

Report.

Wissenschaftsprojekte des FEhS-Instituts **1/2018**

ISSN 0948-4795 | 25. Jahrgang Nr. 1

- | | |
|-----------|--|
| 3 | Verbesserung der Umweltverträglichkeit von sekundärmetallurgischen Schlacken in Bezug auf das Auslaugverhalten von Fluorid
> A. Sokol, R. Bialucha |
| 8 | Definierte Metalloxidreduktion aus Elektroofenschlacken
> D. Algermissen, H.-J. Rauen, H. Tabani, R. Deike, M. Großrath, M. Cancarevic, H. Schliephake |
| 18 | Nachhaltige Verwendung von Stahlwerksschlacken in der M TS E-Bauweise
> D. Demond, R. Bialucha, E. Barka, E. Birle |
| 25 | Ertrag und pflanzensoziologische Entwicklung von Dauergrünland im Mittleren Schwarzwald unter dem Einfluss langjähriger mineralischer Düngung mit Eisenhüttenschlacken
> M. Rex |
| 34 | Erzeugung und Nutzung von Eisenhüttenschlacken in Deutschland und Europa 2017
> Th. Merkel |

VERBESSERUNG DER UMWELT- VERTRÄGLICHKEIT VON SEKUNDÄRMETALLURGISCHEN SCHLACKEN IN BEZUG AUF DAS AUSLAUGVERHALTEN VON FLUORID

Dr. rer. nat. A. Sokol, Dr.-Ing. R. Bialucha

EINLEITUNG

Die Nutzung von sekundärmetallurgischen Schlacken (SEKS) wird einerseits durch die Neigung zum feinkörnigen Zerfall und die daraus resultierenden Nachteile im Hinblick auf die technischen Eigenschaften erschwert. Andererseits können die oft erhöhten Konzentrationen an Fluorid einen limitierenden Faktor darstellen, weil dieser Parameter aus Gründen des Umweltschutzes zunehmend im Fokus der Regelwerke steht. Insbesondere vor dem Hintergrund der geplanten Ersatzbaustoffverordnung (EBV) [1] ist zukünftig mit einer Verschärfung des Bewertungsmaßstabs für Stahlwerksschlacken zu rechnen. Die Präsenz von Fluorid ist meist auf den Einsatz von Flussspat (CaF_2) zurückzuführen, der in der sekundärmetallurgischen Behandlung von Schlacken als Flussmittel oft unverzichtbar ist. Über sein Verhalten in Bezug auf Stahlwerksschlacken war bisher nur wenig bekannt.

Vor diesem Hintergrund wurde ein durch die AiF gefördertes Forschungsvorhaben durchgeführt [2], um den Kenntnisstand über das Vorhandensein, die Bindungsform sowie das Auslaugverhalten von Fluorid in sekundärmetallurgi-

schen Schlacken zu erweitern. Ziel war es, abschätzen zu können, ob Auswirkungen auf Boden, Grund- und Oberflächenwasser bei Verwendung solcher Schlacken im Straßen- und Erdbau zu erwarten sind. Darüber hinaus sollten wirtschaftlich sinnvolle Maßnahmen zur Reduzierung der Fluoridauslaugbarkeit aufgezeigt werden, wobei sowohl Maßnahmen an bereits erkalteten Schlacken als auch Behandlungen im schmelzflüssigen Zustand erprobt wurden.

UNTERSUCHUNGSPROGRAMM

Für die Durchführung wurden acht Schlacken ausgewählt, die bei der sekundärmetallurgischen Behandlung des Rohstahls aus dem LD- sowie auch aus dem Elektroofenprozess entstanden sind. Sekundärmetallurgische Schlacken neigen dazu, bereits bei der Abkühlung aufgrund eines Modifikationswechsels vom β - zum γ -Dicalciumsilikat feinkörnig zu zerfallen, wobei eine Homogenität selten gegeben ist. So können fein zerfallene neben groben, nicht zerfallenen Kornfraktionen vorliegen. Um Unterschiede hinsichtlich der Gehalte und der mineralischen Bindung von Fluorid zwischen den zerfallenen und nicht zerfallenen Schlackenanteilen zu erkennen, wurde eine getrennte Untersu-

chung der feinen und der gröberen Fraktion vorgenommen. Auf Basis einiger Vorversuche, zu denen die Feststoffanalyse, die Auslaugung gemäß Schüttelverfahren 2:1 [3] sowie die röntgenografische Mineralbestimmung (XRD) gehören, wurden drei Schlacken für weitere Versuche ausgewählt. An diesen drei Schlacken wurde neben der grundlegenden Charakterisierung noch zusätzlich das Auslaugverhalten mittels weiterer kurzzeitiger Auslaugverfahren (Schüttelverfahren 10:1 [4], Säulenkurztest [5]) sowie Langzeit-Auslaugverfahren (pH-stat-Verfahren [6], ausführlicher Säulenversuch [5], der abweichend von der Norm bis zu einem L/S-Verhältnis von 10 durchgeführt wurde) untersucht. Zusätzlich wurde die Mineralogie mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskops inklusive energiedispersiver Röntgenanalyse (EDX) der einzelnen Mineralphasen untersucht.

Mit den drei ausgewählten Schlacken wurden außerdem Karbonatisierungsversuche durchgeführt und die Auswirkungen auf die Fluoridauslaugung untersucht. Es wurden sowohl Versuche unter natürlichen CO_2 -Bedingungen der Luft durchgeführt als auch Versuche, bei denen die Proben unter CO_2 -gesättigter Atmosphäre gela-

gert wurden. Da unterschiedliche Materialfeuchten eine Auswirkung auf die Geschwindigkeit der Karbonatisierung haben können, wurden die Proben mit Wasser gemischt und folgende L/S-Verhältnisse eingestellt: 0,1 l/kg, 0,2 l/kg und 0,4 l/kg. Jeweils eine Parallelprobe wurde zudem aufgrund der zu erwartenden Selbsterhärtung in regelmäßigen Abständen zerkleinert bzw. durchmischt. An drei Terminen (nach 1 Woche, 4 Wochen, 16 Wochen) wurden die Proben entnommen und untersucht. Neben Auslaugversuchen (Schüttelverfahren 2:1), für die die verfestigten Proben auf eine Korngröße von < 10 mm gebrochen wurden, wurden auch Feststoff- und Röntgenphasenanalysen durchgeführt.

Die im Labormaßstab durchgeführten Schmelzversuche hatten zum Ziel, die mineralische Zusammensetzung der Schlacken zu verändern. Es wurde untersucht, ob durch die Variation verschiedener Einflussgrößen die Zusammensetzung der abgekühlten Schlacken so modifiziert werden kann, dass eine mineralische Einbindung von Fluorid verbessert wird. Die Einflussgrößen, die das Verhalten von Fluorid in der Schmelze betreffen, sind einerseits die Abkühlungsrate und andererseits die Zugabe eines Konditionierungsmittels. Mit dem Ziel, die Bildung des schwerlöslichen Fluorapatits ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$) zu forcieren, wurde als Konditionierungsmittel Phosphat (P_2O_5) gewählt, das in Form von Diammoniumhydrogenphosphat ($(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$) zudosiert wurde. Zusätzlich wurden Versuche mit der Zugabe von 5 % SiO_2 + 4,5 % P_2O_5 (SiO_2 in Form von Quarzsand) sowie 5 % CaO + 4,5 % P_2O_5 (CaO in Form von Branntkalk) durchgeführt, um den Einfluss der Basizität auf die Apatitbildung zu prüfen. Die nach der schmelzflüssigen Behandlung erneut erstarrten Proben wurden hinsichtlich ihrer Feststoffgehalte, ihres Auslaugverhaltens und ihrer Mineralogie untersucht.

AUSLAUGVERHALTEN VON FLUORID IN ABHÄNGIGKEIT VON FESTSTOFFGEHALT UND MINERALOGIE

Die Hauptmineralphase aller hier untersuchten sekundärmetallurgischen Schlacken ist Dicalciumsilikat (Ca_2SiO_4), wobei in den feinen Fraktionen überwiegend $\gamma\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ und in den groben Fraktionen entweder zusätzlich oder ausschließlich die nicht zerfallene Modifikation $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ vorzufinden ist. Periklas (MgO) tritt nahezu in jeder Schlackenprobe auf. Eine weitere, für sekundärmetallurgische Schlacken typi-

sche Mineralphase ist Mayenit ($\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$) bzw. Fluor-Mayenit ($\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{32}\text{F}_2$). Akermanit, Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$), aber auch Calcit, Spinelle und Eisenoxide wurden in den Proben identifiziert. Als sekundäre Phasen kommen hauptsächlich Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) und Hibschit ($\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_2(\text{OH})_4$) vor. Als fluorführende Phasen treten neben Fluor-Mayenit auch Flussspat (CaF_2) und Cuspidin auf. Dicalciumsilikat ist ebenfalls in der Lage, Fluor aufzunehmen und kann laut Inoue und Suito (2002) [7] bis zu 6 M.-% Fluor enthalten. Es besteht jedoch auch eine Mischkristallreihe zwischen Dicalciumsilikat und Flussspat (Dicalciumsilikat- CaF_2) [7]. Bei der chemischen Analyse der einzelnen Mineralphasen mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskops und EDX war eine eindeutige Zuordnung zu Cuspidin bzw. der Mischphase Dicalciumsilikat- CaF_2 oder Dicalciumsilikat mit Fluoridgehalten oftmals nicht möglich (vgl. Bild 1). Unterschiede zwischen den feinen und den groben Fraktionen sind vereinzelt, jedoch nicht systematisch erkennbar. Bestimmte Mineralphasen sind teilweise nur in der feinen oder nur in der groben Fraktion vorhanden. Der Grund hierfür muss noch vertiefend untersucht werden.

Das Auslaugverhalten des Fluorids wird vorwiegend durch die Mineralogie der Schlacken gesteuert. Die auf die Fluoridfeststoffgehalte (0,02 M.-% bis 7,8 M.-%) bezogenen prozentualen Auslaugraten sind insgesamt recht klein (maximale Auslaugrate: 0,6 %). Es zeigt sich eine Tendenz zu höherer Auslaugung bei niedrigeren Feststoffgehalten. Sehr niedrige Fluoridgehalte im Feststoff führen dazu, dass sich keine fluorführenden Phasen, wie Cuspidin oder Flussspat bilden können. Das vorhandene Fluor liegt dann nur schwach gebunden – beispielsweise in leicht löslichem Dicalciumsilikat – vor. Dieses wird verstärkt gelöst und führt daher zu einer hohen Fluorid-auslaugrate. Daher können auch Proben mit niedrigen Feststoffgehalten relevante Mengen Fluorid auslaugen. Die Ergebnisse der Auslauguntersuchungen (Schüttelverfahren 2:1) für die hier untersuchten Proben sind in Bild 2 dargestellt. Die Fluoridkonzentrationen sind meist so hoch, dass der gemäß EBV-Entwurf vorgesehene Grenzwert für SWS-1 überschritten wird.

Weiterhin zeigen die Ergebnisse der Auslauguntersuchung, dass sich die fein zerfallenen Anteile der sekundärmetallurgischen Schlacken von den groben, stabil gebliebenen Anteilen unterscheiden. Obwohl

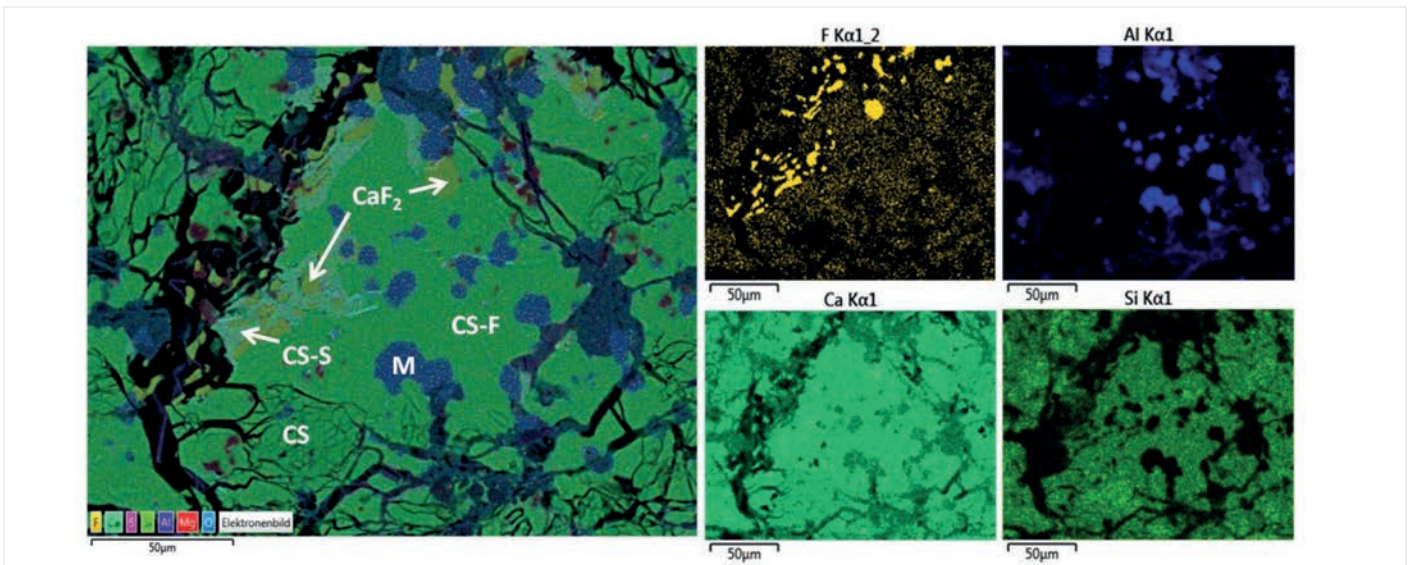


Bild 1: Elementverteilungsbilder eines Teilbereichs einer ausgewählten SEKS. CaF_2 = Flussspat, M = Mayenit, CS = Calciumsilikat, CS-F = Calciumsilikat- CaF_2 (Mischphase), CS-S = Calciumsilikat (schwefelführend)

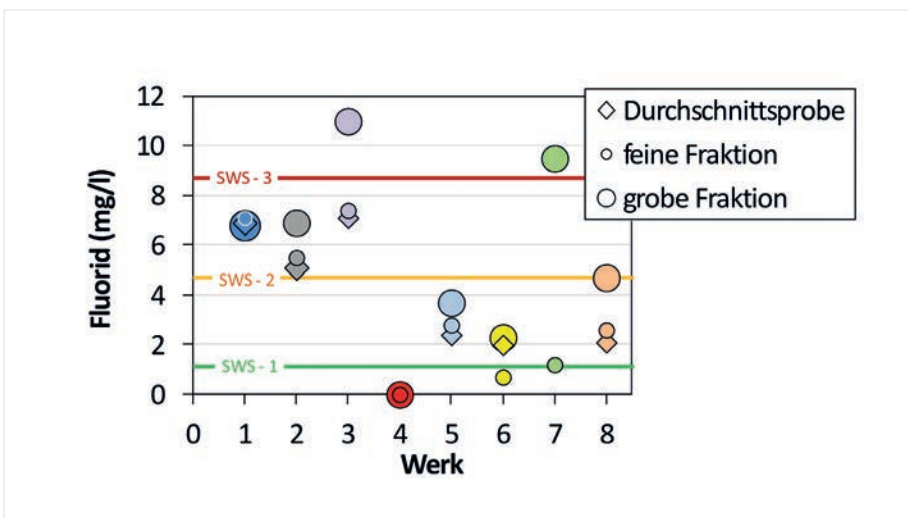


Bild 2: Fluoridkonzentrationen in den Eluaten (Schüttelverfahren 2:1) der acht untersuchten sekundärmetallurgischen Schlacken

die feinen Fraktionen eine größere auslaugbare Oberfläche haben und höhere Fluoridgehalte im Feststoff aufweisen, zeigen die groben Fraktionen höhere Fluoridkonzentrationen in den Eluaten (Bild 2). Diese Beobachtung lässt sich nur bedingt durch die unterschiedliche Mineralogie der beiden Fraktionen erklären und wird von einem anderen Effekt überlagert. Es ist eine Tendenz zu kleineren Fluoridkonzentrationen bei höhe-

rer CaO/SiO_2 -Basizität erkennbar (vgl. Bild 3, links), wobei letztere bei fünf der untersuchten acht Proben in den feinen Fraktionen höher ist als in den groben. Gleichzeitig werden bei höheren CaO/SiO_2 -Basizitäten steigende Al_2O_3 -Gehalte gemessen (vgl. Bild 3, rechts). Höhere Al_2O_3 -Gehalte führen vermutlich zu höheren Aluminiumkonzentrationen im Eluat, wobei die Mineralphase Mayenit ($\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$) als leicht löslich gilt.

Das Vorhandensein von Aluminium führt dazu, dass im Eluat Calciumaluminiumhydrat-Phasen (C-A-H-Phasen) ausfallen können, die eine starke Mitfällungskapazität für Fluorid haben [8]. Fluorid wird somit aus der Lösung entfernt.

MASSNAHMEN ZUR FLUORID-MOBILISIERUNG

Die Auswertung der Schmelzversuche hat gezeigt, dass weder die Abkühlungsrate noch die Zugabe von Konditionierungsmitteln zu einer Veränderung des Fluoridgehalts im Feststoff der Proben führt. Die mineralische Zusammensetzung wird jedoch je nach Abkühlbedingungen und Zugabe des Konditionierungsmittels zum Teil stark modifiziert, so dass sich auch das Auslaugverhalten verändert. Eine schnelle ($> 100\text{ °C/min}$, 50 °C/min) sowie eine moderate Abkühlung (20 °C/min) führen dazu, dass die in der Originalprobe vorhandenen Mineralphasen Mayenit bzw. Fluor-Mayenit durch andere aluminiumführende Phasen, wie Tricalciumaluminat ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$)

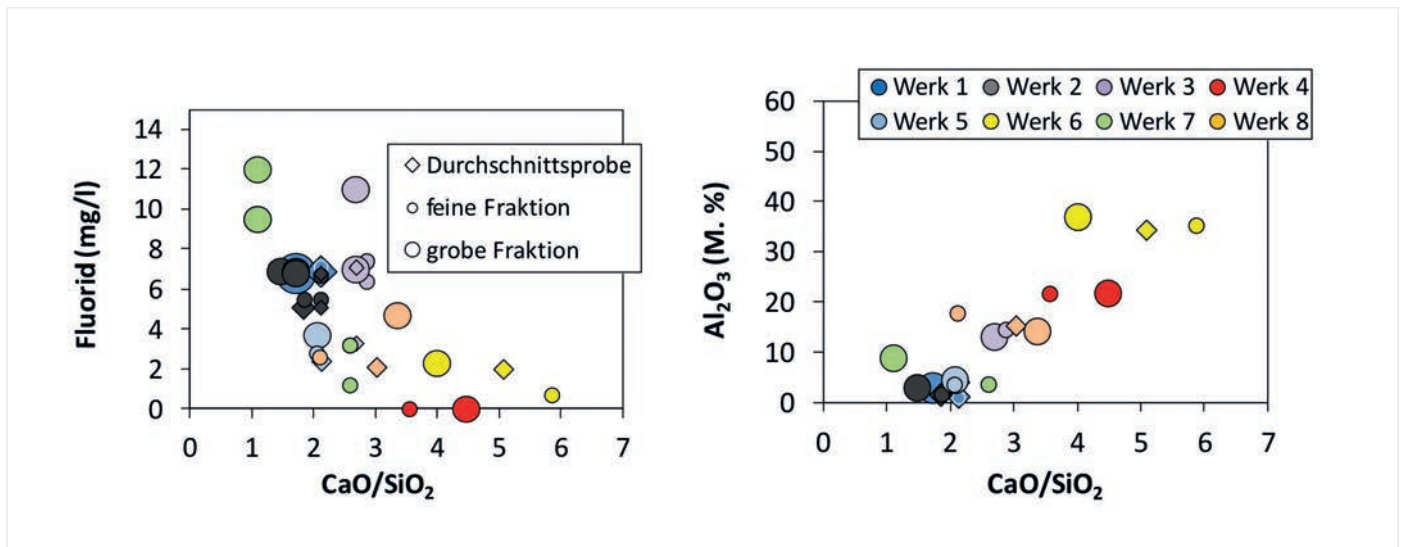


Bild 3: Fluoridkonzentrationen (Schüttelverfahren 2:1) sowie Al₂O₃-Gehalte in Abhängigkeit von der CaO/SiO₂-Basizität

oder Gehlenit (Ca₂Al₂SiO₇), ausgetauscht werden. Gleichzeitig beobachtet man, dass im Vergleich zur Originalprobe wesentlich mehr Fluorid ausgelaugt wird. Bei einer langsamen Abkühlung von 5 °C/min liegt die Fluoridauslaugrate in der gleichen Größenordnung wie die der Originalprobe, wobei auch die Mineralogie wieder der Originalprobe entspricht. Durch die Zugabe von P₂O₅ konnte der Zerfall der Schlacken weitestgehend verhindert werden. Doch auch wenn sich teilweise Fluorapatite bilden konnten, die als stabil gelten, war die Fluorid auslaugung deutlich höher als in der Originalprobe. Eine Erhöhung der Fluorid auslaugung ergibt sich ebenfalls bei den Versuchen mit Zugabe von SiO₂ und CaO. Die Veränderung des Chemismus führte auch bei diesen Versuchen dazu, dass selbst bei der langsamen Abkühlung von 5 °C/min die Bildung von Mayenit bzw. Fluor-Mayenit unterdrückt wurde.

