eine Tendenz des positiven Einflusses von Kalksteinmehl auf die Festigkeitseigenschaften festgestellt werden kann.

Bei Verwendung des Frankfurter Tons als Precursor sind hingegen deutlichen Einflüsse erkennbar. Ohne Substitution vom calcinierten Ton durch Kalksteinmehl („TB1 Ton-KSM 100-0“) resultiert ein Ersatz von 2,5 M.-% des Tones durch Gips zu einem Anstieg der Druckfestigkeit nach einem Tag auf ca. 1,2 N/mm². Eine weitere Erhöhung des Gipsgehaltes auf 5,0 M.-% führt jedoch zu keiner weiteren Verbesserung der mechanischen Eigenschaften, sondern zu einer Reduktion der Druckfestigkeit im Probenalter von einem Tag auf ca. 0,1 N/mm². Bei einer Substitution von 20 M.-% des calcinierten Tons durch Kalksteinmehl kann in der Regel eine weitere Verbesserung der Druckfestigkeit beobachtet werden. So beträgt die Druckfestigkeit im Probenalter von einem Tag ohne eine Zugabe von Gips ca. 1,1 N/mm², reduziert sich bei einer Zugabe von 2,5 M.-% Gips auf rd. 0,2 N/mm² und steigt bei einer Substitution von 5,0 M.-% des Tones durch Gips auf ca. 3,3 N/mm² an. Auch bei der

Substitution von insgesamt 40 M-% des calcinierten Tons durch Kalksteinmehl wird der positive Einfluss auf die Druckfestigkeit im Probenalter von einem Tag erkennbar. Bei einer gleichzeitigen Zugabe von 2,5 M.-% Gips bildet sich nach einem Tag eine Druckfestigkeit von ca. 3,4 N/mm² aus. Eine weitere Erhöhung des Gipsgehaltes führt jedoch zu keiner weiteren Verbesserung der Druckfestigkeitseigenschaften. Die Druckfestigkeit beträgt nach einer Aushärtungszeit von einem Tag bei dieser Bindemittelzusammensetzung ca. 2,3 N/mm².

Es konnte gezeigt werden, dass eine vollständige Verwendung des Tunnelausbruchsmaterial als Precursor zur Herstellung von Geopolymermörteln theoretisch und praktisch möglich ist. Hierdurch kann ein nennenswerter Beitrag zur Ressourcenschonung, sowie Nachhaltigkeit geleistet und somit eine signifikante Einsparung von CO₂-Emissionen bei den vorgesehenen Anwendungsfällen hervorgerufen werden. Im Zuge der Untersuchungen zur alkalischen Aktivierung konnten die z. T. stark unterschiedlichen Reaktionspotentiale aufgezeigt werden. Diese können jedoch nur bei einer sorgsam Abstimmung der Aktivatorzusammensetzung und -dosierung auf die jeweilige Precursor ausgeschöpft werden. Eine Zugabe von Kalksteinmehl und/oder Gips kann einen stimulierenden Effekt auf die Reaktion ausüben und somit eine Erhöhung der Druckfestigkeitseigenschaften im jungen Alter der Geopolymermörtel hervorrufen.

II.1.5 AP 5 Anwendungstechnisches Konzept

Als geeignetes Anwendungsfeld für die Entwicklung von Bindemitteln unter Verwendung von calcinierten Tonen können auf einer Tunnelbaustelle Ringspaltmassen im Zuge von maschinellem Tunnelbau angesehen werden. Dafür wurde als Anforderung an die Druckfestigkeit des Ringspaltmaterials ein Wert von 0,5 N/mm² festgelegt. Das Ziel ist die Steigerung der Ressourceneffizienz durch Aufbereitung eines tonhaltigen Tunnelausbruchsmaterials zu Geopolymer-Bindemittel als Ersatz für Zement. Einerseits entfällt der Verbrauch von Rohstoffen zur Zementherstellung, zusätzlich entfallen Transporte und Beanspruchung von Entsorgungsmöglichkeiten durch direkte Verwertung des Ausbruchsmaterials auf der Baustelle. Neben dem Aspekt der Ressourcenschonung wirkt sich die Aufbereitung von Tonböden als Bindemittel zur Substitution von Zement positiv auf die CO₂-Bilanz aus, da der unumgängliche Entsäuerungsprozess des Kalksteins bei der Zementherstellung bei der thermischen Behandlung von Tonmineralen zu Geopolymer-Bindemitteln aufgrund unterschiedlicher chemischer Prozesse entfällt. Ebenso ist darauf zu achten, dass diese Überlegungen bei Bodenmassenentsorgungs- und Bodenaufbereitungskonzepten bereits in der Planungsphase frühzeitig mit einzubeziehen sind. Bodenaufbereitungskonzepte zur Aufbereitung des tonhaltigen Ausbruchsmaterials und deren Inhalte (vgl. Abbildung 16) sind vorzusehen und zeitlich bestenfalls in der Vorplanungsphase anzusiedeln, müssen aber auf jeden Fall aufgrund der Genehmigungspflicht der Aufbereitungsmaßnahmen in ein Planfeststellungsverfahren mit einfließen.

