

Report.

Wissenschaftsprojekte des FEhS-Instituts 1/2020

ISSN 0948-4795 | 27. Jahrgang Nr. 1

- 3** Vibrationshammerverfahren zur Bestimmung der Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad von Schichten ohne Bindemittel
> D. Demond, M.Sc., N. Verhaag, cand. B.Eng.
- 9** Untersuchungen zur Entwicklung der Tragfähigkeit und Durchlässigkeit selbst-erhärtender Baustoffgemische
> D. Demond, M.Sc., N. Verhaag, cand. B.Eng.
- 16** Identifizierung von nichttechnischen Innovationshürden für die europäische Prozessindustrie
> A. Morillon, PhD, D. Algermissen, M.Sc., I. Martin, M.Sc., M. Izquierdo, M.Sc., M. Winter, PhD, K. Coppenholle, LL.M., A. Orduna, M.A., J. S. Nissen, M.Sc., Dr. rer. nat. Ch. Grunewald, Dr. rer. nat. Ch. Dannert, A.-K. Blanke, M.Sc.
- 22** Erweiterung des Kenntnisstandes über Vanadium in Elektroofenschlacken
> Dr. rer. nat. A. Sokol, Dr.-Ing. R. Bialucha
- 29** Produktion und Nutzung von Eisenhütten-schlacke in Deutschland im Jahr 2019
> Dr.-Ing. Th. Merkel

VIBRATIONSHAMMERVERFAHREN ZUR BESTIMMUNG DER BEZUGSGRÖSSE FÜR DEN VERDICHUNGSGRAD VON SCHICHTEN OHNE BINDEMITELE

D. Demond, M.Sc.; N. Verhaag, cand. B.Eng.
(FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e.V.)

EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

Im Straßenoberbau haben die aus Baustoffgemischen hergestellten Schichten ohne Bindemittel (SoB) eine zentrale, tragende Rolle, die von der Tragfähigkeit und Wasserdurchlässigkeit der SoB beeinflusst wird. Diese Kerneigenschaften von SoB sind maßgeblich für die Nutzungsdauer einer Straße verantwortlich, wobei beide Eigenschaften wiederum von der In-situ-Baustoffverdichtung beeinflusst werden. Entsprechend ist die Verdichtung von ungebundenen Gemischen ein wichtiger Faktor, der in der Baupraxis in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad DPR (Verhältnis aus Labor- und In-situ-Einbaudichte) beurteilt wird. Zur Berechnung des Verdichtungsgrades, der ebenso als Beurteilungskrite-

rium der Tragfähigkeit herangezogen werden kann, ist auch in Deutschland als Eingangsgröße die Bestimmung der Proctordichte mittels Proctorversuch nach DIN EN 13286-2 [1] festgelegt.

Baustoffgemische für SoB weisen zur Sicherstellung ihrer Wasserdurchlässigkeit sieblinienbedingt dränierende Eigenschaften auf. Diese Eigenschaft zeigt sich auch in der Laborpraxis und führt dazu, dass der Proctorversuch für ungebundene Baustoffgemische nicht optimal geeignet ist, da häufig eine präzise Versuchsdurchführung und Auswertung aufgrund der Wasserdrainage während der Probenverdichtung nicht möglich ist. Auf Seiten der Wasserdurchlässigkeit erfolgt die Labormessung zumeist nach DIN 18130-1

[2], die eine Messung an gesättigten Proben vorgibt und somit nicht den Feldbedingungen entspricht. Folglich werden bzgl. der Verdichtungs- und Wasserdurchlässigkeitsprüfung im Labor Messmethoden verwendet, die aufgrund ihrer Verfahrensparameter und/oder der Eigenschaften der zu untersuchenden Materialien keine optimale Ausgangsgrundlage liefern.

Im Forschungsvorhaben FE-Nr. 06.099/2012/EGB [3] wurde die Eignung des Vibrationshammerverfahrens nach DIN EN 13286-4 [4] als potenzielles alternatives Laborverdichtungsverfahren untersucht und festgestellt, dass dieses Laborverdichtungsverfahren in-situ-konform verdichtet und sehr vergleichbare Ergebnisse zum Proctorverfahren unter Ver-



Bild 1: Proctorverdichter



Bild 2: Vibrationshammer A (8,3 Joule)



Bild 3: Vibrationshammer B (16,8 Joule)

wendung eines festgelegten Wassergehaltes (zur Vermeidung einer Wasserdrainage) erzielt. Bezüglich der Wasserdurchlässigkeitsprüfung ist möglicherweise das Standrohrinfiltrometer nach TP Gestein-StB 8.1.3 [5] besser geeignet, da bei diesem sowohl im Labor als auch während einer In-situ-Messung gleiche Verfahrensparameter genutzt werden und die Messungen an ungesättigten Materialien erfolgen.

ZIELSETZUNG UND UNTERSUCHUNGSPROGRAMM

Eines der Hauptziele des im vorliegenden Artikel zusammengefassten und vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Forschungsvorhabens FE 06.0115/2017/EGB [6] war es, die vielversprechenden Ergebnisse des Vorläuferprojekts FE-Nr.06.0099/2012/EGB [3] und den darin formulierten Lösungsansatz eines festgelegten Wassergehaltes zur Optimierung eines Verdichtungsversuches an ungebundenen Gemischen zu überprüfen und ggf. zu verifizieren. Zudem sollte das Forschungsvorhaben den Kenntnisstand zur Eignung des Vibrationshammerverfahrens bzgl. der Verdichtung von ungebundenen Baustoffgemischen weiter ausbauen. Unter Einbindung von 14 ungebundenen Baustoffgemischen wurden mit dem Forschungsvorhaben

daher folgende primäre Fragestellungen untersucht:

- Welchen Einfluss haben das Proctor- und das Vibrationshammerverfahren auf die Trockendichte?
- Welchen Einfluss haben bauungleiche Vibrationshämmer auf die Trockendichte?
- Lässt sich die These zur Verwendung eines festgelegten Wassergehaltes von 3 M.-% (natürliche und industrielle Baustoffgemische) bzw. 5 M.-% (RC und HMVA-Baustoffgemische) zur Vermeidung einer Wasserdrainage während der Versuchsdurchführung bestätigen?
- Welchen Einfluss haben das Proctor- und das Vibrationshammerverfahren auf die Kornzertrümmerung während der Probenverdichtung?
- Welchen Einfluss haben das Proctor- und das Vibrationshammerverfahren auf die Wasserdurchlässigkeit bzw. den Infiltrationsbeiwert $k_i(10)$ gemäß TP Gestein-StB 8.3.1?

VERDICHTUNGSPARATUREN

Die jeweiligen Verdichtungsversuche wurden unter Verwendung eines Proctorverdichters (Bild 1) als auch unter Einsatz des Vibrationshammers aus dem Vorgängerprojekt [3] mit der Kennzeichnung Bosch GSH 5 CE (Bild 2) und einer Schlagenergie von 8,3 Joule durchgeführt. Zusätzliche Verdichtungsversu-

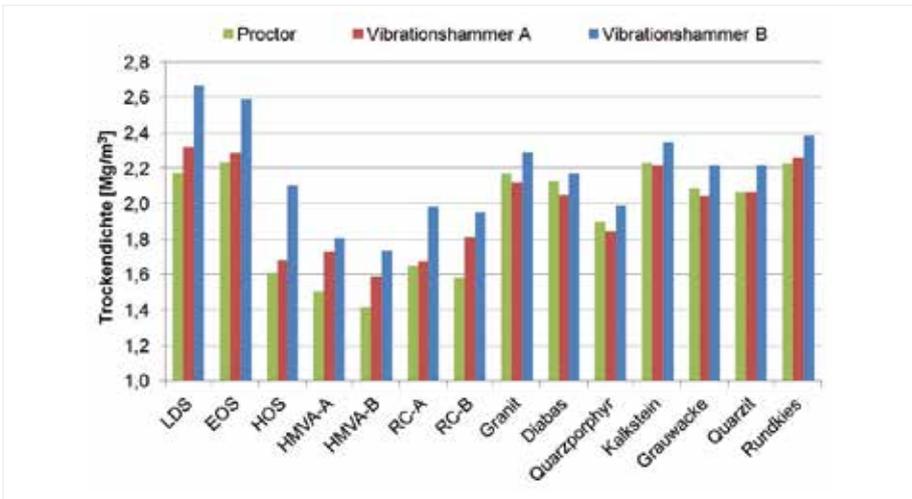


Bild 4: Erzielte Trockendichten unter Einsatz des Proctorverdichters bzw. der Vibrationshämmer

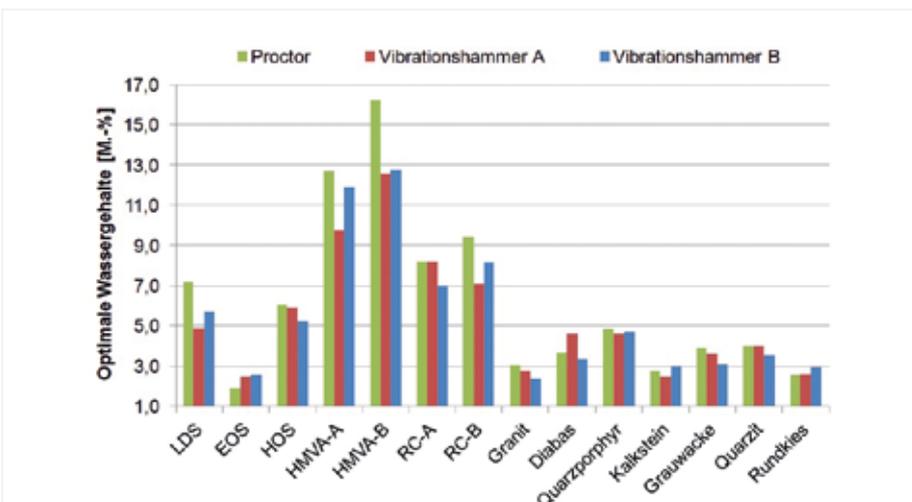


Bild 5: Erzielte optimale Wassergehalte unter Einsatz des Proctorverdichters bzw. der Vibrationshämmer

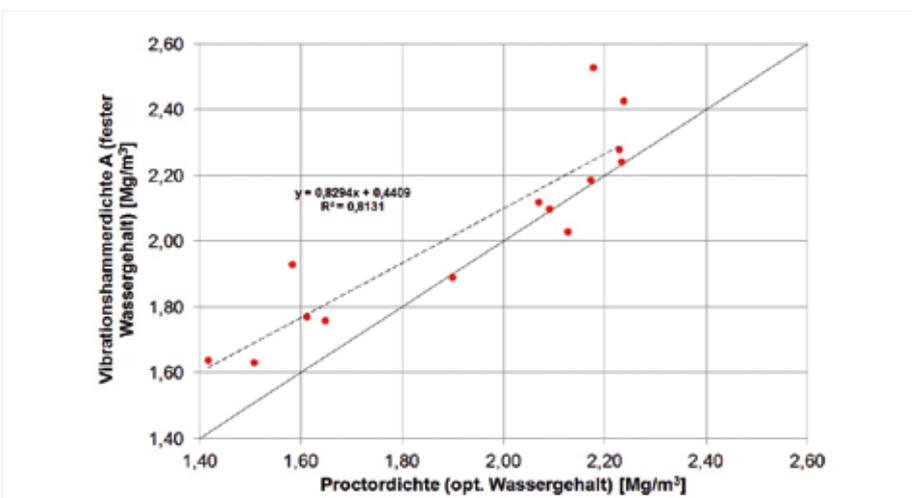


Bild 6: Korrelation Proctortrockendichten (opt. Wassergehalt) vs. Vibrationshammer-trockendichten A (festgelegter Wassergehalt)

che erfolgten mit einem weiteren Schlagbohrer (bzw. Vibrationshammer) mit der Kennzeichnung Bosch GSH 11 E (Bild 3), der mit einer Schlagenergie von 16,8 Joule in etwa die doppelte Schlagenergie im Vergleich zum Bosch GSH 5 CE aufbringt.

FORSCHUNGSERGEBNISSE

Bezüglich der Fragestellung der erzielbaren Trockendichte durch den Proctorverdichter und die beiden Vibrationshämmer und zur auftretenden Kornzertrümmerung wurden Verdichtungsversuche an 0/32 mm Korngemischen ohne Überkorn im Verdichtungstopf B (Ø 150 mm) durchgeführt. Hier zeigte sich, dass der Einsatz eines Vibrationshammers mit einer Schlagenergie von 8,3 Joule zu einer Trockendichtezunahme (2 bis 15 %) für rezyklierte und industrielle Baustoffgemische im Vergleich zum Proctorergebnis führte und sich eine weitere Ergebniszunahme bei Verwendung des Vibrationshammers mit nahezu doppelter Schlagenergie für alle untersuchten Baustoffgemische einstellte (natürliche Baustoffgemische: 2 bis 7 %, rezyklierte und industrielle Baustoffgemische: 16 bis 31 % – Bild 4). Bezüglich der optimalen Wassergehalte wurde für rezyklierte und industrielle Baustoffgemische unter Einsatz eines Vibrationshammers tendenziell eine leichte Reduktion und für natürliche Gesteinskörnungen ein nahezu gleicher Ergebniswert im Vergleich zum Proctorverfahren (Bild 5) bestimmt.

