

FORSCHUNGSPROJEKTE DER LETZTEN JAHRE

2 Baustoffe

9 Düngemittel

17 SEKROHMET

22 Umwelt

BAUSTOFFE

Kurzbericht – die Hüttensand-Datei des FEhS-Instituts

Wenn flüssige Hochofenschlacke bei hohem Wasserüberschuss zu einem körnigen Granulat < 5 mm abgeschreckt wird, so entsteht der weitgehend glasige Hüttensand (Abb. 1). Seit 1861 ist bekannt, dass dieser latent hydraulisch reagiert. Daher wird gemahlener Hüttensand seit Ende des 19. Jahrhunderts als Zementbestandteil verwendet. In einigen Ländern wird er auch als Betonzusatzstoff eingesetzt. Stoffliche Anforderungen werden z. B. in DIN EN 197-1 und DIN EN 15167-1 definiert.

Seit Beginn der Hüttensandnutzung wurde, allerdings nur mit begrenztem Erfolg, versucht, eine Korrelation zwischen den chemischen bzw. physikalischen und den technischen Eigenschaften der Hüttensande und insbesondere zur Festigkeitsentwicklung hüttensandhaltiger Zemente zu finden. Eine Übersicht hierzu wird in [1] gegeben. Ziel war es stets, aus den analytischen Befunden an unbekanntem oder modifizierten Hüttensanden auf das Verhalten des hüttensandhaltigen Zements zu schließen und somit zeitintensive mörteltechnische Versuche einzusparen.

Der Aufbau der Hüttensand-Datei des FEhS-Instituts wurde bereits 1968 beschlossen. Ziel war die „Erfassung der chemischen und physikalischen Kenndaten der Hüttensande“ und darauf aufbauend der Versuch, Zusammenhänge zwischen diesen Kenndaten und der Reaktivität der Hüttensande aufzuzeigen. Von wesentlicher Bedeutung ist, dass dabei bis heute nach einem standardisierten Verfahren vorgegangen wird. So werden die industriell oder im Labor erzeugten Hüttensande auf eine konstante Feinheit gemahlen (4.200 cm²/g nach Blaine sowie vergleichbare Lageparameter der Korngrößenverteilung), die Mischungsverhältnisse in den Laborzementen sind gleich (z. B. 75 M.-% Hüttensand und 25 M.-% Portlandzementklinker), die Klinker sind definiert (seit 2000 verwendet man nur 1 Klinker, der ungemahlen in großer Menge eingelagert wurde), Sulfatgehalt (3,5 bzw. 4,5 M.-%, je nach Hüttensandgehalt) und Sulfatträgergemisch (Anhydrit und Gipsstein) sind ebenfalls konstant und die zementtechnischen Prüfungen werden gemäß DIN EN 196 durchgeführt. Seit etwa 10 Jahren wird dieses Vorgehen ergänzt durch Kombinationen aus je 50 M.-% Hüttensand und einem Portlandzement CEM I 42,5 R, der die Anforderungen an einen Prüfzement für Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff erfüllt.

Die wichtigsten Ergebnisse einer ersten umfassenden Auswertung auf Basis von 24 Hüttensanden wurden bereits 1978 publiziert [2]. Die Hüttensand-Datei beinhaltet mittlerweile (Juni 2017) 744 Datensätze zu Hüttensanden aus aller Welt. Sie stellt damit mutmaßlich weltweit die größte Datenbank zu diesem technisch und ökologisch vorteilhaften Bindemittelbestandteil dar. Sie ermöglicht es, bisher unbekannte Hüttensande qualitativ einzuordnen. Die Hoffnung aber, auf Basis chemischer und/oder physikalischer Kenngrößen die Reaktivität eines beliebigen Hüttensandes exakt prognostizieren zu können, hat sich nicht erfüllt. Die Ursache hierfür ist, dass bei konstanter Feinheit die Reaktivität des Hüttensands nicht nur von der chemischen Zusammensetzung und dem Glasgehalt, sondern z. B. auch von der thermischen Vorgeschichte im Hochofen oder der Wechselwirkung mit dem jeweiligen Portlandzementklinker abhängt.

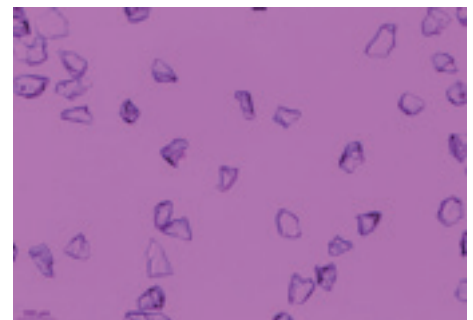
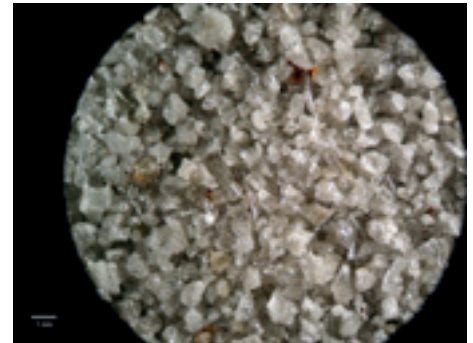


Abb. 1: Hüttensand im Auflicht- und Durchlichtmikroskop

Deutlich wird die begrenzte Korrelation von chemischer Zusammensetzung und Festigkeitsentwicklung von Hochofenzement in Abb. 2. Es zeigt die Abhängigkeit der 2-Tage-Mörteldruckfestigkeit von Hochofenzementen mit 75 M.-% Hüttensand in Abhängigkeit vom 1942 von Keil definierten F-Wert. Hierfür wurden nur die 251 Datensätze verwendet, die seit 2008 für die Hüttensande von Mitgliedsunternehmen des FEHS-Instituts erstellt wurden. Man erkennt lediglich einen Trend zu höheren Festigkeiten mit höherem F-Wert. Und auch wenn der Parameter TiO_2 , der zu Zeiten der Definition des F-Werts noch keine praktische Rolle spielte, mit in den F-Wert aufgenommen wird, verbessert sich die Aussagekraft nur wenig.

Abb. 2 zeigt auch, wie unterschiedlich bei ansonsten konstanten Rahmenbedingungen die Reaktivität von Hüttensand (im Sinne von Festigkeitsentwicklung) sein kann. Die genaue Kenntnis der chemischen, physikalischen und technischen Eigenschaften des Hüttensands ist also nach wie vor die Basis dafür, Hüttensand in Zement und Beton adäquat zu verwenden.

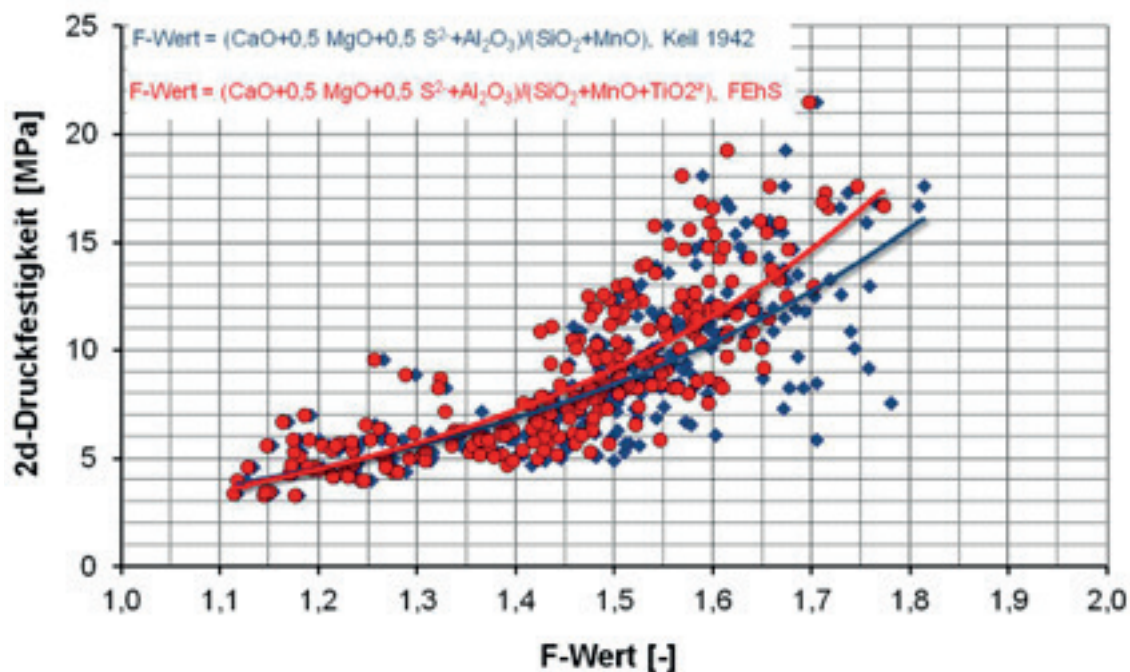


Abb. 2: Abhängigkeit der 2-Tage-Mörteldruckfestigkeit von Hochofenzementen mit 75 M.-% Hüttensand vom F-Wert

Aufbau und Erweiterung der Hüttensand-Datei werden fast ausschließlich aus Eigenmitteln des FEHS-Instituts finanziert. Im Bearbeitungszeitraum 01.07.1988–31.12.1989 wurde ein Teil der Arbeiten im Rahmen des IGF-Vorhabens 7588 der Forschungsvereinigung VDEh-Gesellschaft zur Förderung der Eisenforschung mbH über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

- [1] Ehrenberg, A.: Hüttensand – Ein leistungsfähiger Baustoff mit Tradition und Zukunft. Beton-Informationen 46 (2006) Nr. 4, S. 35–63, Nr. 5, S. 67–95
- [2] Smolczyk, H.G.: Zum Einfluß der Chemie des Hüttensands auf die Festigkeit von Hochofenzementen. Zement-Kalk-Gips 31 (1978) Nr. 6, S. 294–296

BAUSTOFFE

Kurzbericht – gemeinsame Nutzung von Hüttensand, Steinkohlenflugasche und Portlandzementklinker zur Herstellung optimierter Zemente und Betone

Förderkennzeichen: AiF 16148 N

Bearbeitungszeitraum: 01.07.2009–31.12.2011

Projektpartner: Verein Deutscher Zementwerke

Ziel des Forschungsvorhabens war es, die Möglichkeiten und Grenzen von Zementen sowohl mit genormten wie auch mit nicht genormten Kombinationen aus Klinker, Hüttensand und Steinkohlenflugasche aufzuzeigen. Hintergrund ist der seit Ende der 1990er-Jahre zunehmende Trend in der Zementindustrie, den rohstoff-, energie- und CO₂-intensiven Portlandzementklinkeranteil im Zementportfolio abzusenken. Dies kann, wie schon seit Jahrzehnten praktiziert, durch 2-Stoff-Systeme aus Hüttensand und Klinker erfolgen, aber auch durch 3-Stoff-Systeme, die dem Zementhersteller eine höhere stoffliche Flexibilität bieten.