Inhalte Bodenaufbereitungskonzept

- Anlagentechnik
- Logistik (Flächenbedarf Zwischenlager, Transport Aufbereitungsmassen, etc.)
- Ökologische Aspekte (Ressourceneinsparung, Emissionseinsparung)
- Produktionskosten Ton-Bindemittel auf der Baustelle
- Investitionskosten Anlagentechnik

Abbildung 16: Inhalte eines Bodenaufbereitungskonzeptes

Die wichtigsten Akteure zur Aufstellung eines Bodenaufbereitungskonzeptes feinkörniger Böden sind der Auftraggeber als in der Regel Verantwortliche für die Entsorgungsmöglichkeiten, der Objektplaner des Ingenieurbauwerkes und ein für das Projekt miteinander verbundener Anlagenplaner vor allem für die Planung der Anlagen zur thermischen Aufbereitung des tonhaltigen Ausbruchmaterials zum Geopolymer-Bindemittel. Abbildung 17 zeigt die Akteure und Schnittstellen für eine Aufbereitung sowie die zugrundeliegenden Gesetze über die Leistungsphasen.

<u>Akteure</u>	<u>LPH</u>	<u>Gesetze</u>
▪ Bauherr / AG	(1-9)	▪ Kreislaufwirtschaftsgesetz
▪ Bauunternehmen / AN	(8)	▪ BundesImmissions- schutzgesetz
▪ Annahmestelle Boden / Deponie	(ab 2)	▪ 4. BundesImmissionsSchV
▪ Genehmigungsbehörde Aufbereitung	(ab 3)	▪ Laga / ErsatzbaustoffV
▪ Abfallbehörde	(ab 2)	▪ Planfeststellungsbeschluss
▪ Baugrundgutachter	(ab 2)	▪ Bundesbodenschutzgesetz
▪ OP-Planer Ingenieurbau	(1-8)	
▪ Anlagenplaner	(2-8)	

Abbildung 17: Akteure und Gesetze Bodenaufbereitung

Das anwendungstechnische Konzept für die Aufbereitung von Tonböden wird beispielhaft für einen Tunnel mit einem Außendurchmesser der Tübbingröhre von 10 m, einer Ringspaltbreite von 20 cm und einer Tunnellänge von 2.000 m (Abbildung 18) vorgestellt. Aus den Randbedingungen ergeben sich ca. 13.000 m³ benötigtes Ringspaltmaterial, für das der Bindemittelanteil aus dem tonhaltigen Ausbruchmaterial durch Aufbereitung direkt auf der Baustelle hergestellt werden sollte.

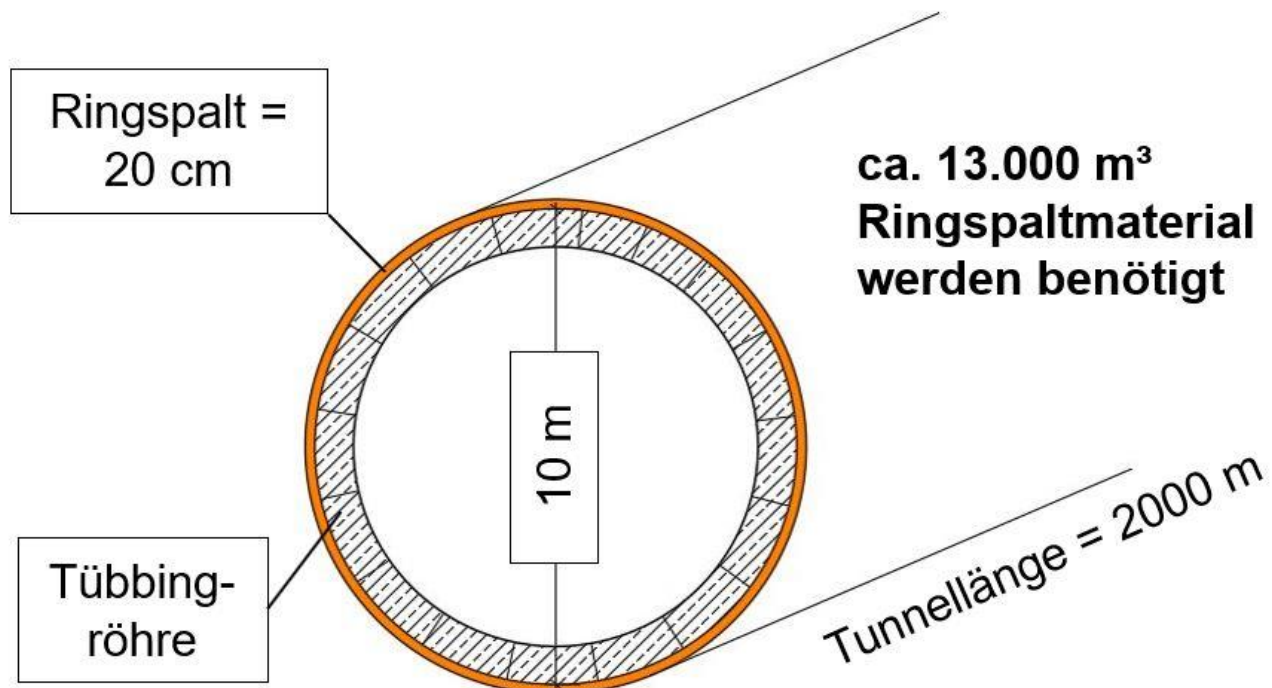


Abbildung 18: benötigte Mengen an Ringspaltmaterial für einen Beispieltunnel [Lie23]