In der Literatur wurden Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen Fluorid auslaugung und dem Auftreten von Fluorapatit gefunden [9, 10]. Dieser Effekt, bei dem die Fluorid auslaugung durch die Bildung des unlöslichen Fluorapatits unterdrückt wird, konnte in dem durchgeführten Forschungsvorhaben nicht bestätigt werden. Dagegen gibt es Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen der Fluorid auslaugung und

dem Vorhandensein bzw. Fehlen leichtlöslicher aluminiumführender Phasen. Diesem Hinweis soll in weiteren Versuchen nachgegangen werden.

Die Auswertung der Karbonatisierungsversuche ergab, dass in der Variante ohne CO₂-Behandlung kaum Karbonatisierungseffekte auftraten, während durch eine CO₂-Behandlung die Bildung von Calciumcarbonat deutlich beschleunigt wurde. Hinsichtlich der Mineralogie erkennt man nach 16 Wochen Versuchslaufzeit neben dem Calciumcarbonat auch noch Hydratphasen, wie Portlandit, Hibschit und Brucit. In einer besonders aluminiumreichen Probe lassen sich zudem auch Calciumaluminiumsilikathydrat und Magnesiumaluminiumhydrat erkennen. Insgesamt konnte die Fluorid auslaugung bei den Versuchen nicht wesentlich reduziert werden. Eine Mitfällung von Fluorid und Calciumcarbonat wurde nicht beobachtet. Lediglich in der aluminiumreichen Probe ist eine geringfügige Abnahme der Fluoridkonzentration zu beobachten, was möglicherweise genau auf die Ausfällung von Calciumaluminiumsilikathydrat und Magnesiumaluminiumhydrat zurückzuführen ist.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Ziele des Forschungsvorhabens waren einerseits, den Kenntnisstand über das Verhalten von Fluorid in

sekundärmetallurgischen Schlacken zu erweitern, und andererseits, Maßnahmen zur Reduzierung der Fluoridauslaugbarkeit aufzuzeigen, wobei sowohl Maßnahmen an bereits erkalteten Schlacken (Karbonatisierungsversuche) als auch Behandlungen im schmelzflüssigen Zustand (Schmelzversuche) erprobt wurden. An ausgewählten Schlacken wurden das kurzzeitige sowie das Langzeit-Auslaugverhalten untersucht. Die Mineralogie wurde mittels XRD und REM untersucht. Die folgenden fluorführenden Mineralphasen wurden identifiziert: Flussspat, Cuspidin, Fluor-Mayenit sowie Dicalciumsilikat. Niedrige Fluoridgehalte im Feststoff führen dazu, dass sich keine eigenständigen fluorführenden Phasen (Cuspidin bzw. Flussspat) bilden können. Das vorhandene Fluor liegt dann schwach gebunden vor (z. B. im Dicalciumsilikat) und wird verstärkt während der Auslaugung freigesetzt. Das Auslaugverhalten wird zudem durch das Vorhandensein von leichtlöslichen aluminiumführenden Mineralphasen (z. B. Mayenit) beeinflusst. Diese führen zu höheren Aluminiumkonzentrationen im Eluat. Dadurch können Calciumaluminiumhydrat-Phasen ausfallen, die eine starke Mitfällungskapazität für Fluorid haben, so dass es aus der Lösung entfernt wird. Die Auswertung der Schmelzversuche hat gezeigt, dass eine schnelle Abkühlung der Schlacken dazu führt, dass die Bildung von Mayenit unterdrückt wird. Gleichzeitig wird im Vergleich zur Originalprobe wesentlich mehr Fluorid in den Eluaten gemessen. Auch durch die Zugabe von P_2O_5 (mit dem Ziel, schwerlösliche Fluorapatite zu bilden) konnte keine deutliche Reduktion der Fluorid-

auslaugung erreicht werden. Die gezielte Karbonatisierung der Proben führte ebenfalls nicht zu einer Unterdrückung der Fluoridauslaugung.

Das wesentliche Ziel dieses Forschungsprojektes, den Kenntnisstand über die Bindungsform und das Auslaugverhalten von Fluorid in sekundärmetallurgischen Schlacken zu erweitern, wurde erreicht. Durch eine gezielte Karbonatisierung bzw. die Veränderung des Schlackenchemismus durch Zugabe von Phosphaten konnte die Auslaugung von Fluorid aus sekundärmetallurgischen Schlacken jedoch nicht verringert werden. Dagegen wurden mögliche Zusammenhänge zwischen der Fluoridauslaugung und dem Vorhandensein bzw. Fehlen leichtlöslicher aluminiumführender Phasen erkannt. Diesem Hinweis soll in zukünftigen Untersuchungen nachgegangen werden. Beispielsweise könnte untersucht werden, welchen Effekt die Zugabe von leichtlöslichen Aluminiumverbindungen zu fluoridreicher Schlacke hat. Auch die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf Elektroofen- bzw. Edelstahlschlacken ist von Interesse.

DANK

Das IGF-Vorhaben Nr. 18523 N der Forschungsvereinigung 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. <<<

LITERATUR

- [1] Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung. Bundesrats-Drucksache 566/17
- [2] Bialucha, R.; Sokol, A.: Verbesserung der Umweltverträglichkeit von sekundärmetallurgischen Schlacken in Bezug auf das Auslaugverhalten von Fluorid. Abschlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 18523 (2018)
- [3] 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
- [4] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau TP Gestein-StB – Teil 7.1.1 Schüttelverfahren (L/S = 10:1), Ausgabe 2016
- [5] DIN 19528:2009-01: Elution von Feststoffen – Perkulationsverfahren zur gemeinsamen Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen und organischen Stoffen
- [6] EN 14997:2015-03: Characterization of waste – Leaching behaviour test – Influence of pH on leaching with continuous pH control
DIN EN 14997:2015-05: Charakterisierung von Abfällen – Untersuchung des Elutionsverhaltens – Einfluss des pH-Wertes auf die Elution bei kontinuierlicher pH-Wert-Kontrolle
- [7] Inoue, R.; Suito, H.: Fluorine-containing Mineral Phases in Ironmaking and Steel-making Slags and Their Solubilities in Aqueous Solution, ISIJ International 42 (2002), Nr. 7, S. 785–793
- [8] Suito, H.; Inoue R.: Dissolution Behavior and Stabilization of Fluorine in Secondary Refining Slags, ISIJ International 42 (2002), Nr. 8, S. 921–929
- [9] Miki, T.; Mino, M.; Shitogiden, K.; Samada, Y.: Protection against fluorine dissolution and pH change of seawater during steelmaking slag addition. Waste Processing and Recycling in Mineral and Metallurgical Industries V, Proceedings of the 5th International Symposium on Waste Processing and Recycling in Mineral and Metallurgical Industries, Hamilton, Canada (2004), S. 569–583
- [10] Nagaike, Y.; Miki, T.; Hino, M.: Prevention of Fluorine Elution from Electric Arc Furnace Reducing Slag into Water, ISIJ International 51 (2011), Nr. 3, S. 508–512

DEFINIERTE METALLOXIDREDUKTION AUS ELEKTROOFENSCHLACKEN

D. Algermissen M. Sc. (FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e.V.)

Dipl.-Oec. H.-J. Rauen, Dipl.-Ing. H. Tabani (Hermann Rauen GmbH & Co.)

Professor Dr.-Ing. R. Deike, M. Großrath M. Sc. (Universität Duisburg-Essen)

Dr. rer. nat. M. Cancarevic, Dr.-Ing. H. Schliephake (Georgsmarienhütte GmbH)

EINLEITUNG

Bedingt durch die Reaktionen während der Stahlherstellung sind Schlacken in Abhängigkeit von der Zusammensetzung der Einsatzstoffe und des zu produzierenden Stahls Gemische aus Oxiden wie SiO_2 , CaO , Al_2O_3 (typische Oxide aus denen Primärbaustoffe bestehen), Metalloxiden und Metallen, die in Form kleiner Tropfen suspendiert in einer Schlacke vorliegen.

In Deutschland werden in Abhängigkeit von der Konjunktur in der Regel jährlich 42 bis 44 Mio. t Rohstahl erzeugt, von denen ca. 30 % in 20 Elektrostahlwerken produziert werden. Im Jahr 2017 sind aus der Elektrostahlproduktion ca. 2 Mio. t Stahlwerksschlacken erzeugt worden [1] [2].

Bei einer Jahresproduktion eines Elektrostahlwerkes von ca. 1,2 Mio. t werden bei ca. 150–160 kg

Schlacke/t Rohstahl durchschnittlich ca. 0,18–0,19 Mio. t Elektroofenschlacken (EOS) erzeugt. Aus Bild 1 ist zu entnehmen, dass der größte Teil der EOS zurzeit als Baustoff im Verkehrswegebau eingesetzt wird.

Die Nutzbarkeit von Elektroofenschlacke für die jeweiligen Anwendungen ist einerseits durch ihre physikalischen Eigenschaften bestimmt, die zum Teil gegenüber natürlichen Materialien deutlich besser sind. So zeichnet sich die EOS beispielsweise durch ihre Möglichkeit der Selbstverfestigung und durch ihren guten Polierwert (PSV, Polished Stone Value) aus, wodurch die Tragfähigkeit in den Tragschichten und die Griffigkeit der Asphaltoberfläche über einen langen Nutzungszeitraum erhalten bleiben. Im Gegensatz zu natürlichem Gestein weist die EOS eine höhere Verformungsbeständigkeit auf, wodurch sie sich ebenfalls als vorteilhaftes Baumaterial auszeichnet [4].

Im Verlauf der Aufbereitung einer EOS aus der Produktion von Qualitätsstahl werden nach dem Stand der Technik vor und während der Produktion die magnetischen Bestandteile, im Wesentlichen das Eisen aus der Schlacke, entfernt. Die nach der Aufbereitung güte-

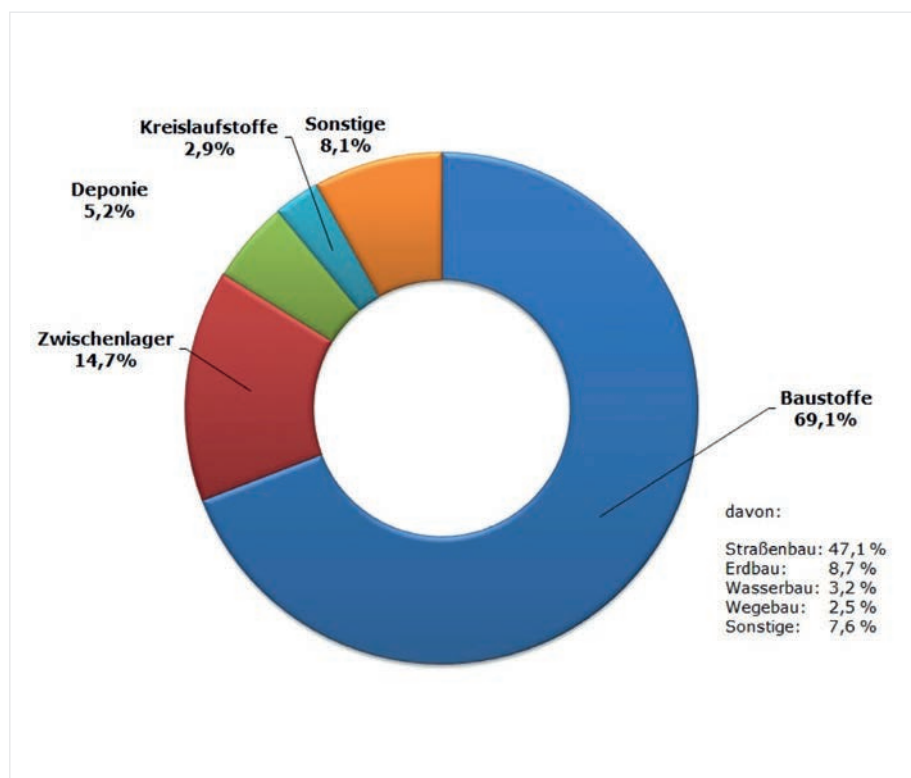


Bild 1: EOS-Nutzung in Deutschland in 2017 [3] aus Qualitäts- und Baustahlerzeugung

überwachten Schlacken werden heute überwiegend im Verkehrswegebau eingesetzt. Beim Verkehrswegebau ist die Löslichkeit aus dem Gestein zu beachten. Im Gegensatz zu anderen Eishüttenschlacken können aus einer EOS aufgrund der vollkommen unterschiedlichen Einsatzstoffe und des unterschiedlichen Schmelzprozesses in geringen Konzentrationen Schwermetalle enthalten sein, die unter Umständen auslaugbar sind.

Aufgrund dieser Tatsache wird der Schutz von Boden und Grundwasser beim Einsatz von recycelten und industriell hergestellten Baustoffen z. B. in NRW durch sogenannte Verwertererlasse geregelt, in denen Grenzwerte definiert sind, die entsprechend einzuhalten sind [5]. Die Einhaltung der in den Erlassen genannten Grenzwerte ist die Voraussetzung dafür, dass die jeweiligen Baustoffe in Baumaßnahmen öffentlicher und nichtöffentlicher Auftraggeber verwendet werden dürfen [6].

Ein dazu in Deutschland seit vielen Jahren gültiges Verfahren ist das S4-Verfahren [7], wobei die Schlacke mit demineralisiertem Wasser in einem Wasser-/Feststoff-Verhältnis (W/F) von 10:1 für 24 h geschüttelt und im Anschluss das

Eluat analysiert wird. Dies ermöglicht eine Aussage der Auswirkung beim Einsatz von EOS auf das Grundwasser und ist eine Grundvoraussetzung für deren Nutzung.

Einflussnehmende Parameter, um die Schlacke hinsichtlich dieser geregelten Werte umweltverträglich zu machen, konnten in den letzten Jahren erforscht werden. Dies wird heute von den Stahlproduzenten mit teilweise großem technischen und finanziellen Aufwand umgesetzt, um ein vermarktbare Produkt zu erhalten, welches der höchsten Anforderungsklasse entspricht [8].

Zukünftig soll ein neues Regelwerk, die bundeseinheitliche Ersatzbaustoffverordnung [9], gelten, welche neben der Änderung des Elutionsverfahrens auf ein W/F-Verhältnis von 2:1 [10] [11] auch neue Grenzwerte enthalten wird, die dazu führen können, dass die EOS zukünftig nicht mehr – wie derzeit noch möglich – als Baustoff im Straßenwegebau verwendet werden kann. Somit wäre die gesetzlich sowohl auf nationaler als auch auf europäischer Ebene geforderte Prüfung der Kreislaufwirtschaft und als Ressourcenschutz zumindest für den Stoffstrom der Elektroofenschlacken nachhaltig gefährdet.

In dem hier vorgestellten Projekt wurde in Zusammenarbeit mit dem Elektrostahlunternehmen Georgsmarienhütte GmbH ein Verfahren entwickelt und erprobt, um die EOS im flüssigen Zustand zu einem definierten Teil zu reduzieren. Das flüssige Reduktionsmetall sammelte sich am Boden der Schlackenpfanne, so dass auf diese Weise eine Separation von der restlichen mineralischen Fraktion der EOS erfolgte. Die damit weitgehend von auslaugbaren Metalloxiden befreite EOS sollte somit einem Baustoff entsprechen, der die zukünftigen Umweltrichtlinien [9] und die technischen Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen einhält [8].

Das während der Reduktion/Konditionierung separierte Eisen sollte als metallischer Rohstoff in anderen Industriezweigen einsetzbar sein, so dass auf diese Weise die Metalle wieder dem Wertstoffkreislauf zugeführt werden können.

Weiterhin erschloss sich durch die Konditionierungsmaßnahmen der EOS im Rahmen dieses Projekts die Möglichkeit, das Material ähnlich wie Hüttensand in der Zementindustrie zu nutzen. Durch die verringerte Basizität, bedingt durch das Einbringen von Silizi-

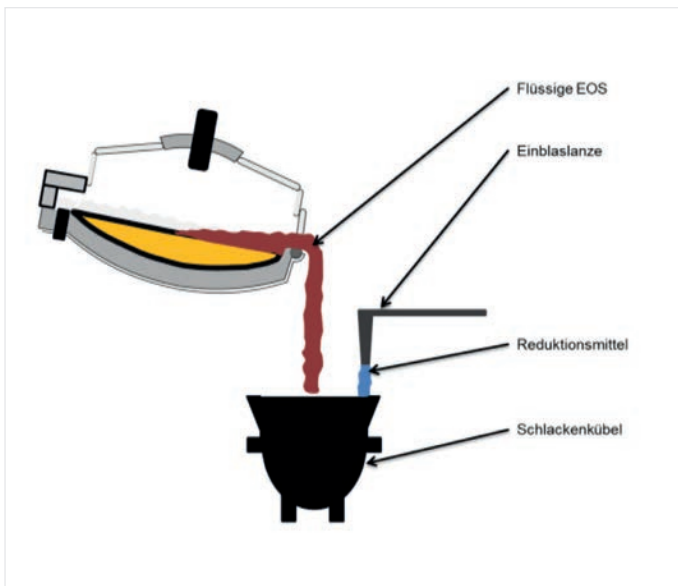


Bild 2: Schematische Darstellung der Versuchsdurchführung

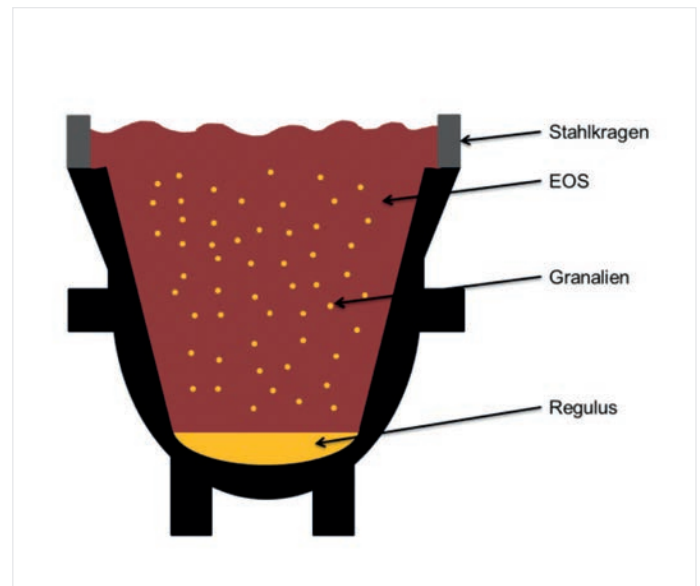


Bild 3: Schematische Darstellung eines Schnitts durch den Schlackenkübel

umträgern, konnte die Schlacke bei schneller Abkühlung glasig erstarren. Dieser Weg wurde mittels einer mobilen Wassergranulation erprobt, um so auch die Möglichkeit zu untersuchen, ein neuartiges Produkt aus der EOS zu erzeugen.

