

Optimierung von Spritzbeton durch calcinierten Ton

Dipl.-Ing. Nancy Beuntner*

M.Sc. Olt Sebastian Lange**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karl-Christian Thienel*

* Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Universität der Bundeswehr München

** Bundesamt für Infrastruktur, Umwelt und Dienstleistungen der Bundeswehr,
Kompetenzzentrum Baumanagement München

Zusammenfassung

Calcinierte Tone sind eine technisch und ökologisch interessante Alternative als Beton-zusatzstoff. Der Beitrag beleuchtet den Hintergrund für die Suche nach derartigen Alternativen. Am Beispiel eines großtechnisch calcinierten Tons werden die Eigenschaften des Materials und dessen Wirkung im Spritzbeton im Vergleich zu einer Flugasche untersucht. Für die Überprüfung der Praxistauglichkeit wurden Proben je eines Spritzbetons mit Flugasche und zweier Spritzbetone mit calciniertem Ton in einem Stollen im Trockenspritzverfahren hergestellt. Durch den Einsatz des calcinierten Tons konnten Verbesserungen einzelner Spritzbetoneigenschaften erzielt werden.

1 Einleitung

Der Diskussion um die Reduktion der anthropogenen CO₂-Emission kann sich heutzutage kein Bereich der Betonindustrie entziehen. Die Energiebilanz und die CO₂-Emission von Spritzbeton werden durch den Zement als seine Hauptbindemittelkomponente bestimmt [1]. Maßnahmen zur ökologischen Optimierung des Spritzbetons greifen folglich am ehesten, wenn sie sich auf das Bindemittel konzentrieren. Optimal wäre eine Lösung, die den gewünschten ökologischen Vorteil mit verbesserten Gebrauchseigenschaften kombiniert.

Die Fragestellung ist für den Einsatz von Spritzbeton nicht neu. Puzzolane Stoffe wie Silicastaub, Steinkohlenflugasche und Metakaolin haben sich seit Jahren bewährt. Partielle Nachteile wie eine zum Teil geringere Frühfestigkeit und eine langsamere Festigkeitsentwicklung werden durch anderweitige Verbesserungen kompensiert. Hierzu zählen ein dichteres Gefüge, ein reduzierter Rückprall, geringere Bindemittelkosten und eine verringerte CO₂-Emission durch die Substitution des Zements.

Als eine Folge der Energiewende zeichnet sich in Deutschland in den nächsten Jahren eine signifikante Verknappung des verfügbaren Flugaschevolumens ab. Ausgehend von 4,5 Mio. t/a in 2004 ist das Angebot an Steinkohlenflugasche in sechs Jahren auf 3,2 Mio. t/a in 2010 zurückgegangen [2]. Diese Entwicklung wird sich durch den vermehr-

ten Einsatz erneuerbarer Energien und die damit einhergehende Verkürzung der Laufzeit von Kohlekraftwerken weiter fortsetzen. Nach einer Studie der Steine und Erden Industrie werden 2030 nur noch 1,1 Mio. t/a Steinkohlenflugasche in Deutschland erwartet [2].

Stoffliche Alternativen für den Einsatz als Bestandteil des Bindemittels in Spritzbeton müssen sich durch mehrere Eigenschaften auszeichnen. Sie müssen in ausreichender Menge zur Verfügung stehen, Vorteile für die Reduktion des CO₂-Ausstoßes bieten, puzolanisch reaktiv sein, die Eigenschaften des Betons wie Festigkeit und Dauerhaftigkeit nach Möglichkeit positiv beeinflussen und darüber hinaus natürlich noch ökonomisch attraktiv sein. Calcinierte Tone bieten die gesuchten Eigenschaften. Nachfolgend wird die Eignung dieses alternativen Betonzusatzstoffs im Spritzbeton exemplarisch untersucht.