Im nächsten Schritt wurde die im FE-Nr. 06.0099/2012/EGB [3] aufgestellte These überprüft, ob Baustoffgemische, die mit einem festgelegten Wassergehalt von

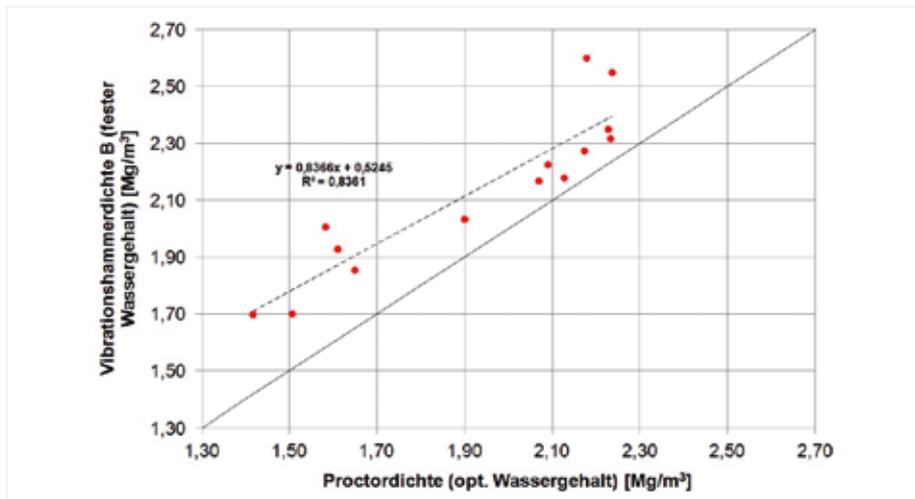


Bild 7: Korrelation Proctortrockendichten (opt. Wassergehalt) vs. Vibrationshammertrockendichten B (festgelegter Wassergehalt)

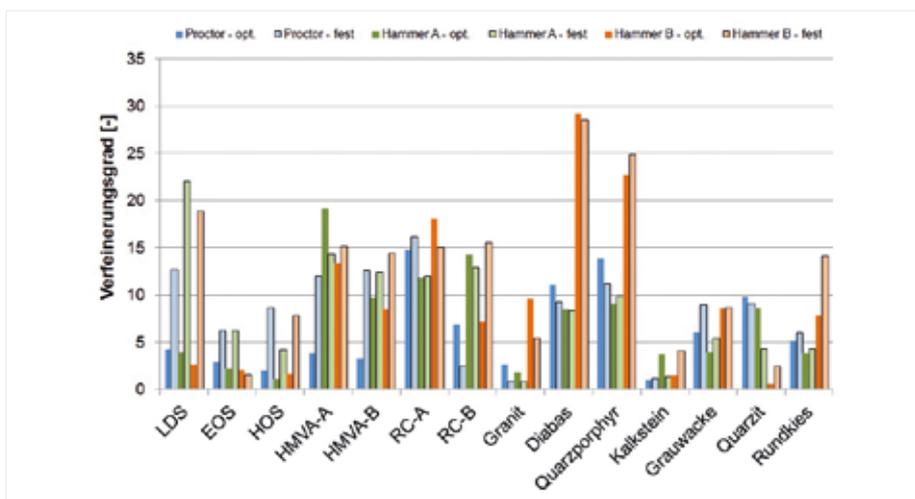


Bild 8: Verfeinerungsgrade der Verdichtungsapparaturen unter Verwendung eines optimalen bzw. festgelegten Wassergehaltes

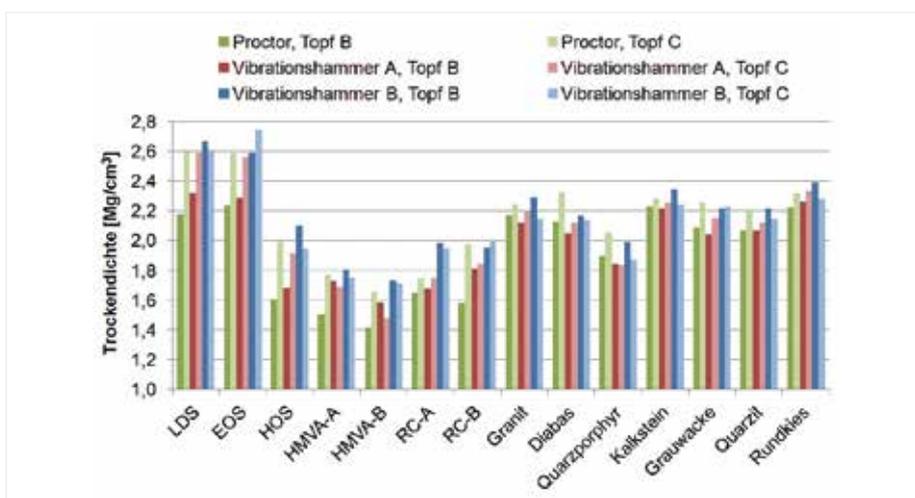


Bild 9: Ergebnisvergleich der gemittelten Trockendichten, die mit den Verdichtungsverfahren unter Verwendung des Proctortopfes B (ohne Überkorn) erzielt wurden

3 M.-% (natürliche und industrielle Baustoffgemische) bzw. 5 M.-% (RC- und HMVA-Baustoffgemische) verdichtet werden, gleichwertige Trockendichten wie bei einer Verdichtung mit einem optimalen Wassergehalt erzielen. Vorteil bei dieser Vorgehensweise wäre für viele Baustoffgemische die Vermeidung einer Wasserdrainage während des Verdichtungsversuches und die potenzielle Möglichkeit zur Reduktion der Einzelprobenanzahl. Zwischen der Vorgehensweise einer Verdichtung mit optimalem Wassergehalt und einem festgelegten Wassergehalt konnten sowohl für das Proctorverfahren als auch für beide Vibrationshämmer Korrelationskoeffizienten minimal kleiner 1 bestimmt werden. Die Trockendichtekorrelationen zwischen den Vibrationshammerergebnissen (fester Wassergehalt) und den Proctoregebnissen (optimaler Wassergehalt) ergaben Korrelationskoeffizienten oberhalb von 0,8 (Bild 6 und Bild 7), wobei sich bei der Verwendung eines festgelegten Wassergehaltes für das Vibrationshammerverfahren eine Ergebniszunahme bei der Trockendichte von gemittelt ca. 6,5 % (Vibrationshämmervariante A mit 8,3 Joule) bzw. ca. 11,5 % (Vibrationshämmervariante B mit 16,8 Joule) einstellte. Über den Verfeinerungsgrad nach Schreiber [7] konnte anhand von Siebanalysen, die nach der Probenverdichtung mittels Vibrationshämmervariante A durchgeführt wurden, gezeigt werden, dass ein festgelegter Wassergehalt im Vergleich zu einer Verdichtung mit einem optimalen Wassergehalt zu einer vermehrten Kornzertrümmerung für industrielle und RC-Baustoffgemische führt. Für die untersuchten natürlichen Baustoffgemische stellte sich

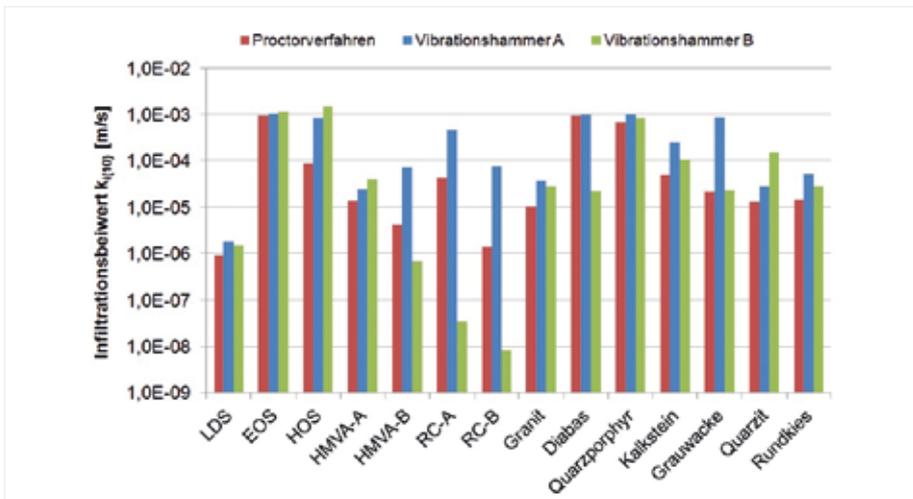


Bild 10: Gemittelte Infiltrationsbeiwerte der Probekörper, welche mit Proctor- bzw. Vibrationshammerverfahren hergestellt wurden

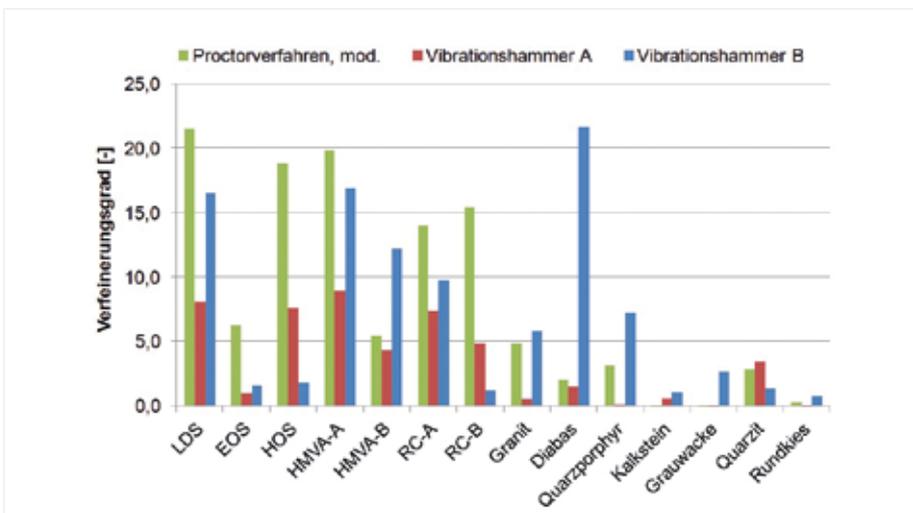


Bild 11: Berechnete Verfeinerungsgrade der drei Verdichtungsapparaturen unter Verwendung des Verdichtungstopfes C

hierbei eher ein konstantes bis gegenläufiges Ergebnisbild bzgl. der Kornzertrümmerung ein. Unter Einsatz der Vibrationshammervariante B mit einer Schlagenergie von 16,8 Joule konnte nahezu durchweg eine vermehrte Zunahme der Kornzertrümmerung (Bild 8) dargelegt werden.

Aufbauend auf der Arbeit von Drnevich, Evans und Prochaska [8] wurde eine Vorgehensweise festgelegt, wie eine Proben-

herstellung im Verdichtungstopf C ($\varnothing = 250$ mm) mittels Vibrationshammer erfolgen kann, da dies bis dato nicht in der DIN EN 13286-4 [4] beschrieben wird. Mit dieser Vorgehensweise konnte aufgezeigt werden, welche Trockendichten hierbei erzielt werden, welche Kornzertrümmerung auftritt und welche Infiltrationsbeiwerte $k_{i(10)}$ mit derart hergestellten Probekörpern erzielt werden können. Zusätzlich konnte untersucht werden, ob die potenziell

auf tretende Kornzertrümmerung evtl. einen Einfluss auf den Infiltrationsbeiwert hat. Die Ergebnisse der dazu durchgeführten Untersuchungen wurden im Vergleich zu Proctorversuchen bewertet. Die Trockendichten der für die Infiltrationsmessungen im Topf C hergestellten Probekörper zeigten auf das jeweilige Verdichtungsverfahren und ungebundene Baustoffgemisch bezogen sehr geringe Standardabweichungen. Entsprechend lieferten die Verdichtungsverfahren untereinander reproduzierbare Trockendichten (Bild 9). Unter Anwendung des Proctorverfahrens konnte beim Wechsel von Verdichtungstopf B zu C eine Trockendichtezunahme zwischen ca. 4 und 25 % (im Mittel ca. 12 %) bestimmt werden (Bild 9), wobei hierbei beachtet werden muss, dass die Probeherstellung im Verdichtungstopf C mit modifizierter Proctorenergie erfolgte. Eine ähnliche Tendenz zeigte sich unter Einsatz des Vibrationshammers A mit 8,3 Joule Schlagenergie beim Wechsel von Verdichtungstopf B zu Verdichtungstopf C. Hier lag die Ergebniszunahme bzgl. der Trockendichte prozentual zwischen ca. 2 und 14 % (im Mittel bei ca. 6 % – s. Bild 9). Konträr dazu zeigte sich das Ergebnisbild durch den Wechsel von Verdichtungstopf B zu Verdichtungstopf C unter Verwendung des Vibrationshammers B mit 16,8 Joule Schlagenergie. Hier kam es zu einer Abnahme der Trockendichteergebnisse zwischen ca. 1 und 7 % (im Mittel ca. 4 % – Bild 9). Die mit dem Proctor- bzw. den Vibrationshämmern hergestellten Infiltrationsprobekörper zeigten Infiltrationsbeiwerte $k_{i(10)}$ von 10^{-3} m/s bis 10^{-8} m/s. Unabhängig vom Proctor- bzw. Vibrationshammerverfahren wurden an nahezu

jedem Baustoffgemisch geringe Ergebnisschwankungen bzgl. der Infiltrationsbeiwerte erzielt. Entsprechend konnte mit Ausnahme weniger Messwerte kein verdichtungsverfahrenabhängiger Einfluss auf das Infiltrationsergebnis aufgezeigt werden (Bild 10). Ergänzend wurden auch Siebanalysen nach der Probenherstellung zur Bestimmung der auftretenden Kornzertrümmerung und zur Berechnung der Verfeinerungsgrade nach Schreiber [7] vorgenommen, die nachfolgende Interpretationen (Bild 11) ermöglichen: Das modifizierte Proctorverfahren bedingt während der Probenkörperherstellung im Verdichtungstopf C den größten und der Vibrationshammer A mit einer Schlagenergie von 8,3 Joule den geringsten Einfluss auf die Kornzertrümmerung. Verfahrensunabhängig zeigen industrielle und RC-Baustoffgemische eine größere Tendenz zur Kornzertrümmerung als natürliche Baustoffgemische. Anhand der Nachsiebungen bzw. berechneten Verfeinerungsgrade nach Schreiber [7] konnte kein Zusammenhang zwischen An- oder Abstieg des Infiltrationsbeiwertes und An- oder Abstieg an Kornzertrümmerung nachgewiesen werden. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass der Verfeinerungsgrad nach Schreiber [7] sehr sensibel auf Sieblinienschwankungen reagiert und somit die Probenteilung einen wesentlichen Anteil am berechneten Ergebnis haben kann.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Zusammenfassend lässt sich aus dem durchgeführten Forschungsvorhaben der Schluss ziehen, dass das Vibrationshammerverfahren nach DIN EN 13286-4 eine Alternative zum Proctorverfahren bietet. Bezüglich der verfahrenstechnischen Aspekte und zur Sicherstellung einer Ergebnisvergleichbarkeit zum Proctorverfahren sollte die Gerätespezifikation bzgl. der Schlagenergie eines Vibrationshammers im Rahmen der berücksichtigten Vibrationshammervariante bei 8,3 Joule liegen. Hierdurch wird eine verstärkt auftretende Kornzertrümmerung und eine zusätzliche, weit über dem Proctorniveau liegende Trockendichtezunahme, vermieden. Der Aspekt einer Verdichtung mit einem festgelegten Wassergehalt lässt sich durchaus weiterverfolgen. Zwar ist damit eine Zunahme an Trockendichte und Kornzertrümmerung verbunden jedoch konnte dargelegt werden, dass die Kornzertrümmerung nur eine untergeordnete Bedeutung auf den Infiltrationsbeiwert der untersuchten Baustoffgemische hat. Aufbauend auf den Ergebnissen konnte zudem ein Entwurf für eine TP Gestein-StB

zur Probenherstellung von Prüfkörpern im 250 mm Verdichtungstopf unter Anwendung eines Vibrationshammers z. B. für Infiltrationsversuche abgefasst werden [6]. Wie dargestellt besteht das Problem, dass die aktuelle Bezugsgröße (Proctortrockendichte) des Verdichtungsgrades für ungebundene Gemische nur bedingt bestimmt werden kann und nicht in-situ-konforme Ergebnisse liefert. Ergebnis- und verfahrenstechnisch trifft Gleiches auf die Wasserdurchlässigkeit zu. Zur weiteren Erfahrungssammlung und Etablierung des Vibrationshammerverfahrens würden sich entsprechend ergänzende Untersuchungen im Vergleich zu Felddaten anbieten. Hier müssten aus realen Baumaßnahmen die erzielte Trockendichte bzw. der Verdichtungsgrad und deren Infiltrationsbeiwerte bestimmt werden. In der Folge müssten diese vergleichend zum Proctorverfahren mit dem Vibrationshammerverfahren an den gleichen ungebundenen Baustoffgemischen möglichst reproduziert werden, um die Eignung des Vibrationshammerverfahrens als durchweg in-situ-konformes Laborprüfverfahren zu belegen. Weiterführende Untersuchungen sollten zudem unbedingt den Einfluss von Randumläufigkeiten während eines Infiltrationsversuches beinhalten. Ebenso wären Versuche zur auftretenden Kornzertrümmerung an idealisierten Standardsieblinien aufgrund des Einflusses der Probenteilung auf das berechnete Verfeinerungsergebnis denkbar.