Die Rezeptur des Ringspaltmaterials wird üblicherweise projektspezifisch festgelegt. Im Rahmen der Betrachtung der möglichen CO₂-Einsparung wurde die Zusammensetzung eines s. g. TOFFEE-Ringspaltmörtel berücksichtigt, dessen Zusammensetzung an [DIN16] angelehnt war. Dieser besteht aus ca. 270 kg trockenen calcinierten Ton pro m³ Ringspaltmörtel (vgl. Tabelle 13). Aufgrund des Wassergehalts des ursprünglichen Bodens und der verfahrensbedingten Trocknung des Materials kann die erforderliche Masse des erforderlichen Ausbruchsmaterials ca. 50 % höher liegen. Unter der Annahme einer Vortriebsgeschwindigkeit von 10 m pro Tag und damit einer Verfüllung des Ringspaltes von 10 m pro Tag sind im betrachteten Fall so ca. 30 Tonnen tonhaltiges Ausbruchsmaterial pro Tag zur Aufbereitung als Bindemittel erforderlich.

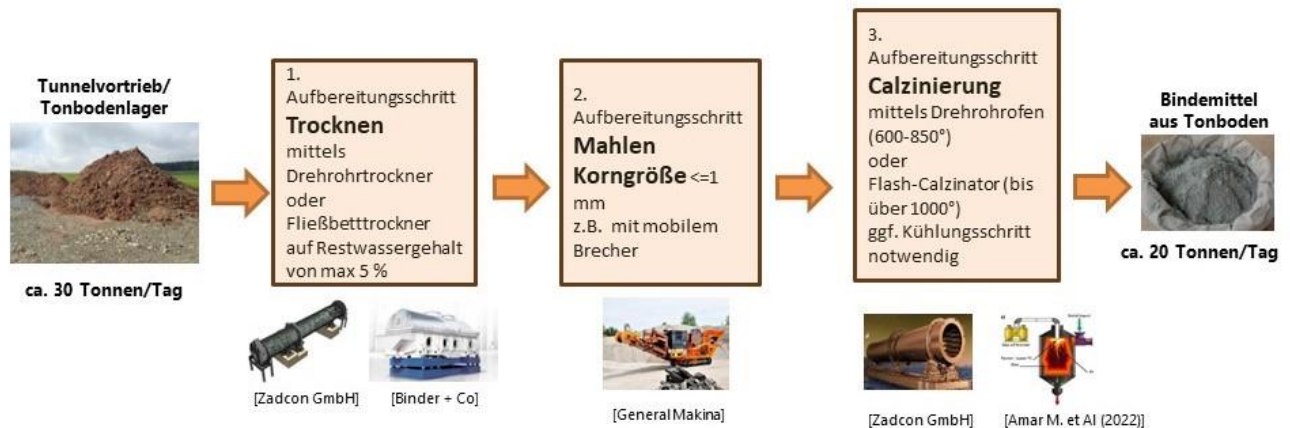


Abbildung 19: Flowchart Aufbereitungsschritte, Variante Calcinierung im Drehrohrofen oder Flash-Calzinator [ZAD23, Bin23, GM23, Ama23, Pix23, sto23]

Abbildung 19 und Abbildung 20 zeigen im Flowchart die notwendigen Aufbereitungsschritte für eine Calcinierung mittels Drehrohrofen oder Flash-Calzinator sowie für eine Kombinationsmühle, in der Mahlung und Calcinierung in einem Schritt in der Mühle erfolgen und somit der zusätzliche Aufbereitungsschritt der Mahlung entfällt (vgl. auch Abschnitt II.1.2.3).



Abbildung 20: Flowchart Aufbereitungsschritte, Variante Calcinierung in einer Kombinationsmühle (Mahlen und Calzinieren in einem Aufbereitungsschritt) [ZAD23, Bin23, Pet23b, Pix23, sto23]

Alle hier notwendigen Aufbereitungsschritte, also Trocknung, Mahlung und Calcinierung, sind nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz genehmigungspflichtig. Dies ist schon in frühen Planungsphasen zu berücksichtigen.

Logistisch ist es am sinnvollsten, die Ausbruchmassen, die für die Aufbereitung zu Ringspaltmaterialbindemittel benötigt werden, direkt auf der Baustelle zu belassen und nicht zuerst extern zu lagern und für eine Beprobung und Aufbereitung wieder auf die Baustelle zurückzufahren. Dies spart Zeit, Treibstoff und Transportemissionen ein. Hierzu müssen, falls verfügbar, Lagerflächen berücksichtigt werden. Eine Variante für den Beispieeltunnel bei Vorhaltung von ca. 150 m³

Ausbruchsmaterial zur weiteren Aufbereitung ergibt beispielsweise einen Flächenbedarf von ca. 400 m² Lagerfläche auf 4 Einzelflächen von ca. jeweils 100 m² (Abbildung 21), die für Beprobung des Ausbruchsmaterials, Lagerung nach der Trocknung und Lagerung nach der Mahlung bei der Planung von BE-Flächen zu berücksichtigen wären. Je nach Konzipierung ist zusätzlich der erforderliche Platz für die Aufbereitungsanlage einzuplanen.