2 Eigenschaften der verwendeten Materialien

2.1 Calciniertes Ton

Calcinierte Tone sind global verfügbar und weisen wegen des fehlenden oder nur geringen Kalkgehalts beim Brennen eine niedrige materialbedingte CO₂-Emission auf und sind daher nachhaltig und umweltfreundlich. Sie sind eine attraktive Alternative zu herkömmlichen Zusatzstoffen [3]. Am Institut für Werkstoffe des Bauwesens wird ein großtechnisch calcinierter Ton untersucht, der aus einem natürlich anstehenden Tongemisch hergestellt wird. Erdgeschichtlich ist er dem Lias Delta zuzuordnen. Der Rohton wird auf < 100 mm gebrochen und in einem dreiteiligen Drehrohrofen für die Blähtonproduktion calciniert. Die calcinierten Granulate liegen in Partikelgrößen bis 40 mm vor und werden anschließend auf Korngrößen < 32 µm gemahlen. Der calcinierte Ton wird unter dem Namen „Liament“ von Liapor GmbH & Co. KG, Pautzfeld, angeboten. Detaillierte Angaben können [4, 5] entnommen werden. Die Rohtongranalien für die Spritzbetonversuche wurden bei etwa 650 °C gebrannt.

2.2 Flugasche

Die eingesetzte Flugasche aus dem Kraftwerk Zolling (allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-3.31-1912) hat einen mittleren Korndurchmesser von 18 µm. Ihr Aktivitätsindex nach [6] liegt bei durchschnittlich 78% nach 28 Tagen und 93% nach 90 Tagen.

2.3 Zement

Für die Versuche wurde Rohrdorfer Portlandhüttenzement CEM II/A-S 42,5 R verwendet.

3 Versuchsergebnisse

3.1 Eigenschaften der verwendeten Materialien

Die eingesetzten Materialien wurden im Vorfeld im Labor charakterisiert. Wesentliche Kennwerte enthält Tab.1. Unterschiede zwischen dem calcinierten Ton und der Flugasche bzw. dem Zement treten insbesondere bei der spezifischen Oberfläche S_{BET} nach [7] und dem Wasseranspruch WA nach [8] zutage. Der calcinierte Ton hat zwischen den miteinander verbundenen Tetraeder- und Oktaederschichten innere Oberflächen, die sowohl für den als Prüfgas verwendeten Stickstoff [7] als auch für Wasser zugänglich sind. Dies verursacht den fast doppelt so hohen Wasseranspruch im Vergleich zur Flugasche bei ähnlicher Kornverteilung. Hinzu kommt die sehr unterschiedliche Kornform (Abb. 1).

Tab. 1: Charakteristische Kennwerte der Betonzusatzstoffe und des Zements

	Calciniertes Ton	Flugasche	CEM II/A-S 42,5 R
Reindichte [g/cm ³]	2,63	2,45	3,11
S_{BET} [m ² /g]	5,3	1,2	1,0
Blaine [cm ² /g]			4611
WA (nach Puntke) [%]	39,6	20,8	28,8
d_{50} [µm]	12,5	18	

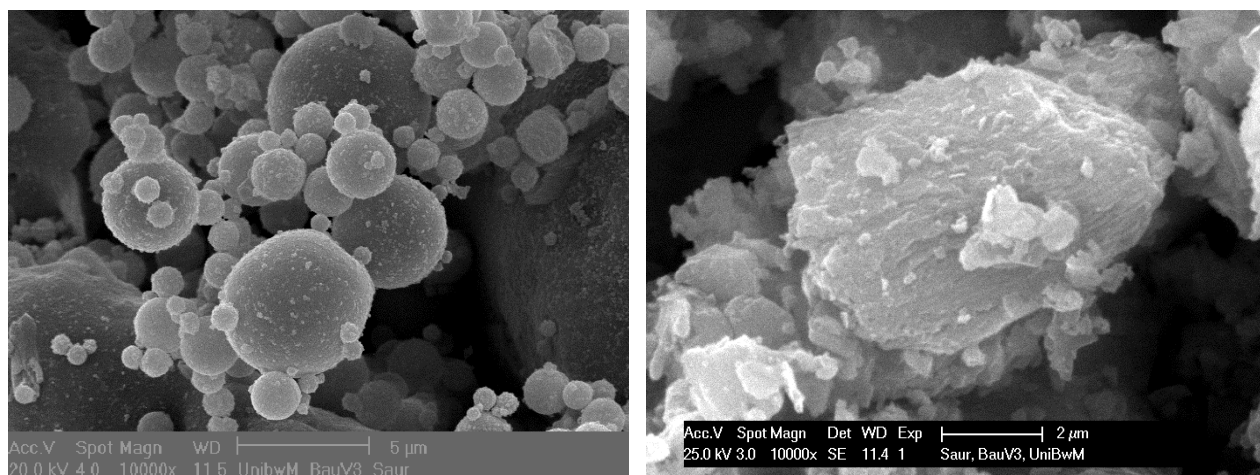


Abb. 1: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Flugasche (links) und des calcinierten Tons (rechts)

