

Kurzbericht

Nachhaltige Baustoffverwendung durch den Einsatz von Eisenhüttenschlacken im Erdbau – Großmaßstäbliche Technikumsversuche und numerische Modellierungen

Förderkennzeichen: AiF 20539 N
 Bearbeitungszeitraum: 01.04.2019 – 31.03.2022
 Projektpartner: FEhS Institut für Baustoff-Forschung e.V.
 TU München, Zentrum Geotechnik

Hintergrund, Zielsetzung und Projektkonzeption:

Die M T S E Bauweisen [1] sind dafür prädestiniert, Baustoffgemische mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen einer sinnvollen und ressourceneffizienten Verwendung zuführen zu können, sodass ihre Deponierung vermieden werden kann. Der Problematik umweltrelevanter Inhaltsstoffe wird sich derart gewidmet, dass die Wasserdurchlässigkeit der verwendeten Baustoffgemische so gering sein muss, dass diese Inhaltsstoffe quasi im M T S E Baukörper eingekapselt vorliegen und das Grundwasser nicht beeinflussen können. Besonders attraktiv ist hierbei die M T S E Bauweise E, da bei dieser auf ein zusätzliches Abdichtungselement verzichtet werden kann und relativ große Mengen an Baustoff benötigt werden.

Bei der Erzeugung von Eisen und Stahl werden als Nebenprodukte die industriellen Gesteine Hochofen- und Stahlwerksschlacke gewonnen. Im Mittel werden in Deutschland jährlich etwa 7,5 Mio. t Hochofenschlacke und ca. 6 Mio. t Stahlwerksschlacke erzeugt [2] und durch Brechen und Klassieren zu Gesteinskörnungen oder Baustoffgemische aufbereitet. Nach wie vor muss jährlich jedoch ein nicht unerheblicher Anteil (s. Bild 1) dieser Stahlwerksschlacken deponiert werden. Insgesamt besteht daher für Stahlwerksschlacken durchaus das Potenzial, ihre Nutzungsrate zu optimieren und den Anteil der zu deponierenden Schlacken zu reduzieren.

Im Zusammenhang mit dem Ressourceneffizienzprogramm der Bundesregierung [3] und dem mit der Ersatzbaustoffverordnung [4] formulierten Ziel einer Schonung von Primärrohstoffen und bevorzugten Verwendung von Sekundärbaustoffen, wurde im AiF-Forschungsvorhaben 18746 N

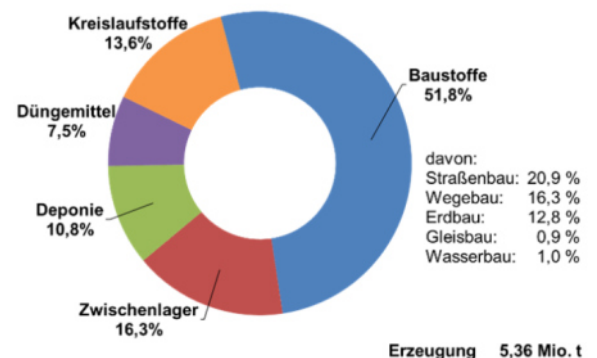


Bild 1: Verwendung von Stahlwerksschlacke 2017 [2]

[5] der theoretische Nachweis erbracht, dass Stahlwerksschlacken, die aufgrund ihrer Materialeigenschaften einer Deponierung zugeführt werden müssten, durch die Maßnahme einer granulometrischen Modifikation in Form einer Feinkornzugabe den Anforderungen des M TS E Merkblattes, Bauweise E [1] entsprechen können.

Vor dem Hintergrund sich zunehmend verschärfender Umweltaforderungen sollte daher die Eignung von industriellen Sekundärrohstoffen für die M TS E Bauweise E auch im Technikumsmaßstab dargelegt werden. Der Ausbau des Kenntnisstandes über das Umweltverhalten von Stahlwerksschlacken in großtechnischen, quasi realen Bauwerken sollte dazu beitragen, einen Verwendungsbereich für Sekundärrohstoffe im Erdbau zu erschließen. Darüber hinaus zielte das Forschungsvorhaben darauf ab, einen Beitrag zum Ressourceneffizienzprogramm der Bundesregierung [3] zu leisten und die Verwendungsrate von industriellen Nebenprodukten und Sekundärrohstoffen zu verbessern.