LITERATUR

- [1] DIN EN 13286-2:2013-02: Ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische – Teil 2: Laborprüfverfahren zur Bestimmung der Referenz-Trockendichte und des Wassergehaltes; Proctorversuch
- [2] DIN 18130-1:1998-05: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes – Teil 1: Laborversuche
- [3] Bialucha, R.; Merkel, Th.; Demond, D.; Ritter, H.-J.; Haas, S.: Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad von Schichten ohne Bindemittel, Schlussbericht, FE-Nr.: 06.0099/2012/EGB, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 08.2014
- [4] DIN EN 13286-4:2003-07: Ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische – Teil 4: Laborprüfverfahren für die Trockendichte und den Wassergehalt; Vibrationshammer
- [5] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau – TP Gestein-StB, Teil 8.3.1: Bestimmung des Infiltrationsbeiwertes mit dem Standrohr-Infiltrometer – Laborverfahren, Ausgabe 2012
- [6] Demond, D.; Haas, S.: Vibrationshammerverfahren zur Bestimmung der Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad von Schichten ohne Bindemittel, Schlussbericht, FE 06.0115/2017/EGB, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Veröffentlichung in Vorbereitung
- [7] Schreiber, F. R.: Zur Frage der Kornverfeinerung eines Gesteinshaufwerks unter praxisnaher Beanspruchung. Mitteilungen aus dem Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung der Technischen Universität Hannover. 1977, Bd. 37
- [8] Drnevich, V. P.; Evans, A. C.; Prochaska, A. B.: A Study of Effective Soil Compaction Control of Granular Soils, Purdue University, 2007

UNTERSUCHUNGEN ZUR ENTWICKLUNG DER TRAGFÄHIGKEIT UND DURCHLÄSSIGKEIT SELBSTERHÄRTENDER BAUSTOFFGEMISCHE

D. Demond, M.Sc.; N. Verhaag, cand. B.Eng.
(FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e.V.)

EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

Baustoffgemische aus der primären Stahlerzeugung (LD- und Elektroofenschlacken) und der Sekundärmetallurgie (Pfannenschlacken) sowie auch daraus hergestellte Mischungen können in Abhängigkeit ihres chemischen Aufbaus im Laufe der Zeit nach dem Einbau einen Tragfähigkeitszuwachs zeigen. Dieser durch Hydratation und Karbonatisierung bedingte Prozess wird mit dem Begriff der Selbsterhärtung bezeichnet und bewirkt eine zusätzliche Verzahnung/Verkittung einzelner Mineralstoffkörner. Neben der Tragfähigkeit ist die Wasserdurchlässigkeit eine der wichtigsten technischen Eigenschaften von Schichten ohne Bindemittel im Straßen- und Erdbau, wobei sich beide technischen Eigenschaften gegenseitig so beeinflussen, dass eine durch Materialverdichtung erzielte hohe Tragfähigkeit zumeist mit einer geringen Wasserdurchlässigkeit verbunden ist. Folglich liegt der Gedanke nahe, dass die Hydratation und Karbonatisierung von Baustoffgemischen möglicherweise den zur Verfügung stehenden Porenraum weiter reduzieren und somit die Wasserdurchlässigkeit

zusätzlich absenkt. Die Eigenschaft der nachträglichen Verfestigung mit einhergehender Tragfähigkeitszunahme könnte also der ebenso wichtigen Forderung gegenüberstehen, dass die entsprechende Mineralstoffschicht nicht wasserundurchlässig werden darf.

ZIELSETZUNG

Ein durch Hydratation und Karbonatisierung hervorgerufener Tragfähigkeitszuwachs könnte vermutlich auch zu einer Reduktion der Wasserdurchlässigkeit und im schlechtesten Fall zu einer Oberflächenversiegelung führen. Eine systematische wissenschaftliche Untersuchung zum Einfluss der Selbsterhärtung bzw. Tragfähigkeitszunahme auf die Wasserdurchlässigkeit erfolgte jedoch bis dato nicht. Im IGF-Forschungsvorhaben 19568 N wurde diese Fragestellung deshalb durch kontinuierliche Messungen im Labor und in situ umfassend untersucht. Folglich sollte mit dem Forschungsvorhaben aufgezeigt werden, welchen Einfluss die Selbsterhärtung von Baustoffgemischen auf deren Wasserdurchlässigkeit hat.



Bild 1: Abfräsen des alten Transportweges



Bild 2: Anlage der Streckenabschnitte

BAUSTOFFGEMISCHE UND UNTERSUCHUNGSPROGRAMM

Zur Durchführung des Forschungsvorhabens wurden zwei Stahlwerksschlacken (SWS), zwei Hüttenmineralstoffgemische (HMGM) und zwei Recyclingbaustoffe mit hohem Betonanteil (Beton-RC) sowie zu Vergleichszwecken eine Natursteinvariante berücksichtigt, die die Siebanforderungen für ungebundene Schichten (Deckschicht ohne Bindemittel und Frostschuttschicht) nach TL SoB-StB [1] erfüllten. Wichtiger Bestandteil des Forschungsvorhabens war der Bau einer Versuchsstrecke unter Verwendung von vier der oben genannten Baustoffgemische (SWS, HMGM, Beton-RC und Natursteinvariante) mit einem regelmäßigen technischen Monitoring über einen Zeitraum von über zwei Jahren in Form von Tragfähigkeits- [2] und Wasserdurchlässigkeitsmessungen [3] [4]. Ein weiterer Bestandteil beinhaltete eine vergleichende und ergänzende Laborstudie unter Verwendung aller sieben Baustoffgemische, an denen ebenso regelmäßige Tragfähigkeits- [5] und Wasserdurchlässigkeitsmessungen [6] an im Voraus hergestellten Probenkörpern durchgeführt wurden.

FORSCHUNGSERGEBNISSE

Für die In-situ-Messungen wurde Ende Juli 2017 auf einer Halde in Dinslaken eine neue Versuchsstrecke angelegt. Hierfür wurde auf einem Teilabschnitt eines Zufahrtweges zur Haldenspitze ein bestehender Transportweg abgefräst (Bild 1) und über eine Streckenlänge von ca. 100 Metern auf Teilabschnitten von jeweils 25 Metern wurden die vier Baustoffgemische SWS, HMGM, Beton-RC und die Natursteinvariante verbaut (Bild 2). Im Anschluss erfolgte die Verdichtung der vier Baustoffgemische mittels Rüttelwalze (Bild 3) auf eine Schichtmächtigkeit von ca. 0,4 Metern. Nach Fertigstellung (Bild 4) wurde die Versuchsstrecke durch regelmäßige Nutzung mit Transportfahrzeugen beansprucht.

Anfang August 2017 wurden kurz nach dem Bau der Versuchsstrecke auf allen vier Abschnitten erste Messungen der Tragfähigkeit und Wasserdurchlässigkeit mittels Lastplattendruckversuch bzw. Doppelring- und Standrohr-Infiltrometer durchgeführt. Darauf aufbauend wurden nach 2 (Oktober 2017), 4 (Dezember 2017), 8 (April 2018), 13 (September



Bild 3: Verdichtung der Baustoffgemische bzw. Streckenabschnitte

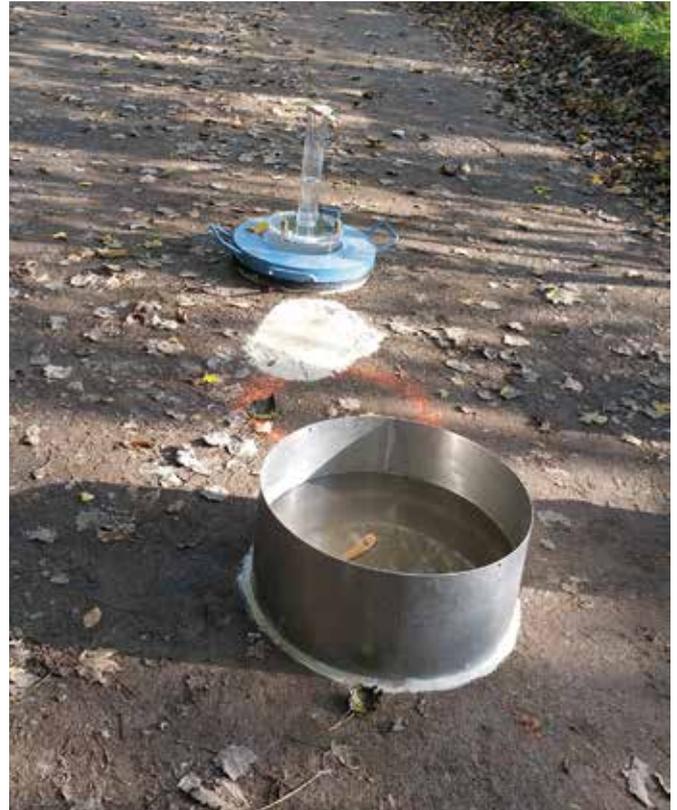


Bild 4: Fertiggestellte Versuchsstrecke

2018), 21 (Mai 2019) und 26 Monaten (Oktober 2019) Liegezeit Folgemessungen durchgeführt. Eine grafische Zusammenfassung der Messergebnisse der In-situ-Messkampagnen zeigt Bild 5 bis Bild 7. Aus den Messdaten lassen sich für die vier verbauten Materialien folgende Ergebniseckpunkte festhalten:

- Der Abschnitt, in dem LDS eingebaut wurde, zeigte nahezu konstante Tragfähigkeitsmesswerte, wobei die leichten Ergebnisschwankungen mit Einbauinhomogenitäten erklärbar sind. Mineralogische Untersuchungen zeigten, dass die eingebaute LDS gut bewittert war, so dass nur minimale Tragfähigkeitserhöhungen zu erwarten waren. Entgegen dem Trend einer nahezu konstanten Tragfähigkeit zeigte sich im Zeitverlauf eine nahezu kontinuierliche Absenkung der Wasserdurchlässigkeit (Doppelring-Infiltrationsmessungen) um fast zwei Potenzen von $7,4 \cdot 10^{-6}$ m/s auf $6,5 \cdot 10^{-8}$ m/s. Auch mit dem Standrohr-Infiltrationsmeter wurde eine Messwertabsenkung bis ca. 4 Monate Liegezeit von $1,4 \cdot 10^{-5}$ m/s auf $5,4 \cdot 10^{-7}$ m/s gemessen. Diese Entwicklung endete jedoch nach 4 Monaten Liege-

zeit und ging in ein nahezu konstantes Ergebnisniveau über. Die anfängliche Reduktion der Wasserdurchlässigkeiten könnte in diesem Fall auch auf Nachverdichtungseffekte durch den Haldenbetrieb erklärt werden.

- Der Abschnitt, in dem Naturstein verbaut wurde, zeigte zu Beginn nahezu konstante Tragfähigkeitsmesswerte. Nach 8 Monaten Liegezeit wurde tendenziell ein Anstieg der Tragfähigkeiten erfasst, der sich im Anschluss wieder auf ein konstanteres Ergebnisniveau absenkte. Entsprechend wird vermutet, dass die Messung nach 13 Monaten Liegezeit nicht repräsentativ und das konstantere Ergebnisniveau vor und nach 13 Monaten Liegezeit bewertungsrelevant ist. Somit zeigte die Variante mit Naturstein einen Tragfähigkeitsanstieg zwischen 4 und 8 Monaten Liegezeit, der in etwa eine Verdopplung bewirkte. Auf Seiten der Doppelring-Infiltrationsmessungen wurde über den gesamten Messzeitraum eine Absenkung der Wasserdurchlässigkeit von $1,0 \cdot 10^{-7}$ m/s auf $1,6 \cdot 10^{-8}$ m/s gemessen, wobei dazwischen auch Messwerte

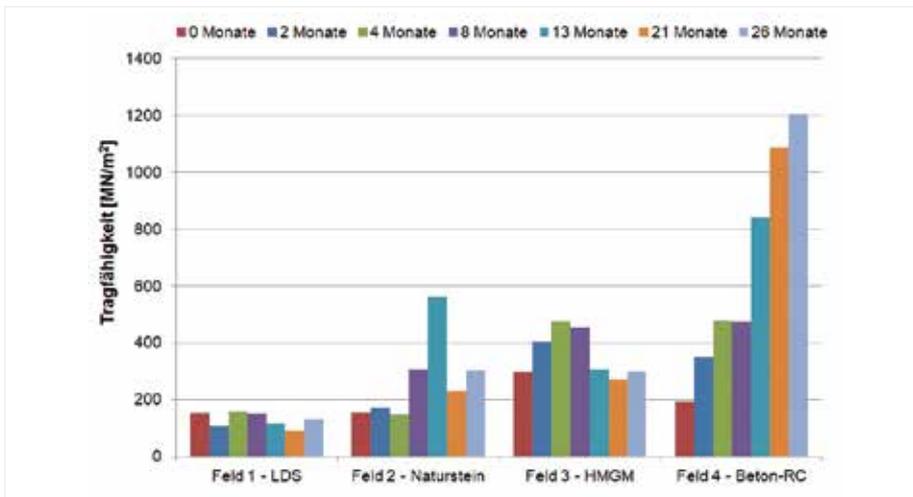


Bild 5: Entwicklung der Tragfähigkeiten (LPD) innerhalb von 26 Monaten (In-situ-Messungen)

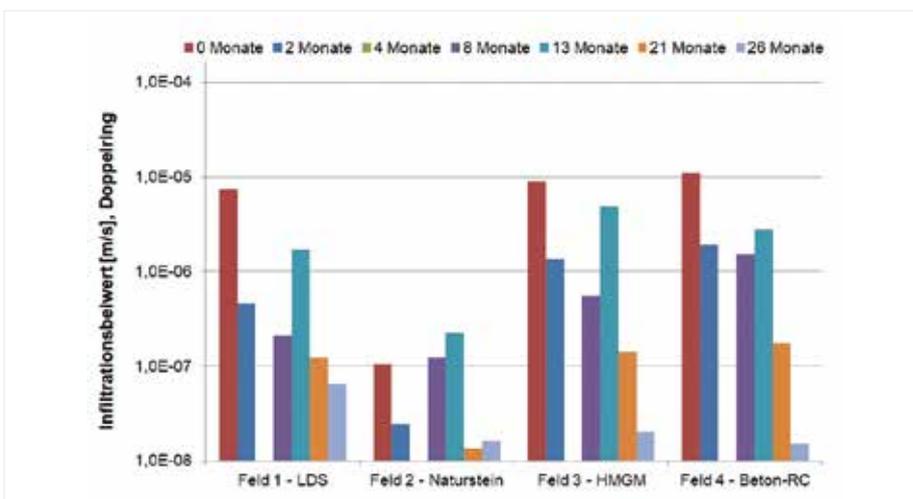


Bild 6: Entwicklung der Doppelring-Infiltrationsbeiwerte innerhalb von 26 Monaten (In-situ-Messungen)