Der deutlich höhere Wasseranspruch wirkt sich auf das Ansteifverhalten und den Erstarrungsbeginn (Abb. 2) aus. Die Bindemittelmischungen mit calciniertem Ton (CT) erstarren deutlich schneller, als die Bindemittelmischungen mit Flugasche (FA).

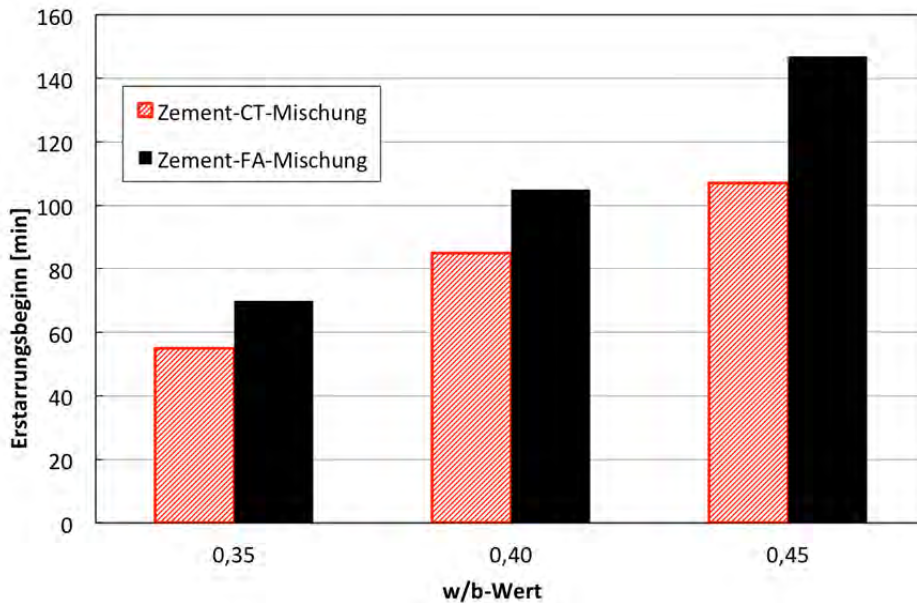


Abb. 2: Erstarrungsbeginn für Zementmischungen mit calciniertem Ton bzw. Flugasche

3.2 Spritzbeton

Die Eignung des calcinierten Tons wurde im Rahmen von Trockenspritzversuchen im Spritzstollen der Geosystems Spezialbaustoffe GmbH in Rohrdorf unter praxisnahen Bedingungen getestet. Die genutzten Trockenmischungen bestanden aus drei Fraktionen natürlicher Gesteinskörnungen. Die Sieblinie stimmte weitgehend mit dem Siebdurchgang der Normsiebline B8 nach DIN 1045-2 [9] überein. Die flugaschehaltige Referenzmischung entsprach einer erprobten Standardrezeptur. Zusätzlich zur Referenzmischung wurden zwei Rezepturen gespritzt, in denen die Flugasche gegen den calcinierten Ton ausgetauscht wurde. Tab. 2 enthält die Zusammensetzungen der drei verwendeten Rezepturen für jeweils etwa 2000 kg Trockenmischung.