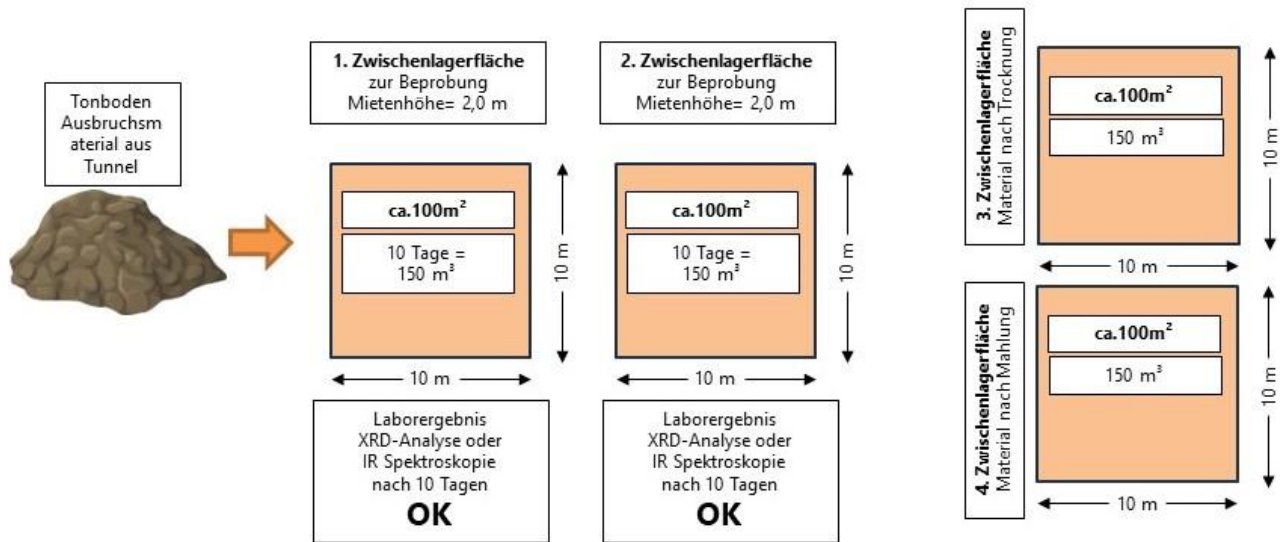


Abbildung 21: Variante Flächenbedarf mit 4 Zwischenlagern für das Aufbereitungsmaterial für den Beispieltunnel

Der eigentliche Energiebedarf ist für die Calcinierung von tonhaltigem Aufbereitungsmaterial bei ca. 650°C geringer und damit günstiger als die für das Zementklinkerbrennen benötigten ca. 1450°C. Der Gesamtenergiebedarf zur Calcinierung von Tonböden mittels Brennstoffs und Strom wird mit ca. 1.500-2.000 kJ/kg Tonboden abgeschätzt [UBÖ19]. Die deutsche Zementindustrie gibt für den Brennstoff- und Stromverbrauch zur Herstellung von Zement Werte um ca. 3.000 kJ/kg an [EEA13].

Auch wenn sich die thermische Aufbereitung von Tonböden im Vergleich zur Zementherstellung als energetisch günstig erweist, zeigt sich aus wirtschaftlicher Sicht für die hier konzipierte Aufbereitungsanlage von Tonböden zum Einsatz als Bindemittel und damit zum Ersatz von angeliefertem Zement, dass ein Downscaling auf Baustellenmaßstab im Vergleich zu großen industriellen Zementanlagen ggf. an seine Grenzen stößt, da z. B. größere Wärmeverluste nach außen zu erhöhtem Energiebedarf beim Betreiben der temporären Baustellenaufbereitungsanlage in Relation zu Großanlagen führen können. Zudem sind die Herstellungskosten stark abhängig von den Umsatzmengen. Für die relativ kleinen benötigten Mengen Bindemittel des Ringspaltmaterials sind neben Kosten für Brennstoffen und Strom u. a. auch noch Personalkosten zum Betrieb der Anlage enthalten, die die Produktionskosten gegenüber industriell betriebenen Anlagen mit erheblich größeren Durchsatzmassen erhöhen.

Dennoch schont die Substitution von auf die Baustelle zu lieferndem Zement durch Geopolymer-Bindemittel aus aufbereitetem Ausbruchsmaterial nicht nur Ressourcen, sondern wirkt sich auch CO₂ emissionsmindernd aus.

In der nachfolgenden Betrachtung wurden die CO₂-Auswirkung einer Rezeptur eines durchschnitts 2K-Ringspaltmaterials mit CEM I Zement [Emissionsfaktoren und Massen in Anlehnung an Lie21] mit der „TOFFEE-Ringspaltmaterial“-Rezeptur mit calcinierten Tonen und einem Aktivator auf Wasserglasbasis als Verfestigungskomponente verglichen. Die genutzten Rezepturen sind in Tabelle 12 und Tabelle 13 aufgeführt.

Tabelle 12: Rezeptur und Treibhauspotential von durchschnitts 2-K Ringspaltmaterial mit Zement (CEM I) [in Anlehnung an Lie21]

Funktion	Bestandteil	Masse		% von Gesamtmasse	
Bindemittel	CEM I	290	[kg/m ³]	24	%
Pumpfähigkeit/ Stabilität	Bentonit ohne Wasser	2,7	[kg/m ³]	0,2	%
Pumpfähigkeit/ Stabilität	Bentonitsuspension	45	[kg/m ³]	4	%
Aktivator Beschleunigung Zementerhärtung	Aktivator auf Wasserglasbasis	95	[kg/m ³]	8	%
Pumpfähigkeit	Verzögerer	3	[kg/m ³]	0,2	%
Hydratation CEM I / Pumpfähigkeit	Wasser	800	[kg/m ³]	65	%

Emissionsfaktor GWP [kg CO ₂ Äq/t]	Quelle	Treibhauspotential GWP [kg CO ₂ Äq/m ³]
923,084	GEMIS	268
453,5	Gemis	1
/		/
951	EPD	90
1310		4
Wasser nicht bilanziert		Wasser nicht bilanziert
SUMME		363

Das 2K-Ringspaltmaterial weist ein Treibhauspotential von 363 kg CO₂Äq/m³ auf, während das TOFFEE-Ringspaltmaterial ein Treibhauspotential von 277 kg CO₂Äq/m³ aufweist. Der Vergleich zeigt, dass bereits auf Basis erster Untersuchungen ein CO₂-Einsparpotential von ca. 25 % möglich ist.