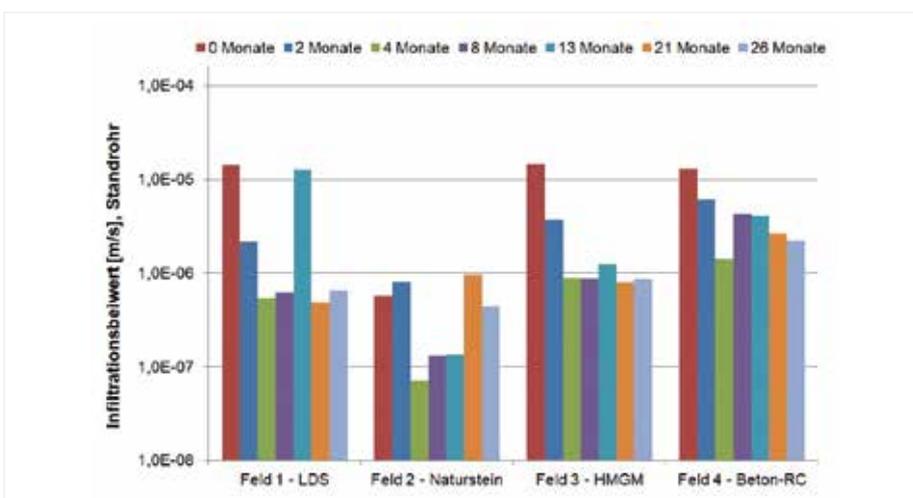


Bild 7: Entwicklung der Standrohr-Infiltrationsbeiwerte innerhalb von 26 Monaten (In-situ-Messungen)

oberhalb des Ausgangswertes festgehalten wurden. Auch auf Seiten der Standrohr-Infiltrationsmessungen wurde zu Beginn eine Ergebnisabsenkung um ca. eine Zehnerpotenz messtechnisch erfasst, die sich jedoch im zeitlichen Verlauf tendenziell wieder auf das Ausgangsergebnis einpendelte.

- Die Tragfähigkeit des dritten Abschnitts (HMGM) der Versuchsstrecke zeigte von Beginn an eine Zunahme der Messergebnisse von knapp 300 MN/m² auf ca. 470 MN/m² nach einer Liegezeit von 8 Monaten. Dieser Anstieg zeigte im Folgenden eine rückläufige Entwicklung auf den anfänglichen Messwert von knapp 300 MN/m². Die Wasserdurchlässigkeiten der Doppelring-Infiltrationsmessungen zeigten über die gesamte Liegezeit einen klaren Absenkungstrend von 9,0·10⁻⁶ m/s auf 2,0·10⁻⁸ m/s. Gleiches konnte für die Messungen mit dem Standrohr-Infiltrationsmeter gemessen werden. Jedoch endete die Absenkungsentwicklung bereits nach 4 Monaten Liegezeit. Danach wurden nahezu konstante Ergebnisse zwischen 8,0 bis 9,0·10⁻⁷ m/s gemessen.

- Einen durchweg eindeutigen Entwicklungstrend bzgl. der Tragfähigkeit zeigte der vierte Bauabschnitt mit dem Beton-RC-Baustoffgemisch. Hier wurde zu Beginn eine Tragfähigkeit von ca. 200 MN/m² gemessen, die sich nach 26 Monaten Liegezeit auf knapp 1.200 MN/m² entwickelte und somit nahezu eine Versechsfachung aufzeigte. Eine gegenläufige Entwicklung zeigte hierzu der Infiltrationsbeiwert mittels Doppel-



Bild 8: Teilansicht
ausgelagerter Laborproben

ring-Infiltrometer mit einer nahezu kontinuierlichen Absenkung von $1,1 \cdot 10^{-5}$ m/s auf $1,5 \cdot 10^{-8}$ m/s. Eine weniger ausgeprägte, jedoch grundsätzlich vergleichbare Entwicklung zeigten die Messergebnisse der Standrohr-Infiltrometermessungen. Hiermit wurde eine Absenkung von $1,3 \cdot 10^{-5}$ m/s auf $2,2 \cdot 10^{-6}$ m/s gemessen.

Aus den In-situ-Messungen lassen sich entsprechend die folgenden Kernpunkte formulieren:

- Die Baustoffgemische zeigten einen teils deutlichen Zuwachs an Tragfähigkeit mit der Liegezeit.
- Die Wasserdurchlässigkeit verringerte sich um ein bis zwei Zehnerpotenzen sowohl unter Beachtung der Doppelring- als auch der Standrohr-Infiltrometermessungen, wobei Letztere ab einem Zeitpunkt von 4 Monaten Liegezeit eher geringer abnahmen oder konstanter ausfielen.
- Häufig zeigte sich, dass die Doppelring-Infiltrometerergebnisse niedriger ausfielen als die Standrohr-Infiltrometerergebnisse. Zum Teil lagen verfahrenstechnisch Ergebnisunterschiede von ein bis fast zwei Zehnerpotenzen vor.

Die Laborstudie umfasste ebenfalls regelmäßige Tragfähigkeits- [5] und Wasserdurchlässigkeitsmessungen [6] und sollte zum einen eine Vergleichsmög-

lichkeit zur Entwicklung der untersuchten Messparameter zwischen Feld- und Laborversuchen (SWS 1, HMGM 1, Beton-RC 1 und Naturstein) ermöglichen und zum anderen sollte die Aussagekraft der Ergebnisse durch Einbindung weiterer Baustoffgemische (SWS 2, HMGM 2, Beton-RC 2) erweitert werden. Um die zeitliche Entwicklung der Wasserdurchlässigkeit und der Tragfähigkeit hierbei möglichst realitätsnah, sprich: unter den gleichen Umwelteinflüssen wie in situ beurteilen zu können, wurden die hergestellten Laborprobenkörper (CBR und Standrohr-Infiltrometer) im Freien gelagert und der jahreszeitlichen Witterung ausgesetzt (Bild 8). Die dafür im Voraus hergestellten Probenkörper wurden nach einem Probenalter von 0, 1, 3, 6, 12 und 24 Monaten getestet. Eine grafische Darstellung der Messergebnisse der Labormessungen zeigen Bild 9 und Bild 10. Die Ergebnisse und Tendenzen der Laborversuche lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Für das Baustoffgemisch LDS 1 wurde ein kontinuierlicher Tragfähigkeitszuwachs von 68 % auf 180 % gemessen, was vom Ergebnis her mehr als einer Verdoppelung der CBR-Tragfähigkeit entspricht. Die Infiltrationsbeiwerte zeigten dagegen keine klare Entwicklung, sondern eher schwankende Ergebnisse. Der Großteil der Messergebnisse zeigte jedoch einen Infiltrationsbeiwert von ca. $1 \cdot 10^{-6}$ m/s.

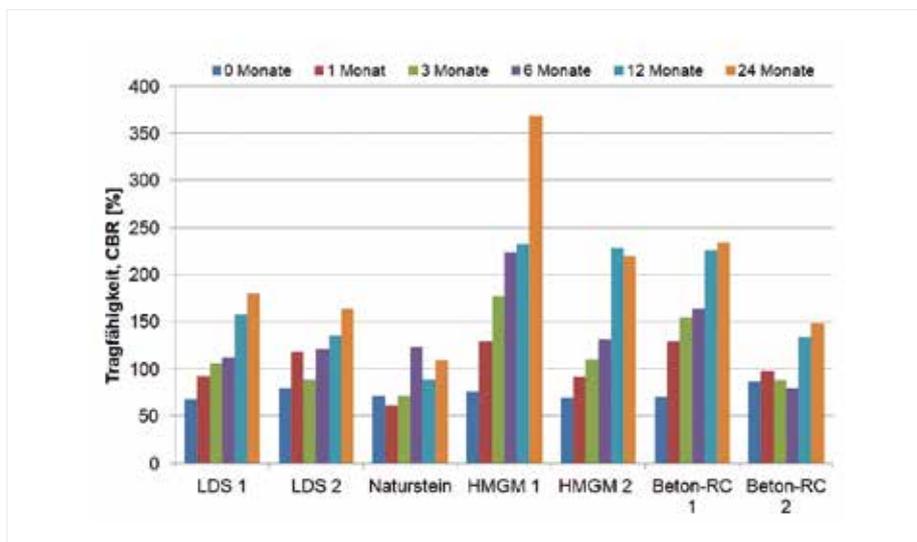


Bild 9: Entwicklung der Tragfähigkeiten (CBR) innerhalb von 24 Monaten (Labormessungen)

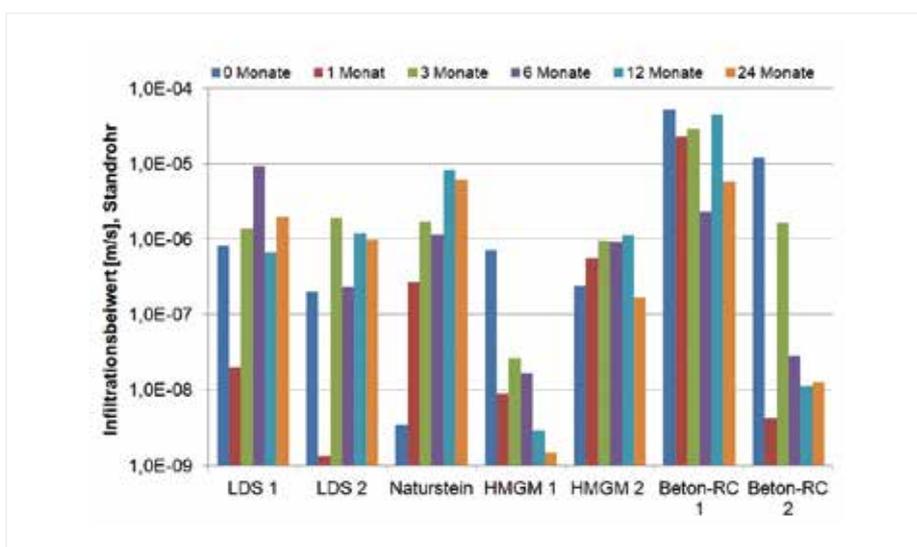


Bild 10: Entwicklung der Standrohr-Infiltrationsbeiwerte innerhalb von 24 Monaten (Labormessungen)

- Auch das Baustoffgemisch LDS 2 zeigte eine mit der LDS 1 vergleichbare kontinuierliche Tragfähigkeitszunahme von 79 % auf 164 %. Bezüglich der Infiltrationsbeiwerte ist keine klare Entwicklungstendenz interpretierbar, da die Messwerte stärkeren Schwankungen unterlagen.
- Bei der Natursteinvariante war zu Beginn der Tragfähigkeitsmessungen keine nennenswerte

Ergebnisänderung messbar. Erst nach 6 Monaten Probenalter wurde ein Zuwachs der Tragfähigkeit von 71 % auf 123 % gemessen. Die Infiltrationsbeiwerte zeigten eine Zunahme von $3,4 \cdot 10^{-9}$ m/s auf $6,1 \cdot 10^{-6}$ m/s.

- Vergleichbar mit der Entwicklung in situ konnte für das HMGM 1 Baustoffgemisch auch während der Labormessungen eine stark ausgeprägte und

kontinuierliche Tragfähigkeitszunahme von 76 % auf 368 % (nahezu Verfünffachung) festgestellt werden, während die Infiltrationsbeiwerte von $7,1 \cdot 10^{-7}$ m/s auf $1,5 \cdot 10^{-9}$ m/s absanken.

- Das Baustoffgemisch HMGM 2 zeigte eine Verdreifachung der Tragfähigkeit von 69 % auf 219 % über 24 Monate. Jedoch konnte hierdurch kein Einfluss auf die Infiltrationsbeiwerte belegt werden, da diese bis zu einem Probenalter von 12 Monaten von $2,4 \cdot 10^{-7}$ m/s auf $1,1 \cdot 10^{-6}$ m/s anstiegen und im Anschluss mit $1,7 \cdot 10^{-7}$ m/s sich wieder nahezu auf den Ausgangswert absenkten.
- Einen kontinuierlichen Tragfähigkeitszuwachs von 70 % auf 234 % zeigte auch das Baustoffgemisch Beton-RC 1, wobei für die Infiltrationsbeiwerte ein abnehmender Ergebnistrend von ca. einer Zehnerpotenz ($5,2 \cdot 10^{-5}$ m/s auf $5,7 \cdot 10^{-6}$ m/s) erfasst wurde.
- Im Vergleich zu den anderen untersuchten Baustoffgemischen entwickelte der Beton-RC 2 einen weniger deutlichen, jedoch vorhandenen Tragfähigkeitszuwachs von 86 % auf 148 %. Auf der anderen Seite wurde eine deutliche Abnahme der Infiltrationsbeiwerte von $1,2 \cdot 10^{-5}$ m/s auf $1,3 \cdot 10^{-8}$ m/s gemessen.

Aus der Laborstudie lassen sich entsprechend die folgenden Kernpunkte formulieren:

- Alle Baustoffgemische zeigten einen klaren Zuwachs der Tragfähigkeit, wobei zum Teil Zuwächse um 300 bis 400 % belegt werden konnten.
- Ein messtechnischer Effekt der Tragfähigkeitszunahme auf die Infiltrationsbeiwerte lässt sich

für drei Baustoffgemische (HMGM 1, Beton-RC 1 und Beton-RC 2) interpretieren. Für die vier anderen Baustoffgemische ließ sich keine direkte bzw. effektive Interaktion zwischen Tragfähigkeitszunahme und Wasserdurchlässigkeit belegen.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Mit dem Forschungsvorhaben konnte sowohl im Labor als auch in situ verdeutlicht werden, dass die untersuchten Baustoffgemische mit zunehmender Liegezeit teils deutliche Tragfähigkeitszunahmen zeigten und sich ihre Wasserdurchlässigkeiten teils um zwei Zehnerpotenzen absenkten. Dennoch kann davon ausgegangen werden, dass keine Versiegelung stattfindet, da die Spannweite der erzielten Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte nach knapp 24 Monaten Projektzeit von 10^{-6} m/s bis 10^{-8} m/s gemäß DIN 18130-1 [7] als durchlässig bis schwach durchlässig eingestuft wird. Folglich lässt sich daraus für die untersuchten Baustoffgemische der Schluss ziehen, dass durch Karbonatisierung keine Oberflächenversiegelung von Verkehrsflächen bedingt wird. Weiterhin muss bzgl. der Infiltrationsbeiwerte beachtet werden, dass die Doppelring- und Standrohr-Infiltrometerergebnisse zum Teil um ein bis fast zwei Zehnerpotenzen divergierten und somit kein Verfahrensvergleich möglich war. Daher ist eine Festlegung, welches Messverfahren bzw. Ergebnis der realen Wasserdurchlässigkeit des untersuchten Materials entspricht, nicht möglich.