In dem durch das FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e.V. und die Technische Universität München (TUM), Zentrum Geotechnik bearbeiteten Forschungsvorhaben wurde auf Basis des Vorgängervorhabens [5] weiterführend untersucht, ob Eisenhüttenschlacken, die durch Feinkornzugabe einer granulometrischen Modifikation unterzogen wurden, auch in großmaßstäblichen Hallenlysimetern (Technikumsmaßstab) ihre Eignung als Baumaterial entsprechend den Anforderungen des Merkblattes über Bauweisen für Technische Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau (kurz: M TS E-Merkblatt) [1] aufweisen. Hierfür wurden Hallenlysimeterversuche an granulometrisch modifizierten Stahlwerksschlacken durchgeführt, deren Ergebnisse mit numerischen Modellen nachgebildet und numerisch auf reale Bauwerke (Straßendamm und Lärmschutzwall) übertragen.

Primäre Untersuchungsergebnisse:

Die primären Ergebnisse des Forschungsvorhabens, die auf organisatorischer Basis von vier Arbeitspakete (AP) erarbeitet wurden, werden folgend zusammengefasst.

AP 1: Zu Beginn wurden die Materialeigenschaften von zwei grobkörnigen Eisenhüttenschlacken (eine LDS und eine SEKS) mit unterschiedlichem Größtkorn (16 mm bzw. 8 mm) und einem feinkörnigen Zuschlagstoff (Kaolin), die auf Basis des Vorgängerprojektes [5] als geeignet bzgl. der Fragestellungen des aktuellen Forschungsvorhabens angesehen wurden, eingehend charakterisiert. Die physikalischen und chemischen Prüfungen an den Ausgangsstoffen wurden als materialtypisch und anforderungsgerecht eingestuft. Unter Berücksichtigung von drei unterschiedlichen Auslaugverfahren [6, 7, 8] zeigten die Ausgangsstoffe Kaolin und GPS verfahrensunabhängig keine nennenswerten Eluatkonzentrationen. Eine Konzentrationszunahme im Eluat der LDS für den umweltrelevanten Parameter Chrom wurde vom Schüttelverfahren (10:1) zum Perkulations- zum Schüttelverfahren (2:1) gemessen.

An den Ausgangsstoffen LDS und GPS als auch an den mit Kaolin granulometrisch modifizierten Ausgangsstoffen wurden Verdichtungsversuche [9] durchgeführt, um auf Basis dieser Ergebnisse die Zielgrößen für den Einbau der Baustoffe in die Hallenlysimeter (AP 2) ableiten zu können. Hierbei konnte für die Ausgangsmaterialien LDS (s. Bild 2) und GPS (s. Bild 3) kein ausgeprägtes Verdichtungsoptimum generiert werden. Für die granulometrisch modifizierten Gemische mit einem Kaolinanteil von 8 M.-% bzw. 13 M.-% wurden im Vergleich zu den Ausgangsstoffen eine etwas höhere Proctordichte unter Verwendung eines höheren Wassergehaltes erzielt, was bzgl. der modifizierten Gemischen für ein größeres Wasserrückhaltevermögen aufgrund des erhöhten Feinkornanteils spricht. Wurde der Kaolinanteil in den Gemischen auf 20 M.-% erhöht, reagierte das Materialgemisch im Verdichtungsversuch zunehmend plastisch, sodass die maximal erzielbare Trockendichte wieder abnahm.