Tabelle 13: Rezeptur und Treibhauspotential von TOFFEE-Ringspaltmaterial

Funktion	Bestandteil	Masse		% von Gesamtmasse	
Bindemittel	Kalziniertes Tonboden	276	[kg/m ³]	12	%
Zuschlag 2-8 mm	Sand/Kies	1541	[kg/m ³]	67	%
Aktivator für Calzinierung Tonboden	Aktivator auf Wasserglasbasis	230	[kg/m ³]	10	%
Pumpfähigkeit	Wasser	253	[kg/m ³]	11	%

Emissionsfaktor GWP [kg CO ₂ Äq/t]	Quelle	Treibhauspotential GWP [kg CO ₂ Äq/m ³]
200	VDZ; Hanein et al.	55
2,05	GaBi	3
951	EPD	219
Wasser nicht bilanziert		Wasser nicht bilanziert
SUMME		277

Besonders positiv ist das Verhältnis der Bindemittel, dass für das TOFFEE-Geopolymer-Bindemittel mit ca. 60 kg CO₂Äq/m³ Ringspaltmaterial im Vergleich zum CEM I-Zement mit seinen ca. 270 kg CO₂Äq/m³ signifikant günstiger ausfällt. Deutlich sichtbar wird hier jedoch auch noch der bisher relativ große Einfluss der Aktivator-Komponente, die durch ihren hohen Massenanteil beim TOFFEE-Bindemittel noch stark ins Gewicht fällt. Hier ist weiteres Optimierungspotential beim TOFFEE-Ringspaltmaterial vorhanden.

II.1.6 AP 6 Ergebnisverbreitung

Im Rahmen des Projekts wurden mehrere wesentliche Aufgaben erfolgreich umgesetzt, die sowohl die Öffentlichkeitsarbeit als auch die wissenschaftliche Verbreitung der Projektergebnisse umfassten. Ein wichtiger Schwerpunkt lag auf der Öffentlichkeitsarbeit, wobei Teilergebnisse des Projekts sorgfältig aufbereitet und in Form von Projektflyern und Postern präsentiert wurden. Darüber hinaus wurde eine Projekt-Homepage erstellt (www.toffee.stuva.de), um aktuelle Informationen bereitzustellen und die breite Öffentlichkeit sowie spezifische Zielgruppen über Fortschritte und Ergebnisse zu informieren.

Ein weiterer zentraler Aspekt des Projekts war die Organisation, Durchführung und Nachbereitung eines Workshops zum Thema „Verwertung von Tunnelausbruchmaterial – Kreislaufwirtschaft, Ressourceneffizienz, Nachhaltige Innovationen“, welcher erfolgreich am 17.01.2024 in Köln durchgeführt wurde. Dieser Workshop bot eine Plattform für den intensiven Austausch zwischen Wissenschaftlern, Industrievertretern und anderen Interessengruppen, um die Nutzung alternativer Rohstoffe zu fördern und innovative Ansätze zu diskutieren.

Neben diesen Aktivitäten wurden die wissenschaftlichen Erkenntnisse des Projekts durch die Veröffentlichung von Fachaufsätzen in renommierten Fachzeitschriften verbreitet (vgl. Abschnitt II.6). Diese Publikationen dienen dazu, die Forschungsergebnisse zu dokumentieren und einer breiten wissenschaftlichen Gemeinschaft zugänglich zu machen. Ergänzend dazu wurden die Ergebnisse auf verschiedenen nationalen und internationalen Konferenzen vorgestellt, um den Austausch mit anderen Forschern zu fördern und die Diskussion über die Projektthemen auf einem hohen wissenschaftlichen Niveau zu führen. All diese Maßnahmen trugen dazu bei, das Wissen über alternative Rohstoffe und ressourceneffiziente Baustoffe zu verbreiten und die Relevanz des Projekts zu verdeutlichen.

II.1.7 AP 7 Projektmanagement

Im Verlauf des Projekts wurden kontinuierlich und projektbegleitend mehrere entscheidende Aufgaben durchgeführt, die maßgeblich zum Erfolg der gesamten Initiative beigetragen haben. Der Grundstein dafür wurde bereits zum Projektstart am 22. Februar 2022 gelegt, als eine Kick-off-Besprechung durchgeführt wurde. In dieser Sitzung wurde festgelegt, dass jeweils am ersten Dienstag im Monat ein Jour-Fixe als Videokonferenz stattfinden soll, bei dem die Ergebnisse protokolliert werden. Diese regelmäßigen Abstimmungstermine wurden konsequent eingehalten und ermöglichten eine kontinuierliche und enge Koordination zwischen den Projektpartnern und dem Projektträger. Zusätzlich fanden am 10. August 2022 bei der MC-Bauchemie, am 13. Dezember 2022 bei der STUVA und am 22. März bei der TH Köln, weitere Arbeitstreffen statt, die die Zusammenarbeit intensivierten und spezifische Themen vertieften. Am 17.01.2024 konnte im Rahmen des Workshops mit dem Thema „Verwertung von Tunnelausbruchmaterial – Kreislaufwirtschaft, Ressourceneffizienz, Nachhaltige Innovationen“ das weitere Vorgehen und die Verbreitung der Ergebnisse besprochen werden.