Basierend auf der Analyse der die Zementleistungsfähigkeit beeinflussenden Parameter wurde mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung eine Versuchsmatrix mit 108 Zementen bei 15 verschiedenen Zusammensetzungen erstellt (Abb. 1). Die statistische Versuchsplanung ermöglichte es, die theoretisch sehr hohe Anzahl möglicher Parametervariationen (Art, Anteil und Feinheit der 3 Zementbestandteile) auf ein handhabbares Maß zu reduzieren bei gleichzeitig erhöhter Aussagekraft der Ergebnisse. Um die Ergebnisse der Modellierung zu überprüfen, wurden 7 zusätzliche Zemente ausgewählt und untersucht. Es konnte festgestellt werden, dass mit Hilfe des erstellten Modells und in dessen Grenzen Festigkeit und Hydratationswärmeentwicklung auf Basis der Zementzusammensetzung und der Reaktivität der Ausgangsstoffe mit sehr guter Näherung vorhergesagt werden können.

An den 108 Zementen wurden die 28-Tage-Mörteldruckfestigkeit (DIN EN 196-1) und die isotherme Hydratationswärme über 7 Tage ermittelt. Über weite Bereiche des untersuchten Zusammensetzungsbereichs war es möglich, Zemente mit einer Festigkeit > 42,5 MPa herzustellen (Abb. 1). Aus den Untersuchungen lässt sich ableiten, dass sich auch hinsichtlich der Frühfestigkeitsentwicklung und der weiteren Anforderungen der DIN EN 197-1 marktfähige Zemente herstellen lassen.

Von 4 Zementen wurden die Hydratationsprodukte eingehend untersucht, um Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Komponenten aufzuzeigen. REM-Aufnahmen dienten zur Charakterisierung des Mörtelgefüges. Nach 2 Tagen Hydratation waren vor allem Ettringit und erste Calciumhydroxidkristalle erkennbar. Nach 7 Tagen waren die Klinker-, Hüttensand- und Flugaschepartikel mit einem dichten Reaktionssaum aus verschiedenen Hydratphasen überzogen. Nach 28 Tagen Hydratation war das Gefüge der Mörtel relativ dicht. Die erkennbaren freien Oberflächen von Flugaschekugeln und Hüttensandpartikeln sind beim Brechen der Probe entstandene Artefakte (Abb. 2).

Basierend auf den für die statistische Versuchsplanung gewählten Randbedingungen lassen sich die CO₂-Emissionen für die möglichen Kombinationen aus Hüttensand, Portlandzement und Steinkohlenflugasche berech-

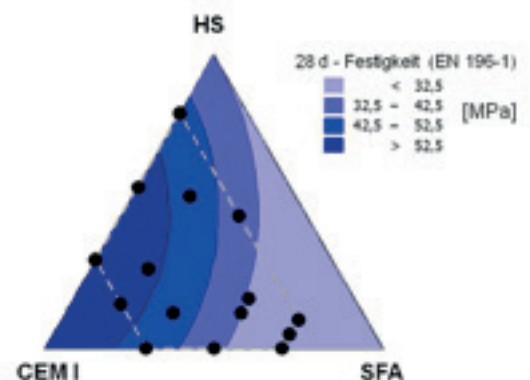


Abb. 1: Statistischer Versuchsraum und 28-Tage-Druckfestigkeiten für Kombinationen aus Hüttensand, Portlandzement und Steinkohlenflugasche; Eckpunkte = 100 M.-%

nen. Auf Grund der sehr viel kleineren spezifischen CO₂-Beiträge des Hüttensands und der Steinkohlenflugasche nehmen die CO₂-Emissionen der Zemente mit sinkendem Portlandzementklinkergehalt unabhängig von den relativen Anteilen der anderen Hauptbestandteile fast linear ab (Abb. 3). Die Modellrechnung ergab, dass sich im Vergleich zu Portlandzement bei 28-Tage-Druckfestigkeiten > 42,5 MPa bzw. > 52,5 MPa 75 % bzw. 55 % CO₂-Emissionen vermeiden lassen. Besonders der bisher nicht genormte Bereich zwischen den CEM III- und CEM V-Zementen ist sehr vielversprechend hinsichtlich sowohl der erreichbaren Festigkeiten als auch der möglichen CO₂-Einsparung. Auch im Bereich zwischen den CEM IV- und CEM V/A-Zementen, der ebenfalls nicht durch die Vorgaben der bisherigen Norm abgedeckt wird, ist die Herstellung von Zementen der Festigkeitsklasse 42,5 möglich.

Basierend auf den Ergebnissen der zementtechnischen Untersuchungen wurden 8 Zemente ausgewählt, mit denen orientierende Betonversuche durchgeführt wurden. Die Frischbetoneigenschaften der untersuchten Betone lagen im für die beiden hergestellten Betonsorten üblichen Bereich. Mit Ausnahme der beiden CEM V/B-Zemente wurden mit allen Zementen bei Betonen der Sorte 1 Druckfestigkeiten im Alter von 28 Tagen ermittelt, mit denen sich zielsicher die Festigkeitsklasse C25/30 nach DIN EN 206/DIN 1045-2 realisieren lässt. Die Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit führten großenteils zu zufriedenstellenden Ergebnissen. Das von 2014 bis 2016 durchgeführte AiF-Projekt 18228 N widmete sich detailliert den Eigenschaften von Betonen mit den neu entwickelten Zementen.

Bei der industriellen Produktion von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen und geringeren Klinkergehalten werden Kenntnisse über den Einfluss der verschiedenen Komponenten zunehmend wichtiger. Das Potenzial klinkerreduzierter Zemente hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit und der Reduktion der mit ihrer Herstellung verbundenen CO₂-Emissionen konnte in diesem Forschungsprojekt aufgezeigt werden. Eine ausführliche Darstellung der Arbeiten findet sich in [1, 2]. Das Ziel der Arbeiten wurde erreicht und die Projektergebnisse fanden bereits Eingang in die Revision der Zementnorm DIN EN 197-1. Die neue Ausgabe wird einige der Kombinationen, die im AiF-Projekt erstmals untersucht wurden, als neue Zementarten aufnehmen. Das Projekt ist also ein Beispiel dafür, wie IGF zeitnah in eine praktische Umsetzung, zumindest hinsichtlich des Regelwerks, einmünden kann.

Das IGF-Vorhaben 16148 N der VDEh-Gesellschaft zur Förderung der Eisenforschung mbH wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

- [1] Feldrappe, V.; Ehrenberg, A.: CEM X-Zemente – Optimierte Zemente mit Hüttensand, Steinkohlenflugasche und Klinker. Report des FEHS – Institut für Baustoff-Forschung 19 (2012) Nr. 2, S. 4–7
- [2] Feldrappe, V.; Ehrenberg, A.; Schulze, S.; Rickert, J.: CEM X-Zemente – Möglichkeiten und Grenzen der Leistungsfähigkeit von Zementen mit Hüttensand, Steinkohlenflugasche und Klinker. 18. Internationale Baustofftagung „ibusil“, Weimar, 12.–15.09.2012

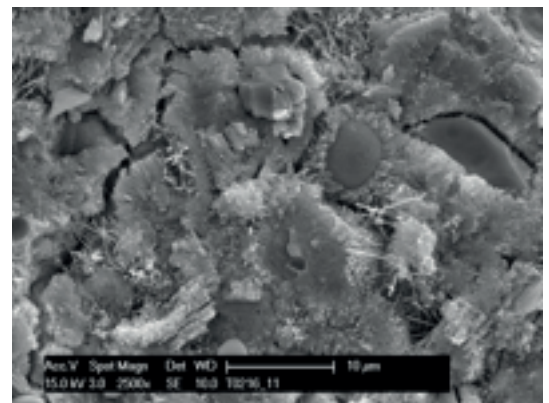


Abb. 2: REM-Aufnahme nach 28 Tagen Hydratation (Bild: VDZ)

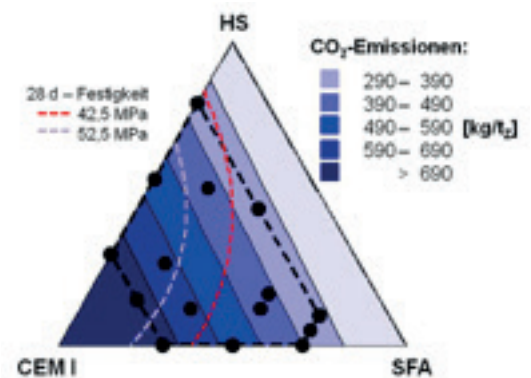


Abb. 3: Statistisch abgeleitete Einsparung von CO₂-Emissionen

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

BAUSTOFFE

Entwicklung von Anwendungsregeln für Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff

Förderkennzeichen: AiF 16743 N

Bearbeitungszeitraum: 01.07.2011–31.12.2014

Projektpartner: Institut für Bauforschung (ibac) der RWTH Aachen

Hüttensand wird in Deutschland traditionell fast ausschließlich als Zementbestandteil verwendet. Um künftig auch eine technisch wie wirtschaftlich sinnvolle Anwendung als Betonzusatzstoff gemäß DIN EN 15167-1 zu ermöglichen, verfolgte das Forschungsvorhaben drei primäre Ziele: Erstens sollte ein Vorschlag zu einer nationalen Anwendungsregel für Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff im Kontext europäischer und nationaler Normung erarbeitet werden. Zweitens sollten für die in Europa üblichen Hüttensande angemessene k-Werte abgeleitet sowie entsprechende Kriterien erarbeitet werden, mit denen sich Hüttensandmehle derart kategorisieren lassen, dass unterschiedliche k-Werte auch zielsicher eingehalten werden. Drittens sollten Empfehlungen für die Qualitätssicherung bei der Betonherstellung erarbeitet werden. Im Forschungsvorhaben wurden erstmalig die drei in DIN EN 206 genannten Anwendungskonzepte für Betonzusatzstoffe (Equivalent Performance of Combinations Concept – EPCC, Equivalent Concrete Performance Concept – ECPC, k-Wert-Konzept) gleichzeitig auf Hüttensandmehle unterschiedlicher Charakteristik angewendet.

Die Ergebnisse der Untersuchungen mit 6 Hüttensanden in jeweils 3 Feinheiten, die mit 3 verschiedenen Portlandzementen CEM I 42,5 R kombiniert wurden, zeigen, dass grundsätzlich alle 3 Konzepte zielsicher anwendbar sind. Es wurde nachgewiesen, dass der betontechnologische Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit des Bindemittels, w/b-Wert und Druckfestigkeit des Betons (Walz-Kurve) auch bei der Anwendung von Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff besteht. Somit lassen sich mit den 3 Konzepten zielgerichtet Betone einer bestimmten Festigkeitsklasse herstellen. Der Widerstand dieser Betone gegenüber dauerhaftigkeitsrelevanten Angriffen entspricht dabei dem von Betonen mit entsprechenden hüttensandhaltigen Zementen.