Tab. 2: Zusammensetzung der Trockenmischungen

Bezeichnung	SB-FA-0128 (Referenz)	SB-CT1-0129	SB-CT2-0130
Sand 0 / 1,4 mm [kg]	740	780	780
Sand 1,4 / 4 mm [kg]	410	450	460
Kies 4 / 8 mm [kg]	380	400	400
CEM II/A-S 42,5 R [kg]	355	380	360
Flugasche [kg]	101	-	-
Calciniertes Ton [kg]	-	105	122

3.3 Spritzversuche

Die Spritzversuche erfolgten in Zusammenarbeit des Südbayerischen Portland-Zementwerks Gebr. Wiesböck & Co. KG, Rohrdorf mit dem Institut für Werkstoffe des Bauwesens der Universität der Bundeswehr München. Im Rohrdorfer Spritzstollen wurde zunächst der flugaschehaltige Spritzbeton als Referenz und anschließend die zwei mit calciniertem Ton modifizierten Spritzbetone zum Vergleich im Trockenverfahren gespritzt. Als erstes wurde die Frühfestigkeit mit Hilfe des Penetrationsnadelverfahrens bestimmt. Die Ergebnisse zeigt Abb. 3. Der Referenzspritzbeton fällt in die Kategorie J1 [10] und eignet sich demnach für den Auftrag dünner Lagen auf trockenem Untergrund. An den Spritzbeton werden dabei in den ersten Stunden keine besonderen statischen Anforderungen gestellt [11]. J1-Spritzbetone zeichnen sich durch eine geringe Staubeentwicklung und einen verminderten Rückprall aus. Die beiden blauen Linien grenzen den Bereich der Spritzbetonkategorie J1 ein. Die Ausgangsrezeptur (SB-FA-0128) besaß ein Verhältnis Zement : Flugasche von 0,78 : 0,22. Für die erste Rezeptur mit calciniertem Ton (SB-CT1-0129) wurde die Flugasche 1 : 1 ausgetauscht. In einem weiteren Versuch (SB-CT2-0130) wurde das Verhältnis etwas zugunsten des calcinierten Tons verschoben (Zement : CT von 0,75 : 0,25.). Der Wasserbindemittelwert der drei Mischungen wurde im Nachgang durch Darren bestimmt. Er betrug $w/b = 0,40$ für den Referenzspritzbeton (SB-FA-0128) und $w/b = 0,48$ (SB-CT1-0129) bzw. $w/b = 0,49$ (SB-CT2-0130) für die Spritzbetone mit calciniertem Ton.

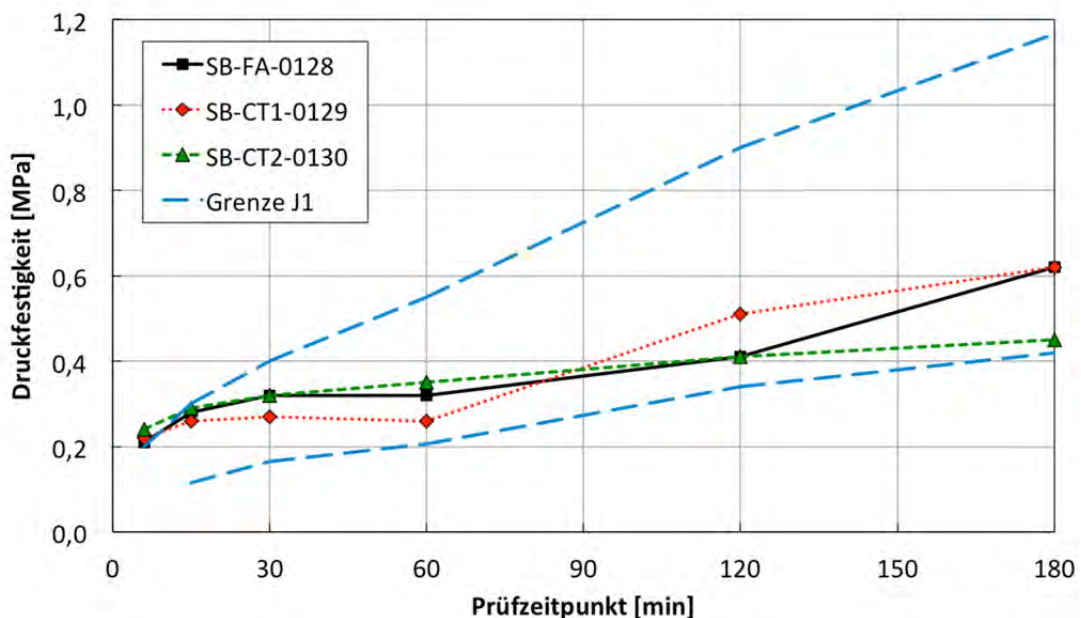


Abb. 3: Entwicklung der Frühfestigkeit; die Grenzlinien spannen den Bereich J1 auf [12]