Auf Basis der mit dem Forschungsvorhaben erzielten Labor- und Feldergebnisse kann für karbonatisierende Baustoffgemische vor allem der positive und vorteilhafte Effekt einer materialbedingten aufwandslosen Tragfähigkeitszunahme hervorgehoben werden, die zum einen die Gebrauchstauglichkeit einer Baumaßnahme hervorhebt und zum anderen einen Einfluss auf die Dimensionierung einer Baumaßnahme bzw. eines Bauwerks und der damit einhergehenden Ressourcenschonung haben kann. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Tragfähigkeitszunahme zu keiner Versiegelung der Oberfläche führt und somit, je nach Anforderungswert, von einer ausreichend vorhandenen Wasserdurchlässigkeit ausgegangen werden kann. Hierzu sei darauf hingewiesen, dass in dem Forschungsvorhaben auch ergänzend ältere Versuchswege mit Liegezeiten von über 10 Jahren untersucht wurden, die dieser Folgerung entsprechen.

DANKSAGUNG

Das hier vorgestellte IGF-Vorhaben 19568 N der Forschungsvereinigung VDEh-Gesellschaft zur Förderung der Eisenforschung mbH, Sohnstraße 65, wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V. (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.



LITERATUR

- [1] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau – TL SoB-StB, Ausgabe 2004, Fassung 2007
- [2] DIN 18134:2012-04: Baugrund – Versuche und Versuchsgeräte – Plattendruckversuch
- [3] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): TP Gestein-StB, Teil 8.3.4: Bestimmung des Infiltrationsbeiwertes mit dem Doppelring-Infiltrometer – in situ-Verfahren, Ausgabe 2015
- [4] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): TP Gestein-StB, Teil 8.3.2: Bestimmung des Infiltrationsbeiwertes mit dem Modifizierten Standrohr-Infiltrometer – in situ-Verfahren, Ausgabe 2012
- [5] DIN EN 13286-47:2012-07: Ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische – Teil 47: Prüfverfahren zur Bestimmung des CBR-Wertes (California bearing ratio), des direkten Tragindex (IBI) und des linearen Schwellenwertes
- [6] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): TP Gestein-StB, Teil 8.3.1: Bestimmung des Infiltrationsbeiwertes mit dem Standrohr-Infiltrometer – Laborverfahren, Ausgabe 2012
- [7] DIN 18130-1:1998-05: Baugrund – Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes - Teil 1: Laborversuche

IDENTIFIZIERUNG VON NICHTTECHNISCHEN INNOVATIONSHÜRDEN FÜR DIE EUROPÄISCHE PROZESSINDUSTRIE

A. Morillon, PhD; D. Algermissen, M.Sc.
(FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e.V.)

I. Martin, M.Sc.; M. Izquierdo, M.Sc.
(Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos [CIRCE], Saragossa, Spanien)

M. Winter, PhD
(Wirtschaftsverband der europäischen chemischen Industrie [CIRCE], Brüssel, Belgien)

K. Coppenholle, LL.M.
(The European Cement Association [CEMBUREAU], Brüssel, Belgien)

A. Orduna, M.A.
(A.SPIRE aisbl, Brüssel, Belgien)

J. S. Nissen, M.Sc.; Dr. rer. nat. Ch. Grunewald
(Deutsches Institut für Normung e. V. [DIN], Berlin)

Dr. rer. nat. Ch. Dannert, A.-K. Blanke, M.Sc.
(European Centre for Refractories gGmbH [ECREF], Höhr-Grenzhausen)

EINLEITUNG

Die verschiedenen Industriebranchen in Europa zeichnen sich mit ihren Prozessen durch anspruchsvolle Technologien aus, die innovationsorientiert sind und ein hohes Maß an Übertragbarkeitspotenzial besitzen. Jedoch liegt die Industrie in Europa mittlerweile in Forschung und Entwicklung hinter ihren wichtigsten Konkurrenten aus anderen Regionen der Welt zurück [1]. Damit Europa auf dem globalen Markt wettbewerbs-

fähig ist, muss es sich auf Neuerungen und Hindernisse konzentrieren, die der Innovation im Wege stehen. Die europäische, sektorübergreifende Zusammenarbeit kann dazu beitragen, gemeinsame nichttechnische Engpässe zu identifizieren. Im Rahmen des Projekts HARMONI (08/2017 bis 10/2019, www.spire2030.eu/harmoni) wurden alle Branchen des Netzwerks SPIRE (Sustainable Process Industry through Resource and Energy Efficiency – Nachhaltige Industrie

durch Ressourcen- und Energieeffizienz) als Prozessindustrie zusammengeführt: Stahl, Mineralien, Nichteisenmetalle, Maschinenbau, Chemikalien, Keramik, Zement und Wasser (Bild 1).

Im Rahmen des EU-Forschungsprogramms Horizon 2020 wurde deshalb ein Verbundprojekt mit Vertretern der europäischen Prozessindustrie durchgeführt, um gemeinsam die regulatorischen Engpässe und den Normungsbe-



Bild 1: Sektoren im Netzwerk SPIRE

darf zu analysieren und Lösungen vorzuschlagen, die für den Übergang zu einer nachhaltigeren und wettbewerbsfähigeren europäischen Prozessindustrie erforderlich sind. Ziel des Projekts HARMONI (Harmonised assessment of regulatory bottlenecks and standardisation needs for the process industry) war es, eine Antwort darauf zu geben, warum es Unternehmen der europäischen Industrie schwerfällt, Innovationen auf dem Markt umzusetzen, und wie Lösungen zur Förderung von Innovationsaktivitäten innerhalb der Branche weiterentwickelt werden können. Dabei wurden drei Schlüsselherausforderungen identifiziert:

- 1) Regelwerke und Regulierungsprozesse
- 2) Hindernisse für die Übertragbarkeit von Innovationen und
- 3) Standards und Standardisierungsprozesse

Die während des Projekts HARMONI identifizierten nichttechnischen Fragen in Bezug auf Regelwerke und Regulierungsprozesse sind von übergreifender Bedeutung in den verschiedenen Sektoren der europäischen Industrie: ganzheitlicher Ansatz, Zugang zu öffentlichen Mitteln, Kreislaufwirtschaft, Abfallrecycling, Kunststoffrecycling sowie CO₂-Abscheidung und -Nutzung [2]. Die Themen wurden durch Literaturrecherchen, Telefoninterviews mit verschiedenen Interessenvertretern oder in Workshops identifiziert. Zu den Zielgruppen gehörten Industrievertreter, Branchenverbände und Projektkoordinatoren. Zusätzlich wurden die Ansichten von Behördenvertretern zu der Thematik eingeholt. Erste Ergebnisse des Projekts wurden bereits während der 10. Europäischen Schlackenkonferenz EUROSLAG in Thessaloniki [3] vorgestellt.

In diesem Beitrag werden Hindernisse der europäischen Industrie im Hinblick auf den sektorübergreifenden Transfer und den aktuellen Normungsbedarf dargestellt.

SEKTORÜBERGREIFENDER TRANSFER VON LÖSUNGEN

Soziale, institutionelle und technische Innovationen gelten als die wichtigsten Treiber des Strukturwandels und der internationalen Wettbewerbsfähigkeit [4, 5]. Die identifizierten Haupthindernisse für die Übertragbarkeit von Innovationen wurden in „Barrieren“ und „verpasste Chancen“ gegliedert.

Im Hinblick auf die Barrieren wurden die folgenden Schlüsselkategorien identifiziert:

- Fehlende Anreize, Besteuerung
- Mangelnde Harmonisierung
- Ökobilanzierung und Fehleinschätzung in der Nutzungsdauer
- Finanzielle Hindernisse: Finanzierungs- und Investitionsentscheidungen
- Bürokratische Barrieren
- Andere

Im Hinblick auf die verpassten Chancen wurden die folgenden Schlüsselkategorien identifiziert:

- Sektorübergreifende Zusammenarbeit und Partnerschaften
- Rolle der Industrieverbände für den Innovationstransfer
- Forschung
- Informationsaustausch und Kommunikation, Wissensmanagement
- IT-basierte Herausforderungen
- Verwendung digitaler Werkzeuge
- Unzureichendes Änderungsmanagement und unzureichende Technologieübernahme
- Rolle der Normung für den Innovationstransfer

Es gibt verschiedene Ansätze, In-

Potenzielle Schlüsselbereiche für einen verbesserten Wissenstransfer	Potenzielle Schlüsselbereiche des Technologietransfers	Soziale, politische, wirtschaftliche und industrielle Trends
<ul style="list-style-type: none"> a. Beschleunigter Einsatz der im Rahmen von SPIRE identifizierten F&E-Möglichkeiten b. Zugang zu Finanzmitteln und neuen Geschäftsmodellen, z. B. für die Kreislaufwirtschaft c. Cluster-Initiativen, um die Reichweite zu erhöhen d. Innovationsmanagement (hoher Austausch von Ansätzen, Best Practices, Lessons Learned) e. Führungseinstellung & Unternehmenskultur f. Neue Materialien/Oberflächen g. Prozessmodifikation und -verfeinerung h. Logistik i. Lizenzierung in verschiedenen Nutzungsphasen j. Fertigkeiten & Ausbildung k. Smart Specialization 	<ul style="list-style-type: none"> a. Bau-Technologien b. Informationstechnik, IT-Anwendungen und Software, IT-Sicherheitstechnik und Überwachung c. Schlüsseltechnologien, insbesondere <ul style="list-style-type: none"> - Nanotechnologie - Fortschrittliche Materialien - Fortschrittliche Fertigung d. Produktionstechnik einschließlich Maschinenbau und Maschinen e. Prüfeinrichtungen (DIN e.V. & DKE 2018) f. Ressourcen- und energieeffiziente Industrie <ul style="list-style-type: none"> - Ausgangsmaterial - Prozesse und Prozessintensivierung, inkl. IS - Markt-Anwendung - Abfall2Ressource - CO₂ zu Brennstoff/Chemikalien 	<p>Diese Trends bilden eine dritte Art des Transfers, da sie einen vertieften Wissensaustausch und ein kooperatives Lernen erfordern.</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Digitale Umwandlung & Industrie 4.0 b. Erweiterter Einsatz der Optimierungstechnik c. Pro-Umwelt-Aktivitäten <ul style="list-style-type: none"> - Kreislaufwirtschaft - Energieverwaltung - CO₂-Nutzung - Erneuerbare Energien - Abfall-Recycling d. Leichtgewichtige Produkte e. Messgeräte f. Überwachungstechnologien g. Industrielle Symbiose (IS)

Tabelle 1: Schlüsselbereiche mit potenziellen Transfermöglichkeiten

novationsaktivitäten in Unternehmen zu fördern. Ein sehr wichtiger Weg ist der Innovationstransfer, weshalb HARMONI sich mit Fragen befasste, wie der sektorübergreifende Transfer von Innovationen gemessen und verbessert werden kann. Im Rahmen einer umfassenden Zusammenarbeit mit der Industrie war es möglich, eine Methodik für Unternehmen zur Bewertung ihrer sektorübergreifenden Übertragbarkeit und einen ganzheitlichen Ansatz von Übertragbarkeitsindikatoren über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg zu definieren. Den Akteuren wurden die relevantesten Kanäle für den Innovationstransfer und potenzielle Schlüsselbereiche

von Übertragungsmöglichkeiten zur Verfügung gestellt.

Im Rahmen des Projekts wurden insgesamt 29 kritische Erfolgsfaktoren identifiziert. Die identifizierten Schlüsselbereiche potenzieller Transfermöglichkeiten sind in Tabelle 1 dargestellt.

Die Ergebnisse aller im Rahmen von SPIRE durchgeführten Projekte wurden auf der Grundlage der identifizierten Schlüsselbereiche hinsichtlich ihres Übertragbarkeitspotenzials auf andere Sektoren bewertet. Diese Ergebnisse werden im Zwischenstandsbericht 5.3 [6] vorgestellt. Tabelle 2 zeigt ein Beispiel für die Darstellung der

Ergebnisse auf der Grundlage der Parameter: Innovation, Technologie, Anwendung, Upscaling-Interesse, aktuelles TRL, weiterer Innovationsbereich, Sektor, Replikationssektor und Initiative. Mit diesem Instrument ist es relativ einfach, potenzielle Technologien zu finden, die auf einen anderen Sektor übertragen werden können.

Der Zugang zum Tool ist unter www.spire2030.eu/HARMONI#edit-group_outcomes „HARMONI Final Booklet“ zu finden.



Innovationsbereiche	Technologie	Anwendung	Upscaling-Interesse	Aktuelles TRL	Weiterer Innovationsbereich	Sektor	Replikationssektor	Initiative
FLEXIBLES ENERGIEMANAGEMENT	ENERGIEMANAGEMENT	Betrachten der wichtigsten Faktoren in Bezug auf Energie und deren Regulierung	PAPIERINDUSTRIE	6	Digitalisierung von Anlagen und Betrieb	Nichteisenmetalle	Stahl (Metallurgie, Gießen), Chemikalien, Zement, Glas, Veredelung	SusPire
		Modularer Rahmen für nahtlose Datenverwaltung in einem Ressourcen-Verwaltungssystem		5	Digitalisierung von Anlagen und Betrieb	Chemie (Kunststoffe), andere	Veredelung (TRL 6–8)	SYMBI-OPTIMA
	FLEXIBILITÄTS-PLATTFORM	System zur Entscheidungshilfe für die optimale Nutzung von Abfallströmen		5		Chemie, Mineralien (Magnesit), Stahl, andere	-	BAMBOO
		Optimierung der Steuerung von Nachfrage und dezentraler Erzeugung		4	Prozess-technologie zur industriellen Symbiose	Chemie (Kunststoffe), andere	-	SYMBI-OPTIMA

Tabelle 2: Identifizierte Schlüsselbereiche mit Potenzial auf Übertragbarkeit (Auszug)

NORMUNG

Die Unternehmen und Verbände der Prozessindustrie beteiligen sich aktiv an der Normung auf europäischer und internationaler Ebene [7]. Die eigene Entwicklung von Standards und Normen ist für die Industrie eine gute Möglichkeit zur Platzierung ihrer Innovationen. Die Normung kann zur Innovationsförderung beitragen, indem sie Lösungen für den freien globalen Handel mit Waren und Dienstleistungen bietet [8]. Sie senkt Barrieren, indem sie den Austausch von Waren, Prozessen und Dienstleistungen erleichtert und die Verbreitung und Anwendung von Innovationen fördert. Sie senkt F&E-Risiken und -Kos-

ten, sichert die Qualität, gewährleistet den Umweltschutz und verbessert die Kommunikation und den Informationsaustausch [8]. Die für die internationale Normung zuständigen Organisationen sind die Internationale Organisation für Normung (ISO) [9] zusammen mit der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) [10]. Die Internationale Fernmeldeunion (ITU) [11] ist eine Sonderorganisation der Vereinten Nationen für Informations- und Telekommunikationstechnologien. Viele Mitglieder der ISO gehören regionalen Normungsorganisationen an. Zudem hat die ISO regionale Normungsorganisationen anerkannt, die Afrika, die arabischen Länder,

das Gebiet der Gemeinschaft Unabhängiger Staaten, Europa, Lateinamerika, den pazifischen Raum und die Länder Südostasiens vertreten.