Parallel dazu wurde die Projektdokumentation kontinuierlich gepflegt, um eine lückenlose und transparente Nachverfolgbarkeit der Fortschritte und Ergebnisse zu gewährleisten. Diese

Dokumentation diene nicht nur als Nachweis für den Projektverlauf, sondern ermöglichte auch eine fortlaufende Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich der Erreichung der gesetzten Ziele. Durch diese regelmäßige Überprüfung konnten Erfolge sichtbar gemacht und potenzielle Abweichungen frühzeitig erkannt und adressiert werden.

Ein integraler Bestandteil des Projektmanagements war zudem das Qualitäts- und Risikomanagement, das kontinuierlich durchgeführt wurde, um die hohe Qualität der Ergebnisse sicherzustellen und Risiken frühzeitig zu identifizieren und zu mitigieren. Im Rahmen dieses Prozesses wurden auch Ausweichpläne erstellt, die es ermöglichten, schnell auf unerwartete Herausforderungen zu reagieren und den Projektverlauf ohne größere Verzögerungen oder Qualitätsverluste fortzusetzen. Dieses proaktive Management trug entscheidend dazu bei, die Projektziele erfolgreich zu erreichen und die Nachhaltigkeit der Ergebnisse sicherzustellen.

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Zuwendungen wurden entsprechend der im Projektantrag definierten Ziele eingesetzt. Vorrangig dienten die Mittel zur Finanzierung des wissenschaftlichen und technischen Personals, welches zur Bearbeitung der dargestellten Fragestellungen eingesetzt wurde. Der detaillierte zahlenmäßige Nachweis wurde separat übermittelt.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten waren notwendig und angemessen, da sie bedeutende wissenschaftlich-technische Herausforderungen adressierten. Insbesondere die Aktivierung von Bindemitteln und die Bestimmung ihrer Reaktivität waren essenziell, um fundiertes theoretisches und anwendungsbezogenes Wissen zu generieren. Diese Erkenntnisse sind unerlässlich für die erfolgreiche Einführung und Vermarktung von Ingenieurdienstleistungen und bauchemischen Produkten, die auf der Aktivierung von tonhaltigen Böden basieren, sowohl mit als auch ohne thermische Vorbehandlung (Calcinierung). Die gewonnenen Ergebnisse bieten eine solide Grundlage für die tatsächliche Realisierbarkeit und Wirkungsweise dieser Technologien und minimieren Planungsrisiken erheblich.

Darüber hinaus war die zielgerichtete Entwicklung ganzheitlicher Ansätze für die Bodenaufbereitung und das anwendungstechnische Konzept, einschließlich der zugehörigen Prozessdatenanalyse, von entscheidender Bedeutung. Die qualitative und quantitative Festlegung praxisrelevanter Ausgangsgrößen und Zielparameter stellte eine komplexe Aufgabe dar, die aus internen Ressourcen allein nicht adäquat hätte bewältigt werden können. Insbesondere bei großen Bauprojekten mit erheblichen Bodenaushubmassen, wie Tunnelbauprojekten, waren umfassende Anpassungen an individuelle Randbedingungen erforderlich, beispielsweise in Bezug auf Transportlogistik und Zwischenlagerkapazitäten. Die universelle Ausrichtung der entwickelten Ansätze gewährleistet deren effiziente und breite Anwendbarkeit in der Praxis, was eine ganzheitliche Betrachtung und Umsetzung notwendig machte.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Aktuell erarbeitet der Deutsche Ausschuss für Unterirdisches Bauen (DAUB) eine Empfehlung zur Verwertung von Tunnelausbruchmaterial (vgl. Kubick, W.; Rosenthal, A. (2024) DAUB-Empfehlung: Verwertung von Tunnelausbruchmaterial. Vortrag auf dem Kölner Tunnelbautag.). In dem Arbeitskreis zur Erstellung dieser Empfehlung sind auch Prof. Dr. C. Budach seitens der TH Köln und Dr. C. Thienert seitens der STUVA, die beide auch im Forschungsprojekt TOFFEE eingebunden sind, aktive Mitglieder. Erkenntnisse aus dem Forschungsvorhaben TOFFEE konnten so in die oben aufgeführte Empfehlung aufgenommen werden. Die Empfehlung zur Verwertung von Tunnelausbruchmaterial soll im Sommer 2024 erscheinen.

II.5 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens

Es sind keine Fortschritte von dritter Seite bekannt geworden, die für die Durchführung des Projektes relevant sind.