Auf Basis der Untersuchungsergebnisse wurden für Hüttensandmehle in Abhängigkeit von stofflichen Parametern 2 verschiedene k-Werte in Höhe von 0,6 und 0,8 vorgeschlagen (Tab. 1). Es wurden Kategorien für die relevanten Parameter Glasgehalt, Basizität, TiO₂-Gehalt und Feinheit mit jeweils verschiedenen Anforderungen definiert. Diese Parameter sind in DIN EN 15167-1 bereits enthalten, müssen also nicht zusätzlich ermittelt werden.

Qualitätskriterium			k ₁ = 0,6	k ₂ = 0,8	
Glasgehalt		Vol.-%	≥ 67	≥ 90	
Chemische Reaktivität"	(C+M)/S	-	≥ 1,0	≥ 1,20	≥ 1,30
	F-Wert	-	-	≥ 1,30	≥ 1,50
	TiO ₂ -Gehalt	M.-%	-	≤ 1,00	1,01 - 1,50
Spezif. Oberfläche (Blaine)		cm ² /g	≥ 2.750	≥ 5.200	≥ 4.000

Tab. 1: Vorschlag zu 2 unterschiedlichen k-Werten für Hüttensandmehl

Die Leistungsfähigkeit des spezifischen Hüttensandmehls wird bei den beiden Performancekonzepten EPCC und ECPC effektiver ausgenutzt als bei dem pauschalen k-Wert-Konzept. Dafür ist aber ein umfangreicher und vor allem kontinuierlicher Prüf- und Überwachungsaufwand für die Kombination mit verschiedenen Portlandzementen notwendig, wohingegen nach Festlegung eines oder mehrerer k-Werte in Abhängigkeit von bestimmten stofflichen Voraussetzungen keine zusätzlichen betontechnischen Prüfungen erforderlich sind. Für die Anwendung der Konzepte sowie für notwendige qualitätssichernde Maßnahmen bei der Betonherstellung wurden entsprechende Vorschläge erarbeitet. Für beide Performance-Konzepte ist eine kontinuierliche Überprüfung der Leistungsfähigkeit der spezifischen Hüttensandmehl-CEM I-Kombinationen nötig. Insbesondere beim ECPC gilt, dass die Leistungsfähigkeit des Betons zielsicher und praxisgerecht beurteilt werden muss. Grundvoraussetzung hierfür sind leistungsfähige und allgemein anerkannte Prüfverfahren sowie allgemeingültige Abnahmekriterien. Diese sind derzeit nicht für alle Expositionen verfügbar. Es ist daher derzeit notwendig, einen Referenzbeton begleitend zu prüfen. Abbildung 1 zeigt, dass sich die bei der Verwendung von Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff gemessenen Restriktionskategorierungen gut in den bei der Verwendung von Zementen gewonnenen Erfahrungsbereich einordnen.

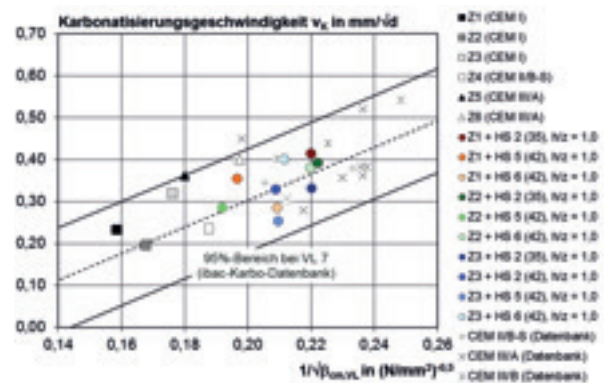


Abb. 1: Karbonatisierungsgeschwindigkeit der ECPC-Betone nach Vorlagerung bei 20 °C/65 % r.F.

Abgerundet wurden die Laborarbeiten durch einen durch die Forschungsstellen begleiteten Praxistest, bei dem Betone mit Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff für unterschiedliche Expositionsklassen im Zuge der Errichtung eines Einfamilienhauses verwendet wurden (Abb. 2). Zum Einsatz kam ein Hüttensandmehl, das nicht bereits zuvor Bestandteil des Versuchsprogramms war und für das sich gemäß Tabelle 1 ein k-Wert von 0,8 ergab. Nachgewiesen wurde im Alter von 28 Tagen ein tatsächlicher k-Wert von 0,96. Die Betone zeigten nach Auskunft der Bauunternehmung eine sehr gute Verarbeitbarkeit.

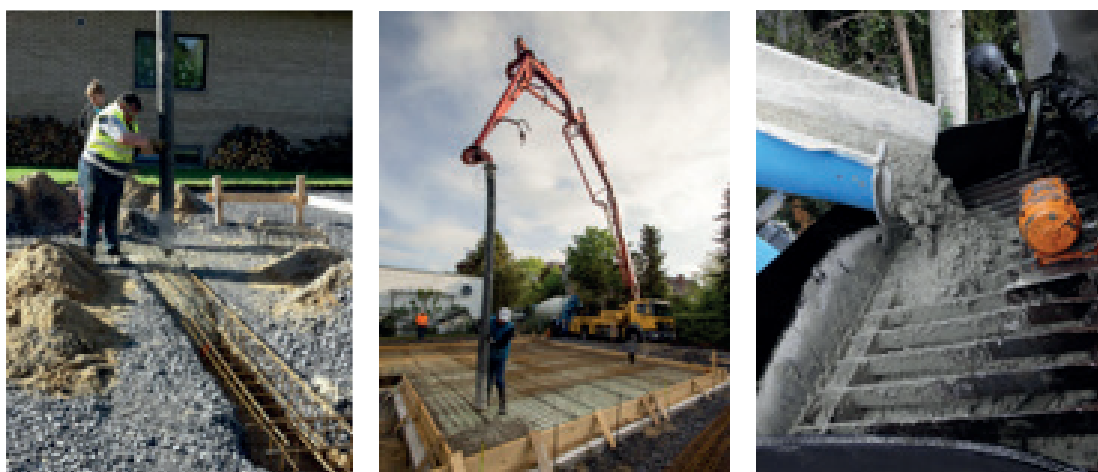


Abb 2: Praxistest zur Verwendung von Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff

Die Ergebnisse des Projektes wurden publiziert und in verschiedenen Kreisen vorgetragen [1, 2, 3]. Nun stellt sich die Aufgabe, die Ergebnisse in die nationale und internationale Normungsarbeit einzubringen.

Das IGF-Vorhaben 16743 N der VDEh-Gesellschaft zur Förderung der Eisenforschung mbH wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.



-
- [1] Feldrappe, V.; Ehrenberg, A.: Entwicklung von Anwendungsregeln für Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff. Report des FEHS – Institut für Baustoff-Forschung 22 (2015) Nr. 1, S. 14–19
 - [2] Feldrappe, V.; Ehrenberg, A.: Die Anwendung von Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff: Die Performance-Konzepte der DIN EN 206. 19. Internationale Baustofftagung „ibaasil“, Weimar, 16.09.–18.09.2015
 - [3] Feldrappe, V.: The use of ground granulated blast furnace slag as a concrete addition. 8th European Slag Conference, Linz, 21.–23.10.2015

DÜNGEMITTEL

Langjähriger Phosphat-Dauerversuch zur Überprüfung der Wirkung von Rohphosphat und Thomasphosphat auf Dauergrünland

Die Nutzung und Bewirtschaftung von Grünlandflächen in Hochlagen des mittleren Schwarzwaldes gestaltete sich eingangs der 50er Jahre eher extensiv. Düngungsmaßnahmen beschränkten sich auf die Zufuhr von wirtschaftseigenen Düngern in Form von Jauche oder Stallmist. Eine mineralische Ergänzungsdüngung erfolgte in der Regel nicht. Futteruntersuchungen in der Region zeigten, dass insbesondere die Phosphatgehalte niedrig lagen. Untersuchungen von Bärmann (1953) fanden diese Situation bundesweit. Aus diesem Grunde wurden seinerzeit zahlreiche Düngungsversuche durchgeführt, um einerseits standortabhängige Aussagen über die Beeinflussung von Ertrag und Futterqualität durch Düngungsmaßnahmen zu erhalten und um auch andererseits überhaupt die Bedeutung einzelner Nährstoffe praxisnah herauszustellen. Unter diesen Gesichtspunkten kam auch ein solcher Versuch 1954 auf einer Wiese in den Hochlagen des mittleren Schwarzwaldes bei St. Peter zur Anwendung. Wurde die seinerzeit zugrundeliegende Fragestellung auch rasch eindeutig zugunsten der mineralischen Düngung beantwortet, so lassen sich heute dank der Fortführung des Versuchs daran Einflüsse langjähriger Düngungspraktiken auch unter ökologischen Aspekten betrachten.

Der Versuch gliedert sich in einen Phosphatformen-Versuch und einen Düngungs-Schauversuch. Der P-Versuch wurde als Exaktversuch mit den Varianten „ohne Phosphat“, „Thomasphosphat“ und „weicherdiges Rohphosphat“ in vierfacher Wiederholung als Reihenanlage mit 12 Parzellen angelegt (Abb. 1). Bei überwiegend zwei- bis dreischnittiger Nutzung wurde jährlich gedüngt und beerntet. Infolge der unterschiedlichen Kalkzufuhr über die beiden verschiedenen Phosphatformen hatten sich in den Versuchsgliedern unterschiedliche pH-Werte im Boden eingestellt, die seit 1985 durch unterschiedlichen Kalkausgleich nach Ergebnissen der Kalkbedarfsbestimmung in jeweils zwei der vier Wiederholungen aller Varianten auf ein einheitliches Niveau gebracht wurden. Eine Übersicht über die Düngungshöhe gibt Tabelle 1 (Seite 16).



Abb. 1: Dauer-Grünlandversuch in St. Peter (Schwarzwald), angelegt im Jahr 1954

Seit 1954 wird auf einer Wiese in den Hochlagen des mittleren Schwarzwaldes auf Dauergrünland ein Düngungsversuch durchgeführt. Die unterschiedliche Düngung wirkt sich in starkem Maß auf den Ertrag und die Bestandszusammensetzung aus. P-Düngung mit Thomasphosphat führt nach wie vor zu höheren Erträgen und besseren Qualitäten als mit weicherdigem Rohphosphat. Bei mittlerer Nutzungsintensität ermöglicht die Nährstoffzufuhr in Höhe des Entzugs den Erhalt eines artenreichen Grünlandbestandes (Abb. 2).