In Europa erfolgt die Normung durch das Europäische Komitee für Normung (CEN) [12], das Europäische Komitee für elektrotechnische Normung (CENELEC) [13] und das Europäische Institut für Telekommunikationsnormen (ETSI) [14].

Auf europäischer Ebene stehen somit verschiedene Normungsdokumente zur Verfügung. Jedes dieser Dokumente stellt eine andere Konsensebene dar [7]:

■ Die Europäische Norm (EN) zielt

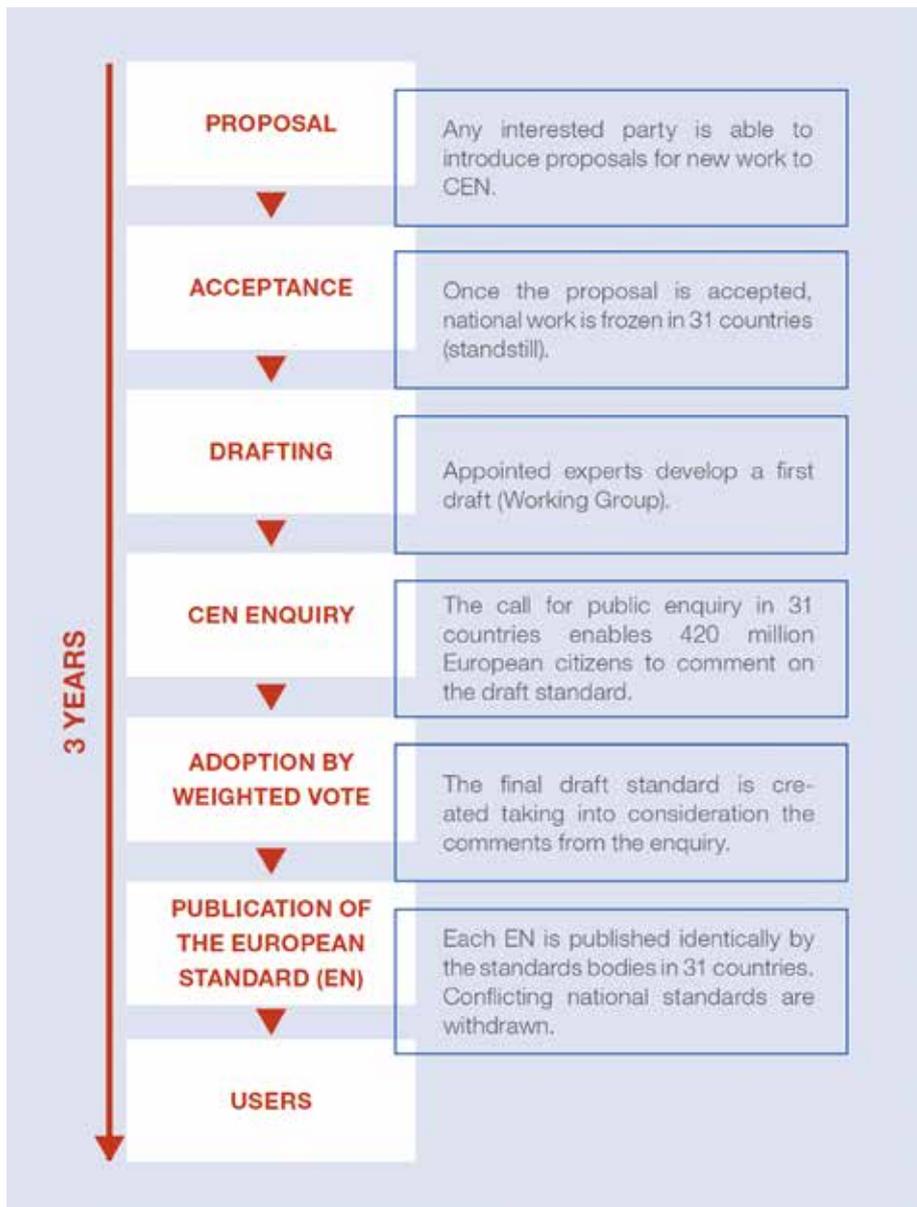


Bild 2: Entwicklung einer Europäischen Norm [15]

auf die Entwicklung (Bild 2) eines normativen Dokuments ab, das den aktuellen Stand der Technik und des Wissens widerspiegelt. Jedes CEN-Mitglied ist verpflichtet, die EN zu übernehmen und nationale Normen zurückzuziehen, die im Widerspruch zu den EN-Normen stehen oder diese duplizieren.

- Weitere Produkte der europäischen Normung sind Europäi-

sche Technische Spezifikationen (CEN/TS), die die Marktentwicklung und das Wachstum von Produkten oder Verfahren unterstützen sollen, die sich noch in der Entwicklungs- und/oder Erprobungsphase befinden, sowie Europäische Technische Berichte (CEN/TR), die Anforderungen mit Empfehlungs- und Erklärungscharakter enthalten.

- Spezielle Standards, die mit dem raschen Konsens von Experten-Interessengruppen entwickelt werden (kein vollständiger Konsens erforderlich), finden sich in CEN-Workshop-Vereinbarungen (CWA).

Die Prozessindustrie nimmt aufgrund der genannten Vorteile aktiv am Standardisierungsprozess teil. Das Projekt HARMONI hat jedoch allgemein wahrgenommene Engpässe weiterer Akteure ermittelt [7]. Einige Beispiele sind:

- Zeit bis zur Markteinführung
- Fehlende personelle Ressourcen
- Komplexität der Entscheidungsprozesse
- Hohe Teilnahmekosten
- Fehlende Informationen über den Prozess
- Patentfragen/Abfluss von Know-how
- Kein Zugang zum Standardisierungsprozess

ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des Projekts HARMONI wurden die Bedürfnisse in Bezug auf die Standardisierung der Industrie ermittelt und darauf aufbauend Optimierungsvorschläge unterbreitet. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass sich ein großer Teil der Normungsarbeit der letzten Jahre auf Aspekte der Abfallwirtschaft und Abfallvermeidung und nicht auf die Kreislaufwirtschaft (Circular Economy) konzentrierte. Häufig werden Prozesse nicht als Kreis, sondern linear betrachtet. Auch Fragen der stofflichen Nutzung, der Recyclingfähigkeit und der Wiederaufbereitung werden meist im Rahmen einer bestimmten Branche und/oder Produktgruppe behandelt. Bis heute gibt es keine Nor-

men, die sich auf das Konzept der Kreislaufwirtschaft in seiner Gesamtheit konzentrieren. Aufgrund der hohen Bedeutung dieses Themas gewinnt es aber an Dynamik [16].

Im Rahmen des Projekts HARMONI wurde eine Standardisierungs-Toolbox entwickelt, die der Industrie helfen soll, sich am Standardisierungsprozess zu beteiligen, die unter www.spire2030.eu/HARMONI#edit-group_outcomes „HARMONI Standardization toolbox“ zu finden ist.



DANKSAGUNG

Dieses Projekt hat eine Förderung der Europäischen Union unter dem Förderungs- und Entwicklungsprogramm Horizon 2020 erhalten und wurde unter der Fördernummer 768755 geführt.



LITERATUR

- [1] https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/R_%26_D_expenditure#Gross_domestic_expenditure_on_R_26_D
- [2] HARMONI, 2018. Deliverable D2.3 "List of priority topics within the challenging regulations and standardisation needs". Available from: <https://www.spire2030.eu/HARMONI>
- [3] Morillon, A.; Algermissen, D.; Martin, I.; Izquierdo, M.; Winter, M.; Coppenholle, K.; Orduna, A.; Nissen, J.S.; Grunewald, C.; Dannert, C.; Blanke, A.K.: Barriers to innovation encountered by European process industry, Proceedings from 10th European Slag Conference 8th to 11th Oct 2019, Thessaloniki, Greece, pp. 19–27
- [4] Baudson, T.G.: (2008): Kreativität und Innovation. Beiträge aus Wirtschaft, Technik und Praxis; eine Publikation des MinD-Hochschul-Netzwerkes
- [5] Neck, H.M.; Brush, C.G.; Greene, P.G.: (2014) Teaching entrepreneurship. A practice-based approach
- [6] HARMONI, 2019. Deliverable D5.3 "Interactive innovation tool for enhancing the transfer of solutions across sectors". Available from: <https://www.spire2030.eu/HARMONI>
- [7] HARMONI, 2018. Deliverable D4.1 "Participation experience of the process industry in the European standardization process". Available from: <https://www.spire2030.eu/HARMONI>
- [8] Standardization benefits. <https://www.din.de/en/about-standards/benefits-for-the-private-sector/benefits-for-the-private-sector-72360>, 23.07.2018
- [9] Internationale Organisation für Normung (ISO), Schweiz, www.iso.org
- [10] Internationale Elektrotechnische Kommission (IEC), Schweiz, www.iec.ch
- [11] Internationale Fernmeldeunion (ITU), Genf, Schweiz, www.itu.int
- [12] Europäisches Komitee für Normung (CEN), Brüssel, Belgien, www.cen.eu
- [13] Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung (CENELEC), Brüssel, Belgien, www.cenelec.eu
- [14] Europäisches Institut für Telekommunikationsnormen (ETSI), Sophia Antipolis, Frankreich, www.etsi.org
- [15] CEN Compass. <https://www.cen.eu/news/brochures/brochures/Compass.pdf>, 23.07.2018
- [16] HARMONI, 2019. Deliverable D4.3 "Actions to address current standardisation needs in the process industry". Available from: <https://www.spire2030.eu/HARMONI>

ERWEITERUNG DES KENNTNISSTANDES ÜBER VANADIUM IN ELEKTROOFENSCHLACKEN

Dr. rer. nat. A. Sokol; Dr.-Ing. R. Bialucha
(FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e.V.)

EINLEITUNG

Elektroofenschlacken (EOS) entstehen bei der Stahlherstellung im Elektrolichtbogenofen, wo Stahlschrott unter Zugabe von Zusätzen, wie Kalk und Dolomit, eingeschmolzen wird. Im Laufe des Einschmelzens bilden sich aus den Reaktionsprodukten Rohstahl und eine schmelzflüssige Schlacke. Die flüssige Schlacke kühlt in Beeten ab, ist kristallin und weist eine komplexe mineralische Zusammensetzung auf. Durch den nahezu ausschließlichen Einsatz von Schrott als Eisenträger liefert die Elektrostahlroute in Bezug auf die Kreislaufwirtschaft einen wichtigen Beitrag zum Stahlrecycling. Die Verwendbarkeit der EOS hängt neben den technischen Eigenschaften auch von der wasserwirtschaftlichen Verträglichkeit ab. Hierunter wird in erster Linie die Löslichkeit umweltrelevanter Bestandteile und damit ihr möglicher Einfluss auf Boden und Oberflächen- bzw. Grundwasser verstanden. Elektroofenschlacke wird vor allem als Baustoff im

Straßen- und Erdbau eingesetzt [1]. Vor dem Hintergrund der geplanten bundeseinheitlichen Ersatzbaustoffverordnung EBV [2] ist jedoch damit zu rechnen, dass aufgrund neuer Auslaugverfahren (Verfahren, die mit einem Wasser/Feststoff-Verhältnis (L/S) von 2:1 statt 10:1 arbeiten: Säulenverfahren DIN 19528 [3] und das Schüttelverfahren DIN 19529 [4]) und Eluatgrenzwerte etablierte Anwendungsgebiete teilweise wegfallen werden [5]. Dies würde zwangsläufig zu erhöhter Deponierung mit entsprechenden Kosten und negativen Folgen für die Umwelt führen, was zusätzlich gegen den Gedanken der Kreislaufwirtschaft spricht. Besonders der Parameter Vanadium ist im Rahmen der EBV in den Fokus der Diskussion geraten, der bei Zugrundelegung der 2:1-Auslaugverfahren zu einer schlechteren Bewertung vieler Elektroofenschlacken führen würde. Aktuelle Untersuchungen belegen, dass zahlreiche Schlacken der deutschen Elektrostahlwerke aufgrund der Vanadiumauslau-

FeO	M.-%	31
CaO	M.-%	27
SiO ₂	M.-%	14
MgO	M.-%	8,6
MnO	M.-%	6,2
Al ₂ O ₃	M.-%	6,0
CO ₂	M.-%	1,8
Cr ₂ O ₃	M.-%	1,7
TiO ₂	M.-%	0,54
P ₂ O ₅	M.-%	0,36
V ₂ O ₅	M.-%	0,22
BaO	M.-%	0,13
SO ₄	M.-%	0,20
F	M.-%	0,02

Tabelle 1: Feststoffgehalte der untersuchten EOS

Name	Formel	EOS	EOS modifiziert				
			Original	Schnell abgekühlt	Langsam abgekühlt		
					Keine Zugabe	Al ₂ O ₃ Zugabe ¹⁾	SiO ₂ Zugabe ¹⁾
Wüstit	(Fe _{1-x-y} Mg _x Mn _y)O _z	37	38	28	27	22	
Spinell	(Fe,Mg,Mn)(Al,Cr) ₂ O ₄	10	2	16	22	15	
Larnit	β-Ca ₂ SiO ₄	35	13	26	21	-	
Bredigit	Ca ₁₄ Mg ₂ (SiO ₄) ₈	-	32	-	-	-	
Kirschsteinit	CaFeSiO ₄	-	-	-	-	57	
Melilith	Ca ₂ (Mg,Al,Fe)Si ₂ O ₇	8	7	29	28	5	
Brownmillerit	Ca ₂ (Al,Fe) ₂ O ₅	10	6	2	2	-	

* A = Ca²⁺, Fe²⁺, Mg²⁺

Tabelle 2: Mineralische Zusammensetzung (M.-%) der untersuchten EOS im Originalzustand und nach Modifizierung im Schmelzversuch

gung nicht mehr in die beste Klasse 1 (SWS-1) eingestuft würden, sondern in Klasse 2 (SWS-2) oder 3 (SWS-3). Das hätte zur Folge, dass diese EOS nicht mehr ohne technische Sicherungsmaßnahmen in sensiblen Bereichen, wie z. B. dem offenen, ungebundenen Wegebau, eingesetzt werden könnten. Zudem gibt es auf dem Markt kaum eine Akzeptanz für Baustoffe, die nicht der Klasse 1 zugeordnet sind – und damit laut EBV-Entwurf als „Produkt“ bezeichnet werden dürfen, während die schlechteren Klassen dem Abfallregime unterliegen.