WERKSVERSUCHE ZUR DEFINIERTEN REDUKTION

Der Ablauf der Reduktionsversuche ist schematisch in Bild 2 dargestellt. Während des Schmelzprozesses im Elektrolichtbogenofen fließt die überschüssige EOS kontinuierlich aus einer Schlackentür in einen Schlackenkübel. Zum Ende des Schmelzprozesses wird die flüssige EOS durch das Kippen des Elektrolichtbogenofens dekantiert, bevor der Abstich des Stahls erfolgt. Während des Abgusses der Schlacke wird zeitgleich das Reduktionsmittel über eine Einblasvorrichtung in den Schlacken-

kübel eingebracht. Bei den durchgeführten Versuchen wurde als Reduktionsmittel eine Mischung aus Kohlenstoff, Ferrosilizium und Siliziumdioxid in die flüssige EOS eingeblasen. Durch die Anpassung des Verhältnisses des Ferrosiliziums (exotherme Reduktionsreaktion) zum Kohlenstoff (endotherme Reduktionsreaktion mit Gasbildung) wird die Wärmeentwicklung und die Gasbildung der Reduktionsreaktion eingestellt. Eine homogene Durchmischung des Reduktionsmittels und der flüssigen EOS wird durch das parallele und kontinuierliche Einblasen gewährleistet. Zusätzlich setzt mit dem Beginn der Reduktion aufgrund der Bildung eines gasförmigen Gemischs aus Kohlenstoffmonoxid (CO) und Kohlenstoffdioxid (CO₂) ein Aufschäumen der EOS im Schlackenkübel ein. Das Aufschäumen und die damit einhergehende Durchmischung haben den Vorteil, dass die Reak-

tionskinetik schnell ist. Allerdings besteht auch die Gefahr des Überlaufens des Kübels, was zu einem Teilverlust des Reduktionsmittels der EOS führen kann.

Um das Überlaufen der EOS zu verhindern bzw. zu verringern und das zur Verfügung stehende Reaktionsvolumen zu vergrößern, wurde im Verlauf des Vorhabens ein Stahlkragen am oberen Rand des Schlackenkübels angebracht. Zusätzlich wurden neue Schlackenkübel mit einem größeren Volumen angeschafft.

Mit zunehmender Versuchsdauer steigt der Reduktionsgrad der EOS, d. h., die Metalloxide werden reduziert und der Siliziumdioxidanteil nimmt aufgrund der Reaktion des Siliziums als Reduktionsmittel zu (sinkende Basizität). Des Weiteren sinkt die Temperatur aufgrund des Wärmeverlusts an die Umgebung, wodurch sich die

BTI 3



BTI 4



BTI 5



BTI 8



Bild 4: Beispielhafte Aufnahmen der Reguli

Viskosität der Schlacke erhöht und die Reaktionskinetik abnimmt. Nachdem das Dekantieren der EOS aus dem Elektrolichtbogenofen erfolgt ist, wird der Kübel zum Schlackenplatz gefahren. In Abhängigkeit des Verhältnisses der eingebrachten Masse des Reduktionsmittels zu der Masse der EOS und der vorherrschenden Temperatur läuft die Reduktionsreaktion weiterhin ab. Dies konnte am Schlackenplatz durch auftretende Gasblasen an der Oberfläche des Kübels beobachtet werden.

Das flüssige Metall, welches sich aus der Reduktion der Metalloxide der EOS bildet, agglomeriert zu Tropfen bzw. Granalien. Diese sinken aufgrund ihrer höheren Dichte zum Boden des Kübels und bilden dort den sogenannten Regulus, Bild 3. Mit zunehmender Viskosität der Schlacke können die Granalien ab einem bestimmten Zeitpunkt nicht mehr absin-

ken und werden in der reduzierten EOS eingebunden.

Das Kippen der Kübel fand bei den ersten Versuchen nach ca. 140 h (ca. 6 Tagen) statt, so dass die Granalien größtenteils aus-sedimentieren konnten und die Schlacke vollständig erstarrt war. Da im Hinblick auf die Einbindung in den Betriebsablauf eine derart lange Abkühlzeit der Schlacke im Kübel nicht wirtschaftlich ist, wurden im Laufe der Versuche kürzere Abkühlzeiten bis hin zum Kippen der Schlacke im flüssigen Zustand durchgeführt.

REDUKTIONSMETALL

In Bild 4 sind beispielhaft für vier Versuche die aus den Reduktionsversuchen erhaltenen Reguli dargestellt. Zunächst wurden aus den Reguli am Rand sowie der Mitte Proben entnommen. Dann wurde zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der

Reguli von jedem durchgeführten Reduktionsversuch ein Teil des entnommenen Probenmaterials in einem Vakuuminduktionsofen umgeschmolzen.

Nach dem Aufschmelzen wurde die Schmelze über eine Rinne in der Kammer des Vakuuminduktionsofens in drei Kupferkokillen gegossen. Bei jedem Umschmelzversuch wurden auf diese Art drei Talerproben erzeugt. In Bild 5 sind die Kupferkokillen mit der Rinne sowie beispielhaft drei Talerproben nach dem Abguss dargestellt.

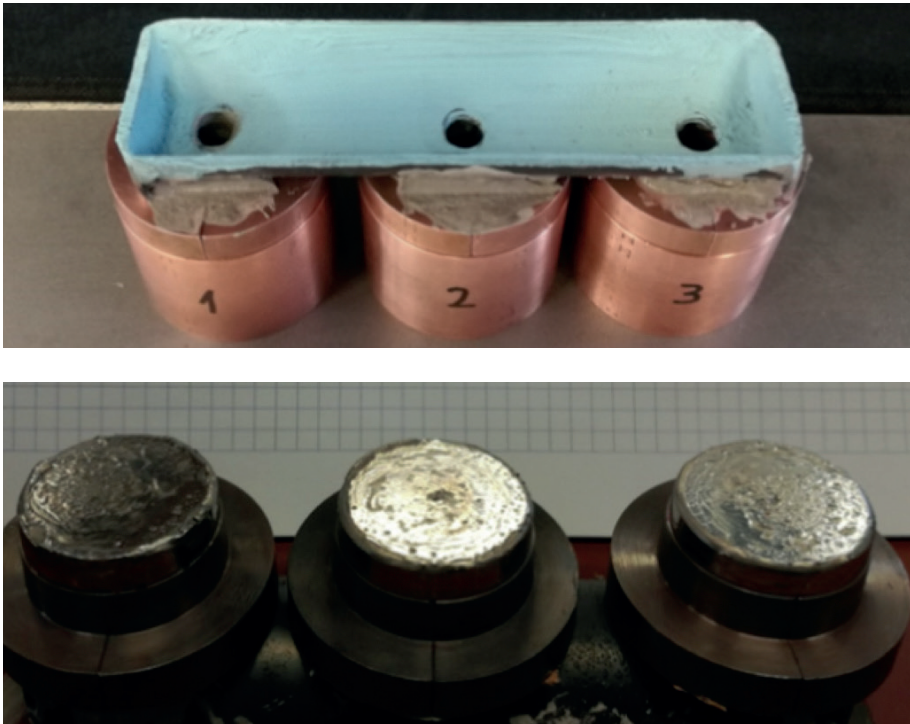


Bild 5: Kupferkokillen mit einer Rinne und erzeugte Proben nach dem Abguss

Die erzeugten Talerproben wurden mit Hilfe einer Verbrennungsanalyse hinsichtlich der Kohlenstoff- sowie Schwefelgehalte untersucht. Des Weiteren wurden die Konzentrationen der Elemente Silizium, Mangan, Phosphor, Schwefel, Chrom, Molybdän, Nickel, Kupfer und Vanadium mit einem Funkenemissionsspektrometer ermittelt.

Die entstehenden festen Reduktionsprodukte (Metallregulus und Schlacke) müssen eine definierte Qualität aufweisen, um diese vermarkten zu können. Dabei zeigte sich, dass für das Metall der Phosphorgehalt ein limitierender Faktor ist. Deswegen trägt der Siliziumgehalt positiv zum Wert des Metalls bei.

Neben dem metallischen Regulus fällt bei der Aufbereitung der reduzierten Elektroofenschlacke das Separationseisen an, das ei-

nen Teil der Schlacke enthält sowie einen durchschnittlichen metallischen Anteil von 35,8 M.-% aufweist und somit, ebenso wie die Reguli, als Eisenträger in anderen metallurgischen Prozessen eingesetzt werden könnte.

NUTZUNG ALS STRASSENBAUSTOFF GEMÄSS ERSATZBAUSTOFFVERORDNUNG

Die Aufbereitung der erstarrten EOS erfolgte bei der Firma Hermann Rauen GmbH & Co. Zunächst wurde die reduzierte EOS gebrochen. Vor jeder Brechstufe wurde der stark ferromagnetische Anteil (eisenhaltige Anteile) der EOS abmagnetisiert, um die Schlacke von den Eisenanteilen zu befreien und die Brechwerkzeuge vor Beschädigungen zu schützen. Dieses sogenannte Separationseisen enthielt hohe Anteile an Granalien und teilweise Reste oder Abplatzungen der Reguli. Die Aufbereitung erwies sich aufgrund

der guten mechanischen Eigenschaften und der hohen Festigkeit der EOS als schwierig, da die Brechaggregate der Firma Rauen nicht auf diese Art von Schlacke ausgelegt sind und die Chargen im Projektverlauf unterschiedliche Qualitäten aufwiesen. Nach dem Brechen und Sieben der EOS wurden durch das FEhS-Institut Proben zur Durchführung diverser Untersuchungen zum Feststoffgehalt, zu Umweltverhalten und zu den technischen Eigenschaften im Hinblick auf den Einsatz im Verkehrswegebau entnommen.

UMWELTEIGENSCHAFTEN

Die Analyse der Umwelteigenschaften ist abhängig vom betrachteten Regelwerk. Während heute meist die TL Gestein-StB in ihrer eigenen oder abgewandelten Form, abhängig vom Bundesland, herangezogen wird, ist das Ziel der Ersatzbaustoffverordnung, eine bundeseinheitliche Regelung zu finden.

Die EBV lässt die Wahl zwischen dem Schüttelverfahren mit einem W/F-Verhältnis von 2:1 nach DIN 19529 oder dem Perkulationsverfahren im Aufwärtsstrom mit einem W/F-Verhältnis von 2:1 nach DIN 19528.

Gemäß EBV wurden im Rahmen des Vorhabens deshalb beide Verfahren untersucht:

- Schüttelverfahren 2:1 / Korngröße 8–11 mm
- Aufwärts-Perkulationsverfahren 2:1 / Korngröße 0–32 mm

Die Grenzwerte sind in Tabelle 1 dargestellt. Die Proben wurden entsprechend in die Zuordnungs-klassen SWS-1 bis SWS-3 kategorisiert.

Ersatzbaustoffverordnung (W/F 2:1)

		SWS-1	SWS-2	SWS-3
pH-Wert		13,0	13,0	13,0
el. Leitfähigkeit	[µS/cm]	10.000	10.000	10.000
Chrom	[mg/l]	0,110	0,190	0,250
Molybdän	[mg/l]	0,055	0,400	1,000
Vanadium	[mg/l]	0,180	0,450	1,000
Fluorid	[mg/l]	1,1	4,7	8,5

Tabelle 1: Grenzwerte für EOS gemäß EBV [9]

Ersatzbaustoffverordnung (W/F 2:1)

	Unbehandelt 0/32 mm	8/11 mm Schütteln	0/32 mm Perkolation
SWS-1	0 %	23 %	54 %
SWS-2	0 %	77 %	46 %
SWS-3	100 %	0 %	0 %

Tabelle 2: Eingruppierung der Chargen EBV unbehandelt bzw. nach Konditionierung in die Klassen SWS-1 bis -3

Verfahren/Parameter	Einheit	Mittelwert	Minimum	Maximum
Rohdichte	[Mg/m³]	3,6	3,3	3,9
Schlagversuch 8/12 mm	[M.-%]	21,0	17,9	31,1
Schlagversuch 35/45 mm	[M.-%]	18,9	15,2	25,0
FTW Splitt	[M.-%]	0,55	0,23	0,90
FTW Schotter	[M.-%]	0,22	0,10	0,50
Dampfversuch 24 h	Δ[Vol.-%]	0,01	0,00	0,08
Dampfversuch 168 h	Δ[Vol.-%]	1,03	0,00	2,83

Tabelle 3: Ergebnisse der technischen Untersuchungen

Voruntersuchungen zeigten, dass die unbehandelten Schlacken in SWS-3 einzustufen wären, wenn die EBV bereits heute gelten würde. Durch die definierte Reduktion konnte dies deutlich verbessert werden, Tabelle 2. Insbesondere bei der Perkolation zeigte sich, dass die Überschreitungen (ausschließlich für Molybdän) nur geringfügig über dem SWS-1-Grenzwert lagen.

TECHNISCHE EIGENSCHAFTEN FÜR DEN VERKEHRSWEGEBAU

Zur Bestimmung der Eigenschaften für den Einsatz im Verkehrswegebau existieren für Elektroofenschlacken nach TL Gestein-StB Anforderungen. Im Rahmen des Vorhabens wurden folgende Prüfungen an den behandelten Schlacken durchgeführt:

- Volumenbeständigkeit mittels Dampfversuch
- Schlagzertrümmerungswert Splittkörnung 10–12 mm
- Schlagzertrümmerungswert Schotterkörnung 35–45 mm
- Widerstand gegen Frost-Tau-salz-Beanspruchung (FTW) für Splittkörnung
- Widerstand gegen Frost-Tau-salz-Beanspruchung (FTW) für Schotterkörnung
- Widerstand gegen Polieren (PSV)
- Rohdichte mittels Tauchwägung bzw. Pyknometer

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse ist in Tabelle 3 zu sehen.

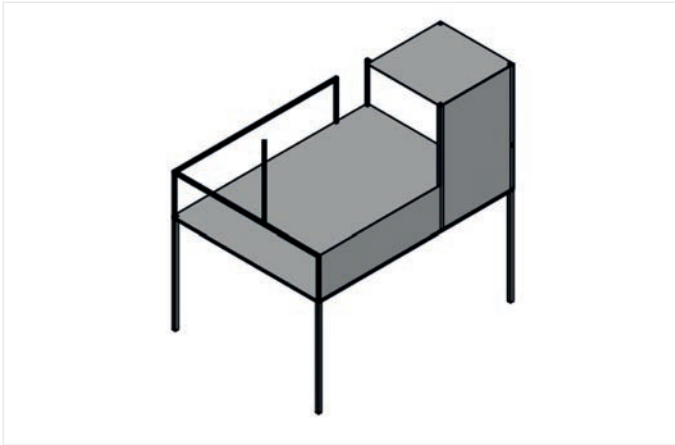


Bild 6: Bühne am Schlackenplatz mit mobiler Wassergranulation

Aufgrund der Reduzierung des Eisengehalts konnte die Rohdichte von ursprünglich deutlich über 4 Mg/m^3 auf bis zu $3,3 \text{ Mg/m}^3$ reduziert werden. Dennoch konnten teils sehr gute Werte für den Schlagversuch sowie die Frost-Tau-Wechselbeständigkeit erreicht werden. Die Volumenbeständigkeit konnte auch nach 168 h sichergestellt werden und der Widerstand gegen das Polieren lag über der höchsten Anforderungsklasse $\text{PSV} > 55$. Könnten die besten Chargen kontinuierlich erzeugt werden, wäre ein hochwertiger Einsatz im Asphalt möglich.

Andere erforderliche Parameter wie z. B. die Kornformzahl wurden nicht bestimmt, da in den Versuchen in der Aufbereitungsanlage der Fa. Rauen deutlich wurde, dass der vorhandene Brecher nicht optimal für diese Schlacke ausgelegt ist. Im erzeugten Kornband fehlte maßgeblich das für einen wirtschaftlichen Betrieb notwendige Mittelkorn (8–16 mm). Bei der Nutzung eines anderen Brechaggregats würden sich die sonstigen bautechnischen Pa-

rameter ebenfalls ändern, so dass die Gesamtheit der Prüfungen erneut durchgeführt werden müsste. Grundsätzlich sind die Ergebnisse jedoch als sehr positiv einzuschätzen.

NUTZUNG ALS POTENZIELLES MATERIAL FÜR DIE ZEMENTINDUSTRIE

Parallel zur Aufbereitung als Straßenbaustoff wurden in mehreren Versuchen auch Granulationen durchgeführt, um zu prüfen, ob an der EOS ein neuartiges Material für die Zementindustrie erzeugt werden kann.

Dazu wurde im Bereich des Schlackenplatzes eine Bühne gebaut, auf welche die mobile Granulationsapparatur des FEhS aufgebaut wurde, Bild 6.

Mit einem Stahlwerk-Probenlöffel wurde flüssige, behandelte Schlacke von oben aus dem Kübel entnommen und mittels Wasser in der Granulationsapparatur sehr schnell abgekühlt, so dass diese zerspratzte,

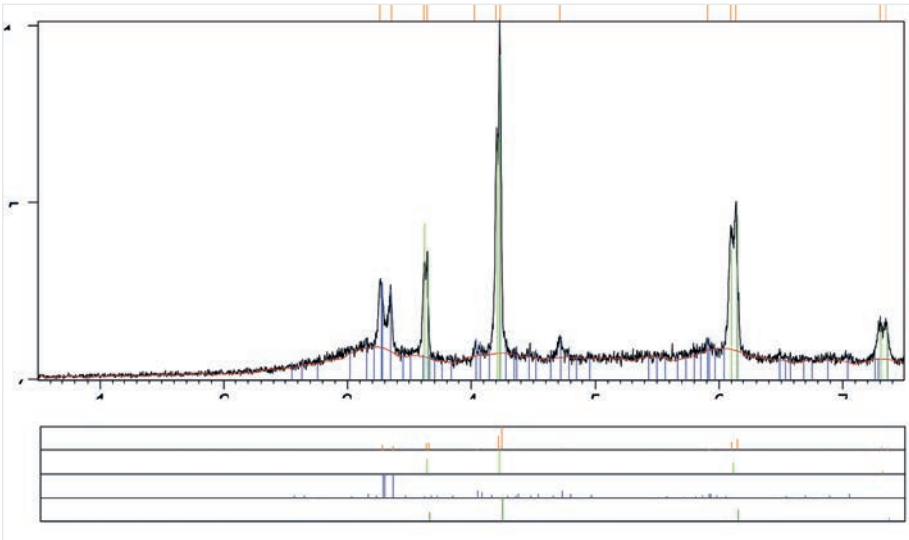


Bild 7: Röntgendiagramm einer wassergranulierten, konditionierten EOS

so wie es auch für die Hüttensandherstellung mit Hochofenschlacke üblich ist.

Zur Bildung latent hydraulischer Eigenschaften ist die Erzeugung einer Glasphase notwendig. Unter betrieblichen Bedingungen erstarrt eine reguläre EOS immer kristallin, selbst bei einer Wassergranulation. Durch die Konditionierung wurde die C/S-Basizität auf das Niveau einer Hochofenschlacke abgesenkt, so dass teilweise eine Glasbildung möglich wird, wie das Röntgendiagramm in Bild 7 zeigt.