Anhand der Frühfestigkeiten kann der Spritzbeton nach der Substitution der Flugasche durch den calcinierten Ton CT weiterhin in die Spritzbetonkategorie J1 eingestuft werden. Die Frühfestigkeitswerte des flugaschehaltigen Spritzbetons bewegen sich bis zum Prüfzeitpunkt nach drei Stunden zwischen den Werten Spritzbetone mit dem calcinierten Ton. Die weitere Festigkeitsentwicklung der Spritzbetone zeigt Abb. 4 bis zu einem Alter von 28 Tagen. Die Festigkeitsentwicklung der Spritzbetone mit dem calcinierten Ton verläuft bis 28 Tage langsamer als die der Referenz. Allerdings deutet sich bereits an, dass der Referenzspritzbeton im weiteren Verlauf der Erhärtung zumindest von einem Spritzbeton mit calciniertem Ton übertroffen wird, während der zweite (SB-CT2-0130) keinen signifikanten Festigkeitszuwachs nach 7 Tagen aufweist und auf vergleichsweise niedrigem Niveau verharrt. Als Ursache für die beobachtete geringe Festigkeit der Spritzbetone mit dem calcinierten Ton wird die nicht vorhandene Erfahrung der Spritzdüsenführers mit einem derartigen Zusatzstoff vermutet. Daher wurden diese Spritzbetone mit zu wenig Wasser gespritzt und konnten ihre Leistungsfähigkeit nicht entfalten. Dafür spricht der marginale Festigkeitszuwachs der letzten Spritzbetonrezeptur (SB-CT2-0130).

Ein wichtiger Aspekt für die Versuche war die Frage der Dichtheit des Spritzbetongefüges, die mit Hilfe der Wassereindringtiefe geprüft wurde. Dichte Spritzbetone werden insbesondere dort benötigt, wo der Spritzbeton ohne eine zwischenliegende Abdichtung auf die Felswand aufgebracht wird und später durch kalkreiches Bergwasser die Gefahr eines Versinterns der Abflussleitungen besteht. Die beiden Spritzbetone mit dem calcinierten Ton schneiden bei dieser Prüfung deutlich besser ab als die Referenz (Abb. 5) und erfüllen die Anforderungen der österreichischen Richtlinie für Spritzbeton hinsichtlich der Permeabilität [13], obwohl sie mit einem deutlich höheren Wasserbindemittelwert gespritzt wurden.

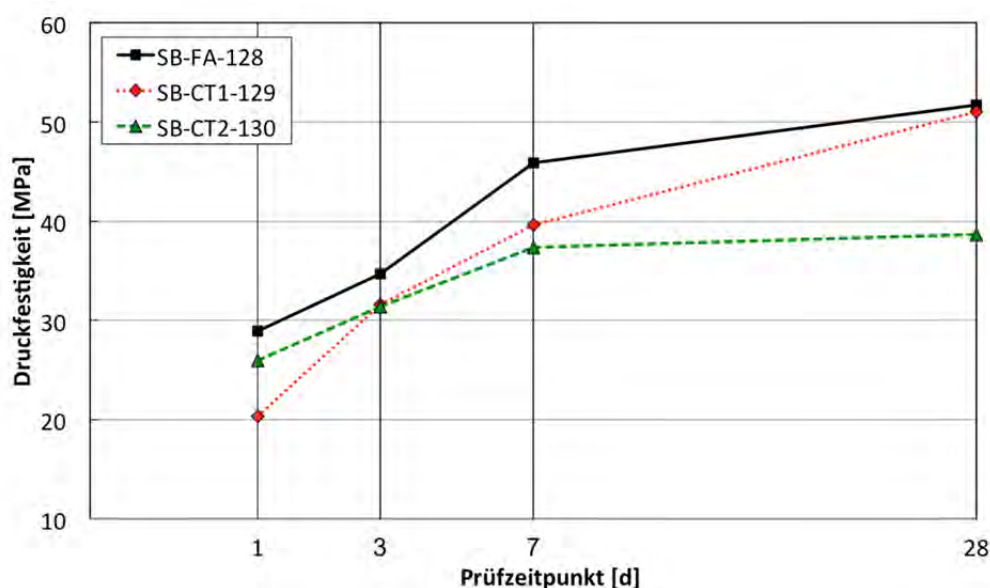


Abb.4: Festigkeitsentwicklung der untersuchten Spritzbetone [12]