Es ist bekannt, dass bei der Freisetzung von Spurenelementen die mineralische Bindungsform eine wesentliche Rolle spielt. Die genauen Mechanismen, die zur Auslaugung von Vanadium aus Elektroofenschlacken führen, sind bisher jedoch weitgehend unbekannt. Im Rahmen des hier vorgestellten AiF-Forschungsvorhabens [6] wurde daher der Einfluss der mineralischen Bindung von Vanadium

in Elektroofenschlacken auf das Auslaugverhalten eingehend untersucht. Ziel des Forschungsvorhabens war es zudem, durch den neu erworbenen Kenntnisstand über das Verhalten von Vanadium Möglichkeiten für eine dauerhaft feste Bindung von Vanadium in den Schlacken zu finden, um die Auslaugung weitestgehend zu reduzieren. Als Optionen wurden Zugaben verschiedener Zusätze im flüssigen Zustand sowie unterschiedliche Abkühlgeschwindigkeiten getestet.

Insgesamt wurden acht verschiedene EOS hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung, Mineralogie und des Auslaugverhaltens untersucht. Für die Untersuchungen der mineralogischen Zusammensetzung kamen sowohl die Röntgendiffraktometrie (XRD) als auch die Elektronenstrahlmikrosonde (EMPA) zum Einsatz. Für die Versuche zur Erprobung metallurgischer Maßnahmen wurde aus den acht Schlacken eine EOS ausgewählt, die besonders hohe Vanadiumkonzentrationen im Eluat aufweist, mit der Schmelzversuche im Labormaßstab durchgeführt wurden.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der verschiedenen Untersuchungen mit der ausgewählten EOS vorgestellt und Rückschlüsse auf den Mechanismus der Freisetzung von Vanadium gezogen.

Die ausgewählte EOS weist eine für Elektroofenschlacken typische Zusammensetzung auf. Die im Vollaufschluss gemessenen Feststoffgehalte sind in Tabelle 1 aufgelistet. Tabelle 2 enthält halbquantitative Angaben zur mittels XRD bestimmten mineralischen Zusammensetzung der EOS im Originalzustand sowie nach Modifikation im Schmelzversuch. Die mineralischen Hauptphasen der EOS im Originalzustand sind Wüstit ((Fe,Mn,Mg)O) sowie Larnit (β-Ca₂SiO₄). Weiterhin kommen Spinell, Brownmillerit (Ca₂(Al,Fe)₂O₅)

CHARAKTERISIERUNG DER UNTERSUCHTEN PROBE

Die ausgewählte EOS weist eine für Elektroofenschlacken typische Zusammensetzung auf. Die im Vollaufschluss gemessenen Feststoffgehalte sind in Tabelle 1 aufgelistet. Tabelle 2 enthält halbquantitative Angaben zur mittels XRD bestimmten mineralischen Zusammensetzung der EOS im Originalzustand sowie nach Modifikation im Schmelzversuch. Die mineralischen Hauptphasen der EOS im Originalzustand sind Wüstit ((Fe,Mn,Mg)O) sowie Larnit (β-Ca₂SiO₄). Weiterhin kommen Spinell, Brownmillerit (Ca₂(Al,Fe)₂O₅)

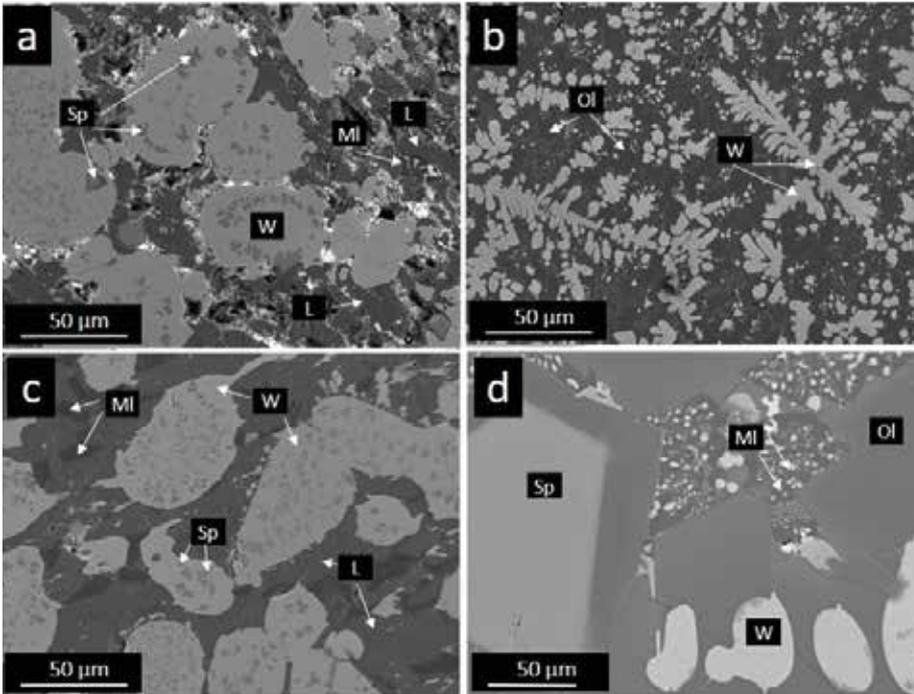


Bild 1: Rückstreuelektro-nenaufnahmen einer EOS im Originalzustand (a) und modifiziert durch schnelle (b) und langsame (c) Abkühlung sowie durch Zugabe von Al_2O_3 mit Bildung großer Spinelle (d); W = Wüstit, L = Larnit, Ol = Olivin, Sp = Spinell, MI = Melilith

	Original	Schnell abgekühlt	Langsam abgekühlt	Al_2O_3 Zugabe*	SiO_2 Zugabe*
Spinell	0,47	0,27	0,29	0,30	0,47
Wüstit	0,19	0,10	0,08	0,17	0,10
Larnit	0,27	0,33	0,37	0,19	-
Bredigit	-	0,37	-	-	-
Kirschsteinit	-	-	-	-	0,29
Melilith	0,15	0,36	0,31	0,36	0,31
Brownmillerit	0,16	0,20	0,36	0,18	-

* Langsame Abkühlung

	Original	Schnell abgekühlt	Langsam abgekühlt	Al_2O_3 Zugabe	SiO_2 Zugabe
Spinell	20	2	18	26	27
Wüstit	29	16	9	18	8
Larnit	40	18	38	15	-
Olivin	-	50	-	-	59
Melilith	5	10	31	40	6
Brownmillerit	6	4	3	1	-

Tabelle 3: V_2O_5 -Gehalte der verschiedenen Mineralphasen in der untersuchten EOS im Originalzustand und nach Modifikation im Schmelzversuch (Mittelwerte)

Tabelle 4: Relative prozentuale Verteilung von Vanadium auf die Mineralphasen

und Melilith (Gehlenit-Äkermanit-Phasen mit der Zusammensetzung $Ca_2(Mg,Al,Fe)Si_2O_7$) vor. Larnit ist ein Vertreter der Olivin-Gruppe mit der allgemeinen

Zusammensetzung $(Ca,Mg,Fe,Mn)_2SiO_4$. Grundsätzlich können sich in Elektroofenschlacken auch andere Phasen dieser Gruppe wie Kirschsteinit ($CaFeSiO_4$), Bredi-

git ($(Ca_{14}Mg_2(SiO_4)_8$), Monticellit ($CaMgSiO_4$) oder Calcio-Olivine ($\gamma-Ca_2SiO_4$) ausbilden. In der untersuchten EOS wurde jedoch ausschließlich der Larnit detek-

		Schüttelverf. 2:1		Schüttelverf. 10:1	
Körnung		0–32 mm	1–4 mm	0–32 mm	1–4 mm
pH-Wert		11,0	11,6	11,4	11,4
Al	µg/l	6384	5516	2697	2621
Cr	µg/l	4,8	6,0	3,1	2,1
Fe	µg/l	15	2,9	47	4,0
K	µg/l	1164	1278	263	289
Mg	µg/l	134	132	401	353
Mo	µg/l	33	57	6,5	14
Ca	mg/l	77	92	40	50
Si	mg/l	8,4	7,3	12	12
V	µg/l	364	456	210	285

Tabelle 5: Eluatkonzentrationen und pH-Werte der untersuchten EOS

tiert, was auch durch Punktanalysen mit der Mikrosonde bestätigt wurde. Nach Modifikation im schmelzflüssigen Zustand treten jedoch auch andere Phasen dieser Gruppe auf, worauf nachfolgend noch eingegangen wird.

Mittels der Elektronenstrahlmikrosonde wurden Rückstreuelektro-nenbilder der Proben angefertigt (Bild 1). Zudem wurden an zwei bis zehn Körnern (je nach Verfügbarkeit) derselben Mineralphase mittels WDS (wellenlängendisper-sive Analyse) quantitative Analysen durchgeführt. Die gemessenen gemittelten Vanadiumgehalte der einzelnen Mineralphasen der untersuchten Proben sind in Tabelle 3 aufgelistet. Es ist ersichtlich, dass Spinell mit 0,46 M.-% in der Originalprobe die höchsten Ge-halte an Vanadium enthält. Auch in den übrigen sieben EOS aus dem oben genannten Forschungsprojekt sowie in früheren Studien (z. B. [7, 8]) wurde Spinell als Hauptträgerphase für Vanadium erkannt. Doch auch die Phasen

aus der Olivin-Gruppe (Larnit, Bredigit, Kirschsteinit) sowie Melilith und Brownmillerit sind in der Lage, Vanadium in signifikanten Mengen aufzunehmen.

Aus den Ergebnissen der halb-quantitativen mineralischen Zusammensetzung und den quantitativen ESM-Messungen kann die relative Verteilung des gesamten in einer Probe enthaltenen Vanadiums auf die einzelnen Mineralphasen abgeschätzt werden. Die entsprechenden berechneten Werte sind in Tabelle 4 angegeben. Es ist ersichtlich, dass der Spinell – obwohl er in der Originalprobe die höchsten Vanadiumgehalte aufweist – trotzdem nicht den Hauptanteil des gesamten Vanadiums in der Probe bindet. So ist etwa 40 % des gesamten Vanadiums im Larnit gebunden, 29 % liegt in Wüstiten vor, während Spinell nur etwa 20 % des gesamten Vanadiums enthält.

Tabelle 5 enthält Konzentrationen ausgewählter Parameter in

Eluaten, die mittels der Schüttelverfahren 2:1 sowie 10:1 in den Körnungen 0–32 mm und 1–4 mm hergestellt wurden. Zu erkennen ist, dass im Schüttelverfahren 2:1 deutlich höhere Vanadium-Konzentrationen gemessen werden als im Schüttelverfahren 10:1. Die SWS-1-Grenze (180 µg/l) wird bei dem 2:1-Auslaugverfahren bei der Körnung 0–32 mm deutlich überschritten, bei der Körnung 1–4 mm wird sogar die SWS-2-Grenze von 450 µg/l erreicht. Bei dem 10:1-Verfahren liegen die Konzentrationen zwar niedriger, dennoch werden die derzeit geltenden Grenzwerte der TL Gestein-StB [9] überschritten (SWS-1: 50 µg/l; SWS-2: 100 µg/l).

SCHMELZVERSUCHE IM LABORMASSSTAB

Für die Schmelzversuche wurde die ausgewählte Probe auf die Korngröße 1–4 mm aufbereitet. Dieses enge Kornband sollte eine gute Vergleichbarkeit gewährleisten, so dass Effekte durch unterschiedliche Feinkornanteile

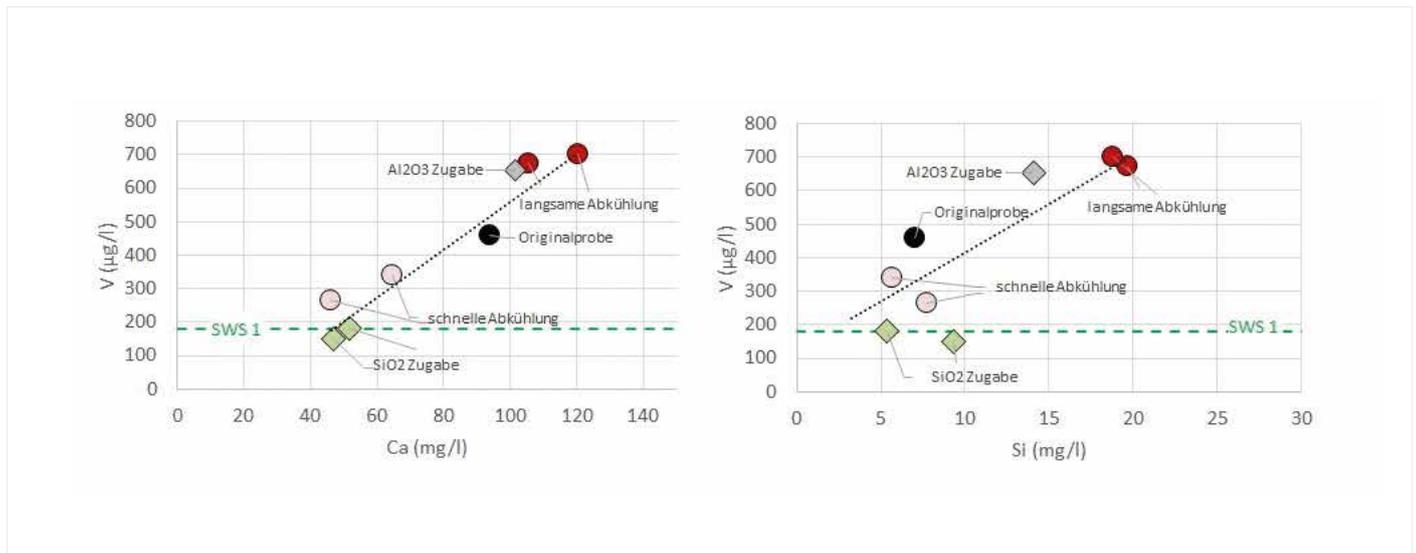


Bild 2: Abhängigkeit von Ca bzw. Si und Vanadium in den Eluaten (Schüttelverfahren 2:1, 2 Punkte = Doppelversuche) der EOS im Originalzustand und nach schmelzflüssiger Behandlung

vermieden werden. In einem ersten Schritt wurde der Zusammenhang zwischen schneller bzw. langsamer Abkühlung der Schlacke und der Vanadiumauslaugung untersucht. Die Proben wurden im MgO-Tiegel im Tammannofen bei ca. 1.600 °C aufgeschmolzen und dann sowohl langsam als auch schnell abgekühlt. Eine schnelle Abkühlung erreicht man durch Abkippen der Schlacke auf Stahlplatten, was eine rasche Wärmeableitung gewährleistet (100 °C/min [10]). Eine langsame Abkühlung (20 °C/min) findet statt, wenn man die im Tiegel geschmolzene Probe im ausgeschalteten Ofen stehen lässt.