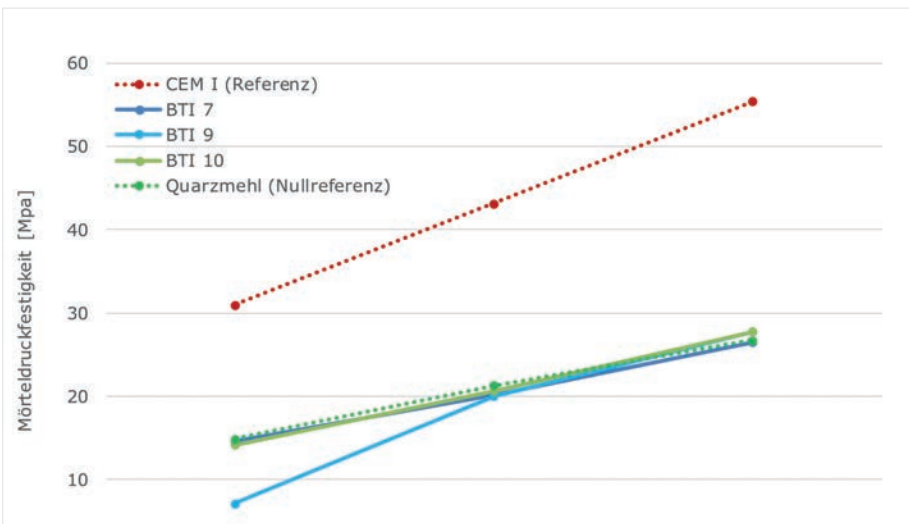


Bild 8: Mörteldruckfestigkeiten dreier teilreduzierter EOS als 50:50 (CEM I)-Mischung + 3,5 M.-% SO_3 im Vergleich zu Quarzmehl (Nullreferenz) und CEM I (Referenz)

Die nicht wassergranulierten Proben zeigten im Röntgenbeugungsdiagramm bis zu 50 % der leicht hydraulischen Mineralphase Larnit (BTI 7 und BTI 9: 50 %, BTI 8: 20 %, vgl. Anhang 4), die bei den zementtechnischen Untersuchungen jedoch keinen Festigkeitsbeitrag leistete. Nach Prüfung der Druckfestigkeit der hergestellten Mörtelprismen konnte festgestellt werden, dass die Festigkeiten meist sogar unter der Null-Referenz (Quarzmehl) lagen, Bild 8.

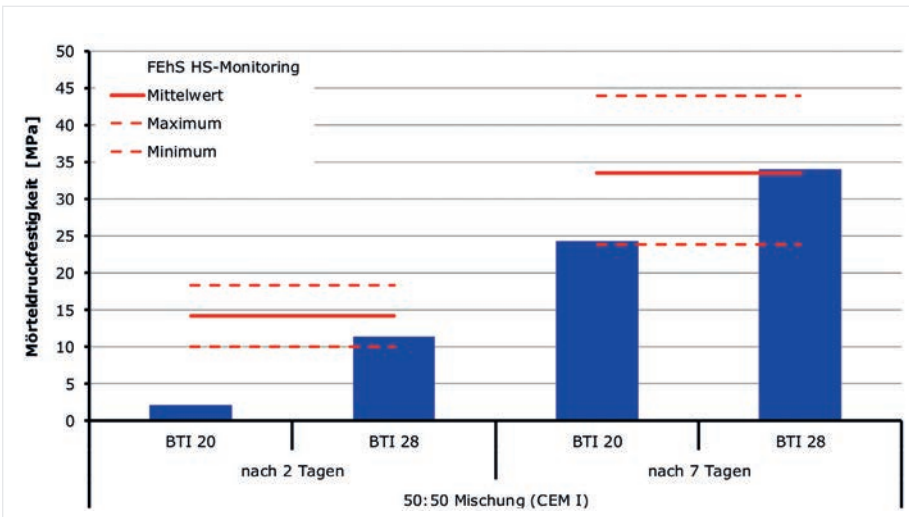


Bild 9: Mörteldruckfestigkeiten der behandelten und wassergranulierten EOS als 50:50 (CEM I)-Mischung mit FEhS-Hüttensandmonitoring als Vergleich

Somit erwies sich die Nutzung der teilreduzierten, langsam erstarrten EOS als Klinker-Zuschlagstoff als nicht zielführend. Trotz höherer Gehalte an teilreaktivem Larnit als Mineralphase lagen die Festigkeitswerte teils unter der Nullreferenz (Quarzmehl). Dies mag dadurch bedingt sein, dass der Festigkeitsbeitrag des CEM-I-Zements, welcher zu 50 % allen Proben zugemischt wurde, durch die EOS blockiert wird. Dieser Weg wurde deshalb nicht weiter verfolgt.

Bei der Wassergranulation der teilreduzierten Schlacke konnten größere Gehalte an Glas erzeugt werden. Diese konnten mikroskopisch jedoch nicht quantifiziert werden, da das noch enthaltene Eisen- und Manganoxid in der Schlacke die Körner dunkel färbt. Das polarisierte Licht lässt deshalb keine Detektion der Glasigkeit zu, so dass auf die Röntgenbeugung zurückgegriffen wurde. Der erzeugte „Glasbuckel“ als Untergrund der Mineralphasen stellt die amorphen Phasen dar.

Die Mörteldruckfestigkeiten der teilreduzierten EOS sind stark vom Reduktionsgrad sowie dem erzeugten Glasgehalt abhängig. In Bild 9 sind beispielhaft der bisher beste (BTI 28) sowie ein im mittleren Festigkeitsbereich angesiedelter Versuch (BTI 20) dargestellt. Der bisher beste Versuch lag im Vergleich zum FEhS-Hüttensandmonitoring im mittleren Bereich. Bei der Mahlbarkeitsprüfung nach Zeisel ordnet sich die Schlacke im oberen Bereich des Energiebedarfs für übliche Hüttensande aus dem Hochofen ein. Somit sind beim Einsatz des Materials keine durch die Mahlenergie bedingten deutlichen wirtschaftlichen Nachteile zu erwarten.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Rahmen des Projekts wurden eine Vielzahl von Versuchen und Untersuchungen durchgeführt, die Stärken und Schwächen des entwickelten Prozesses aufzeigen. Das Einbringen des Reduktionsmittels unter der Ofenbühne während des Abstichs erwies sich als zielführend, da kaum unreaktiertes Reduktionsmittel in der Schlacke nachgewiesen werden konnte. Jedoch muss das prozessbedingte Übersäumen verringert werden, da dies sowohl mit einem erhöhten Wartungsaufwand als auch mit einem

Verlust an Reduktionsmittel verbunden ist. Das Ziel des Vorhabens, eine Schlacke zu erzeugen, die den Umweltaspekten der zukünftig geltenden Ersatzbaustoffverordnung entspricht und somit als Stahlwerksschlacke der Klasse 1 (SWS-1) eingestuft werden kann, wurde in vielen Fällen erreicht. Zum einen kann durch die Erzeugung einer Schlacke, die sich durch geringe Schwermetallgehalte auszeichnet und auch nach zukünftig geltenden Regelwerken als umweltverträglicher Baustoff eingesetzt werden kann, dem Gedanken der Kreislaufwirtschaft entsprochen werden. Zum anderen wird durch die Reduktion der EOS ein metallischer Regulus aus der EOS zurückgewonnen, welcher geringe Gehalte des Stahlschädigers Phosphor enthält. Zwar ist ein interner Einsatz im Elektrostahlwerk nicht möglich, jedoch können die metallischen Reguli als Eisenträger in der Basismaterial- oder Roheisenproduktion eingesetzt werden und somit die Rohstoffeffizienz der Stahlproduktion erhöhen.

Die Umweltverträglichkeit gemäß Ersatzbaustoffverordnung konnte zum Status quo deutlich verbessert werden. Insbesondere die Molybdänkonzentration konnte reduziert werden, so dass die Schlacke meist die beste Zuordnungsklasse SWS-1 einhielt bzw. die Konzentrationen nur knapp über dem Grenzwert lagen. Somit wäre auch eine zukünftige Vermarktung der Schlacke sichergestellt. Nur durch die Erzeugung einer auch weiterhin vermarktbareren Elektroofenschlacke kann eine kostenintensive Deponierung der Schlacke vermieden werden.

Zur Aufbereitung wurde die vorhandene betriebliche Anlage der Firma Rauen genutzt, die eigentlich nicht für diese Art der Schlacke konzipiert ist. Dennoch

konnten gute bis sehr gute technische Eigenschaften erzeugt werden, die auch neue Geschäftsmodelle, wie die Nutzung der Schlacke im Asphalt, erlauben würden. Aufgrund des sehr dichten Materials wies die Schlacke eine hohe Härte auf, weshalb das Aufbereitungsequipment einer starken Beanspruchung ausgesetzt war. Dadurch konnte kein gleichmäßiges Kornband erzeugt werden, welches für einen wirtschaftlichen Betrieb unabdingbar ist. Eine neue Aufbereitungstechnik und zusätzliche Brechwerke könnten diese Nachteile beheben und ggf. auch andere Parameter positiv beeinflussen.

Die Nutzung des Materials in der Zementindustrie erwies sich auf Basis der durchgeführten Versuche als

nur bedingt möglich. Während die Nutzung der regulär abgekühlten Schlacke als Klinker-Zuschlagstoff einen tendenziell negativen Festigkeitsbeitrag brachte, zeigte das wassergranulierte Material gewisse latent hydraulische Eigenschaften, die im besten Fall in Bereichen eines mittelharten Hüttensands liegen. Eine Optimierung der chemischen Zusammensetzung, soweit dies mit dem Reduktionsprozess zu vereinbaren ist, könnte hier eine deutliche Steigerung bringen.

Die detaillierten Ergebnisse sind im öffentlichen Abschlussbericht des Forschungsvorhabens der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) mit dem Aktenzeichen 33756/01-21 dargestellt. Für die Förderung wird der DBU ausdrücklich gedankt. <<<

LITERATUR

- [1] Schüler, S.; Algermissen, D.; Markus, H.P., Mundersbach, D.; Drissen, P.: Metallurgische Maßnahmen zur Einstellung der Nachhaltigkeit von Elektroofenschlacke – Kreislaufwirtschaft stabil weiterentwickeln –, Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 3, TK Verlag (2016)
- [2] Merkel, Th.: Produktion und Nutzung von Eisenhüttenschlacken im Jahr 2016, Report des FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e.V., 25 (2018) Nr. 1, S.
- [3] Daten des Fachverbands Eisenhüttenschlacken e.V. (FES), 2018
- [4] Motz, H.; Mundersbach, D.: Zukunftstechnologien für Energie- und Bauwirtschaft, Schlacken aus der Metallurgie, Band 2, TK Verlag (2012)
- [5] Verordnung zur Regelung von Verfahrensanforderungen in den Bereichen umweltfreundliche und energieeffiziente Beschaffung, Berücksichtigung sozialer Kriterien und Frauenförderung sowie Förderung der Vereinbarkeit von Beruf und Familie bei der Anwendung des Tariftreue- und Vergabegesetzes NRW (RVO TVgG NRW) vom 14.05.2013
- [6] Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen Teil A, Fassung 2016 (BANZ AT 19.01.2016 B3)
- [7] DIN EN 12457-4: Charakterisierung von Abfällen – Auslaugung; Übereinstimmungsuntersuchung für die Auslaugung von körnigen Abfällen und Schlämmen, 2003
- [8] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TL Gestein-StB), Edition 2004/Version 2007
- [9] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Verordnung über Anforderungen an den Einbau von mineralischen Ersatzbaustoffen in technische Bauwerke. BR-Drucksache 566/17
- [10] DIN 19528:2009-01: Elution von Feststoffen – Perkulationsverfahren zur gemeinsamen Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen und organischen Stoffen
- [11] 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

NACHHALTIGE VERWENDUNG VON STAHLWERKSSCHLACKEN IN DER M T S E-BAUWEISE

D. Demond M. Sc., Dr.-Ing. R. Bialucha (FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e.V.)

Dipl.-Ing. E. Barka, Dr.-Ing. E. Birle (Technische Universität München, Zentrum Geotechnik)

EINLEITUNG

Die Errichtung von Erdbauwerken wie Rampen, Straßendämmen oder Lärmschutzwällen führt aufgrund des Bauvolumens zu teils erheblichem Baustoffverbrauch [1]. Ein Ausbau der Nutzung von industriellen Nebenprodukten für dieses Einsatzfeld würde daher zu entsprechend großen Einsparungen bei der Gewinnung natürlicher Böden und/oder Gesteinsrohstoffe führen und gleichzeitig eine Verringerung von knapper werdendem Deponieraum vermeiden. Diese Aspekte des Umweltschutzes stehen allerdings manchmal im Widerspruch zum Schutz von Boden, Grundwasser und Oberflächengewässern vor einer möglichen Belastung durch aus den eingesetzten Baustoffgemischen ausgelaugte Inhaltsstoffe.

Eine Möglichkeit des Schutzes der Umwelt vor der Auslaugung umweltrelevanter Inhaltsstoffe besteht in der Reduzierung der Durchsickerung der Baustoffgemische durch so genannte technische Sicherungsmaßnahmen. Hierzu sind die Baustoffgemische so zu modifizieren, dass sie selbst kaum durchsickert werden, oder sie sind mit entsprechenden Abdichtungen nach einem FGSV-Merkblatt (M T S E) [2] auszustatten.

Entsprechend sind die M T S E-Bauweisen dafür prädestiniert, dass Baustoffgemische mit nicht

konformen Materialeigenschaften einer sinnvollen Verwendung zugeführt werden können und nicht deponiert werden müssen.

PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG

Bei der Erzeugung von Eisen und Stahl werden als Nebenprodukte die industriellen Gesteine Hochofen- und Stahlwerksschlacke gewonnen. Im Schnitt werden in Deutschland jährlich ca. 7,5 Mio. t Hochofenschlacke und ca. 6 Mio. t Stahlwerksschlacke erzeugt [3] und durch Brechen und Klassieren zu Gesteinskörnungen oder Baustoffgemischen aufbereitet. Nach wie vor müssen jedoch jährlich etwa 16 % (s. Bild 1) dieser Stahlwerksschlacken aufgrund ihrer technischen und/oder umwelt-

technischen Materialeigenschaften deponiert werden. Insgesamt besteht daher für Stahlwerksschlacken durchaus das Potenzial, deren Nutzungsrate zu optimieren und den Anteil der zu deponierenden Schlacken weiter zu reduzieren.

Im Zusammenhang mit der Ersatzbaustoffverordnung [4] und dem im Ressourceneffizienzprogramm der Bundesregierung [5] formulierten Ansatz einer bevorzugten Verwendung von Sekundärbaustoffen sollte durch eine umfangreiche Laborstudie der theoretische Nachweis erbracht werden, dass Eisenhütten-schlacken durch die Maßnahme einer granulometrischen Modifikation in Form einer Feinkornzugabe den Anforderungen des M T S E [2] entsprechen können. Durch eine der-

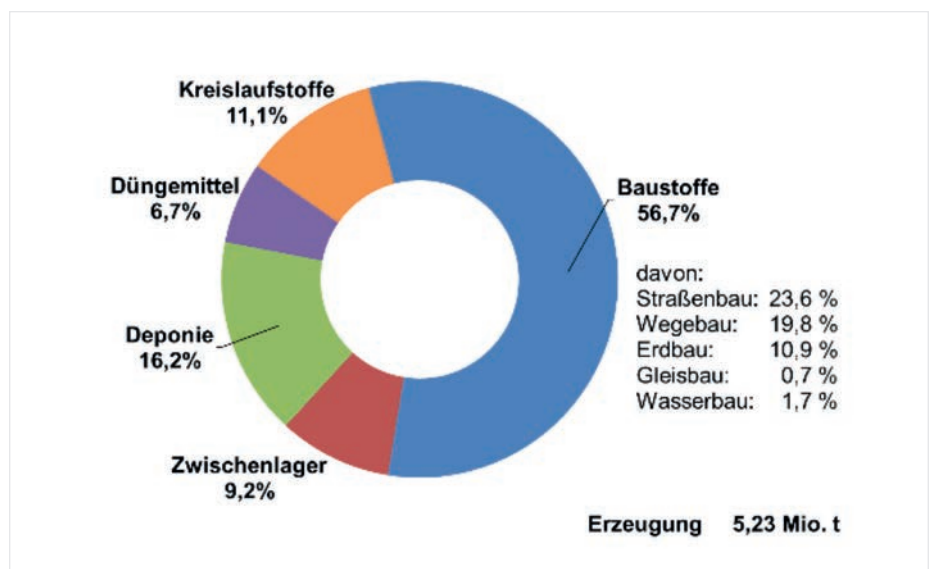


Bild 1: Verwendung von Stahlwerksschlacke im Jahr 2016 [3]

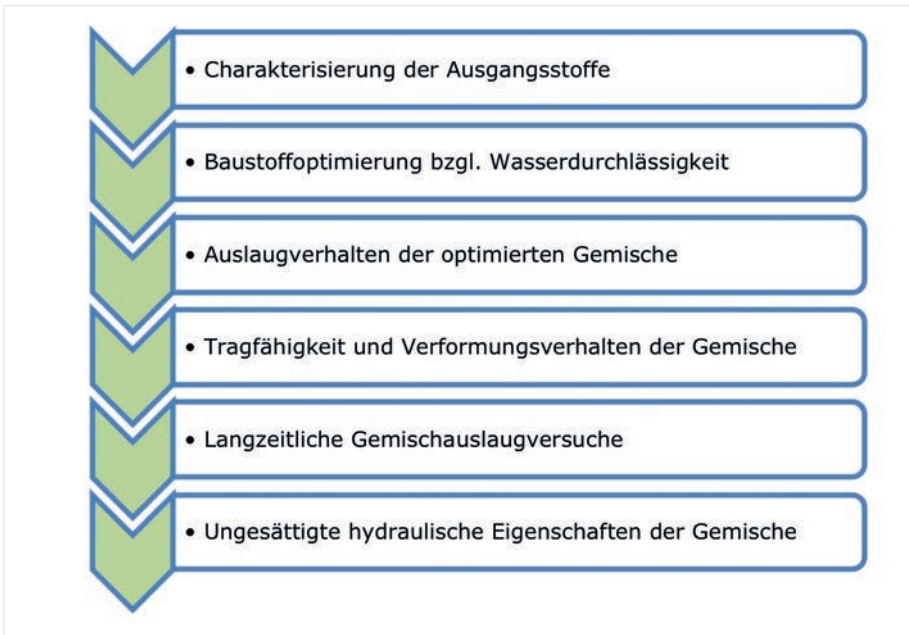


Bild 2: Projektverlaufsschema und Untersuchungsprogramm

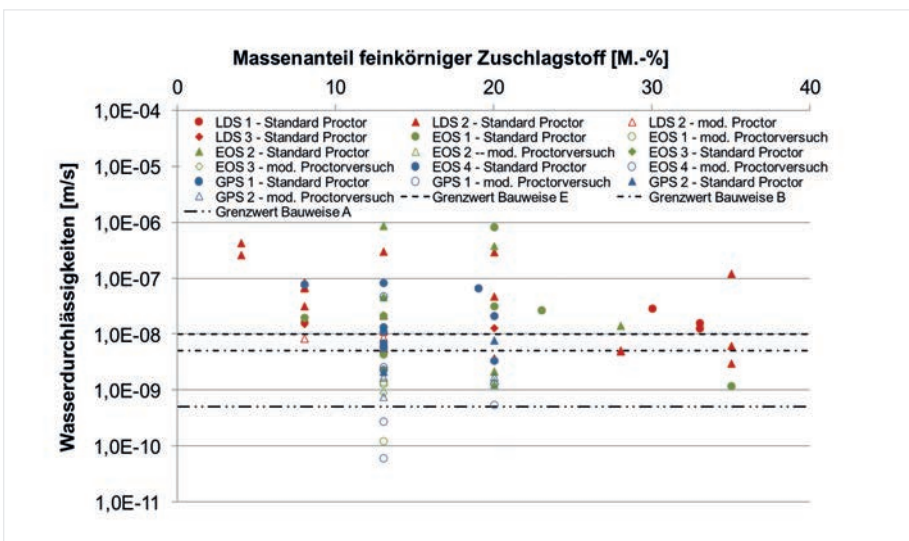


Bild 3: Ergebnisse der Durchlässigkeitsversuche in Abhängigkeit vom Feinkornmassenanteil und eingesetzter Verdichtungsenergie

artige Baustoffmodifikation könnte zukünftig ein potenziell neuer Einsatzbereich für Eisenhüttenschlacken im Erdbau erschlossen werden. Auf diesem Wege sollen die Ergebnisse helfen, als Beitrag zum Ressourceneffizienzprogramm der Bundesregierung [5] den verstärkten Einsatz von industriellen Nebenprodukten und Sekundärrohstoffen zu verbessern und somit auch am Ressourcenschutz mitzuwirken.