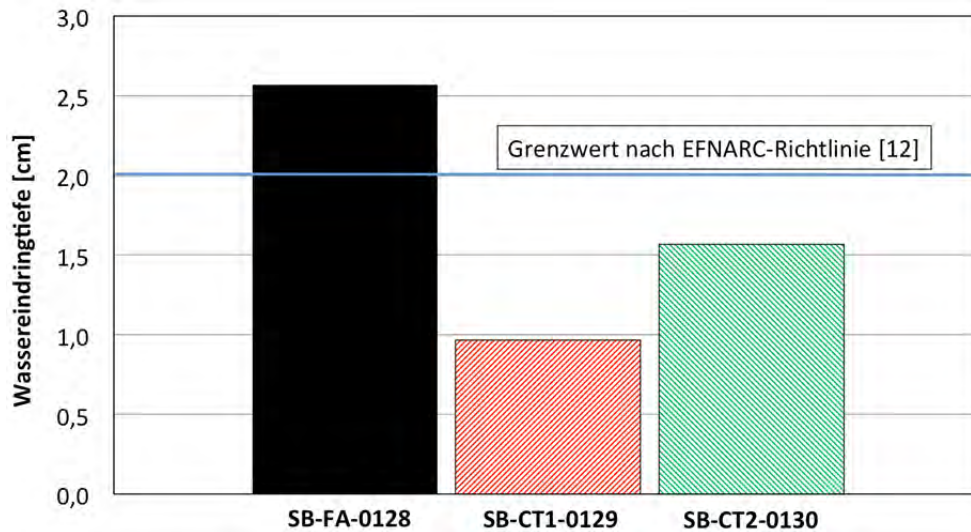


Abb. 5: Vergleich der mittleren Wassereindringtiefen [12]

Die Unterschiede in der Wasseraufnahme können durch die unterschiedliche Verteilung der Porenradien erklärt werden. Der Flugasche-haltige Spritzbeton hat eine gröbere Porenstruktur als die, die sich unter Einsatz des calcinierten Tons einstellt (Abb. 6).