Abb. 2: Unterschiedlich gedüngte Parzellen im Dauer-Grünlandversuch in St. Peter (Schwarzwald) am 31.05.2017

Bereits im ersten Versuchsjahr hatte die Zufuhr der beiden P-Formen eine unterschiedliche, aber sehr deutliche Erhöhung des Ertrags zur Folge (Abb. 3). Ohne P-Düngung nahmen die Erträge bis 1973 kontinuierlich ab. Auch auf den P-gedüngten Varianten verringerte sich das Ertragsniveau bis 1968 und nahm erst mit Erhöhung der N- und K-Düngung seit 1968 wieder zu. Generell führt die Düngung mit Thomasphosphat zu höheren Erträgen als die Rohphosphatdüngung.

Mit dem seit 1985 erfolgten Kalkausgleich war vor allem auf der Variante „ohne Phosphat“ ein starker Mehrertrag verbunden (Abb. 4). Demgegenüber konnte bei dem weicherdigen Rohphosphat nur eine geringe Ertragszunahme festgestellt werden, während bei Thomasphosphat im Durchschnitt der betrachteten Versuchsjahre keine Ertragsveränderungen durch die Kalkdüngung gegeben war. In den letzten Jahren haben sich die zusätzlich gekalkten Thomas- und Rohphosphatparzellen im Ertrag angeglichen. Dies ging einher mit einer offensichtlich witterungsbedingten allgemeinen Erhöhung der Phosphatgehalte im Aufwuchs, die sich in den beiden P-gedüngten Varianten dem optimalen Bereich näherten. Zudem lag die Phosphatdüngung in den Jahren 1985 bis 1992 mehr als 30 kg P_2O_5 /ha höher als der Phosphatzug, so dass ein Aufbau mit Phosphatreserven im Boden auf ein ausreichendes Niveau – selbst bei geringerer Umsetzung des Rohphosphats – zur Deckung des Phosphatbedarfs ausreichte. Darauf weist auch die Entwicklung der Phosphatgehalte im Aufwuchs hin.

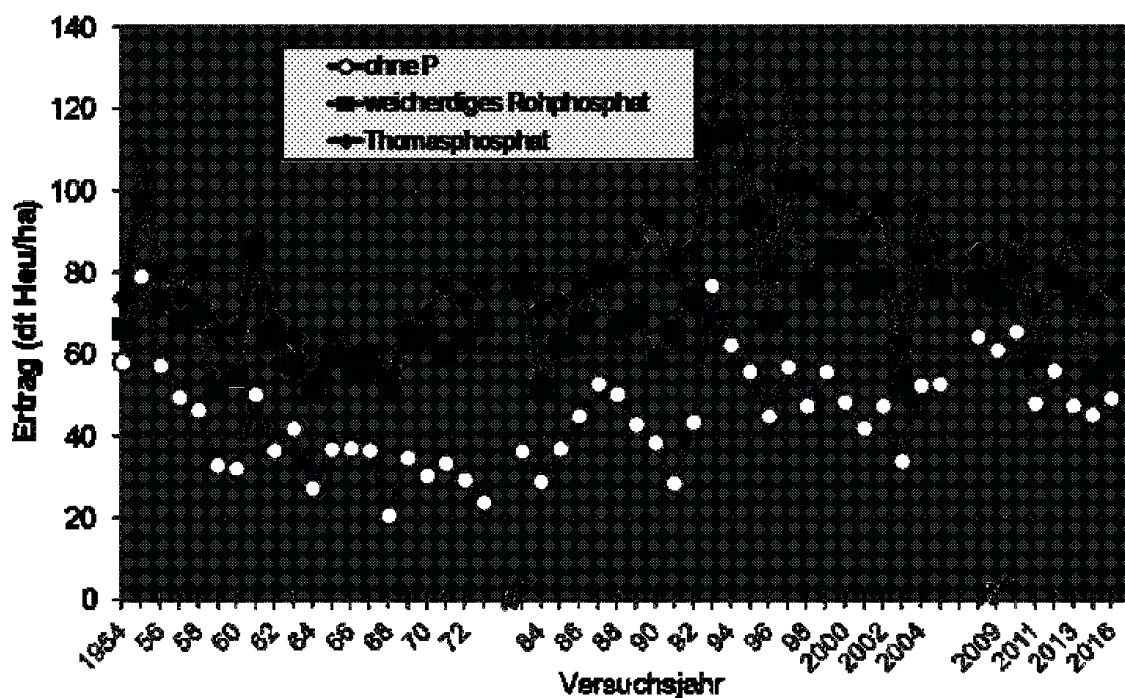


Abb. 3: Erträge 1954–2016 im Dauergrünland-Versuch St. Peter in Abhängigkeit von der Phosphatdüngung ohne zusätzliche Kalkung

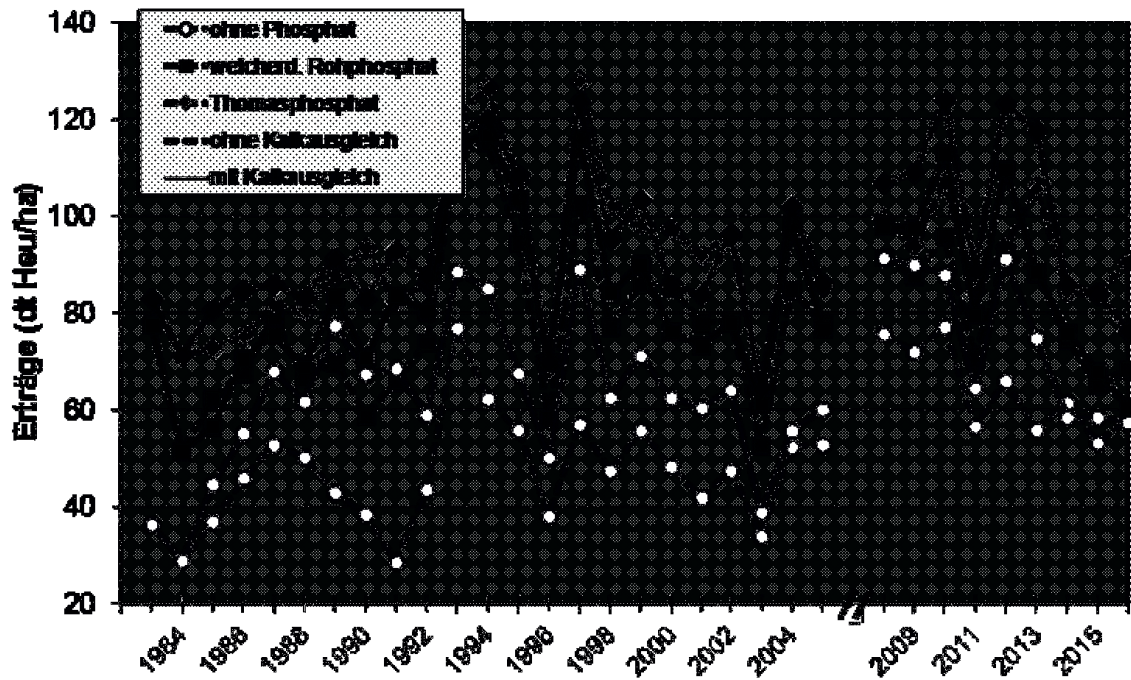


Abb. 4: Erträge 1983–2016 im Dauer-Grünlandversuch St. Peter in Abhängigkeit von der Phosphat- und Kalkdüngung

In den Hochlagen des mittleren Schwarzwaldes sind die Goldhaferwiesen (Polygono-Trisetion) verbreitet. Der ursprüngliche Bestand auf der Versuchsfläche lässt sich auch diesem Typ zuordnen. Die Düngung wirkt sich in starkem Maße auf die botanische Zusammensetzung des Bestandes aus. Unter ihrem Einfluss variieren die Bestände der Düngungsparzellen pflanzensoziologisch zwischen extrem magerer Goldhaferwiese und nährstoffreicher subalpiner Fettwiese. Zwölf Jahre nach Versuchsbeginn hatten sich bereits unterschiedliche Bestände etabliert. Wie erwartet, wurden durch die Phosphatdüngung die Leguminosenanteile deutlich erhöht, während bei unterlassener Mineraldüngung, aber auch bei unterlassener P-Düngung die Gräseranteile vorherrschten. Zudem war der Blütenansatz der Kräuterarten deutlich eingeschränkt. Ohne Phosphatdüngung werden Rotschwingel, Ruchgras und Rotes Straußgras Hauptbestandbildner.

Durch die Kalkung wurden die Wiesenkräuter gefördert, so dass sich die gekalkten Flächen artenreicher als die ungekalkten darstellten. Bereits 1986, im zweiten Jahr nach Beginn der zusätzlichen Kalkung, hatte sich allein durch die Kalkgabe die Artenzahl von 17 auf 23 erhöht, auf den phosphatgedüngten Parzellen lag die Zahl der Pflanzenarten zwischen 24 und 30.

Ähnliche Verhältnisse zeigen sich bis heute (Abb. 5). Die Pfeile markieren die Leguminosen. Durch Kalk- und Phosphatdüngung erscheinen die Bestände ausgewogener, da stark dominierende Arten auf den gedüngten Versuchsgliedern abnehmen.