BAUSTOFFGEMISCHE UND UNTERSUCHUNGSPROGRAMM

In die Laborstudie, deren Aufbau aus Bild 2 hervorgeht, wurden zu Beginn neun grobkörnige Stahlwerksschlacken (3 LDS-Schlacken (LDS), 3 Elektroofenschlacken (EOS), 3 Gießpfannenschlacken (GPS) und vier feinkörnige Zuschlagstoffe (leicht plastischer Ton, Ca-Bentonit, Na-Bentonit, Kaolinit (K) eingebunden. Fachlicher Hintergrund

für die Verwendung der feinkörnigen Zuschlagstoffe war die Arbeit von Heyer, Bienen und Maurer [6], in der aufgezeigt wurde, dass grobkörnige Ausgangsmaterialien durch Zugabe von Füller- und Feinkorn ($< 0,063$ mm) in ihrer Durchlässigkeit stark reduzierbar sind. Weiterhin wurden mit Calcium-Bentonit und natriumaktiviertem Calcium-Bentonit zwei Zuschlagstoffe berücksichtigt, die vor allem aufgrund ihrer Quellfähigkeit eine Reduktion der Baustoffwasserdurchlässigkeit bewirken sollten.

FORSCHUNGSERGEBNISSE

Die **Charakterisierung der Ausgangsstoffe** erfolgte entsprechend den für den Erdbau gültigen technischen Regelwerken. Die Gesteinskörnungen, die unterschiedliche Sieblinien mit variierendem Größtkorn von 8–32 mm aufwiesen, wie auch die Zuschlagstoffe zeigten materialtypische Kennwerte. Auf Seiten der umwelttechnischen Auslaugversuche [7] wurden größtenteils die gemäß TL Gestein-StB [8] bzw. TL BuB E-StB [9] festgelegten Grenzwerte eingehalten.

Im Rahmen der **Baustoffoptimierung** wurde primär untersucht, welchen Einfluss die unterschiedlichen feinkörnigen Zuschlagstoffe in Abhängigkeit von deren zugefügtem(-n) Massenanteil(-en) auf die Wasserdurchlässigkeit [10] der Baustoffgemische haben. Basierend auf der zur Zeit der Konzeption des Forschungsvorhabens gültigen Ausgabe des M TS E [11] waren bzgl. der Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte je nach Bauweise Grenzwerte von $k \leq 1 \cdot 10^{-7}$ m/s bis $k \leq 5 \cdot 10^{-10}$ m/s vorgegeben. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigt Bild 3.

Den Wasserdurchlässigkeitsgrenzwert von $k \leq 1 \cdot 10^{-7}$ m/s erzielten nahezu alle Mischungen aus SWS und Zuschlagstoff(-en) bei einer Verdichtung mit Standard-Proctorenergie, wobei hierfür teilweise bereits eine Feinkornzugabe von 8 M.-% ausreichte. Die Anforderung $k \leq 1 \cdot 10^{-8}$ m/s wurde bei den untersuchten Mischungen aus LDS 1, EOS 1, GPS 3, EOS 4, GPS 1 und GPS 2 bereits ab 13 M.-% Feinkornzugabe und bei denen aus LDS 2 und EOS 2 ab 20 M.-% Feinkornzugabe erfüllt. Kein Prüfkörper erzielte jedoch bei einer Verdichtung mit Standard-Proctorenergie einen Durchlässigkeitsbeiwert von $k \leq 1 \cdot 10^{-9}$ m/s.

Ursächlich hierfür wurde neben dem bekannten Einflussfaktor des Einbauwassergehaltes auf die Wasserdurchlässigkeit als weiterer Faktor der Luftporenanteil der mit Standard-Proctorenergie verdichteten Probenkörper identifiziert, der im Mittel bei allen untersuchten Baustoffgemischen oberhalb von 6 % lag. Eine wirksame Vorgehensweise, um den Luftporenanteil zu reduzieren, wurde in der modifizierten Proctorenergie zur Probenherstellung gefunden. Derart hergestellte Proben erzielten Durchlässigkeitsbeiwerte unterhalb von $1 \cdot 10^{-9}$ m/s (s. Bild 3). Ein k -Wert kleiner $1 \cdot 10^{-10}$ m/s konnte jedoch auch unter Anwendung der modifizierten Proctorenergie nur für eine einzige untersuchte Probenmischung erzielt werden.

Obwohl natriumaktivierter Ca-Bentonit eine hohe Quell- und somit Abdichtungsfähigkeit aufweisen sollte, wurde bei Verwendung dieses Zuschlagstoffes keine signifikante Reduzierung der Durchlässigkeit im Vergleich zu Mischungen mit Kaolinit oder mit Calcium-Bentonit festgestellt. Hierzu wurde dem Lösungsansatz nachgegangen, dass es innerhalb der Porenlösung zu einem Ionenaustausch (Umwandlung von Na-Bentonit zu Ca-Bentonit) kommt, der der erhöhten Quell- und Abdichtungsfähigkeit des Na-Bentonits gegenüber einem Ca-Bentonit entgegenwirkt. Weiterhin sollte die Quellfähigkeit mit zunehmender Elektrolytkonzentration in der Porenlösung im Vergleich zu einer Porenlösung aus destilliertem Wasser stark abnehmen. Beide Faktoren würden sich folglich auf das Quellverhalten von Na-Bentonit und somit auf die Probenwasserdurchlässigkeit auswirken. Ein Nachweisansatz wurde über Plastizitätsversuche geführt, die mit Versuchen zur Ausroll- und Fließgrenze unter Verwendung von Eluaten aus 10:1-Schüttelversuchen [7] durchgeführt wurden. Wie vermutet, war

hierbei eine für die Kombination aus natriumaktiviertem Bentonit und Eluaten, die durch Verwendung von freikalkhaltigen LD-Schlacken gewonnen wurden, wenn auch nur mäßige, Reduzierung der Fließgrenze feststellbar, wobei sich der Effekt bei Verwendung von „reinen“ 1:1-Eluaten voraussichtlich noch verstärken würde, da dann Konzentrationen entsprechend der Porenlösung vorliegen würden.

Bezüglich der umwelttechnischen Eignung wurde das Auslaugverhalten der optimierten Gemische mit einem L/S-Verhältnis von 2:1 [12] untersucht. Grundsätzlich konnten viele Gemischkombinationen auch aufgrund der Auslaugergebnisse für die M TS E-Bauweisen als geeignet eingestuft werden. Hier sind vor allem die Gemische aus feinkörnigen Zuschlagstoffen mit LDS bzw. mit GPS zu nennen. Auf Basis dieser Ergebnisse zu den Durchlässigkeitseigenschaften und zum Auslaugverhalten der Ausgangsmaterialien und Gemische wurden folgende vier aussichtsreiche Gemischkombinationen ausgewählt:

- LDS_2K_8 (Verdichtung mit Standard-Proctorenergie)
- $\text{LDS}_2\text{K}_{20}$ (Verdichtung mit Standard-Proctorenergie)
- $\text{GPS}_1\text{K}_{13}$ (Verdichtung mit modifizierter Proctorenergie)
- $\text{GPS}_1\text{K}_{20}$ (Verdichtung mit modifizierter Proctorenergie)

Um die Eignung dieser Gemischkombinationen für die M TS E-Bauweise zu belegen, wurden sie über weitere Materialversuche vertieft charakterisiert.

Die **Tragfähigkeit und das Verformungsverhalten der Gemische** wurden über CBR-Versuche [13], eindimensionale Kompressionsversuche [14] und Scherfestigkeitsversuche [15] beurteilt.

Die CBR-Versuche an den vier Gemischen zeigten vergleichbare Werte (s. Bild 4) zu natürlichen Böden ähnlicher Granulometrie [16]. Mit steigendem Feinkornanteil wurde eine zunehmende Abhängigkeit der CBR-Tragfähigkeiten vom Wassergehalt erkennbar, und eine höhere Verdichtungsenergie führte zu höheren CBR-Werten ($\text{GPS}_1\text{K}_{13}$). Die untersuchten Mischungen zeigten bei Wassergehalten unterhalb des Proctroptimums CBR-Werte $> 40 \%$ und konnten somit gemäß Keil [17] hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit als gutes Erdbaumaterial beurteilt werden.

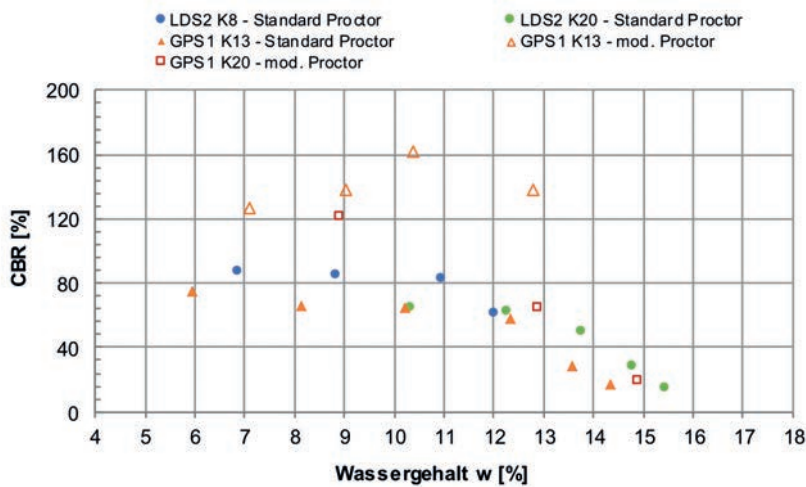


Bild 4: Tragfähigkeiten (CBR-Werte) der untersuchten Mischungen

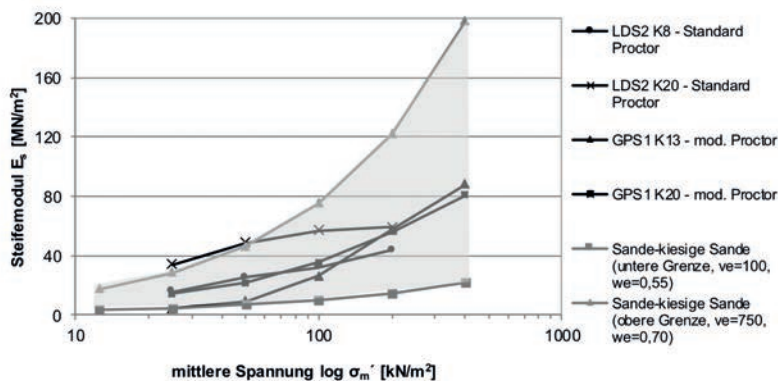


Bild 5: Vergleich der Probesteifemoduln im Vergleich zu Steifemoduln natürlicher Böden nach Ohde [18]

Probe	Scherparameter	
	φ' [°]	c' [kN/m ²]
LDS ₂ K ₈	46,7 ¹⁾	36,4 ¹⁾
LDS ₂ K ₂₀	44,4 ¹⁾	49,0 ¹⁾
GPS ₁ K ₁₃	42,7 ²⁾	81,7 ²⁾
GPS ₁ K ₂₀	45,1 ²⁾	110,4 ²⁾
¹⁾ = Einbaubedingung: Standard Proctorenergie, Proctoroptimum		
²⁾ = Einbaubedingung: Modifizierte Proctorenergie, Proctoroptimum		

Tabelle 1: Ergebnisse der Triaxialversuche CU

Um das Kompressionsverhalten der Mischungen mit dem von natürlichen Böden zu vergleichen, wurden die Steifemoduln der Proben mit Steifemoduln von natürlichen Sanden und kiesigen Sanden, die gemäß der empirischen Beziehung nach Ohde [18] berechnet wurden (mit v_e und w_e als dichteabhängige Parameter), verglichen (s. Bild 5). Der Vergleich zeigte, dass die Steifemoduln (die Verformbarkeit) der vier untersuchten Mischungen denen von natürlichen Böden (Sande und kiesige Sande) entsprechen.

Über triaxiale Scherversuche wurden die Scherparameter Kohäsion und Reibungswinkel (s. Tabelle 1) der Mischungen bestimmt. Die Ergebnisse der durchgeführten Triaxialversuche zeigten, dass die untersuchten Proben mit einer Kohäsion zwischen ca. 36 und 110 kN/m² und Reibungswinkel zwischen ca. 43° und 47° hohe Scherfestigkeitswerte aufweisen, die auf deren hohe Trockendichte, die Kornform der Stahlwerkschlacken (kantig und rau) und den Feinkornanteil der Gemische zurückgeführt werden können.

Die Ergebnisse der bodenmechanischen Untersuchungen verdeutlichen, dass die untersuchten Mischungen einen ausgezeichneten Dammbaustoff darstellen und für den Einsatz in Erdbauwerken (z. B. als Dammkernmaterial eines Straßendamms) aus bodenmechanischer Sicht uneingeschränkt eingesetzt werden können.

Langzeitliche Gemischauslaugversuche waren aufgrund der Fragestellung relevant, ob die ausgewählten Baustoffgemische auch nach längeren Zeiträumen

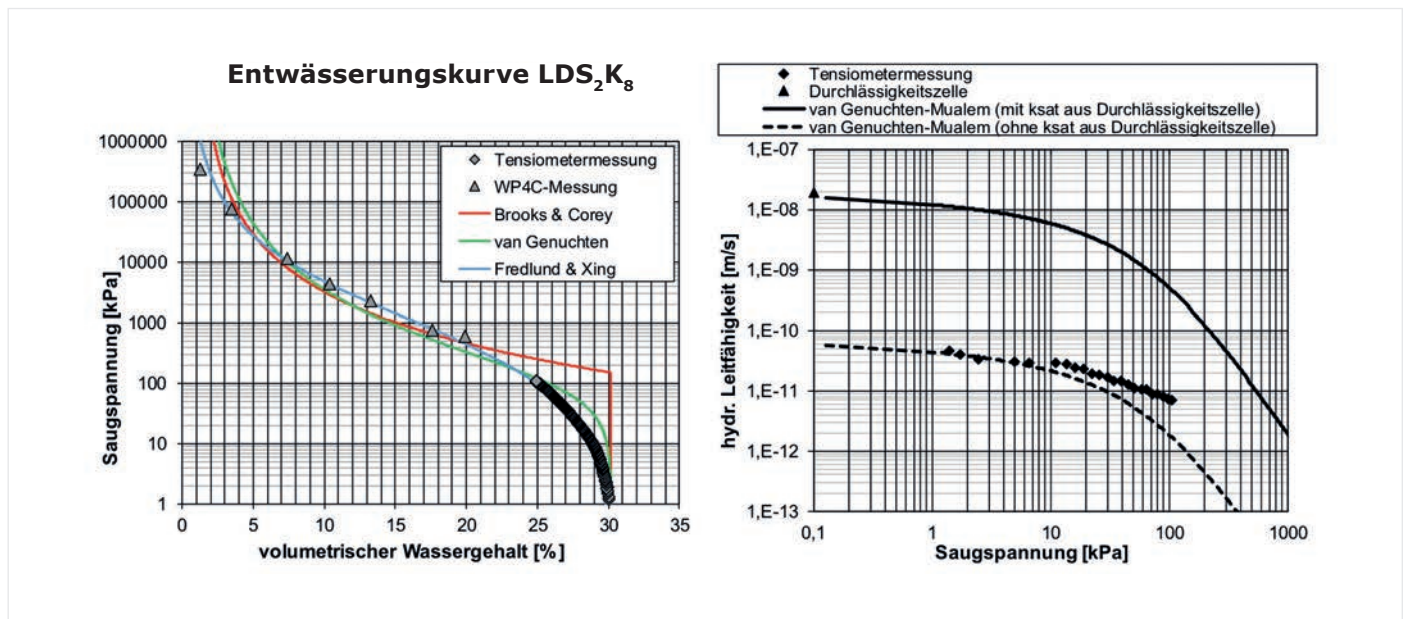


Bild 6: Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung (links) und ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit-Saugspannungs-Beziehung (rechts) für das Gemisch LDS₂K₈

keine Auffälligkeiten bzgl. chemischer Umweltparameter zeigen. Hierfür wurden Proctorkörper hergestellt und nach 0 und 28 Tagen sowie 6 und 8 Monaten mittels Trogverfahren [19] ausgelaugt. Keiner der untersuchten Probenkörper laugte Eluatkonzentrationen aus, die oberhalb der Grenzwertvorgaben nach EBV [4], TL Gestein-StB [8] oder TL BuB E-StB [9] lagen. Vielmehr konnte festgehalten werden, dass die gemessenen Konzentrationen sogar in die jeweils beste Klasse mit den niedrigsten Grenzwerten einzuordnen und somit als unbedenklich einzustufen sind. Die langzeitlichen Untersuchungen an den granulometrisch modifizierten Gemischen zeigten deutlich, dass auch aus umwelttechnischer Sicht von einer eindeutigen Materialeignung ausgegangen werden kann.

Zur Ermittlung der **ungesättigten hydraulischen Eigenschaften der Gemische** wurden abschließend die Zusammenhänge zwischen Saugspannung und Wassergehalt sowie ungesättigter hydraulischer Leitfähigkeit und Saugspannung experimentell bestimmt. Die Ermittlung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung wurde anhand eines Verdunstungsexperimentes [20, 21, 22] mit Tensiometern zur Messung der Matrixpotenziale im hohen bis mittleren Feuchtebereich und mit Hilfe eines Feuchtigkeitsmessgerätes nach der Taupunktmethode (WP4C) [23] zur Messung der totalen Saugspannung

im trockenen Bereich realisiert. Die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit wurde aus den Verdunstungsexperimenten mit Hilfe der instationären Augenblicksprofilmethode festgelegt. Die experimentell bestimmten Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen wurden mit empirischen und physikalisch basierten Modellen (Brooks und Corey, van Genuchten sowie Fredlund und Xing) mathematisch abgebildet. Die Versuchsergebnisse zu den Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen konnten mit allen drei Modellen im hohen Saugspannungsbereich sehr gut angenähert werden. Im niedrigen Saugspannungsbereich zeigten die Kurven nach Fredlund und Xing die beste Approximation an die Versuchsdaten. Zur Beschreibung der versuchstechnisch ermittelten Beziehung zwischen ungesättigter hydraulischer Leitfähigkeit und Wassergehalt bzw. Saugspannung wurde das Modell nach van Genuchten-Mualem herangezogen. Die Ergebnisse zeigten, dass die Durchlässigkeit bereits bei geringen Saugspannungen (< 10 kPa) bei allen drei untersuchten Mischungen signifikant geringer ist als im gesättigten Zustand (siehe beispielsweise LDS₂K₈ in Bild 6). Mit zunehmenden Saugspannungen nimmt die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit weiter ab, wobei sich die in den Versuchen ermittelte hydraulische Leitfähigkeit im ungesättigten Zustand jeweils unterhalb der mit dem Modell nach van Genuchten-Mualem abgeschätzten Kurve befindet. Mit den vorliegenden Ergebnissen

zu den ungesättigten hydraulischen Eigenschaften der Gemische konnten die grundlegenden Eingangsparameter für zukünftige Simulationsberechnungen zur Abbildung der Wasserbewegung in Erdbauwerken, die aus diesen Baustoffen errichtet werden, gewonnen werden.

ZUSAMMENFASSUNG

Die M TS E-Bauweisen sind dafür prädestiniert, dass Baustoffgemische, die aufgrund ihrer Materialeigenschaften, wie z. B. umweltrelevanter Inhaltsstoffe, möglicherweise deponiert werden müssten, einer sinnvollen Verwendung zugeführt werden können. Um den Anforderungen an einen umweltgerechten Einsatz nachzukommen, muss die Wasserdurchlässigkeit der verwendeten Baustoffgemische so gering sein, dass diese Inhaltsstoffe quasi im Baukörper eingekapselt vorliegen und das Grundwasser nicht beeinflussen können.

In dem durch das FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e.V. und die Technische Universität München (TUM), Zentrum Geotechnik bearbeiteten IGF-Forschungsvorhaben 18746 N konnte gezeigt werden, dass Eisenhüttenschlacken, die durch Feinkornzugabe einer granulometrischen Modifikation unterzogen wurden, den Anforderungen des Merkblattes über Bauweisen für Technische Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau (kurz: M TS E) entsprechen.