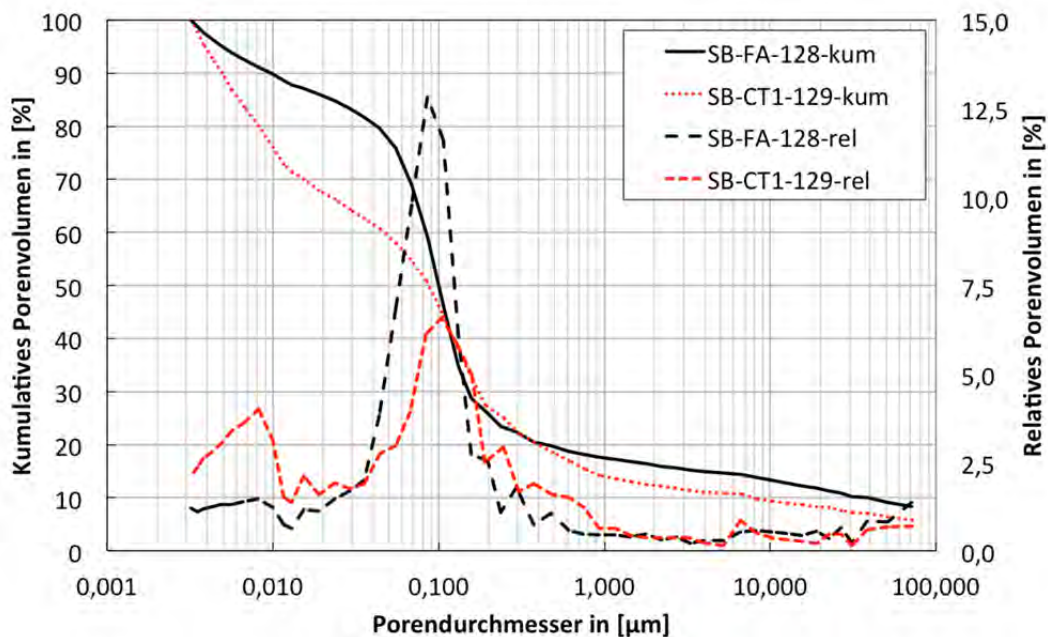


Abb. 6: Vergleich der Porenradienverteilung von Spritzbeton mit Flugasche bzw. calciniertem Ton [12]

Der verwendete calcinierte Ton bietet gegenüber der Flugasche einen weiteren Vorteil. Er bindet deutlich mehr und schneller Calciumhydroxid aus der Porenflüssigkeit. Dadurch wird das Versinterungspotenzial vermindert (Abb. 7), was durch das Auslaugen von Ca^{2+} -Ionen aus dem Spritzbeton und das anschließende Ausfällen zeit- und kostenintensive Instandsetzungsmaßnahmen in Tunnelbauwerken nach sich ziehen kann [14].

In Österreich wird das Versinterungspotenzial nach einem im ÖVBB-Merkblatt „Spritzbeton“ beschriebenen Verfahren bestimmt [15]. In Ausschreibungen tauchen häufig Forderungen nach einem Wert von etwa 0,55 kg CaO/t Spritzbeton auf, um das Risiko der Kalkausfällung zu minimieren [14]. Die beiden Spritzbetone mit dem calcinierten Ton erfüllen diese Anforderung.

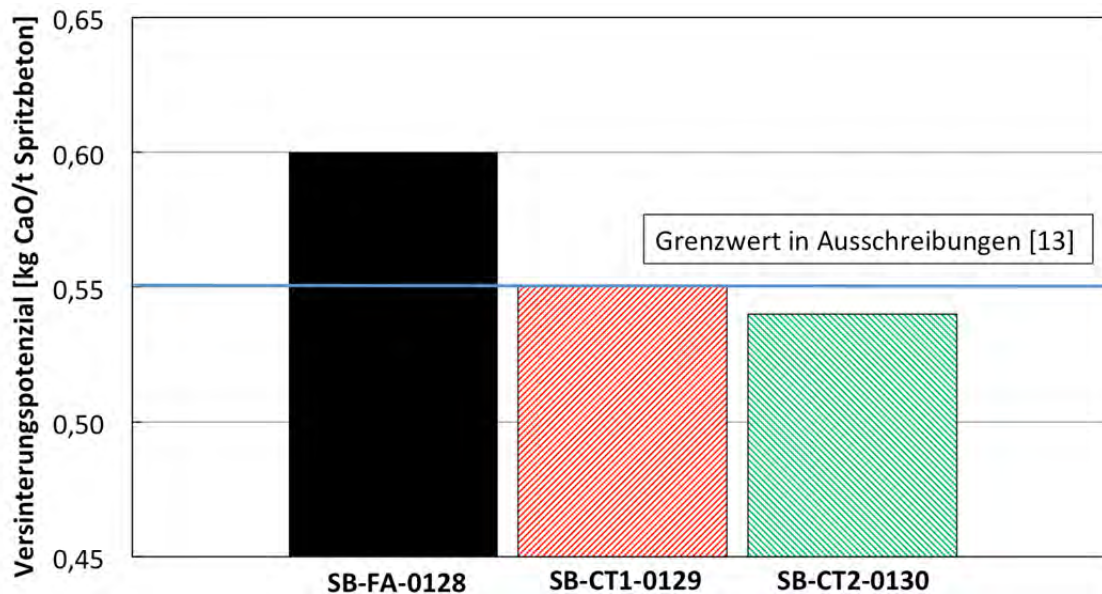


Abb. 7: Vergleich des Versinterungspotenzials von Spritzbeton mit Flugasche bzw. calciniertem Ton [16]

4 Zusammenfassung

Durch den Austausch der Flugasche gegen calcinierten Ton konnte ein dichteres Gefüge des Spritzbetons erzielt werden. Diese Optimierung führte zu einer geringeren Wassereindringtiefe und einem verminderten Auslaugen, obwohl die Spritzbetone mit dem calcinierten Ton mit einem signifikant höheren Wasserbindemittelwert hergestellt wurden. Die festgestellten Unterschiede in der Festigkeitsentwicklung sich nicht gravierend und können im Zuge einer Optimierung sicher noch kompensiert werden.