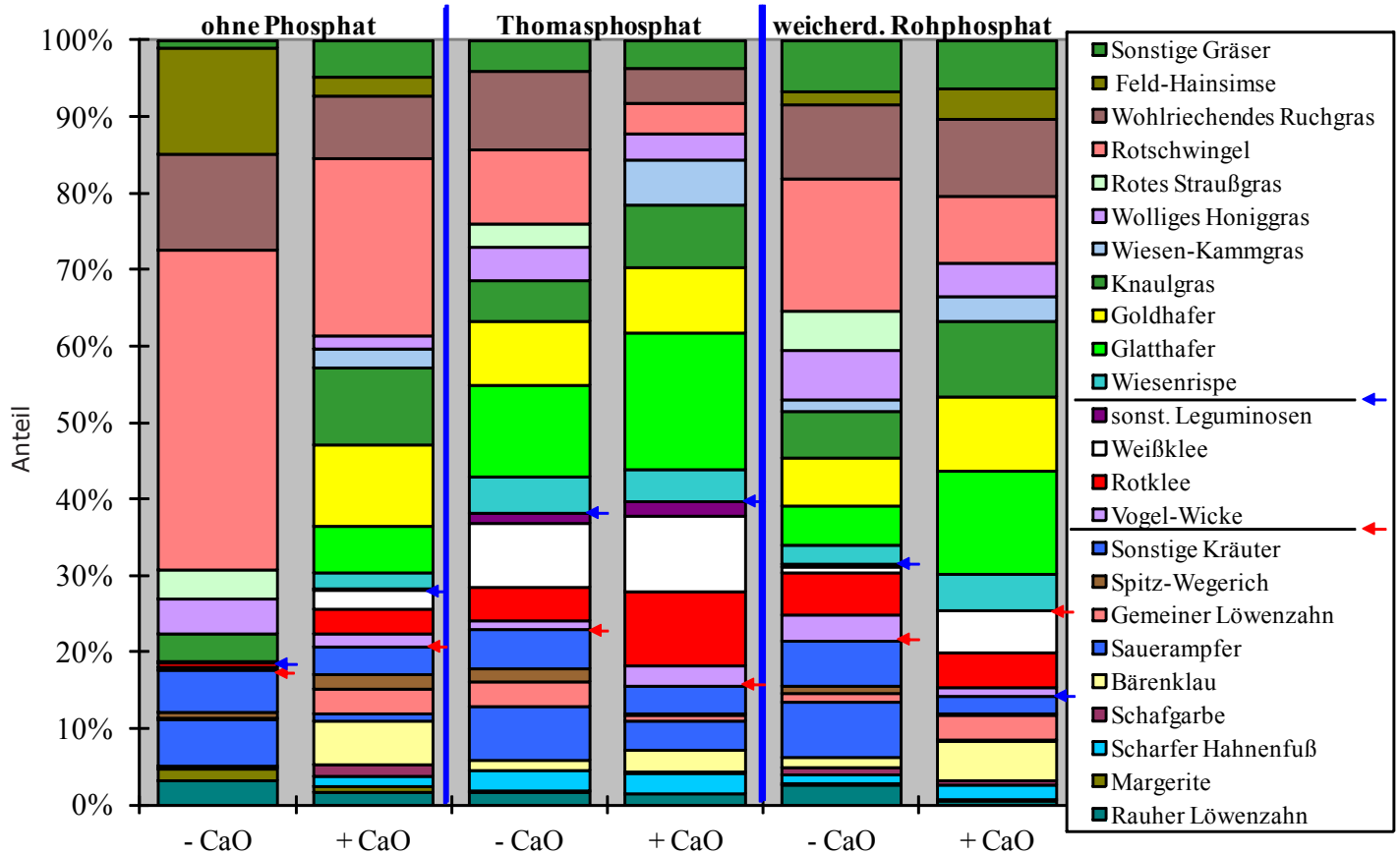


Abb. 5: Bestandszusammensetzung im P-Formenversuch St. Peter in Abhängigkeit von der Phosphat- und Kalkdüngung 60 Jahre nach Versuchsbeginn

Typische Magerkeitsanzeiger, darunter auch einige seltenere Arten wie z. B. die Berg-Waldhyazinthe (*Platanthera chloranta*) und das Knabenkraut (*Orchis spec.*) sind auf den Parzellen ohne Mineraldüngung und im P-Formenversuch ohne Phosphatdüngung zu finden. Solche Bestände können allerdings den Nutzungsansprüchen der auch mit minderer Intensität durchgeführten Landwirtschaft nicht gerecht werden. Bei mittlerer Nutzungsintensität, die regional bei zwei Schnitten und ggf. einem zusätzlichen Weidegang liegt, kann durch eine Nährstoffzufuhr in Höhe des Entzugs ein artenreicher Bestand mittleren Ertragsniveaus erhalten werden, der zudem noch eine hohe Futterqualität aufweist. Ähnliche Düngungspraktiken werden auch für Grünlandbestände in Naturschutzgebieten empfohlen. In den Hochlagen des mittleren Schwarzwaldes stellt der Fremdenverkehr auch für landwirtschaftliche Betriebe eine zusätzliche, bedeutende Erwerbsquelle dar. Artenreiche, blühende Bergwiesen, die das Landschaftsbild prägen, weisen dabei sicherlich eine höhere Attraktivität auf als Magerrasen. Zum Erhalt gefährdeter Arten wäre allerdings die Anlage von Magerrasen-Randstreifen mit entsprechender Pflege bei gleichzeitiger Aufwands- und Ausfallentschädigung des Landwirts denkbar.

Solche Dauerfeldversuche bieten die Möglichkeit, beispielsweise das tatsächliche Verhalten von Nähr-, aber auch Schadstoffen im Boden zu messen und daran Simulationsprogramme zu entwickeln und zu eichen. Wiederholt wurden so auf diesem Standort Proben aus dem Bodenprofil entnommen und die Entwicklung und Verlagerung von Elementen dargestellt. Beispielhaft sei das am Element Uran gezeigt, das in sedimentären Lagerstätten mit dem Phosphor vergesellschaftet ist und so im Rohphosphat vorkommt. Abbildung 6 zeigt so die Verteilung des Urans im Bodenprofil bis 50 cm Tiefe unter dem Einfluss der Düngung.

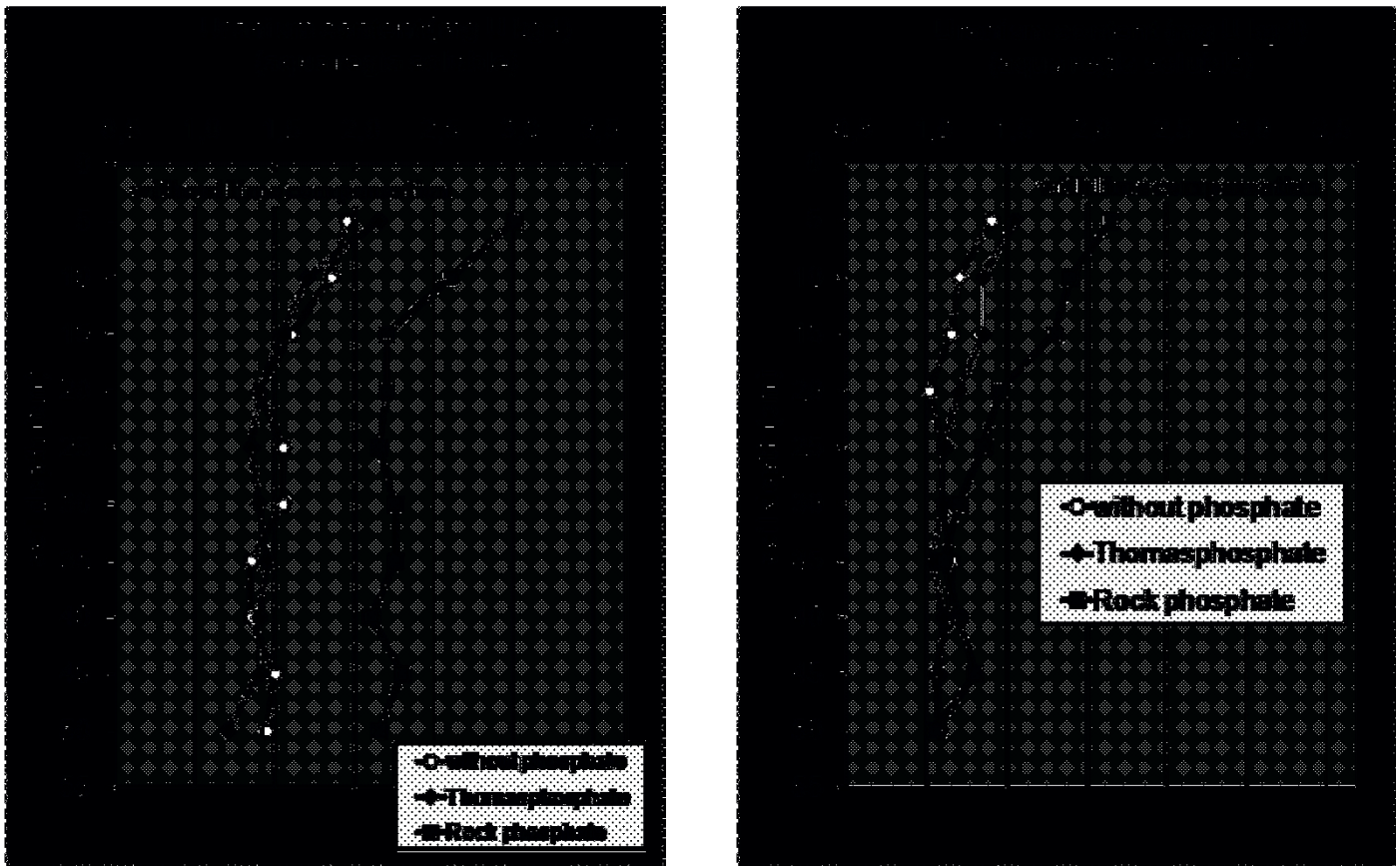


Abb. 6: Uran-Gehalte im Bodenprofil des Versuchs St. Peter bei jährlicher Düngung über 60 Jahre mit verschiedenen P-Formen ohne und mit Kalkausgleich

ZUSAMMENFASSUNG:

Seit 1954 wird auf einer Wiese in den Hochlagen des mittleren Schwarzwaldes auf Dauergrünland ein Düngungsversuch durchgeführt. Die unterschiedliche Düngung wirkt sich in starkem Maß auf den Ertrag und die Bestandszusammensetzung aus. P-Düngung mit Thomasphosphat führte zu höheren Erträgen und besseren Qualitäten als mit weicherdigem Rohphosphat. Bei mittlerer Nutzungsintensität ermöglicht die Nährstoffzufuhr in Höhe des Entzugs den Erhalt eines artenreichen Grünlandbestandes.

Ergebnisse dieses Versuchs wurden im Rahmen des vom EU-Research Fund Coal and Steel geförderten Forschungsprojekts „Impact of long-term application of blast furnace and steel slags as liming materials on soil fertility, crop yields and plant health (SLAGFERTILISER)“ erarbeitet. Der Projektbericht ist als RFCS-Publikation erschienen und unter

<https://bookshop.europa.eu/en/impact-of-long-term-application-of-blast-furnace-and-steel-slags-as-liming-materials-on-soil-fertility-crop-yields-and-plant-health-slagfertiliser--pbKINA28447/>

abrufbar. (Grant Agreement RFSR-CT-2011-00037; EUR 28447 EN)



DÜNGEMITTEL

Pflanzenverfügbarkeit von Phosphaten aus Klärschlamm- und Tiermehlaschen nach Aufschluss in flüssiger Konverterschlacke

In der Verwertung von Phosphaten aus Aschen der Klärschlamm- oder Tiermehlverbrennung besteht ein erhebliches Potenzial zum P-Recycling. Allein aus Klärschlammaschen wird für Deutschland das Rückgewinnungspotenzial auf über 60.000 t pro Jahr geschätzt. Das Phosphat in solchen Aschen ist jedoch nur zu einem geringen Anteil pflanzenverfügbar und muss für eine effiziente Nutzung des Phosphats mit geeigneten Maßnahmen aufgeschlossen werden.

In einem vom FEHS-Institut koordinierten und vom BMBF im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme „Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Rohstoffintensive Produktionsprozesse“ geförderten Projekt wurde der Versuch unternommen, phosphathaltige mineralische Aschen in flüssiger LD-Schlacke im Stahlwerk aufzuschließen und die Düngewirkung der behandelten Schlacken im Vegetationsversuch zu prüfen. Die für das hier entwickelte Verfahren benötigte LD-Schlacke wird bei der Erzeugung von Rohstahl im LD-Konverter erzeugt. LD-Schlacke, die den Anforderungen der Düngemittel-Verordnung für Konverterkalk entspricht, wird in der Landwirtschaft als Düngekalk eingesetzt.