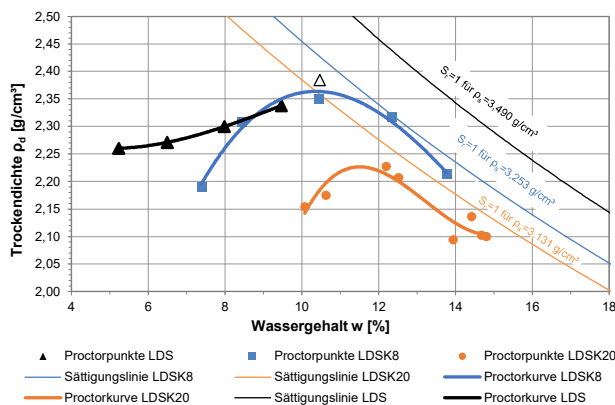


Bild 2: Proctorkurven der LDS und LDS-Kaolin Gemische

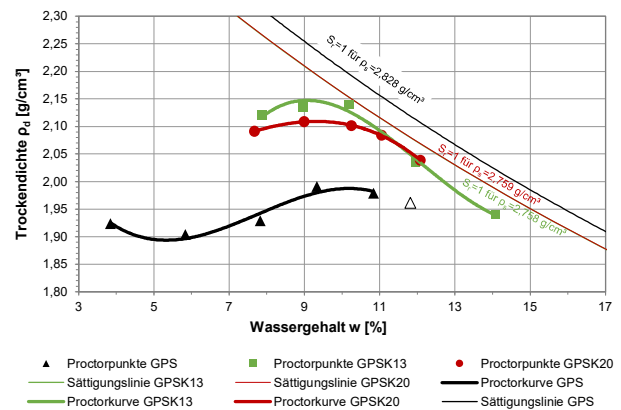


Bild 3: Proctorkurven der GPS und GPS-Kaolin Gemische

Primärer Materialanforderungsfaktor für die M T S E Bauweise E ist ein Durchlässigkeitsbeiwert von $\leq 1 \cdot 10^{-8}$ m/s, der von keiner der untersuchten Materialmischungen erzielt wurde. Ursache für diesen Umstand war, dass die beim Proctroptimum mit Standard wie auch mit modifizierter Proctorenergie verdichteten Proben zu geringe Verdichtungsgrade aufwiesen und als Folge Luftporenanteile von 4 bis 5 % (LDS) und 7,6 bis 9,9 % (GPS) zeigten, die wiederum eine Zunahme der Probendurchlässigkeit bedingten.

Als weitere wichtiger Messparameter bzgl. der Fragestellungen des Projektes wurden die ungesättigten hydraulischen Eigenschaften von den Ausgangsmaterialien LDS und GPS, wie auch zwei SWS-Kaolin und zwei GPS-Kaolin-Gemischen an Proben direkt nach Herstellung sowie hinsichtlich möglicher zeitabhängiger Veränderungen nach einer feuchten Probenlagerung von 12 Monaten untersucht. Die Bestimmung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung wurde mit einem Verdunstungsexperiment unter Verwendung von Tensiometern bis zum mittleren Feuchtebereich sowie mit einem Feuchtigkeitsmessgerät nach der Taupunktmethode (WP4C) im trockenen Bereich umgesetzt. Die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit wurde mit einem Verdunstungsexperiment nach der instationären Augenblicksprofilmethode bestimmt. Für alle

Materialvarianten zeigte sich, dass die hydraulische Leitfähigkeit bei geringen Saugspannungen (< 10 kPa) signifikant geringer ist, als im gesättigten Zustand und mit zunehmenden Saugspannungen die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit weiter abnimmt. Für die Materialmischungen LDS₉₂K₈ (s. Bild 4) und LDS₈₀K₂₀ (s. Bild 5) zeigten die Proben nach 12 Monaten Lagerung bzgl. der hydraulischen Leitfähigkeit im ungesättigten Zustand einen niedrigeren Wert als Proben, die direkt nach Herstellung getestet wurden. Dementgegen zeigten die Materialmischungen GPS₈₇K₁₃ (s. Bild 6) und GPS₈₀K₂₀ (s. Bild 7) nach 12 Monaten Probenlagerung höhere hydraulische Leitfähigkeiten als die Proben ohne Lagerung.

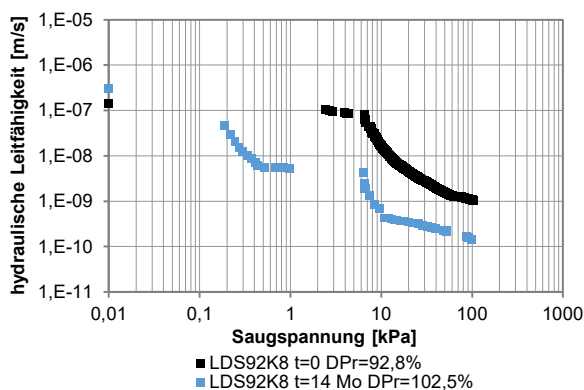


Bild 4: Ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit-Saugspannungs-Beziehung für das Gemisch LDS₉₂K₈