An vier ausgewählten Gemischen konnte dargelegt werden, dass diese granulometrisch modifizierten Baustoffgemische sowohl aus

technischer als auch aus umwelttechnischer Sicht die Anforderungen des M TS E einhalten. Im Detail konnten durch die granulometrische Modifikation Wasserdurchlässigkeiten der Baustoffe erzielt werden, die nach aktueller Ausgabe des M TS E [2] aus dem Jahre 2017 den Anforderungen der Bauweise E entsprechen. Zudem zeigten diese Gemische in langzeitlichen Auslaugversuchen Eluatkonzentrationen, die den niedrigsten derzeit geltenden Grenzwertanforderungen gerecht wurden. Ebenso zeigten ergänzende Versuche zu den mechanischen Eigenschaften dieser Gemische deren prinzipielle technische Eignung.

AUSBLICK

Im Rahmen des IGF-Forschungsvorhabens 18746 N wurde im Labormaßstab nachgewiesen, dass Gemische aus Eisenhüttenschlacken und Kaolinit als feinkörnigem Zuschlagstoff in M TS E-Bauweisen verwendet werden können. Diese Ergebnisse sollten in weiteren Versuchen im halbbtechnischen Maßstab und ggf. im Praxismaßstab verifiziert werden. Im Verlauf des Projekts wurden Fragen aufgeworfen, die es weiter zu untersuchen gilt. Dies betrifft zum Beispiel den formulierten Aspekt zur gegenseitigen Interaktion zwischen einigen Ausgangsstoffen und dessen Folge auf das Abdichtungsverhalten der feinkörnigen Zuschlagstoffe. Weiterhin ist eine Antwort auf die durchaus relevante Frage zu finden, welche Wassermengen durch Baukörper mit einer Durchlässigkeit von 10^{-8} m/s bis 10^{-10} m/s wirklich sickern. Durch weiterführende Versuche könnten die Erkenntnisse des hier vorgestellten Forschungsvor-

habens verifiziert und weiter ausgebaut werden. Daneben könnte durch weiterführende Untersuchungen evtl. auch die Eignung weiterer Baustoffe aus Stahlwerksschlacke für die M TS E-Bauweisen im Allgemeinen aufgezeigt werden.

Bei entsprechender Umsetzung der hier dargelegten Kenntnisse könnte im größeren Umfang der Gedanke der Ressourcen- und Umweltschonung praktisch und faktisch umgesetzt werden, da hierdurch eine unnötige Deponierung von Ersatzbaustoffen

und der Abbau von Primärstoffen vermieden bzw. reduziert werden können.

DANKSAGUNG

Das hier vorgestellte IGF-Vorhaben 18746 N der Forschungsvereinigung VDEh-Gesellschaft zur Förderung der Eisenforschung mbH, Sohnstraße 65, 40237 Düsseldorf, wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V. (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschafts-

forschung und -entwicklung (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

LITERATUR

- [1] Heyer, D.; Baumgärtel, T.: Nachhaltige Materialverwendung im Erdbau. Straße und Autobahn 2011, Heft 6, S. 369–376
- [2] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Merkblatt über Bauweisen für Technische Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau – M TS E, Ausgabe 2017
- [3] Merkel, Th.: Erzeugung und Nutzung von Eisenhüttenschlacken 2016, Report des FEhS-Instituts 24 Nr. 1, 2016, S. 15
- [4] Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung. Bundesrats-Drucksache 566/17 vom 17.07.2017
- [5] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes) – Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen, Berlin, 2012
- [6] Heyer, D.; Bienen, B.; Maurer, I.: BayFORREST-Forschungsvorhaben F157 „Optimierung der Zusammensetzung gemischtkörniger Abdichtungsmaterialien“. Zentrum Geotechnik Technische Universität München, 2003
- [7] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau – TP Gestein-StB, Teil 7.1.1: Schüttelverfahren (L/S = 10:1), Ausgabe 2016
- [8] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau – TL Gestein-StB, Ausgabe 2004/Fassung 2007
- [9] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Technische Lieferbedingungen für Böden und Baustoffe im Erdbau des Straßenbaus – TL BuB E-StB, Ausgabe 2009
- [10] DIN 18130-1:1998-05: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts – Teil 1: Laborversuche
- [11] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Merkblatt über Bauweisen für Technische Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau – M TS E, Ausgabe 2009
- [12] 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
- [13] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau – TP BFStB, Teil B 7.1: Prüfverfahren zur Bestimmung des CBR-Wertes (California Bearing Ratio), Ausgabe 2012
- [14] DIN 18135:2012-04: Baugrund – Untersuchung von Bodenproben – Eindimensionaler Kompressionsversuch
- [15] DIN 18137-2:2011-04: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Scherfestigkeit – Teil 2: Triaxialversuch
- [16] Müller, H.: Das CBR-Verfahren, ein moderner Testversuch zur Bestimmung der Deckenstärke in Anhängigkeit vom Straßenuntergrund. Straßen- u. Tiefbau, Heft 3, S. 89–94, 1950
- [17] Keil, K.: Der Dammbau – zweite Auflage: Grundlagen und Geotechnik der Stau- und Verkehrsdämme. Springer Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1954
- [18] Boley, C.: Handbuch Geotechnik, Grundlagen – Anwendungen – Praxiserfahrungen. Conrad Boley (Hrsg.), Vieweg und Teubner, 2012
- [19] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau – TP Gestein-StB, Teil 7.1.2: Trogverfahren, Ausgabe 2008
- [20] Becher, H.: Ein Verfahren zur Messung der ungesättigten Wasserleitfähigkeit. Aus dem Institut für Bodenkunde der Technischen Universität Hannover. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Band 128, Heft 1, 1971
- [21] Schindler, U.: Ein Schnellverfahren zur Messung der Wasserleitfähigkeit im teilgesättigten Boden an Stechzylinderproben. Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde, S. 1–7, Berlin, 1980
- [22] Peters, A.; Durner, W.: Simplified evaporation method for determining soil hydraulic properties. Journal of Hydrology, 356, S. 147–162, 2008
- [23] Meter Group, Inc.: WP4C – Dew Point PotentialMeter, Operator's Manual, 2017

ERTRAG UND PFLANZENSOZIOLOGISCHE ENTWICKLUNG VON DAUERGRÜNLAND IM MITTLEREN SCHWARZWALD UNTER DEM EINFLUSS LANGJÄHRIGER MINERALISCHER DÜNGUNG MIT EISENHÜTTENSCHLACKEN

Dr. agr. M. Rex

EINLEITUNG

Die Nutzung und Bewirtschaftung von Grünlandflächen in den Hochlagen des Mittleren Schwarzwaldes gestaltete sich eingangs der 1950er 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 [1], dass insbesondere die Phosphatgehalte niedrig lagen. Untersuchungen [2] 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 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 Anlage. Wurde die seinerzeit zugrunde liegende Fragestellung auch rasch eindeutig zugunsten der mineralischen Düngung beantwortet [3, 4], so lassen sich heute dank der Fort-

führung des Versuchs Einflüsse langjähriger Düngungspraktiken mittlerer Intensität unter Verwendung eines Düngemittels aus Stahlwerksschlacke auch unter ökologischen Aspekten betrachten [5]. Dabei spielen die Auswirkungen auf die Bodenfruchtbarkeit und das Verhalten von Elementen im Bodenprofil eine wichtige Rolle.

MATERIAL UND METHODEN

Standort

Der Versuchsstandort liegt auf einer Wiese in 750 m über NN am oberen Ende des Glottertals bei St. Peter. Der vorherrschende Bodentyp ist eine saure Braunerde aus Buntsandsteinverwitterung über granitisiertem Ortho- und Paragneis. Der mittlere Jahresniederschlag liegt bei 1.400 mm, die Jahresdurchschnittstemperatur bei 7 °C. Die Nutzung vor Versuchsbeginn erfolgte als zweischrittige Wiese mit Nährstoffzufuhr über Jauche.

Versuchsdurchführung

Der Versuch in St. Peter 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 angelegt.



Bild 1: Standort des langjährigen Düngungsversuchs auf Dauergrünland in St. Peter im Schwarzwald

Bei überwiegend zweischnittiger Nutzung wurde jährlich gedüngt und beerntet. Im Zeitraum von 1974 bis 1982 und in den Jahren 2006/2007 konnte keine Ertragsfeststellung durchgeführt werden.

Beide Phosphatformen sind im ökologischen Landbau zugelassen. Weicherdiges Rohphosphat wird überwiegend aus Abbau mariner Sedimente durch mechanische Bearbeitung hergestellt. Der Phosphor liegt als Calciumapatit vor. Seine Löslichkeit ist eingeschränkt und erreicht vor allem in sauren Böden eine befriedigende Wirkung. Thomasphosphat entstand bei der Verhüttung phosphorhaltiger Eisenerze bei der Stahlherstellung aus Roheisen nach dem Thomasverfahren. Die dabei anfallende Schlacke wurde durch Vermahlung zu Thomasphosphat. Der Phosphor lag darin überwiegend als Calcium-Silikophosphat vor. Thomasphosphat war in der Mitte des 20. Jahrhundert das meistverwendete Phosphor-Düngemittel in Deutschland. Mit der zunehmenden

Verhüttung phosphorarmer Eisenerze und dem Ersatz des Thomasverfahrens in den Stahlwerken durch das Linz-Donawitz-Verfahren nahm die Produktion von Thomasphosphat in Deutschland und Europa seit den 1970er Jahren allmählich ab, so dass der Verbrauch in der Landwirtschaft in Deutschland mit Ende der 1990er Jahre zum Erliegen kam.

Der Versuch wurde dennoch weitergeführt, da er Aussagen zur Auswirkung der Verwendung von Konverterkalk, der in seiner mineralogischen Zusammensetzung mit Ausnahme des Phosphatgehalts dem Thomasphosphat sehr ähnlich ist, ermöglicht.

Beide im Versuch eingesetzten Phosphatdüngemittel enthalten basisch wirksame Bestandteile, die als CaO-Äquivalent im Rohphosphat mit ca. 20 % geringer ausfallen als im Thomasphosphat mit ca. 45 %. Infolge der unterschiedlichen Kalkzufuhr über die beiden verschiedenen Phosphatformen hatten sich in den Versuchsgliedern unterschiedliche

pH-Werte im Boden eingestellt, die von 1985 an durch unterschiedliche Kalkung nach Ergebnissen der Kalkbedarfsbestimmung in jeweils zwei der vier Wiederholungen aller Varianten auf ein einheitliches Niveau von etwa pH 6,0 gebracht werden sollten. Eine Übersicht über die Düngungshöhe zeigt Bild 2.

In dem Schauversuch, ebenfalls 1954, jedoch ohne Wiederholungen angelegt, wurden die Nährstoffe N, P und K in den Kombinationen „nur Kali“, „Stickstoff und Kali“, „Phosphat und Kali“ sowie „Stickstoff, Phosphat und Kali“ in jeweils gleicher Höhe wie im Exaktversuch verabreicht (Bild 2). Phosphat wurde als Thomasphosphat gedüngt. Damit erhielten die so gedüngten Parzellen auch eine Kalkzufuhr. Eine Ertragsermittlung fand in diesem Versuchsteil erst seit 1984 statt.

Aus den Versuchsjahren vor 1976 lagen keine Bodenuntersuchungsergebnisse mehr vor oder es wurden keine Untersuchungen vorgenommen. Seit 1983 wurden jährlich nach dem letzten Schnitt Bodenproben aus der Bodenschicht 0–10 cm gezogen und untersucht.

ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Erträge

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

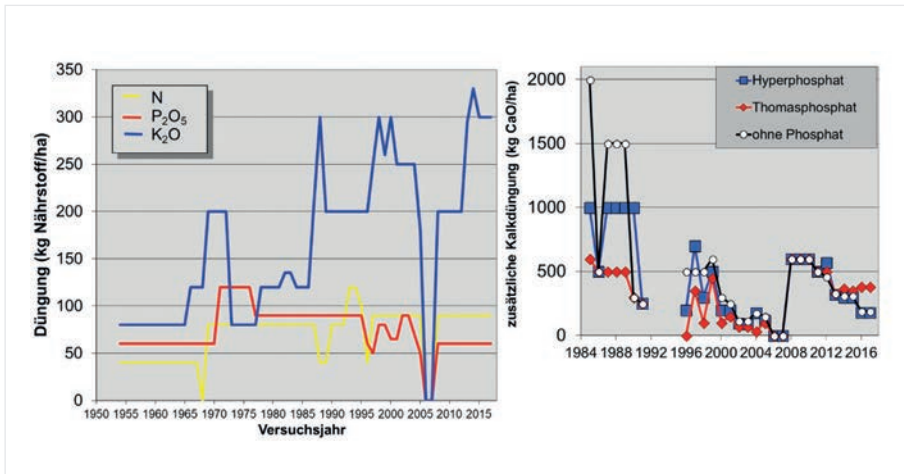


Bild 2: Dünge (kg/ha) im P-Versuch zur Wirkungsprüfung der P-Formen Thomasphosphat und weicherdiges Rohphosphat

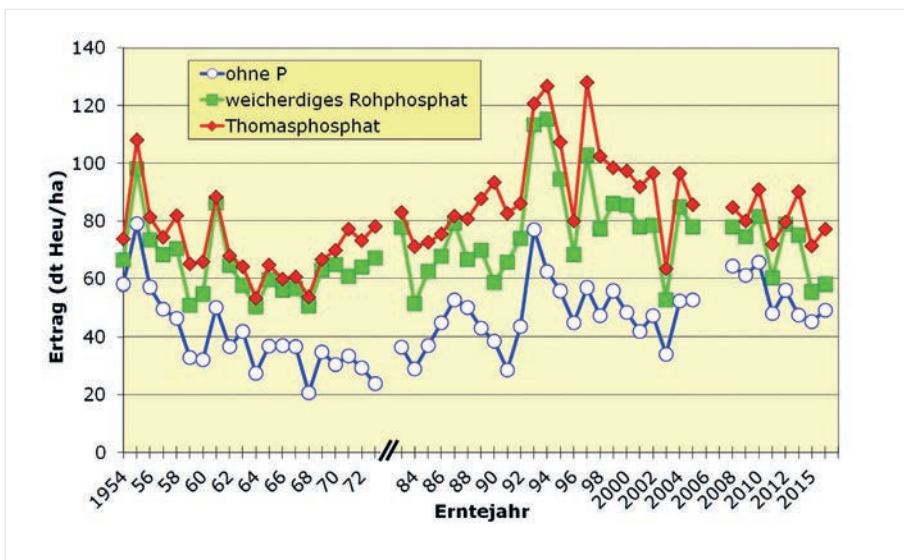


Bild 3: Grünlanderträge im P-Versuch in Abhängigkeit von der Phosphatdünge

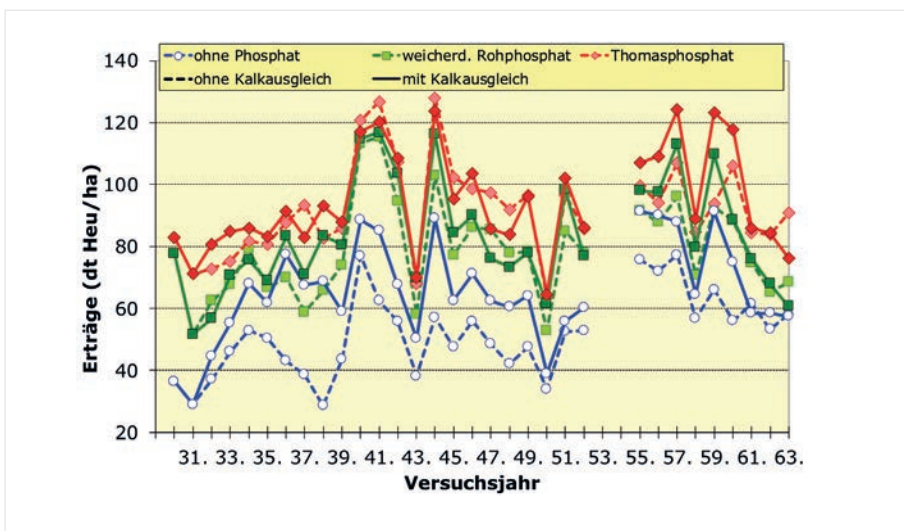


Bild 4: Erträge im Wiesenaufwuchs des Phosphat-Versuchs in Abhängigkeit von der Phosphat- und Kalkdünge

Mit dem seit 1985 erfolgten Kalkausgleich war vor allem auf der Variante „ohne Phosphat“ ein starker Mehrertrag verbunden (Bild 4). Demgegenüber konnte bei dem weicherdigen Rohphosphat nur eine geringe Ertragszunahme festgestellt werden, während bei Thomasphosphat im Durchschnitt der betrachteten Versuchsjahre keine Ertragsveränderung durch die Kalkdünge gegeben war.

Mit zunehmender Versuchsdauer glichen sich die zusätzlich gekalkten Thomas- und Rohphosphatparzellen im Ertrag an. Dies ging einher mit einer offensichtlich witterungsbedingten allgemeinen Erhöhung der Phosphatgehalte im Aufwuchs (Bild 5), die sich in den beiden P-gedüngten Varianten dem optimalen Bereich näherten. Zudem lag die Phosphatdünge in den Jahren 1985 bis 1992 mehr als 30 kg P₂O₅ pro ha höher als der Phosphatentzug, so dass ein Aufbau mit Phosphatreserven im Boden auf ein ausreichendes Niveau – selbst bei geringerer Umsetzung des Rohphosphates – zur Deckung des Phosphatbedarfs ausreichte. Darauf weist auch die Entwicklung der Phosphatgehalte im Aufwuchs hin.

Auch im Dünge-Schauversuch blieb erwartungsgemäß der Ertrag der Variante „ohne Dünge“ gegenüber den gedüngten Varianten zurück (Bild 6). Wie im P-Formenversuch zeigte auch hier die P-Dünge in den Varianten PK und NPK eine besondere Ertragswirksamkeit. Da die Phosphatdünge mit Thomasphosphat erfolgte, kam der damit ausgebrachte Kalk ebenfalls zum Tragen. Der Ertrag der PK-Variante überstieg in den letzten Jahren den bei NPK-Dünge. Verantwortlich dafür war die starke Zunahme des Leguminosenanteils bei P- und K-Dünge, die letztlich einen höheren N-Entzug

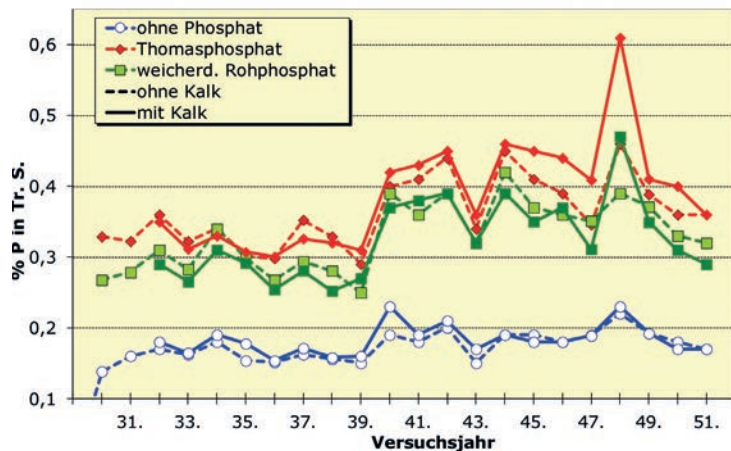


Bild 5: Phosphatgehalte im Wiesenaufwuchs des P-Versuchs St. Peter in Abhängigkeit von der Phosphat- und Kalkdüngung

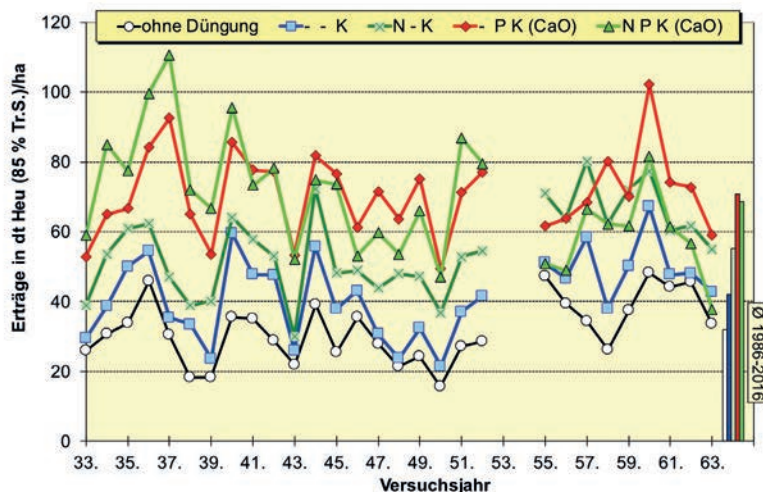


Bild 6: Erträge im Wiesen-Schauversuch in Abhängigkeit von der Mineraldüngung

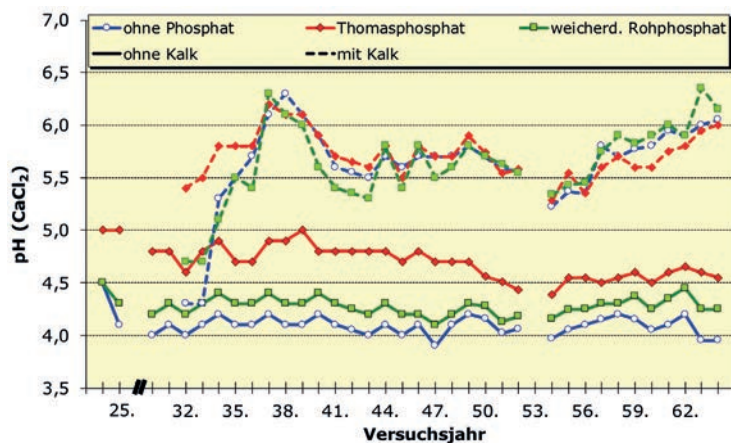


Bild 7: pH-Werte im Boden des Wiesenversuchs St. Peter in Abhängigkeit von der Phosphat- und Kalkdüngung

des Bestandes ermöglichte als bei NPK-Düngung.