Im Projekt wurden im Schmelzlabor sowie großtechnisch im Stahlwerk Aschen aus der Verbrennung von Tiermehl (TMA) und Klärschlamm (KSA) mit Konverterschlacke (LDS) eingeschmolzen bzw. in die schmelzflüssige Schlacke im Konverter oder in der Schlackenpfanne überführt (Abb. 1). Nach Erkalten der Schlacke wurde diese zerkleinert und auf den für Thomasphosphat geforderten Siebdurchgang (75 % < 0,16 mm; 96 % < 0,63 mm) vermahlen. Die mineralogische Zusammensetzung der Ausgangsmaterialien sowie der angereicherten LD-Schlacken wurde röntgendiffraktometrisch ermittelt. Die Phosphat- und Kalkgehalte wurden nach den entsprechenden Methoden des VDLUFA bestimmt.

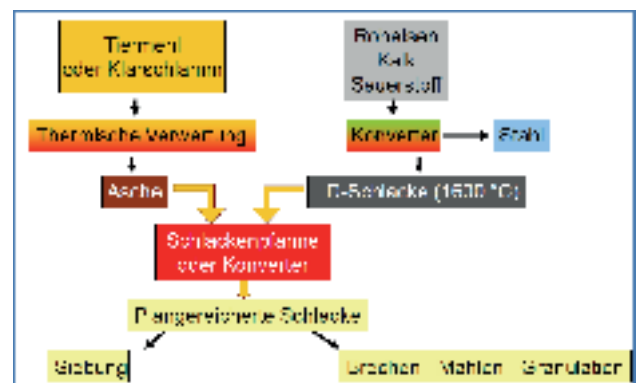


Abb. 1: Schematische Darstellung der Schlacken-anreicherung mit Klärschlamm- oder Tiermehlasche im Stahlwerk

Im Labor-Schmelzversuch wurden P-Anreicherungen bis knapp 10 % P_2O_5 erreicht. Dabei wiesen die mit KSA angereicherten LD-Schlacken höhere citronensäurelösliche Anteile am Gesamt-Phosphat auf als die mit TMA angereicherten.

Die Anreicherung der Konverterschlacke führte zu einer Veränderung der mineralogischen Zusammensetzung. Die phosphathaltigen Minerale wie Apatit und Whitlockit in der Klärschlamm- und Tiermehlasche wurden aufgelöst und gingen in Calcium-Silikophosphate über. Das in Apatit und Whitlockit gebundene Phosphat ist schwer pflanzenverfügbar, während Phosphat in Calcium-Silikophosphat, der Phosphatform im Thomasphosphat, leicht verfügbar ist. Das belegten auch die Vegetationsversuche, die mit den angereicherten Konverterschlacken im Vergleich zu aufgeschlossenen Phosphaten, wie Triple-Superphosphat (TSP) und Thomasphosphat, nicht aufgeschlossenem Rohphosphat und unbehandelten Klärschlamm- und Tiermehlaschen im Gefäß- und im Feldversuch durchgeführt wurden.

Die pflanzenverfügbaren Phosphatgehalte im Boden nahmen durch die Düngung in unterschiedlicher Weise zu. Während durch das Rohphosphat und die Aschen eine geringe Zunahme verzeichnet wurde, nahmen bei

Verwendung der wasserlöslichen P-Form und der angereicherten Schlacken die P-Gehalte im Boden signifikant zu, was sich auch in der Entwicklung, den Erträgen und den Phosphataufnahmen der Versuchspflanzen widerspiegelte (Abb. 2).

Während durch das Rohphosphat und die beiden Aschen allenfalls ein geringer Anstieg der P-Gehalte erreicht wurde, kam es durch die beiden Referenzdünger und vor allem durch die angereicherten Schlacken zu signifikanten Zunahmen der P-Gehalte.

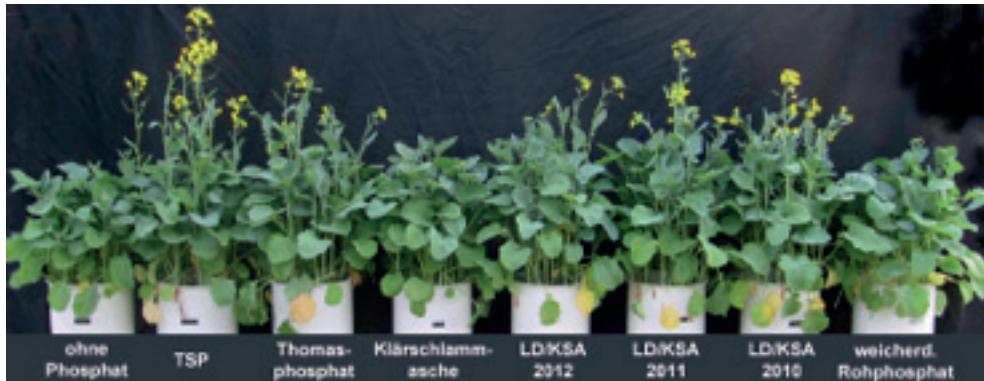


Abb. 2: Entwicklung der Versuchskultur Raps unter dem Einfluss unterschiedlicher Phosphatdüngung mit aufgeschlossenen P-Düngern (TSP, Thomasphosphat), P-angereicherten Schlacken (LD/KSA) und nicht aufgeschlossener Klärschlamm- asche und Rohphosphat.

Im Gefäß- wie im Feldversuch entsprach die Phosphatwirkung der angereicherten Schlacken (LDS/KSA, LDS/TMA) den voll aufgeschlossenen P-Düngern und übertraf diese teilweise sogar. Von den unbehandelten Aschen und dem Rohphosphat gingen nur geringe Ertragseffekte auf alle untersuchten Kulturen auf allen Böden aus (Abb. 3).

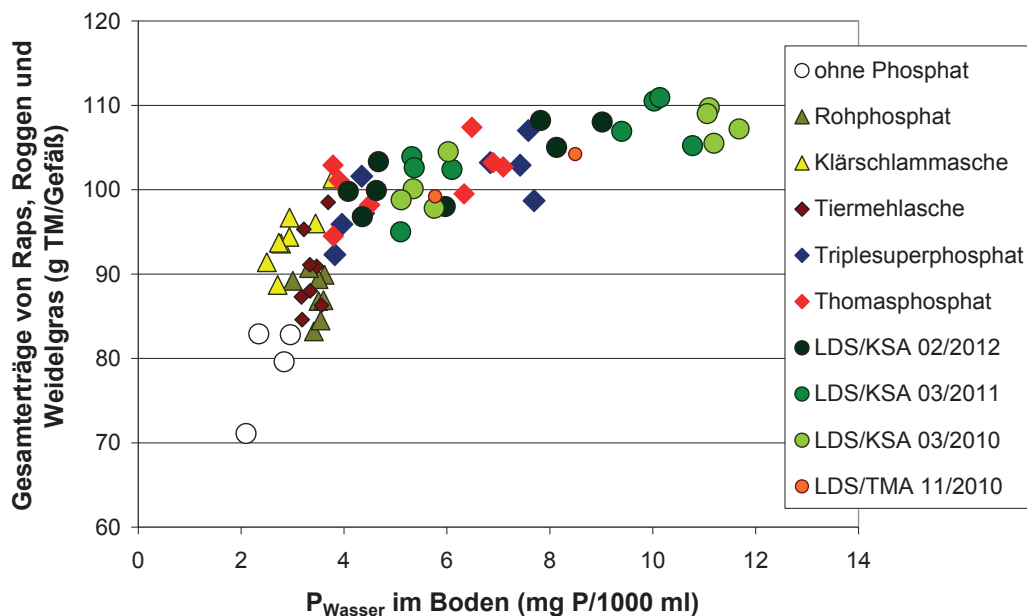


Abb. 3: Gesamterträge von Raps, Roggen und Weidelgras auf dem Lehm- boden Vörden in Abhängigkeit vom P_{Wasser} -Gehalt im Boden und der P-Form

In dem Feldversuch ergaben sich signifikante Mehrerträge und P-Entzüge durch die zugeführte P-Düngung. Dabei fiel der P-Entzug nach Düngung mit angereicherter Konverterschlacke signifikant höher aus als mit Triple-Superphosphat (Tab. 1).

P-Form	Kalkform	P-Düngung (kg P/ha)	Triticale-Ertrag (dt TM/ha)	P-Entzug (kg P/ha)	pH (CaCl ₂)	CAL-P ₂ O ₅ mg/100 g
-	Kohls. Kalk	0	49,0 a	9,9 a	5,70	5,25
-	Konverterkalk	0	45,6 a	9,9 a	5,65	6,25
TSP	Konverterkalk	26	53,4 ab	11,0 ab	5,55	5,75
LDS/KSA	Konverterkalk	26	61,0 b	12,7 bc	5,63	5,25
TSP	Konverterkalk	52	55,5 ab	13,7 c	5,63	7,25
LDS/KSA	Konverterkalk	52	63,0 b	15,9 d	5,50	6,75
GD 5%			11,3	2,0		

Tab. 1: Ergebnisse im Feldversuch Marienmünster-Vörden 2013

Der energieeffiziente Aufschluss von phosphathaltigen Klärschlamm- und Tiermehlaschen in flüssiger Konverterschlacke führte bei entsprechender mechanischer Aufarbeitung der Schlacke zu einem gut pflanzenverfügbaren P-Dünger.

SEKROHMET

Umweltentlastung durch Schonung von Primärressourcen und Vermeidung von Kohlendioxidemissionen bei der Rohstoffaufbereitung sowie Nutzung des Energieinhaltes von flüssiger Elektroofenschlacke bei gleichzeitiger Vermeidung der Deponierung von Reststoffen durch Umwandlung der schmelzflüssigen Elektroofenschlacke in ein Material mit Klinkereigenschaften

Ziel des Projekts war, auf der Basis flüssiger Elektroofenschlacke (EOS) umweltfreundlich ein Material zu erzeugen, welches das dem hydraulischen Portlandzementklinker vergleichbare Eigenschaften aufweist. Dabei soll die EOS stofflich wie thermisch für die Klinkerphasenbildung genutzt werden. Die stoffliche Nutzung der EOS erfolgt heute überwiegend in Form von Gesteinskörnungen für den Verkehrswegebau. Vor dem Hintergrund künftiger gesetzlicher Änderungen könnte die Nutzung von jährlich rd. 1,7 Mio. t EOS erheblich eingeschränkt bzw. unterbunden werden, was eine (teilweise) Deponierung nach sich ziehen würde. Diese ist im Sinne verstärkter Ressourcenintensität und Kreislaufwirtschaft zu vermeiden. Es ist aus ökologischer (CO₂-Emission, Rohstoff- und Primärenergiebedarf) wie ökonomischer (erhöhte EOS-Wertschöpfung, Beitrag zur Stahlstandortsicherung) Sicht erforderlich, eine alternative Nutzung der EOS zu erschließen.