In einem zweiten Schritt wurden Konditionierungsmittel hinzugefügt. Da Spinell sich als Hauptträger von Vanadium erwiesen hat und als stabil und wasserunlöslich gilt, wurde untersucht, ob durch Zugabe von Al₂O₃ (3 % in Form von Bauxit) die Spinellbildung erhöht und somit die Vanadiumauslaugung reduziert werden kann. Weiterhin wurden Versuche unter Zugabe von SiO₂ (10 % in Form von Quarzsand) durchgeführt. Die Mischungen von Schlacke mit Konditionierungsmitteln wurden ebenfalls im MgO-Tiegel aufgeschmolzen. Anschließend wurde die Mischung langsam abgekühlt, da dies am ehesten den Abkühlungsbedingungen von EOS im Schlackenbeet ent-

spricht. An den erstarrten Proben wurden Schüttelversuche 2:1 [4] in der Körnung 1–4 mm durchgeführt. Die resultierende Mineralogie wurde mittels XRD und Elektronenstrahlmikroanalyse genauer untersucht.

Die mineralogische Zusammensetzung der modifizierten und erstarrten Schlacken ist in Tabelle 2 aufgelistet, die gemessenen V₂O₅-Gehalte der einzelnen Mineralphasen enthält Tabelle 3, und die relative Verteilung von Vanadium auf die Mineralphasen ist in Tabelle 4 zu finden. Es ist erkennbar, dass durch die Veränderung der Abkühlgeschwindigkeit und die Zugabe von Konditionierungsmitteln die Mineralogie der Proben verändert wurde. Die Anteile der verschiedenen Mineralphasen variieren, was Auswirkungen auf die Auslaugung der Proben hat. Die Ergebnisse der Auslaugversuche sind in Bild 2 dargestellt, wo die in den Eluaten gemessenen Ca- bzw. Si-Konzentrationen gegen die Vanadiumkonzentrationen aufgetragen sind. Aus Bild 2 lässt sich erkennen, dass sowohl die langsame Abkühlung als auch die Zugabe von Al₂O₃ im Vergleich zur Originalprobe zu einer Erhöhung der Vanadiumfreisetzung geführt hat. Trotz erhöhter Spinellbildung konnte Vanadium auf diese Weise nicht stärker gebunden werden. Demgegenüber bewirkte die schnelle Abkühlung eine Verringerung der Konzen-

trationen im Eluat. Noch effektiver konnte die Vanadiumkonzentration bei dem Versuch mit SiO_2 -Zugabe reduziert werden. Die Konzentrationen unterschreiten hierbei sogar knapp die SWS-1-Grenze (Bild 2).

Hinsichtlich der Mineralogie ist zu beobachten, dass bei den beiden Proben mit erfolgreicher Reduktion der Vanadiumauslaugung die Mineralphase Larnit teilweise bzw. vollständig durch eine andere Phase aus der Olivingruppe ersetzt wurde (Tabelle 2). In der Originalprobe liegt der Larnitanteil bei 35 %, bei der schnell abgekühlten Probe sind nur etwa 13 % vorhanden, die Phase Bredigit ist jedoch hinzugekommen (32 %). In der Probe, die mit SiO_2 behandelt wurde, fehlt der Larnit vollständig, dafür konnten 57 % Kirschsteinit detektiert werden. Aus Tabelle 4 lässt sich entnehmen, dass der in diesen Olivinphasen gebundene Vanadiumanteil ca. 50 % (Bredigit) bzw. 59 % (Kirschsteinit) beträgt. Wenn man davon ausgeht, dass sich diese Phasen gegenüber einem Wasserangriff stabiler verhalten als der reine Larnit, kann so die verringerte Vanadiumfreisetzung erklärt werden.

AUSLAUGMECHANISMEN VON VANADIUM

Wie oben beschrieben, sind in der untersuchten EOS im Original etwa 40 % des gesamten Vanadiums im Larnit gebunden. Die restlichen 60 % verteilen sich unterschiedlich auf die anderen Mineralphasen, wobei der gebundene Anteil im Spinell 20 % und im Wüstit 29 % beträgt. Da sich Spinell und Wüstit im Vergleich zu Larnit bereits in anderen Studien als stabil erwiesen haben (z. B. [8]), lässt sich aus dieser Betrachtung schlussfol-

gern, dass die Vanadiumkonzentration in Eluaten vorrangig durch das Anlösen des Larnits gesteuert wird. Die Ergebnisse aus den Schmelzversuchen unterstützen diese These, da durch die Modifikation des Chemismus der Anteil des Larnits zugunsten anderer Silikate verringert wurde, was zu deutlich geringeren Vanadiumkonzentrationen im Eluat führte. Die Vanadiumkonzentrationen in Eluaten der modifizierten Schlacken (Bild 2) korrelieren zudem mit den Ca- und Si-Konzentrationen. Diese Beobachtung stellt einen weiteren Hinweis dar, dass hauptsächlich Larnit für die Vanadiumfreisetzung verantwortlich ist, da gleichzeitig Calcium und Silicium freigesetzt werden.

Zusammenfassend lässt sich aus diesen Beobachtungen schlussfolgern, dass die Auslaugung von Vanadium hauptsächlich über die kalksilikatischen Minerale erfolgt. Die Vanadiumkonzentration eines Eluats ist daher von der aktuellen Verteilung des Vanadiums auf die verschiedenen Minerale und insbesondere der Menge des leichtlöslichen Larnits (Ca_2SiO_4) abhängig. Durch die Zugabe von SiO_2 in die schmelzflüssige Schlacke und die dadurch bedingte Erniedrigung des CaO/SiO_2 -Verhältnisses lässt sich die Mineralogie der Schlacke dahingehend verändern, dass sich weniger Larnit bildet und stattdessen stabilere Phasen der Olivingruppe (wie Bredigit oder Kirschsteinit) entstehen. Eine solche Veränderung hat eine deutliche Reduzierung der Vanadiumfreisetzung zur Folge.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Zugabe von SiO_2 in die schmelzflüssige Schlacke hat sich

als wirksam hinsichtlich stärkerer mineralischer Einbindung von Vanadium erwiesen. Die so behandelte Probe wurde nach dem Aufschmelzen langsam abgekühlt. In einem nächsten Schritt wären Versuche in Kombination mit anderen Abkühlvarianten sinnvoll. Die vorstehend beschriebenen Ergebnisse beziehen sich bisher auf eine einzelne Elektroofenschlacke, da nur mit dieser Schlacke Schmelzversuche durchgeführt wurden. Um die erkannten Mechanismen zu verifizieren, ist es somit sinnvoll, weitere Elektroofenschlacken zu untersuchen.

DANKSAGUNG

Das hier vorgestellte IGF-Vorhaben 20131 der Forschungsvereinigung VDEh-Gesellschaft zur Förderung der Eisenforschung mbH, Sohnstraße 65, wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V. (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert. Dafür sei an dieser Stelle gedankt.

LITERATUR

- [1] Merkel, Th.: Erzeugung und Nutzung von Eisenhüttenschlacken in Deutschland und Europa 2018. Report des FEhS-Instituts für Baustoff-Forschung e.V., 26 (2019) Nr. 1, S. 25–26
- [2] Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung. Bundesrats-Drucksache 566/17
- [3] DIN 19528:2009-01: Elution von Feststoffen – Perkolationsverfahren zur gemeinsamen Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen und organischen Stoffen
- [4] DIN 19529:2015-12: Elution von Feststoffen – Schüttelverfahren zur Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen und organischen Stoffen mit einem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 2 l/kg
- [5] Clausthaler Umwelttechnik-Institut: Bewertung der Substitution von industriellen Nebenprodukten der Stahl- und Kupfererzeugung durch Primärrohstoffe beim Einsatz im Straßenbau. Clausthal-Zellerfeld, 2016
- [6] AiF-Forschungsprojekt Nr. 20131 mit dem Titel: „Einfluss der mineralischen Bindung von Vanadium in Elektroofenschlacken auf das Auslaugverhalten“
- [7] Neuhold, S.; van Zomeren, A.; Dijkstra, J.J.; van der Sloot, H.A.; Drissen, P.; Algermissen, D.; Mudersbach, D.; Schüler, S.; Griesacher, T.; Raiß, J.G.: Investigation of Possible Leaching Control Mechanisms for Chromium and Vanadium in Electric Arc Furnace (EAF) Slags Using Combined Experimental and Modeling Approaches. Minerals 2019, 9, 525
- [8] Bialucha, R.; Drissen, P.: Löslichkeit umweltrelevanter Elemente aus Eisenhüttenschlacken in Abhängigkeit von pH-Wert und mineralischer Bindung, Abschlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 14061 N, 2007
- [9] Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau – TL Gestein-StB Ausgabe 2004/Fassung 2018. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
- [10] Drissen, P.; Mudersbach, D.: Stabilisierung sekundärmetallurgischer Schlacken aus der Qualitätsstahlerzeugung, Report des FEhS-Instituts für Baustoff-Forschung e.V., 19 (2012) Nr. 1, 10–14

PRODUKTION UND NUTZUNG VON EISENHÜTTENSCHLACKE IN DEUTSCHLAND IM JAHR 2019

Dr.-Ing. Th. Merkel
(FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e.V.)

Seit vielen Jahren ist Eisenhütten-schlacke (Hochofen- und Stahlwerksschlacke), die als Nebenprodukt bei der Erzeugung von Eisen und Stahl gewonnen wird, als bewährter Baustoff und Düngemittel am Markt etabliert. Die Daten zur Produktion und Nutzung im Jahr 2019 in Deutschland werden in den Tabellen 1 (Hochofenschlacke) und 2 (Stahlwerksschlacke) angegeben. Zum Vergleich sind jeweils die Daten des Jahres 2018 mit dargestellt.

Die Rohstahlproduktion in Deutschland ist 2019 erstmals seit dem Krisenjahr 2009 wieder unter die Marke von 40 Mio. t gefallen (39,7 Mio. t, 2018: 42,4 Mio. t) [1]. Entsprechend war auch die Produktion der Nebenprodukte rückläufig – sowohl bei Hochofenschlacke als auch bei Stahlwerksschlacke ist ein Rückgang gegenüber dem Jahr 2018 zu verzeichnen. Insgesamt wurden im Jahr 2019 12,3 Mio. t Eisenhütten-schlacke hergestellt (2018: 13,1 Mio. t). Davon wurden im Jahr 2019 11,4 Mio. t in den verschiedenen Anwendungsgebiete-

ten als Baustoffe und Düngemittel eingesetzt. Dies entspricht einer weiterhin hohen Nutzungsrate von 93 %. Lediglich 0,7 Mio. t Schlacke wurden deponiert. Die Bestände der Zwischenlager wurden per Saldo um 0,3 Mio. t aufgebaut.

Betrachtet man die Daten im Einzelnen, ist festzustellen, dass bei der Hochofenschlacke die Granulationsrate, also der Anteil der zu Hüttensand granulierten Hochofenschlacke, bei ca. 90 % der Gesamtmenge liegt. Weiter auf hohem Niveau liegt folglich auch die Nutzung von Hüttensand in der Zementindustrie, auch wenn der Absolutwert angesichts der reduzierten Produktionsmenge zurückgegangen ist. (7,2 Mio. t, 2018: 7,7 Mio. t). Die Herstellung von CEM-II- und CEM-III-Zementen ist das wichtigste Absatzgebiet von Hochofenschlacke, die damit auch einen wichtigen Beitrag zur CO₂-Einsparung leistet. In absoluten Zahlen hat der Einsatz von Hochofenstückschlacke als Gesteinskörnung bzw. Baustoffgemisch zur Herstellung von As-

phalten, Betonen und Tragschichten ohne Bindemittel mit 0,6 Mio. t (Vorjahr: 0,9 Mio. t) abgenommen. Der Rückgang wäre noch deutlicher ausgefallen, wenn nicht die Menge der für eine spätere Nutzung zwischengelagerten Hochofenschlacke weiter hätte reduziert werden können.

Im Jahr 2019 wurden in Deutschland insgesamt 5,0 Mio. t Stahlwerksschlacke erzeugt. Das entspricht im Vergleich zum Vorjahr einem Rückgang um 0,3 Mio. t. Vergleicht man die Nutzung in den

verschiedenen Anwendungsgebieten, erkennt man nur wenige Veränderungen beim Einsatz als Kalk- und Eisenträger im metallurgischen Kreislauf (0,6 Mio. t, ca. wie Vorjahr) und bei der Nutzung als Kalkdüngemittel (0,4 Mio. t, fast identisch mit dem Vorjahr). Auch die deponierte Menge ist etwa konstant geblieben (s. o.). Einen leichten Rückgang gibt es dagegen beim Einsatz als Baustoff (2,1 Mio. t, Vorjahr: 2,3 Mio. t) und als einfaches Schüttmaterial ohne formelle Überwachung (0,3 Mio. t, Vorjahr: 0,4 Mio. t).

Erzeugung	2019	2018
Schlacke aus Stahlroheisenerzeugung	7,21	7,68
Schlacke aus sonstiger Roheisenerzeugung	0,09	0,10
Summe	7,30	7,78
davon: HS 6,48 HOS 0,82		
Lagerabbau	0,74	1,04
Summe	8,04	8,82

Nutzung	2019	2018
HOS (Gesteinskörnungen)	0,13	0,29
HOS (Baustoffgemische)	0,51	0,60
HS zur Zementherstellung	7,15	7,70
HS für andere Einsatzgebiete	0,11	0,11
Eigenverbrauch der Werke	0,14	0,12
Summe	8,04	8,82

Tabelle 1: Erzeugung und Nutzung von Hochofenschlacke 2019/2018 (jeweils in Mio. t)

Erzeugung	2019	2018
Schlacke aus Oxygenstahlerzeugung	3,02	3,23
Schlacke aus Elektrostahlerzeugung	1,47	1,54
Schlacke aus Sonderverfahren	0,52	0,53
Summe	5,01	5,29

Nutzung	2019	2018
Metallurg. Kreislaufführung	0,56	0,61
Düngemittel	0,40	0,39
Baustoffe (Straßenbau, Erdbau, Wasserbau etc.)	2,12	2,25
Sonstiges	0,27	0,41
Deponie	0,66	0,66
Zwischenlager	1,00	0,97
Summe	5,01	5,29

Tabelle 2: Erzeugung und Nutzung von Stahlwerksschlacke 2019/2018 (jeweils in Mio. t)

LITERATUR

- [1] https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2020/04/Rohstahlproduktion_in_Deutschland_April2020.png

Impressum // Herausgeber: FEHS-Institut e. V., Duisburg // **Verantwortlich:** Thomas Reiche, Geschäftsführer // **Gestaltung:** del din design

FEHS – Institut für Baustoff-
Forschung e.V.
Bliersheimer Straße 62
47229 Duisburg

Telefon: 02065 9945-0
Telefax: 02065 9945-10
E-Mail: fehs@fehs.de
www.fehs.de



INSTITUT FÜR
BAUSTOFF
FORSCHUNG

FEHS