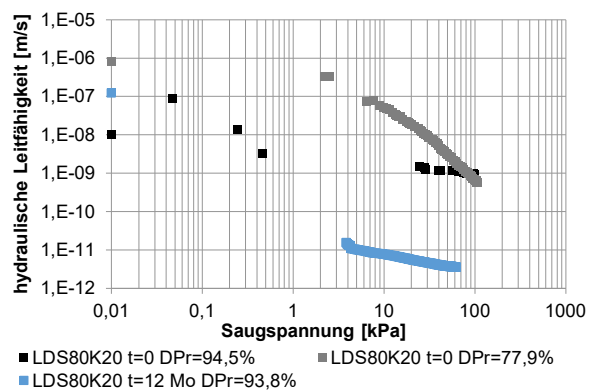


Bild 5: Ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit-Saugspannungs-Beziehung für das Gemisch LDS₈₀K₂₀

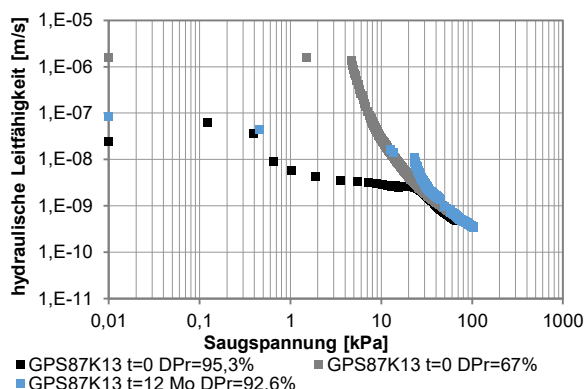


Bild 6: Ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit-Saugspannungs-Beziehung für das Gemisch GPS₈₇K₁₃

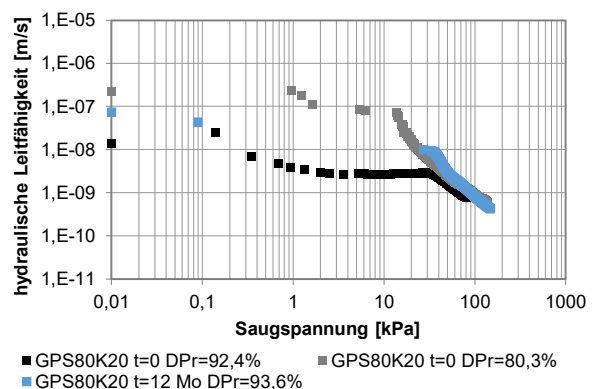


Bild 7: Ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit-Saugspannungs-Beziehung für das Gemisch GPS₈₀K₂₀

AP 2: Großmaßstäbliche Lysimeteruntersuchungen wurden an vier SWS-Kaolin-Mischungen und an den beiden Ausgangsstoffen ohne Kaolin-Zugabe in den Räumlichkeiten der Bundesanstalt für Straßenwesen durchgeführt. Die Bilderserie in Bild 8 bis Bild 12 zeigt den Aufbau der Hallenlysimeter sowie den grundsätzlichen Ablauf eines Materialeinbau für einen Lysimeterversuch.



Bild 8: Hallenlysimeter, Seitenansicht



Bild 9: Hallenlysimeter leer, Frontansicht



Bild 10: Hallenlysimeter mit Sensorik und Berechnungseinheit



a)



b)



c)

Bild 11: a) Lysimeterkasten mit Saugplatten, b) mit Quarzschluff bzw. Quarzsand eingeschlammte Saugplatten, c) Seitenwände bestrichen mit Bentonitpaste



Bild 12: Lysimeter mit eingebautem Material und Dränschicht (Kies)

Ebenso wie bei den hydraulischen Laborversuchen zeigten vor allem die granulometrisch modifizierten Gemische zu geringe Verdichtungsgrade nach dem Einbau in die Hallenlysimeter. Für die Mischungen GPS₈₇K₁₃, GPS₈₀K₂₀ und LDS₈₀K₂₀ lagen die Verdichtungsgrade bei 76%, 71% bzw. 80% und für das LDS₉₂K₈-Gemisch bei 93 %. Ursache hierfür war die schlechte Homogenisierbarkeit der Ausgangsstoffe, die dazu führte, dass die Gemische aus Schlacke, Kaolin und Wasser eine Pellet- bzw. Klumpenbildung (s. Bild 13) zeigten und sich im Hallenlysimeter nicht optimal verdichten (s. Bild 13) ließen. Dies führte zu einem sehr hohen Luftporenanteil, der wiederum zu einer hohen Durchlässigkeit im Hallenlysimeter führte und einen starken Einfluss auf die Sickerwassermengen hatte. Jedoch wurde auch bei der Verwendung der granulometrisch nicht modifizierten „reinen“ LDS trotz des hohen Verdichtungsgrades von 98 % ein Sickerwasseranteil von 77 % gemessen.