Bodenuntersuchungen

Die pH-Werte im Boden spiegeln die unterschiedlichen Kalkgehalte der beiden P-Dünger wie auch den seit 1985 vollzogenen Kalkausgleich wider (Bild 7). Ohne zusätzliche Kalkzufuhr bewegen sich die pH-Werte etwas über pH 4,0. Durch die mit Thomasphosphat durchschnittlich zugeführten 260 kg CaO je ha und Jahr stellte sich ein Niveau von knapp pH 5 ein. Im Versuchsteil mit Kalkausgleich wurde 1990 ein etwa einheitliches pH-Wert-Niveau auf allen Varianten erreicht.

Bei unterlassener Phosphatdüngung stellten sich langfristig Phosphatgehalte von 5 mg CAL-P₂O₅ ein (Bild 8), die bei zusätzlicher Kalkung durch die höheren Erträge und damit auch stärkeren P-Entzüge auf 2–3 mg absanken. Die Abnahme der Phosphatgehalte im Boden in der Variante „ohne Phosphat“ lässt sich durch den höheren Phosphatentzug nach zusätzlicher Kalkung, bedingt durch sowohl höhere P-Gehalte im Aufwuchs als auch durch die deutlich höheren Erträge, erklären. Die Phosphatgehalte im Boden der phosphatgedüngten Varianten lagen bei beiden P-Formen annähernd gleich hoch, zuweilen beim Thomasphosphat aufgrund des höheren P-Entzugs sogar niedriger als bei weicherdigem Rohphosphat. Besonders dieser letzte Effekt steht im Widerspruch zu den Erträgen und Phosphatgehalten im Aufwuchs. Letztere lagen bei Düngung mit Rohphosphat stets unter denen bei Thomasphosphatdüngung, wurden aber in beiden Varianten durch die zusätzliche Kalkung nur geringfügig verändert. Dagegen dürfte der starke Abfall der Phosphatgehalte in der gekalkten Variante mit Rohphosphat

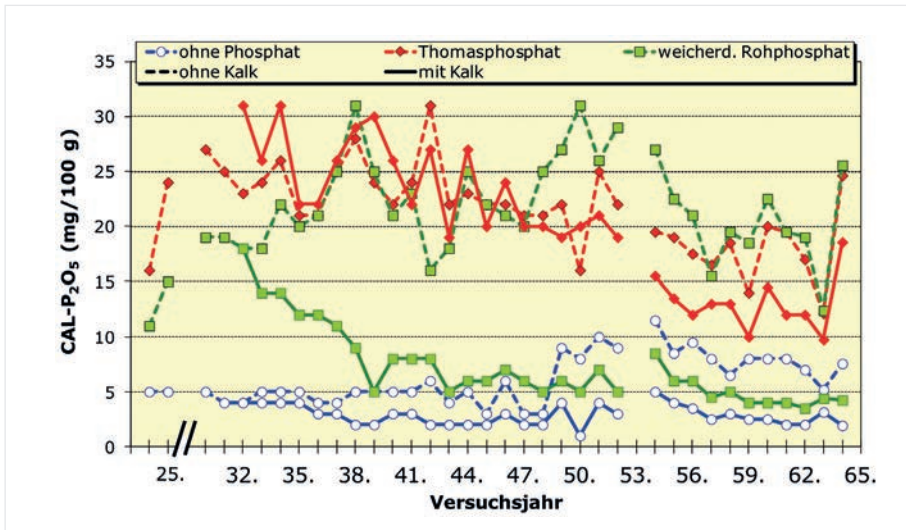


Bild 8: CAL-extrahierbare Phosphatgehalte im Boden des Wiesenversuchs St. Peter in Abhängigkeit von der Phosphat- und Kalkdüngung

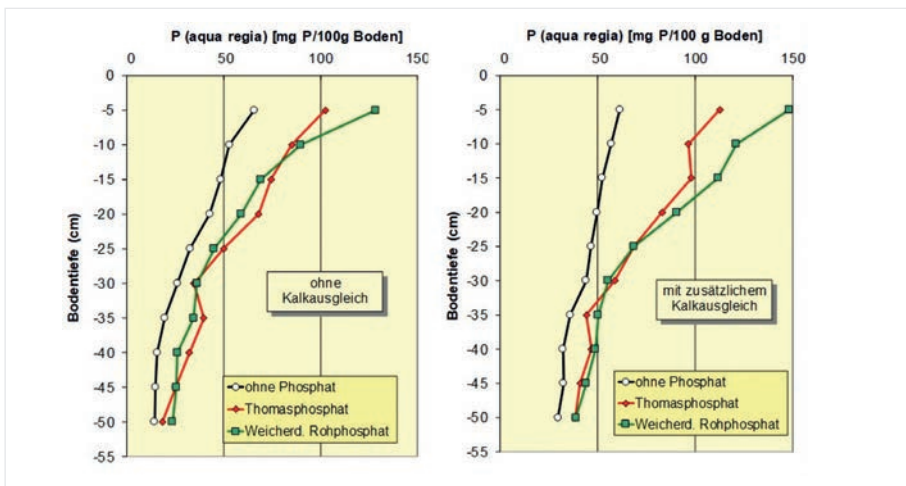


Bild 9: Verteilung der Gesamt-P-Gehalte im Bodenprofil des Versuchs St. Peter bei jährlicher Düngung mit verschiedenen P-Formen und zusätzlichem Kalkausgleich über 60 Jahre

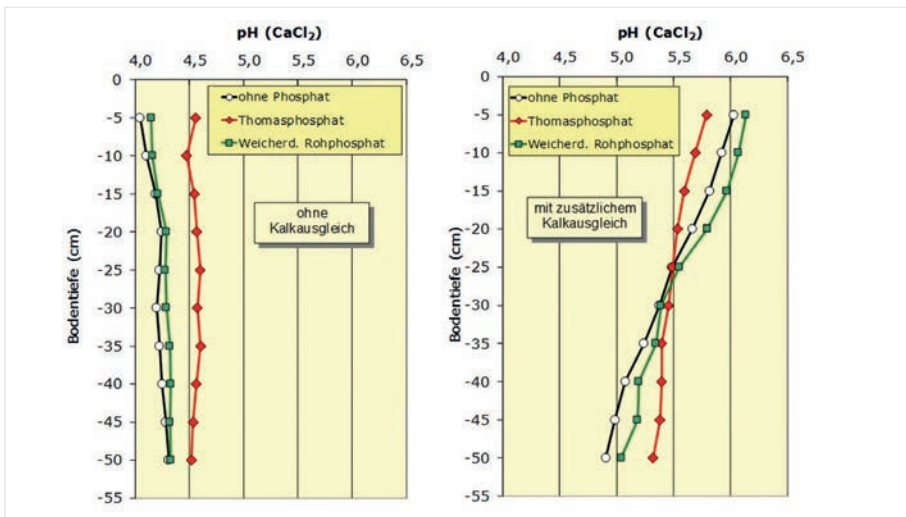


Bild 10: Verteilung der pH-Werte im Bodenprofil des Versuchs St. Peter bei jährlicher Düngung mit verschiedenen P-Formen und zusätzlichem Kalkausgleich über 60 Jahre

analytisch bedingt sein. Offensichtlich wird bei unterlassenem Kalkausgleich bei dem niedrigeren pH-Wert im Boden während der CAL-Extraktion noch genügend Rohphosphat aufgelöst, wobei dies auch im Einklang mit den P-Gehalten des Aufwuchses steht. Die zusätzliche Kalkung stabilisiert dagegen die pH-Pufferung der CAL-Lösung und schränkt die Auflösung des Rohphosphats ein.

Feldversuche auf Dauergrünland mit einer so langen Laufzeit wie im Versuch St. Peter zeigen die Anreicherung und Verteilung von Nährelementen und Schadstoffen im Bodenprofil. Im 60. Versuchsjahr wurden Bodenproben aus 5-cm-Schichten im Bodenprofil bis 50 cm Tiefe gezogen und untersucht [6]. So lässt sich eine Anreicherung des Gesamt-Phosphats bis knapp 50 cm Tiefe bereits auf der Kontrolle ohne Phosphat nachweisen (Bild 9). Die mineralische P-Düngung auf den mit Phosphat gedüngten Parzellen weist eine zusätzliche P-Anreicherung mit beiden P-Düngern auf, die auch bis auf etwa 50 cm Tiefe gehen.

Die unterlassene bzw. durchgeführte jährliche P-Düngung mit beiden P-Formen über 60 Jahre hinterließ drei unterschiedliche, aber mit zunehmender Bodentiefe gleichbleibende pH-Niveaus im Bodenprofil. Während sich die pH-Werte bei Rohphosphatdüngung kaum von denen ohne P-Düngung unterscheiden, heben sich die pH-Werte bei Thomasphosphatdüngung deutlich von denen der beiden anderen Düngungsvarianten im gesamten untersuchten Profil ab (Bild 10). Die zusätzliche angepasste Kalkzufuhr seit 1984 mit dem Ziel, etwa gleiche pH-Werte im Boden zu erreichen, zeigt auch nach 20 Jahren im Oberboden im Vergleich zum Unterboden noch einen stärkeren pH-Anstieg.

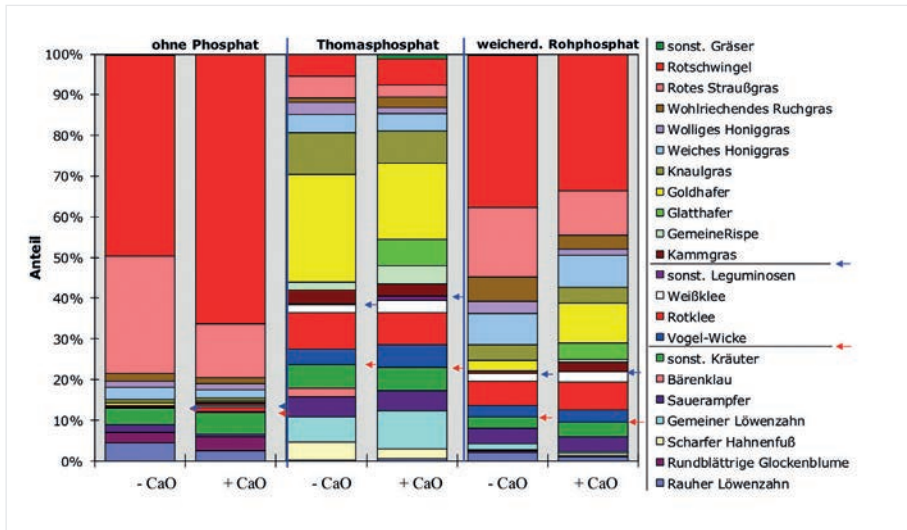


Bild 11: Bestandszusammensetzung in Abhängigkeit von der Phosphat- und Kalkdüngung im 33. Versuchsjahr 1986

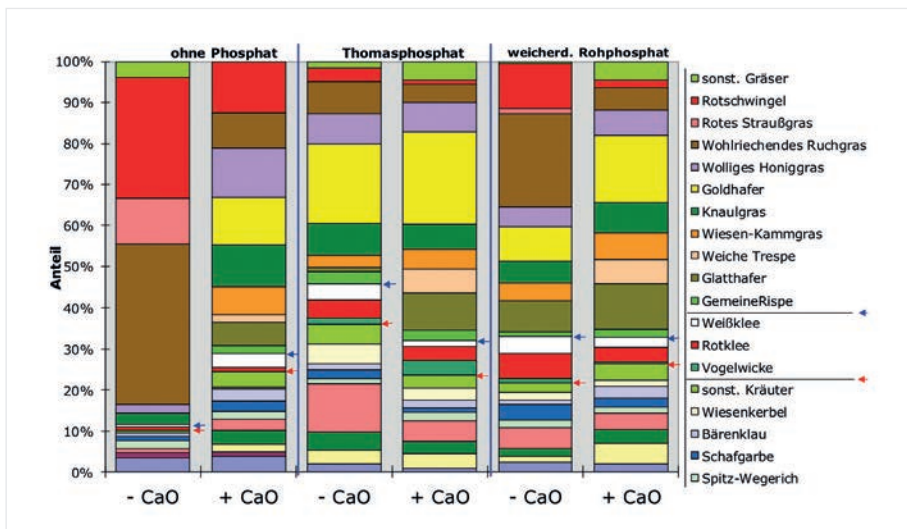


Bild 12: Bestandszusammensetzung in Abhängigkeit von der Phosphat- und Kalkdüngung im 42. Versuchsjahr 1995

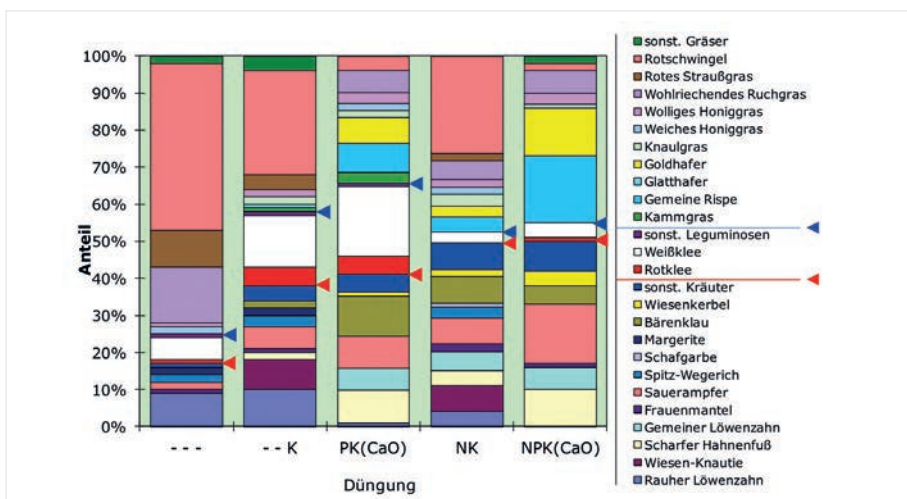


Bild 13: Bestandszusammensetzung des Wiesen-Schauversuchs St. Peter in Abhängigkeit von der Mineraldüngung im 42. Versuchsjahr 1995

Bestandszusammensetzung

In den Hochlagen des Mittleren Schwarzwaldes sind die Goldhaferwiesen (Polygono-Trisetion) verbreitet. Der ursprüngliche Bestand auf der Versuchsfläche lässt sich auch diesem Typ zuordnen [7]. Auf beiden Versuchsteilen wirkte sich die Düngung in starkem Maße auf die botanische Zusammensetzung des Bestandes aus. Unter ihrem Einfluss variieren die Bestände der Düngungspartellen pflanzensoziologisch zwischen extrem magerer Goldhaferwiese und nährstoffreicher subalpiner Fettwiese. Die ersten pflanzensoziologischen Bestandsaufnahmen wurden erst 1966 durchgeführt. Zu diesem Zeitpunkt, 12 Jahre nach Versuchsbeginn, hatten sich bereits unterschiedliche Bestände etabliert. Wie erwartet, wurden durch die Phosphat- und auch die Kalidüngung die Leguminosenanteile deutlich erhöht, während bei unterlassener Mineraldüngung, aber auch bei unterlassener P-Düngung die Gräseranteile vorherrschen. Zudem war der Blütenansatz der Kräuterarten deutlich eingeschränkt [7]. Ohne Phosphatdüngung werden Rotschwingel (*Festuca rubra*), Wohlriechendes Ruchgras (*Anthoxanthum odoratum*) und Rotes Straußgras (*Agrostis capillaris*) Hauptbestandbildner. Allein durch die Kalkung wurden die Wiesenkräuter gefördert, so dass sich die gekalkten Flächen artenreicher als die ungekalkten darstellen. Die Dominanz einzelner Arten wurde zurückgedrängt.

Die Bilder 11–14 zeigen die Artenzusammensetzungen der verschiedenen Düngungsvarianten jeweils vor dem ersten Schnitt. Einzelne berücksichtigt wurden nur Arten mit einem Anteil von mindestens 2 %. Die Pfeile markieren die Leguminosen.

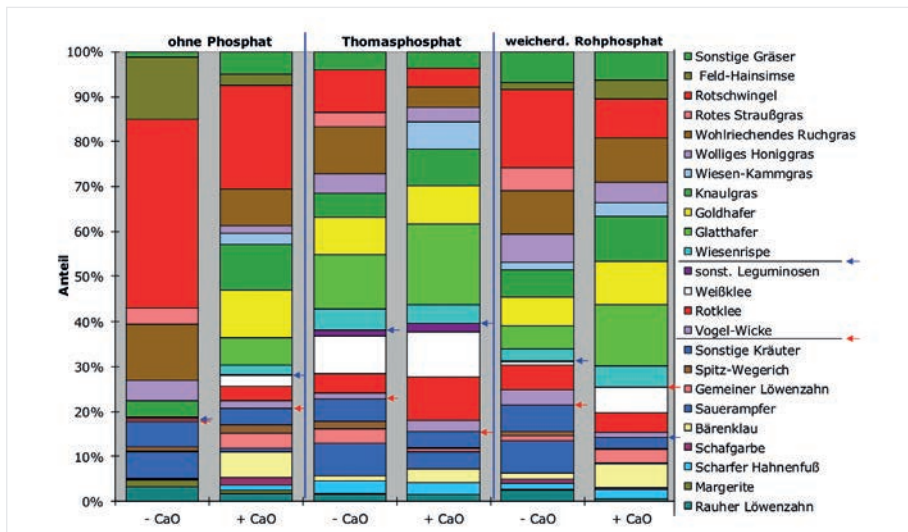


Bild 14: Bestandszusammensetzung in Abhängigkeit von der Phosphat- und Kalkdüngung im 58. Versuchsjahr 2011



Bild 15: Grünlandbestand im P-Düngungsversuch St. Peter vor dem ersten Schnitt am 1. Juni 2017

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 (Bild 11).

Im Jahr 1995 konnte auf den gekalkten Flächen mit 35 bis 38 verschiedenen Arten eine relativ hohe Artenzahl festgestellt werden. Dabei erschienen die Bestände ausgewogener, da stark dominierende Arten auf den gedüngten Versuchsgliedern fehlten (Bild 12). Die artenreichsten Bestände wurden in der Variante „ohne Phosphat“ und „mit Kalk“ sowie im Schauversuch auf den Varianten --K und N-K (Bild 13) gefunden. Demgegenüber ging auf den phosphatgedüngten Varianten die

Artenzahl leicht von etwa 31 auf 28 Arten zurück.