Die Zementindustrie ist ressourcen- und CO₂-intensiv. Sie basiert auf der Verwendung von Portlandzementklinker, häufig kombiniert mit weiteren Bestandteilen (z. B. Hüttensand). Diese reichen jedoch nicht aus, um eine signifikante weitere Klinkersubstitution zu erschließen. Die EOS stellt grundsätzlich eine Option dar, um ein klinkerähnliches Material zu erzeugen, das die technischen Eigenschaften des Zements (Festigkeitsentwicklung, Verarbeitungsverhalten) oder die Belange des Arbeits- und Umweltschutzes nicht beeinträchtigt. Diese Anwendung liegt nahe, da EOS bereits eine stoffliche Nähe zur Zusammensetzung von Portlandzementklinker aufweist, in schmelzflüssiger Form ansteht und keine weiteren stofflich bedingten CO₂-Emissionen erfordert (keine Entsäuerung von Kalkstein). Weiterhin kann der hohe Wärmeinhalt der EOS von etwa 2,3 GJ/t für den Konditionierungs-Prozess genutzt werden.

Die Reduktionsversuche im Tammann-Ofen des FEHS-Instituts fanden in einem Graphittiegel statt, dessen Kohlenstoff in Form von Kohlenmonoxid die Oxide Cr₂O₃, FeO, Fe₂O₃, MnO aus der EOS reduzierte. Dies bestätigte die thermodynamischen Berechnungen zur freien Reaktionsenthalpie bei Temperaturen von 1.650 °C. Die sich absetzenden Metallreguli besaßen einen Massenanteil von bis zu 40 M.-% und zeigten das hohe Wertstoffpotenzial der EOS. Die Metallanalysen ergaben, dass dieses Metall in begrenztem Maße dem Elektroofenprozess wieder zugeführt werden kann, wodurch eine Substitution des Einsatzmaterials ermöglicht wird. Die neben dem Metallregulus verbliebene ausreduzierte Schlacke besaß CaO-Gehalte von lediglich 45 M.-%, so dass eine Konditionierung mit zusätzlichen Kalkträgern nötig ist, um die für einen Klinker erforderliche Chemie einzustellen.

Aufgrund der durch den nun hohen CaO-Anteil stark ansteigenden Viskosität stellte sich heraus, dass die Schlacke nicht mehr handhabbar war, wodurch im großtechnischen Maßstab massive Probleme auftauchen würden. Die Prozessschritte von Reduktion und Konditionierung müssen daher getrennt stattfinden. Ein möglicher Prozess dazu mittels Drehrohrofen konnte erarbeitet werden, so dass eine Behandlung auch im großtechnischen Maßstab möglich wäre.

Die mineralogischen Analysen dieses Materials zeigten, dass wichtige Klinkerphasen wie C3S, C2S und C3A gebildet werden konnten. Durch Optimierung der Konditionierung konnte mittels des Modells von Bogue ein Material erzeugt werden, welches gute zementtechnische Eigenschaften wie Mörteldruckfestigkeit und Hydrationswärme aufwies.

Im Rahmen des Projekts ergab sich als weitere Möglichkeit die Konditionierung hin zu einem Hüttensand, einem latent hydraulischen Material. Die Konditionierung erfolgte statt mit Kalk- mit SiO₂-Trägern, welche keinen negativen Einfluss auf die Viskosität der Schlacke besitzen. Durch eine anschließende Granulation des Materials konnte ein Hüttensand mit ebenfalls guten zementtechnischen Eigenschaften erzeugt werden. Diese Behandlung bedarf keines zweiten Prozessschritts mittels Drehrohrverfahrens, weshalb die ökonomische Betrachtung deutlich günstiger wird. Jedoch besitzt dafür der Hüttensand einen vergleichsweise deutlich geringeren Wert als ein Klinker.

Im Projekt konnte gezeigt werden, dass es alternative Nutzungsmöglichkeiten von EOS mit diversen Vor- und Nachteilen gibt. Theoretisch lässt sich die EOS vollständig in die zwei Produkte „Metall“ und „Klinker“ bzw. „Hüttensand“ konditionieren; jedoch ist dies mit hohen ökonomischen Aufwendungen verbunden, die durch ein Elektrostahlwerk nicht aufgebracht werden können. Zudem ist der Reduktionsprozess mittels Kohlenstoff sehr energie- und CO₂-intensiv, so dass sich auch unter ökologischen Aspekten keine Vorteile gegenüber der bisherigen Klinkererzeugung ergeben.

Dennoch kann das Projekt als Erfolg gewertet werden, da viele Erkenntnisse für Reduktion und Konditionierung von EOS gewonnen werden konnten, die künftig dabei helfen können, Energie und Ressourcen zu schonen. Dadurch wird ein Beitrag zum Umweltschutz geliefert.

ANSPRECHPARTNER

Metallurgie

David Algermissen, M.Sc.

 d.algermissen@fehs.de

 02065.9945-12

Baustofftechnik

Dr.-Ing. Andreas Ehrenberg

 a.ehrenberg@fehs.de

 02065.9945-50

Das Projekt wurde unter dem Aktenzeichen 29689-21/2 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert. Dem Förderträger sei an dieser Stelle besonders gedankt.



SEKROHMET

Umweltentlastung durch Entwicklung eines Verfahrens zur Verfestigung und Rückführung von Schlämmen aus Nassentstaubungsanlagen der Eisen- und Stahlindustrie

Zielsetzung des Vorhabens war es, ein umweltschonendes Verfahren zur Verfestigung und Verpressung von Schlämmen aus Nassentstaubungsanlagen der Hüttenwerke der Eisen- und Stahlindustrie zu entwickeln. Mit diesem Verfahren ist es möglich, die bislang nicht zu verfestigenden Schlämme in einen Zustand zu überführen, der aufgrund geänderter Materialeigenschaften eine Verpressung erlaubt. Verpresste und formstabile Schlämme aus Nassentstaubungsanlagen sollen wieder in die Prozessstufen der Eisen- und Stahlindustrie, aus denen sie stammen, eingesetzt werden.

Der überwiegende Anteil der Schlämme aus den Nassentstaubungsanlagen wird derzeit deponiert. Schlämme enthalten Wertstoffe, hauptsächlich Eisen und Kohlenstoff, die bei einem Wiedereinsatz zur Ressourcenschonung beitragen. Mit einem Wiedereinsatz ließen sich allein in Deutschland 300.000 t/a Schlammengen wiederverwerten, die bisher deponiert werden. Hierdurch ließen sich allein in Deutschland rein rechnerisch jährlich ca. 135.000 t Eisen und 40.000 t Kohlenstoff einsparen. Diese Einsparung von natürlichen Ressourcen erzeugt weiterhin eine große Menge an eingesparter Energie.

Im Rahmen der Projektarbeiten ist es gelungen, aus Konverter- und Gichtgasschlamm formstabile und damit für ein Recycling handhabbare Agglomeratsteine herzustellen. Die umfassenden Untersuchungsergebnisse der chemischen und mineralischen Zusammensetzung, der Korngrößenverteilung und Kornform sowie der Einfluss von Stützkorn flossen in eine Hemmnisanalyse ein und waren richtungweisend für die Entwicklung von Rezepturen zur Herstellung der Agglomeratsteine aus den Schlämmen. Durch den Einsatz unterschiedlicher Zementarten wurden die angestrebten Kennwerte der Agglomeratsteine weiter optimiert.



Das neu entwickelte Verfahren wird es ermöglichen, erstmals auch Schlämme zu Steinen zu formen und diese dann problemlos in die metallurgischen Prozesse zu recyceln, wie es mit Stäuben aus Trockenentstaubungsanlagen betriebliche Praxis ist. Der Wiedereinsatz von Schlämmen in fester Steinform wird die zu deponierenden Mengen dieser Schlämme vermindern und damit der Zielsetzung einer Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz Rechnung getragen werden.

Mit den in den Laborversuchen erreichten Ergebnissen wurden aus Konverterschlamm in der Steinfabrik Volmer Agglomeratsteine erfolgreich erzeugt. Der Einsatz dieser Agglomeratsteine in den Konverterprozess war ebenfalls erfolgreich. Die metallurgische Zielsetzung der Kühlung von Stahlschmelzen durch den Einsatz der Agglomeratsteine wurde bestätigt.

ANSPRECHPARTNER

Dr.-Ing. Peter Drissen

 p.drissen@fehs.de

 02065.9945-46

Das Projekt wurde unter dem Aktenzeichen 32417/01 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert. Dem Förderträger sei an dieser Stelle besonders gedankt.

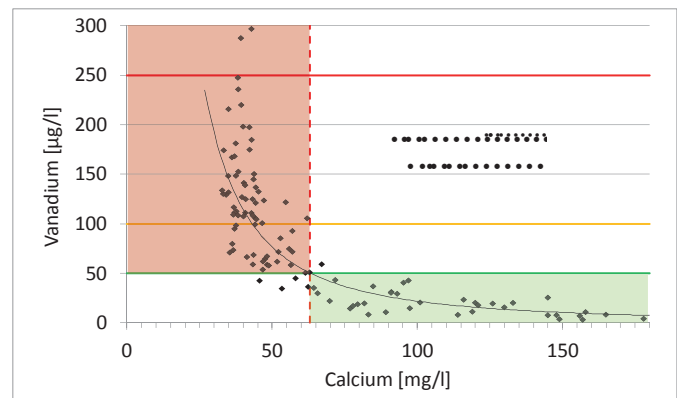


SEKROHMET

Control of slag quality for utilisation in the construction industry

EAF slag is a by-product of electric steelmaking, the annual quantity in Europe is around 10 M tonnes, 8 M tonnes from carbon steelmaking and 2 M tonnes from high alloyed steelmaking. The objective of this project is to increase the utilisation of EAF slag by improving the quality of this slag. The treatments investigated are during the liquid stage of the slag (optimised metallurgical process or additions or cooling procedure) and during/after solidification through water treatment (cooling/washing).

As the regulations in EU countries are not uniform the slag quality classification and utilisation is based not only on the properties of the slag, but also in which country it is used. Therefore, individual solutions have to be found for each slag/steel work. Elements such as Ba, Cr and V were successfully decreased in slag leachate to meet environmental regulations, however solutions for stabilisation of Mo and Se during the liquid stage were not found. Barium leaching was decreased with the addition of sand without increase in V leaching (the slag was slow cooled). Vanadium leaching was decreased by addition of Ca-rich material (e.g. LF slag). Chromium leaching was decreased by favouring the formation of spinels with aluminium oxide additions.



In pilot scale tests with solidified slag, slag washing and water treatment with iron hydroxide adsorbent was tested. The adsorbent is able to remove Mo, V and F- from slag washing water, but the solidified slag washing experiments were not yet successful in decreasing V leaching from the EAF slag.