II.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

- Budach, C., Müller, P., Siebert, B., Thienert, C., Leismann, F., Heiermann, T., Uebachs, S., Liepins, S., Schmidt, L., Uhlmann, D., Kleen, E., Koppe, K., Volhard, M.-F. (2023): Reduktion von Primärbaustoffen durch Einsatz von Aushubmaterial aus dem - maschinellen Tunnelbau. Tagungsband "Vorträge der Fachsektionstage Geotechnik - Interdisziplinäres Forum 2023, Congress Centrum Würzburg, 12. - 13. September 2023
- Müller, P., Budach, C., Siebert, B. (2023): Reusability potential of selected soil types as supplementary cementitious material: Case studies with particular regard to tunnel excavation material. SGI-Congress "The Geoscience paradigm: resources, risk and future perspectives", Potenza, Italien, 19. - 21. September 2023
- Deutscher Austausch für Unterirdisches Bauen e.V. (DAUB) (2024): Empfehlung zur Verwertung von Tunnelausbruchmaterial (im Druck) - unter Mitwirkung von Prof. Dr. C. Budach (TH Köln) und Dr. C. Thienert (STUVA).
- Siebert, B., Budach, C., Müller, P., Heiermann, T., Uebachs, S. (2024): Calcination of tunnel excavation material and use as supplementary cementitious material in concrete. 78th RILEM Annual Week & RILEM Conference on Sustainable Materials & Structures: Meeting the major challenges of the 21st century - SMS 2024 (im Druck)
- Budach, C., Müller, P., Siebert, B., Thienert, C., Leismann, F., Uebachs, S., Heiermann, T., Liepins, S., Uhlmann, D. (2024): Verwertung von Ausbruchmaterial aus dem maschinellen Tunnelbau durch Calcinierung von tonhaltigen Böden – Ergebnisse des Forschungsvorhabens TOFFEE. Tunnelbau Taschenbuch 2024 (im Druck)

- Siebert, B., Uebachs, S. (2024): Feinkörniges Tunnelaushubmaterial als Basis zur Calcinierung und nachhaltigen Nutzung als Bindemittel: Erkenntnisse aus dem Forschungsvorhaben "TOFFEE". Vortrag auf dem 1. Kölner Tunnelbautag
- Budach, C. Klaproth, C. (2024): Verwertung von Ausbruchmaterial beim Schildvortrieb – Randbedingungen und geotechnische Grundlagen. STUVA-Workshop Köln, Januar 2024
- Kleen, E., Siebert, B., Heiermann, T. (2024): Baustoffe auf Basis von tonhaltigem Bodenmaterial – Ergebnisse des FuE-Projekts TOFFEE. STUVA-Workshop Köln, Januar 2024
- Liepins, S. (2024): Nachhaltigkeitsinnovationen aus Sicht eines Planers am Beispiel der Tonbodenaufbereitung zum Einsatz als Geopolymer-Bindemittel für Ringspaltverfüllmaterial. STUVA-Workshop Köln, Januar 2024
- Thienert, C., Leismann, F., Handke, D., Liepins, S., Kleen, E., Uhlmann, D., Budach, C., Müller, P., Siebert, B., Uebachs, S., Heiermann, T.: Resource-efficiency in TBM tunnelling: Utilisation of calcined clay as a binder and additive for annular gap grout, World Tunnel Congress, Stockholm, Schweden, 09.-15. Mai 2024

II.7 Literatur

- [Ada12] Adam, A. A.: The effects of water to solid ratio, activator to binder ratio, and lime proportion on the compressive strength of ambient-cured geopolymer concrete. *Journal of the Civil Engineering Forum*, 5(2), 161. <https://doi.org/10.22146/jcef.43878>
- [Ama23] Amar, M., Benzerzour, M.; Abriak, N.-E. (2022) Designing Efficient Flash-Calcined Sediment-Based Ecobinders, materials
- [Alu15] Alujas, A., Fernández, R., Quintana, R., Scrivener, K. L., & Martirena, F. (2015). Pozzolanic reactivity of low grade kaolinitic clays: Influence of calcination temperature and impact of calcination products on OPC hydration. *Applied Clay Science*, 108, 94-101
- [Beu17] Beuntner, N. 2017. Zur Eignung und Wirkungsweise calcinierter Tone als reaktive Bindemittelkomponente im Zement. Dissertation. Bundeswehr Universität München
- [Beu19] Beuntner, N., Sposito, R., & Thienel, K. C. (2019). Potential of calcined mixed-layer clays as pozzolans in concrete. *ACI Materials Journal*, 116(4), 19-29
- [Bin23] Binder + Co AG (2023)
- [Buc12] Buchwald, A.: Der Einfluss des Kalziums auf die Kondensation von (Alumo-)Silikaten in alkali-aktivierten Bindern. Habilitation, Weimar, 2012
- [Bud24] Budach, C. Klaproth, C. (2024): Verwertung von Ausbruchmaterial beim Schildvortrieb – Randbedingungen und geotechnische Grundlagen. STUVA-Workshop Köln, Januar 2024
- [DIN02] DIN 18128:2002-12, Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung des Glühverlustes.
- [DIN12a] DIN 18132:2012-04, Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte - Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens.
- [DIN12b] DIN EN 450-1:2012-10, Flugasche für Beton - Teil 1: Definition, Anforderungen und Konformitätskriterien; Deutsche Fassung EN 450-1:2012