Nach 58 Versuchsjahren hatte sich die Hainsimse auf den Varianten „ohne P“ und mit Rohphosphat angesiedelt (Bild 14). Der Rotschwingel nahm wieder einen größeren Anteil ein und der Anteil der Leguminosen am Gesamtbestand hatte auf den P-gedüngten und den zusätzlich gekalkten Varianten zugenommen. Die Variante mit Thomasphosphat zeigte wieder einen ausgewogenen, ertragreichen Bestand (Bild 15).

1991 wiesen die Parzellen mit weicherdigem Rohphosphat mehr Magerkeitsanzeiger und düngungsempfindliche Wiesenkräuter, die typisch für Goldhaferwiesen sind, auf als die Thomasphosphatparzellen. Diese Un-

terschiede fielen 1995 zwischen beiden P-Formen geringer aus, teilweise kehrten sich die Verhältnisse sogar um. Durch die bessere Verfügbarkeit des Phosphats im Thomasphosphat haben sich auf dem Standort bei dem gewählten Düngungsniveau, das mit 90 kg P_2O_5 /ha etwa 20 bis 25 kg höher als der Phosphatentzug lag, Düngungsanzeiger wie die anspruchsvollen Gräser Glatthafer (*Arrhenatherum elatius*), Wiesenschwingel (*Festuca pratensis*), Gemeine Rispe (*Poa trivialis*) und Weiche Tresse (*Bromus mollis*) sowie Löwenzahn (*Taraxacum officinale*) und Scharfer Hahnenfuß (*Ranunculus acer*) stärker verbreitet und empfindlichere Arten wurden zurückgedrängt. Bei etwas reduzierterem, dem Entzug angepassten P-Düngungsniveau dürften düngungsempfindlichere Pflanzen noch konkurrenzfähig bleiben.

Typische Magerkeitsanzeiger, darunter auch einige seltenere Arten wie z. B. die Berg-Waldhyazinthe (*Platanthera chlorantha*) 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 Entzuges ein artenreicher Bestand mittleren Ertragsniveaus erhalten werden, der zudem noch eine hohe Futterqualität aufweist. Zu ähnlichen Empfehlungen kamen auch Bartels und Scheffer [8] für Grünlandbestände in Naturschutzgebieten.

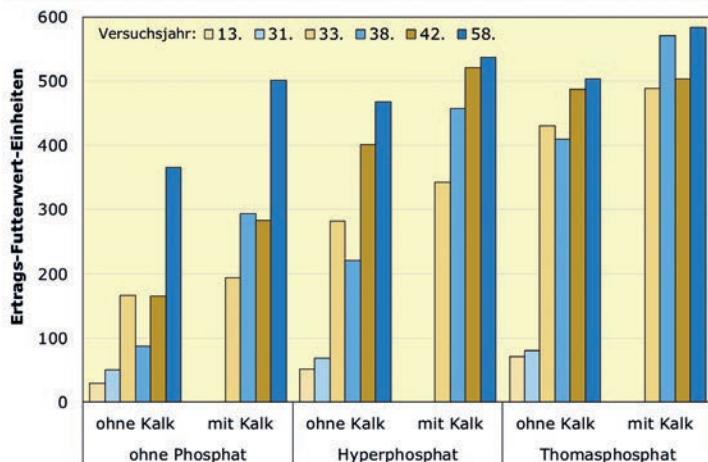


Bild 16: Ertrags-Futterwert-Einheiten [9] im Phosphat-Düngungsversuch St. Peter in Abhängigkeit von der Düngung mit zunehmender Versuchslaufzeit

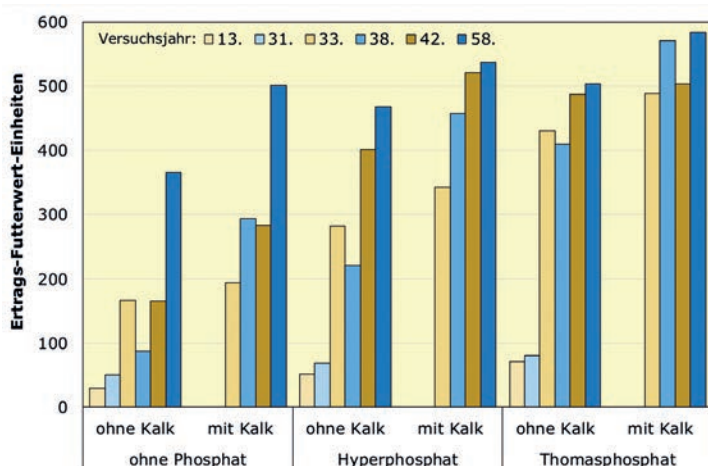


Bild 17: Ertrags-Futterwert-Einheiten [9] im Wiesen-Schauversuch in Abhängigkeit von der Düngung mit zunehmender Versuchslaufzeit

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 Ausfalls-Entschädigung des Landwirts denkbar.

Futterqualität

Zur Bewertung der Futterqualität wurden Berechnungen der Ertrags-Futterwert-Einheiten nach Mott [9] aus den nach Klapp/Stählin geschätzten Ertragsanteilen der einzelnen Pflanzenarten, deren Wertzahl nach Klapp und dem tatsächlich gemessenen Ertrag vorgenommen [10]. Sie zeigen für die verschiedenen Düngungsvarianten ebenfalls deutliche Unterschiede an. Im P-Formenversuch führte die Thomasphosphatdüngung zu den

besten Futterqualitäten (Bild 16). In dem Düngungsschauversuch war die PK-Düngung der NPK-Düngung überlegen (Bild 17). Auch in dieser Hinsicht zeigt der Versuch, dass die unterlassene Stickstoffdüngung bei einer Nutzung mittlerer Intensität und entsprechender Etablierung von Leguminosen keine Verluste an Ertrags- und Futterqualität nach sich zieht.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

In dem Versuch zeigt sich, dass bei moderater Nutzungsintensität mit einer Düngungshöhe, die am Entzug orientiert ist, ein Dauergrünlandbestand mittleren Ertragsniveaus mit hoher Artenvielfalt und guter Futterqualität langfristig aufrechtzuerhalten ist. Die Unterlassung vor allem der Phosphatdüngung kann zwar den Erhalt einzelner düngungsempfindlicher, seltener Arten begünstigen, führt aber langfristig zu deutlichen Ertragseinbußen und Verminderung der Futterqualität bei gleichzeitigem Rückgang der Artenvielfalt im Bestand. Eine an den Phosphatentzug angepasste Düngung fördert demgegenüber das Auftreten anspruchsvollerer Arten, ohne düngungsempfindliche zu verdrängen. Erst bei einer dauerhaft das Entzugsniveau deutlich übersteigenden P-Düngung nimmt die Artenvielfalt zugunsten leistungsfähiger und anspruchsvollerer Arten, vor allem Gräser, ab. Auf stark sauren Böden unter pH 4,5 fördert die Kalkung das Auftreten von Kräutern und Leguminosen im Bestand und erhöht damit die Artenzahl.

Im Vergleich zu einer entzugsangepassten Stickstoff- und Grunddüngung kann bei ausschließlicher PK-Düngung der Anteil an Leguminosen so stark gefördert werden, dass Ertragsgleichheit erzielt wird und

die Futterqualität zunimmt. Unter Beachtung einer bedarfsgerechten Grunddüngung führen so Extensivierungsprogramme mit eingeschränkter oder unterlassener Stickstoffdüngung nicht zu Ertrags- und Qualitätseinbußen. Der langjährige Einsatz von Thomasphosphat, einer Schlacke aus dem Thomaskonverter, die bei der Stahlerzeugung anfällt, führt in dem Versuch anhaltend zu den höchsten Erträgen und besten Futterqualitäten.

ZUSAMMENFASSUNG

In einem Grünland-Düngungsversuch in Hochlagen des Mittleren Schwarzwaldes mit mittlerer, standorttypischer Nutzungsintensität führte die unterlassene Phosphatdüngung über 64 Jahre zu einem Absinken des Ertrages auf 50 % im Vergleich zur phosphatgedüngten Variante. Die völlig unterlassene Mineraldüngung ließ nur noch Erträge von ca. 50–60 % der mit PK oder NPK gedüngten Flächen zu. Die PK-Düngung er-

reichte das Niveau der NPK-Düngung bei gleichzeitig ausgeglichenerem Bestand und besserem Futterwert. Infolge einer besseren P-Verfügbarkeit wurden mit Thomasphosphat höhere Erträge und bessere Futterqualitäten erzielt als mit weicherem Rohphosphat. Die Kalkung hat ein Ansteigen des Ertrages, die Verbesserung der Futterqualität und eine Förderung der Artenvielfalt zur Folge. Durch Unterlassung vor allem der Phosphatdüngung nahm der Blütenansatz vieler Arten deutlich ab und der Gräseranteil im Bestand zugunsten weniger dominierender Arten zu. Gleichzeitig wurden auch einige seltenere Pflanzenarten konkurrenzfähig. Eine ausgeglichene Grunddüngung auf oder leicht über Entzugsniveau kann bei einer mittleren Nutzungsintensität (2–3 Schnitte) den Erhalt eines artenreichen, blühenden Grünlandbestandes mit befriedigendem Ertrag und guter Futterqualität dauerhaft ermöglichen. <<<

LITERATUR

- [1] Papendick, K. (1955): Über die Mineralstoffversorgung der Rinder – Berechnungen an 153 südbadischen Betrieben. *Landwirtsch. Forsch.* 8, S. 45–54
- [2] Bärmann, C. (1953): Phosphatdüngung und Mineralstoffgehalt von Wiesenheu, *Phosphorsäure* 13, S. 145–157
- [3] Munk, H. (1986): Wachstum und botanische Zusammensetzung einer Wiesennarbe im Hochschwarzwald unter dem Einfluss 30jähriger Düngungsmaßnahmen. *VDLUFA-Schriftenreihe*, 20, S. 547–558, Kongressband 1986
- [4] Rex, M. und K. Müller (1992): Entwicklung der Grünlandvegetation auf einem Wiesen-Düngungsversuch im Hochschwarzwald unter dem Einfluss unterschiedlicher Düngung über 38 Jahre. *VDLUFA-Schriftenreihe*, 35, S. 777–780, Kongressband 1992
- [5] Rex, M. (1995): Ökologische Bewertung der Auswirkungen 40-jähriger unterschiedlicher Düngungsmaßnahmen auf die Grünlandvegetation einer Wiese im Hochschwarzwald. *VDLUFA-Schriftenreihe*, 40, S. 639–642, Kongressband 1995
- [6] Algermissen, D.; Morillon, A.; Arit, K.-J.; Wolsfeld, N.; Rex, M.; Mauhart, M.; Spiegel, H.; Lehtinen, T.; Branca, T.A.; Colla, V.; Ragagnoli, G.; Pistocchi, Ch.; Romaniello, L. und Tuomikoski, S. (2015): Impact of long-term application of blast furnace and steel slags as liming materials on soil fertility, crop yields and plant health [SLAGFERTILISER]. European Commission: Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel, RFSR-CT-2011-00037, EUR 28447 EN (<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--pbKI-NA28447/>)
- [7] Kretschmar, F. (1992): Die Wiesengesellschaften des Mittleren Schwarzwaldes: Standort – Nutzung – Naturschutz. *Diss. bot.* 189, S. 146
- [8] Bartels, R. und B. Scheffer (1997): Grunddüngung nach dem Entzug richten, *Hannoversche Land- und Forstwirtschaftliche Zeitung* 150 (14), S. 20–22
- [9] Mott, N. (1957): Die Anwendung von Futterwertzahlen bei der Beurteilung von Grünlandbeständen, *Das Grünland* 7, S. 1–4
- [10] Rex, M. (1997): Ertrag und pflanzensoziologische Entwicklung von Dauergrünland im Mittleren Schwarzwald unter dem Einfluss langjähriger mineralischer Düngung. Felix-Henningsen, P. und Wegener, H.-R. (Hrsg.): *Boden und Landschaft. Schriftenreihe zur Bodenkunde, Landeskultur und Landschaftsökologie*, Band 17, S. 77–90, 1997

ERZEUGUNG UND NUTZUNG VON EISENHÜTTEN-SCHLACKEN IN DEUTSCHLAND UND EUROPA 2017

Dr.-Ing. Th. Merkel

Die bei der Erzeugung von Roheisen und Stahl als Nebenprodukte hergestellten Eisenhüttenschlacken (Hochofen- und Stahlwerksschlacken) werden seit vielen Jahrzehnten als Baustoffe und Düngemittel nachhaltig erfolgreich eingesetzt. In den Tabellen 1 und 2 werden die in Deutschland im Jahr 2017 erzeugten und verwendeten Mengen im Vergleich zum Vorjahr dargestellt. Bei der Erzeugung von Hochofen- und Stahlwerksschlacke ist ein leichter Anstieg gegenüber dem Vorjahr zu verzeichnen. Insgesamt wurden 2017 etwa 13,1 Mio. t Eisenhüttenschlacken produziert.

Betrachtet man die Daten im Einzelnen, ist festzustellen, dass bei der Hochofenschlacke die Granulationsrate, also der Anteil der zu Hüttensand granulierten Hochofenschlacke, im Vergleich zum Vorjahr nochmals auf 87 % angestiegen ist. Noch deutlicher zugenommen hat die Menge des zur Herstellung von CEM-II- und CEM-III-Zementen eingesetzten Hüttensands. Etwa 0,65 Mio. t mehr wurden im vergangenen Jahr für diesen Verwendungszweck genutzt. Da auch der Einsatz der Hochofenstückschlacke als Gesteinskörnung bzw. Baustoffgemisch zur Herstellung von Asphalten, Betonen und Tragschichten ohne Bindemittel um ca. 0,25 Mio. t zugenommen hat,

Erzeugung	2017	2016
Schlacke aus Stahlroheisenerzeugung	7,70	7,46
Schlacke aus sonstiger Roheisenerzeugung	0,08	0,08
Summe	7,78	7,54
davon: HS 6,89 HOS 0,89		
Lagerabbau	1,11	0,55
Summe	8,89	8,09

Nutzung	2017	2016
HOS für Gesteinskörnungen	0,20	0,17
HOS für Baustoffgemische	0,51	0,39
HS zur Zementherstellung	7,89	7,24
HS für andere Einsatzgebiete	0,16	0,17
Eigenverbrauch der Werke	0,13	0,12
Summe	8,89	8,09

Tabelle 1: Erzeugung und Nutzung von Hochofenschlacke 2017 (2016 zum Vergleich, alle Angaben in Mio. t)

konnte die Menge der für eine spätere Nutzung zwischengelagerten Hochofenschlacke deutlich reduziert werden (Lagerabbau = 1,1 Mio. t).

Bei den Stahlwerksschlacken ist der Anstieg der erzeugten Gesamtmenge geringer als bei der Hochofenschlacke, insgesamt wurden 2017 5,24 Mio. t Stahlwerksschlacke erzeugt. Vergleicht man die Verwendung in den verschiedenen Einsatzgebieten, erkennt man eine Steigerung beim Einsatz als Kalk- und Eisenträger

Erzeugung	2017	2016
Schlacke aus Oxygenstahlerzeugung	3,08	3,11
Schlacke aus Elektro-stahlerzeugung	1,73	1,61
Schlacke aus Sonderverfahren	0,55	0,52
Summe	5,36	5,24

Nutzung	2017	2016
Metallurg. Kreislauf-führung	0,73	0,58
Düngemittel	0,40	0,37
Baustoffe (Straßenbau, Erdbau, Wasserbau etc.)	2,45	2,67
Sonstiges	0,32	0,24
Deponie	0,58	0,85
Zwischenlager	0,88	0,53
Summe	5,36	5,24

Tabelle 2: Erzeugung und Nutzung von Stahlwerksschlacke 2017 (2016 zum Vergleich, alle Angaben in Mio. t)

im metallurgischen Kreislauf sowie bei der Nutzung als Kalkdüngemittel. Der wichtige Einsatz als Baustoff jedoch ist seit einigen Jahren rückläufig und macht nur noch 2,5 Mio. t aus. Möglicherweise ist dies auch auf die fehlende Verfügbarkeit geeigneter Baumaßnahmen zurückzuführen – die deutliche Erhöhung der Zwischenlager-Kapazitäten macht dies wahrscheinlich. Positiv ist letztlich, dass die Ablagerung von Stahlwerksschlacken auf Deponien deutlich zurückgegangen ist. Mit 0,58 Mio. t wurde der niedrigste Wert seit dem durch

die Wirtschaftskrise gekennzeichneten Jahr 2009 verzeichnet.

Insgesamt konnten mit 12,8 Mio. t Eisenhüttenschlacken rd. 98 % der erzeugten Menge vermarktet werden. Dies ist als Erfolg für die Bemühungen der Produzenten und Aufbereiter zu werten, dem Markt die benötigten Produktqualitäten zur Verfügung zu stellen.

Neben den Daten zur Erzeugung und Nutzung von Eisenhüttenschlacken in Deutschland werden seit einiger Zeit durch EUROSLAG im zweijährigen Turnus auch die entsprechenden Daten für Europa erfasst. In den Tabellen 3 und 4 sind die Daten für das Jahr 2016 dargestellt.

Einschränkend muss festgestellt werden, dass die europäische Statistik im Vergleich zur Statistik in Deutschland weniger repräsentativ ist. Insbesondere wurden aus Italien, dem zweitgrößten Stahlproduzenten der EU, keine belastbaren Zahlen gemeldet. Trotzdem gibt die Statistik einen guten Überblick, da Daten für eine Vielzahl von Ländern vorliegen. Zur Verfügung gestellt wurden Daten aus Belgien, Bosnien-Herzegowina, Bulgarien, Deutschland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Luxemburg, den Niederlanden, Polen, Portugal, Österreich, Rumänien, Schweden, der Slowakei,

Slowenien, Spanien, Tschechien und dem Vereinigten Königreich.

Grundsätzlich ähneln die Daten denen aus Deutschland, im Detail jedoch gibt es Unterschiede: So ist bei der Hochofenschlacke die Granulationsrate ca. 10 % niedriger; es werden im Durchschnitt lediglich 79 % der Hochofenschlacken zu Hüttensand verarbeitet. Entsprechend verändert ist auch die Verteilung der Einsatzfelder – die Verwendung für die Herstellung von Zement und Beton liegt bei 80 %, für den Straßenbau bei 20 %.

Bei den Stahlwerksschlacken ist die Verteilung auf die Erzeugungsverfahren in Europa ähnlich der in Deutschland: jeweils 55–60 % aus Konverterverfahren, 30–35 % aus Elektroöfenverfahren, ca. 10 % sonstige Schlacke. Bei den Einsatzfeldern ist auch europaweit zuerst die Verwendung als Baustoff zu nennen – sie umfasst wie in Deutschland ca. 50 % der erfassten Menge.

Insgesamt wurden 2016 in den o. g. Ländern 43,0 Mio. t Eisenhüttenschlacken erzeugt, von denen nur 6 % einer Deponierung zugeführt werden mussten. Ziel ist sicherlich, diesen Anteil weiter zu reduzieren. Grundsätzlich ist aber festzustellen, dass Hersteller und Aufbereiter die Produkte aus

Eisenhüttenschlacken insgesamt auch europaweit sehr erfolgreich vermarkten konnten. <<<

Erzeugung	Mio. t
Hüttensand (HS)	19,41
Hochofenstückschlacke (HOS)	5,19
Summe	24,60
Lagerabbau	1,26
Summe	25,86

Nutzung	Mio. t
Zementproduktion und Betonzusatzstoffe	20,02
Straßenbau	5,13
Sonstiges	0,61
Deponie	0,10
Summe	25,86

Tabelle 3: Erzeugung und Nutzung von Hochofenschlacke 2016 in Europa

Erzeugung	Mio. t
Schlacke aus Oxygenstahlerzeugung	10,40
Schlacke aus Elektrostahlerzeugung	5,93
Schlacke aus Sonderverfahren	2,04
Summe	18,37

Nutzung	Mio. t
Metallurg. Kreislaufführung	2,82
Düngemittel	0,50
Baustoffe (Straßenbau, Erdbau, Wasserbau etc.)	9,66
Sonstiges	1,21
Deponie	2,59
Zwischenlager	1,59
Summe	18,37

Tabelle 4: Erzeugung und Nutzung von Stahlwerksschlacke 2016 in Europa

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