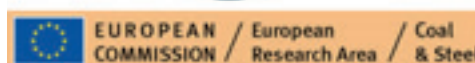
ANSPRECHPARTNER

David Algermissen, M.Sc.

 d.algermissen@fehs.de

 02065.9945-12

This project has been funded by the European Commission in the Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel (RFCS) under RFSR-CT-2012-00006.



UMWELT

Übertragbarkeit von Laborergebnissen auf Praxisverhältnisse bei Verwendung von LD-Schlacke im offenen Einbau

Der Einsatz von Stahlwerksschlacken in Tragschichten ohne Bindemittel unter dichten Decken oder bitumengebunden in Asphaltsschichten wird grundsätzlich als unkritisch betrachtet. Dagegen ist der offene Einbau (Einsatz in Wegen, Plätzen oder Wällen, die nicht mit dichten Abdeckungen, wie z. B. Beton oder Asphalt versehen sind) von industriellen Nebenprodukten im Allgemeinen und damit auch derjenige von Stahlwerksschlacken in den letzten Jahren immer wieder von den Umweltbehörden diskutiert worden.

Ziel eines Forschungsprojekts war es daher, das langfristige Verhalten von LD-Schlacke bei Verwendung in ungebundenen Schichten zu untersuchen. Neben der technischen Eignung der ausgewählten LD-Schlacke für den offenen ländlichen Wegebau wurde vor allem das Auslaugverhalten in Laborversuchen, in halbtechnischen Lysimeterversuchen sowie unter Praxisbedingungen untersucht. Hierzu wurde ein aus zwei Abschnitten bestehender Versuchsweg errichtet (s. Abb. 1), dessen Tragschicht aus einer LD-Schlacke bzw. zum Vergleich aus einem Kalkstein besteht. Die Analysen der Sickerwässer aus dem Versuchsweg wurden mit Ergebnissen verschiedener Labor-Auslaugverfahren sowie Lysimeterversuchen verglichen.



Abb. 1: links: Gelände vor Bau des Versuchswegs; rechts: Versuchsweg kurz nach Fertigstellung

Anhand der Prüfung der technischen Eigenschaften konnte eine gute Eignung der LD-Schlacke als Mineralstoff für den Einsatz im offenen Wegebau nachgewiesen werden. Untersuchungen der Sickerwassermengen belegen, dass die Durchlässigkeit der Tragschicht auch nach über siebenjähriger Beobachtungszeit des Versuchswegs ausreichend hoch ist, so dass eine gute Versickerung von Niederschlagswässern gewährleistet ist.

Die Vergleichbarkeit der Laborverfahren untereinander wird durch die verschiedenen Rahmenbedingungen sowie durch die unterschiedlichen W/F-Verhältnisse eingeschränkt, was oftmals zu voneinander abweichenden Stofffrachten führt. Eine direkte Übertragung der in Laborversuchen erzielten Ergebnisse auf die Verhältnisse unter der Tragschicht des Versuchswegs ist nicht möglich, da die W/F-Verhältnisse der Laborversuche deutlich höher sind. Ausnahmen bilden nur die jeweils ersten Fraktionen des ausführlichen Säulenversuchs (DIN 19528) sowie des Up-flow-Perkolationsverfahrens (DIN EN 14405).

Die durchgeführten Lysimeterversuche (Abb. 2) entsprechen in ihrem Aufbau dem Versuchsweg bis zu einer Tiefe von ca. 20 cm unter der Tragschicht. Dennoch wurden zum Teil andere Konzentrationsverläufe einiger Elemente beobachtet, was durch höhere W/F-Verhältnisse, begünstigt durch den erzwungenen Durchfluss, und damit andere Stofffrachten erklärt wird.

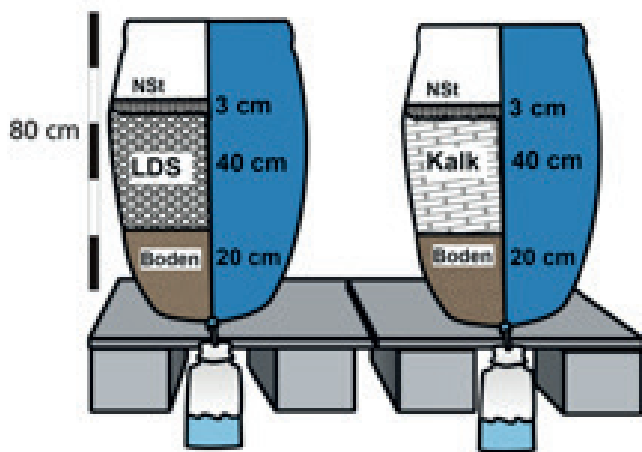


Abb. 2: Skizze (links) und Foto (rechts) von der Anlage der Lysimeterversuche

Bereits in der Anfangsphase des Versuchswegs wurde für beide Mineralstoffe (LD-Schlacke und Kalkstein) eine geringe Durchlässigkeit der Tragschicht festgestellt, was zu einer recht geringen Auslaugung der Materialien führt. Die Konzentrationen umweltrelevanter Parameter in den mittig unter dem Versuchsweg entnommenen Bodenlösungen sind daher so gering, dass negative Effekte auf das Grundwasser nicht zu besorgen sind.

UMWELT

Untersuchungen zur Auslaugung schwer perkolierbarer Baustoffe unter Berücksichtigung neuer deutscher und europäischer Regelwerke mit dem Ziel einer nachhaltigen Verwendung

In verschiedenen Industriezweigen, wie Stahlindustrie, Kohlekraftwerke oder Gießereien, entstehen außer den eigentlichen Produkten auch sogenannte industrielle Nebenprodukte. Diese können grobstückig, aber auch sehr feinkörnig bis pulverförmig sein. Für solche feinkörnigen Materialien sind die Einsatzmöglichkeiten, z. B. im Straßenbau, aus technischen Gründen beschränkt. Es besteht aber die Möglichkeit, sie beispielsweise für Oberflächenabdichtungen von Deponien und für Flächensanierungen einzusetzen. Weitere Einsatzgebiete liegen im Bereich des Erdbaus, z. B. Lärmschutzwälle. Der Einsatz solcher industriellen Nebenprodukte hilft zum einen, natürliche Ressourcen zu schonen, zum anderen wird teurer und immer knapper werdender Deponieraum eingespart.

Voraussetzung für eine Nutzung industriell hergestellter feinkörniger Materialien als Baustoff ist die Erfüllung bestimmter Anforderungen hinsichtlich der technischen Eigenschaften sowie der Umweltverträglichkeit. Bisher gibt es allerdings nur wenige Verfahren zur Prüfung der Umweltverträglichkeit, die speziell für feinkörnige Materialien geeignet sind. Schüttelverfahren, wie die DIN 19529 oder die DIN EN 12457, wären grundsätzlich geeignet. Seit Beginn der Erarbeitung einer bundeseinheitlichen Verordnung für den Einsatz von industriellen Nebenprodukten, der Ersatzbaustoffverordnung (EBV), werden jedoch Säulenverfahren bevorzugt (DIN 19528), da diese Art der Auslaugung realitätsnähere Ergebnisse liefern soll. Ein Problem bei der Untersuchung sehr feinkörniger Materialien stellt dabei vor allem die geringe Durchlässigkeit solcher Materialien sowie die Neigung zur Verfestigung und zum Quellen dar (Abb. 1).



Abb. 1: links: stark verdichtete, nicht perkolierbare SFA in der Glassäule des Perkolationsverfahrens (DIN 19528); rechts: verfestigte, nicht perkolierbare Pfannenschlacke in zerbrochener Glassäule

Die DIN 19528 enthält zwar den Hinweis, dass „schwer perkolierbare Stoffe“ mit 80 % Sand gemischt werden können, um eine Durchströmbarkeit der Probe zu gewährleisten. Mit dieser speziellen Versuchsdurchführung liegen allerdings bisher wenig Erfahrungen vor, und es ist unklar, welchen Einfluss die Sandzumischung auf die Ergebnisse hat. Darüber hinaus fehlen Angaben zum Handling, z. B. wie eine homogene Mischung von Probe und Sand zu erfolgen hat.

Auf europäischer Ebene wird ein ganz anderer Ansatz für die Untersuchung sehr feinkörniger Baustoffe verfolgt. Sofern ein Material so undurchlässig ist, dass eine Durchströmung in einer Versuchssäule nicht mehr möglich ist, wird das Material als quasi monolithisch betrachtet. In dem Fall ist das sogenannte GLHC-Verfahren (test method for granular products with low hydraulic conductivity) anzuwenden, ein Sonderverfahren des für monolithische Stoffe entwickelten DSLT (Dynamic Surface Leaching Test). Erfahrungen mit dem GLHC-Verfahren liegen bisher allerdings kaum vor.

Für beide Untersuchungsansätze gilt, dass es kein schlüssiges Entscheidungskriterium gibt, ab welcher Durchlässigkeit ein feinkörniger Baustoff nicht mehr mit einem für körnige Bauprodukte vorgesehenen Standardverfahren untersucht werden kann, sondern mit einem Alternativverfahren für schwer perkolierbare Materialien geprüft werden muss. Die Ergebnisse dieses Projekts sollen diesbezüglich eine Entscheidungshilfe liefern. Dazu werden u. a. Langzeit-Durchlässigkeitsprüfungen mittels Triaxialzellenversuch durchgeführt (Abb. 2).

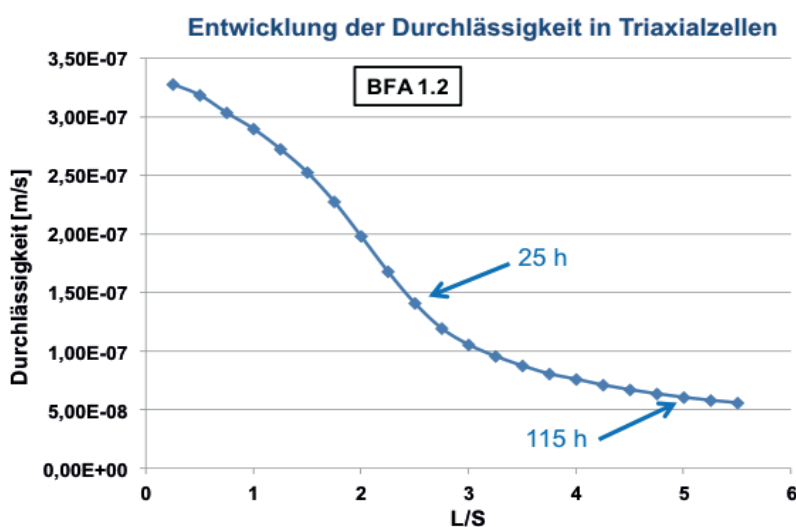


Abb. 2: Entwicklung der Durchlässigkeit einer Probe BFA im Laufe des Triaxialzellenversuchs