Danksagung

Die Autoren danken der Firma Liapor GmbH & Co. KG für die Bereitstellung der calcinierten Tone und der Firma Südbayerisches Portland-Zementwerk Gebr. Wiesböck & Co. KG für die Möglichkeit, die Spritzversuche durchzuführen sowie den Mitarbeitern beider Firmen für die konstruktive Zusammenarbeit.

Literaturverzeichnis

- [1] Eyerer, P.; Reinhardt, H.-W.: Ökologische Bilanzierung von Baustoffen und Gebäuden. Basel, Birkhäuser Verlag, 2000. 233 p.
- [2] Schwarzkopp, F.; Drescher, J.; Gornig, M.; Blazejczak, J.: Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine-und-Erden-Industrie bis 2030 in Deutschland - Kurzfassung. Berlin, Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden e. V., 2013.
- [3] Schulze, E.; Ricker, J.: Pozzolanic Acitivity of Calcined Clays. In: Holland TC, Gupta PR, Malhotra VM, editors. Proceedings of the 12th International Conference on Recent Advances in Concrete Technology and Sustainability Issues; 30.10. - 01.11.2012 Prag, Sheridan Books, 2012, p. 277-288.
- [4] Thienel, K.-C.; Beuntner, N.: Ökologisch und technisch verbesserte Betone durch den Einsatz alternativer Zusatzstoffe. In: Schwarz, J.; Thienel K.-C., editors. Nachhaltigkeit und Innovation; 18.10.2013, Universität der Bundeswehr München: Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften, 2013. p. 58-65.
- [5] Beuntner, N.: Leistungsfähigkeit großtechnisch calcinierter Tone und deren Wirksamkeit in zementären Systemen. In: Breitenbücher R, Mark P, editors. Innovationen in Beton – 1. DAfStb-Jahrestagung mit 54 Forschungskolloquium; 7./8. November 2013; Bochum: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton; 2013. p. 239-244.
- [6] DIN EN 450-1: Flugasche für Beton - Teil 1: Definition, Anforderungen und Konformitätskriterien. Berlin, 2012.
- [7] DIN ISO 9277: Bestimmung der spezifischen Oberfläche von Feststoffen durch Gasadsorption nach dem BET-Verfahren. Berlin, 2003; 19.
- [8] Puntke, W.: Wasseranspruch von feinen Kornhaufwerken. beton. 2002;52(5): S. 242-248.
- [9] DIN 1045-2: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1, Berlin, 2008; 62.
- [10] Richtlinie Spritzbeton. Wien, 1989.
- [11] Girmscheid, G.: Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau. Berlin, Ernst; 2000. 658 p.
- [12] Lange, S.: Auswirkung calcinierter Tone auf die Eigenschaften von Spritzbeton. Masterarbeit, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, 2013.
- [13] Europäische Richtlinie für Spritzbeton. Farnham, UK, 1997; 36.
- [14] Bernstein, S.; Pichler, C.; Astner, M.; Lackner, R.: Numerisches Berechnungsmodell für Calcium-Lösung und Diffusion in zementgebundenen Baustoffen: Anwendung zur Optimierung des Bindemitteldesigns und der Spritzbetonrezeptur. In: F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, editor. 12 Internationale Baustofftagung ibausil, 12.-15. September, Weimar, 2012. p. 20235 - 20242.
- [15] ÖVBB-Richtlinie Spritzbeton. Wien, 2009, 93.
- [16] Bernstein, S.: Versinterungspotenzial von Spritzbeton mit Flugasche bzw. calciniertem Ton. Personal Communication Beuntner, N., 2013.