- [DIN15] DIN EN ISO 17892-1:2015-03, Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 1: Bestimmung des Wassergehalts (ISO 17892-1:2014); Deutsche Fassung EN ISO 17892-1:2014
- [DIN16] DIN EN 196-1:2016-11, Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit; Deutsche Fassung EN 196-1:2016
- [DIN17a] DIN EN ISO 17892-4:2017-4, Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 4: Bestimmung der Korngrößenverteilung (ISO 17892-4:2016); Deutsche Fassung EN ISO 17892-4:2016
- [DIN17b] DIN EN ISO 17892-6:2017-07, Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 6: Fallkegelversuch (ISO 17892-6:2017); Deutsche Fassung EN ISO 17892-6:2017
- [DIN18] DIN EN ISO 17892-12:2018-10, Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 12: Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenzen (ISO 17892-12:2018); Deutsche Fassung EN ISO 17892-12:2018
- [DIN22] DIN EN 1097-7:2022-12, Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 7: Bestimmung der Rohdichte von Füllern - Pyknometer-Verfahren; Deutsche Fassung EN 1097-7:2022
- [DIN23] DIN 18196:2023-02: Erd- und Grundbau - Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke
- [Dyc23] Dyckerhoff - CEDUR Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH). Überarbeitet am: 14.07.2023
- [EEA13] Energy Environment Forecast Analysis (2013) Wettbewerbsfähige Stromkosten-Voraussetzung für die Zementherstellung am Standort Deutschland
- [Gar22] Garces-Vargas, J. F., Díaz-Cardenas, Y., Zunino, F., Ribalta-Quesada, J., Scrivener, K., & Martirena, F. (2022). The Challenge of Grinding Ternary Blends Containing Calcined Clays and Limestone. *Minerals*, 12(9), 1170
- [GM23] General Makina (2023), Webseite, <https://www.general-makina.com.tr/tr/home>, Zugriff am 09.03.2024
- [Han22] Hanein, T., Thienel, K.C., Zunino, F., Marsh, A.T., Maier, M., Wang, B., Canut, M., Juenger, M.C., Ben Haha, M., Avet, F. & Parashar, A., 2022. Clay calcination technology: state-of-the-art review by the RILEM TC 282-CCL. *Materials and Structures*, 55(1), p.3
- [Hay23] Hay, R., & Celik, K. (2023). Performance enhancement and characterization of limestone calcined clay cement (LC3) produced with low-reactivity kaolinitic clay. *Construction and Building Materials*, 392, 131831
- [IZB] Zement-Merkblatt B20: Zusammensetzung von Normalbeton – Mischungsberechnung. InformationsZentrum Beton GmbH
- [Jas20] Jaskulski, R., Jóźwiak-Niedźwiedzka, D., & Yakymchko, Y. (2020). Calcined clay as supplementary cementitious Material. *Materials*, 13(21), 4734
- [Lie21] Liepins, S. (2021): Ökobilanz unterschiedlicher Ringspaltmaterialien im maschinellen Tunnelbau als Grundlage zur Verringerung von Umweltwirkungen. Diplom, Universität Koblenz-Landau
- [Lie23] Liepins et al., (2023): CO₂-Reduktionspotential bei Materialien zur Ringspaltverpressung: Vergleich verschiedener Materialien, Hauptverursacher für CO₂, Ökobilanzen und Ranking. STUVA-Tagung

- [Lud15] Ludwig, H.M. and (Zhang, W., 2015). Research review of cement clinker chemistry. *Cement and Concrete Research*, 78, pp.24-37
- [Nai20] Nair, N., Haneefa, K. M., Santhanam, M., & Gettu, R. (2020). A study on fresh properties of limestone calcined clay blended cementitious systems. *Construction and Building Materials*, 254, 119326.
- [Ove24] Overmann, S., Vollpracht, A., & Matschei, T. (2024). Reactivity of Calcined Clays as SCM—A Review. *Materials*, 17(2), 312
- [Pet23a] Claudius Peters Technologies, „Gypsum Technik – We know how“, Issue 3, Brochure, 2023
- [Pet23b] Claudius Peters Group GmbH (2023): Horizontal Impact Calciner, Firmenbroschüre
- [Pix23] Pixabay.com (2023)
- [Shi06] Shi, C.; Krivenko, P. V.; Della Roy: Alkali-activated cements and concrete. Taylor & Francis, London, 2006
- [Scr18a] Scrivener, K., Martirena, F., Bishnoi, S. & Maity, S., 2018. Calcined clay limestone cements (LC3). *Cement and concrete research*, 114, pp.49-56
- [Scr18b] Scrivener, K., Avet, F., Maraghechi, H., Zunino, F., Ston, J., Hanpongpun, W. and Favier, A., 2018. Impacting factors and properties of limestone calcined clay cements (LC3). *Green Materials*, 7(1), pp.3-14
- [sto23] stock.adobe.com (2023)
- [Thi20] Thienert, C., Breitsprecher, G., & Budach, C. (2020). Verwertung von Ausbruchmaterial bei maschinellen Tunnelvortrieben im Lockergestein. *Taschenbuch für den Tunnelbau 2021: Kompendium der Tunnelbautechnologie Planungshilfe für den Tunnelbau*, 203-227
- [Tol19] Tole, I., Habermehl-Cwirzen, K., & Cwirzen, A. (2019). Mechanochemical activation of natural clay minerals: an alternative to produce sustainable cementitious binders—review. *Mineralogy and Petrology*, 113, 449-462
- [Trü19] Trümer, A. (2019) Calcinierte Tone als Puzzolane der Zukunft – Von den Rohstoffen bis zur Wirkung im Beton. Dissertation. Bauhaus-Universität Weimar
- [UBÖ19] Umweltbundesamt Österreich (2019) Stand der Technik zur Kalk-, Gips-, und Magnesiaherstellung
- [ZAD23] ZADCON GmbH (2023) Drehrohtrockner/Drehrohrofen, <https://www.zadcon.de/de/products.html#drehrohtrockner>, Zugriff am 09.03.2024