Bild 13: Pelletbildung nach der Materialanmischung und folgender Effekt auf den Einbau der Mischungen GPS₈₇K₁₃, GPS₈₀K₂₀ und LDS₈₀K₂₀

Die umwelttechnischen Analysen der Lysimeterversuche, die nahezu wöchentlich an oberflächlich abfließenden Wasserproben (Overflow) und Sickerwasserproben erfolgten, lassen darauf schließen, dass die umwelttechnischen Anforderungen unter Berücksichtigung der Grenzwerte der Ersatzbaustoffverordnung [4] größtenteils eingehalten werden. Konzentrationsanstiege von vereinzelt Messparametern im Overflow konnten dem Beregnungswasser bzw. dessen Parameterkonzentrationen zugeordnet werden. Erhöhte Chromkonzentrationen in den Lysimeterversuchen nahmen zum Ende der jeweiligen Lysimeterversuchsphasen ab und lagen letztlich ebenso im Grenzwertbereich der Ersatzbaustoffverordnung [4]. Das Laborprüfverfahren nach DIN 19529 [8] zeigte für vereinzelt Messparameter tendenziell vergleichbare Konzentrationen wie die der Sickerwasser- und Overflowproben der Lysimeterversuche mit LDS. Bzgl. der GPS-Versuche konnte kein Prüfverfahren favorisiert werden, das vergleichbare Ergebnisse zu den Hallenlysimeterergebnissen lieferte.

AP 3: Mit numerischen Berechnungen wurden die Hallenlysimeterergebnisse unter Berücksichtigung der Laborergebnisse nachmodelliert. Für die meisten Materialien konnte jedoch keine optimale Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Werten erzielt werden, da alle Berechnungen im Model eine niedrigere Sickerwassermenge als bei den Lysimeterversuchen zeigten. Beispielhaft sind die numerischen Berechnungsergebnisse im Vergleich zu den Lysimeterergebnissen für die Materialkombination LDS₈₀K₂₀ in Bild 14 dargestellt. Einen kompletten prozentualen Ergebnisvergleich der Lysimeterergebnisse mit den numerischen Modellen zeigt Bild 15.

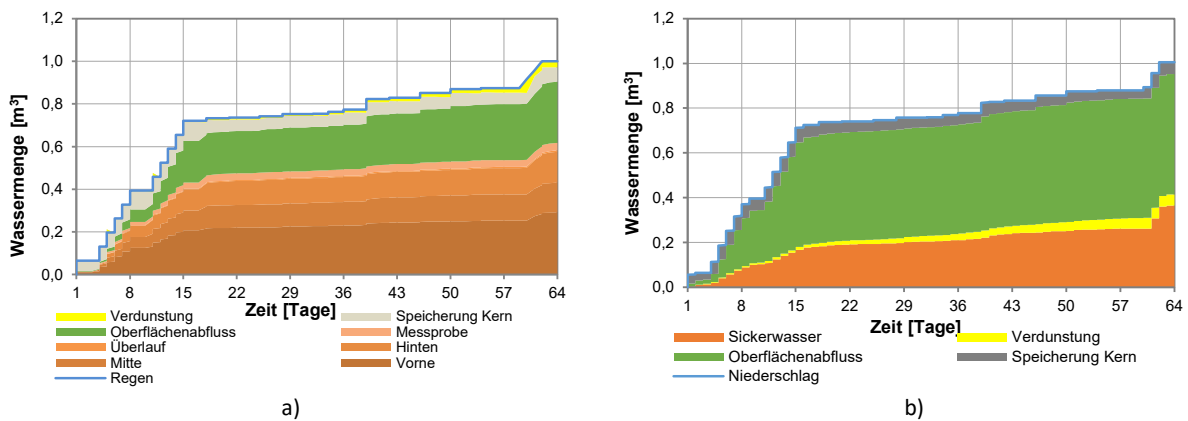


Bild 14: a) Lysimeterergebnisse LDS₈₀K₂₀, b) Numerische Berechnungsergebnisse zum Vergleich

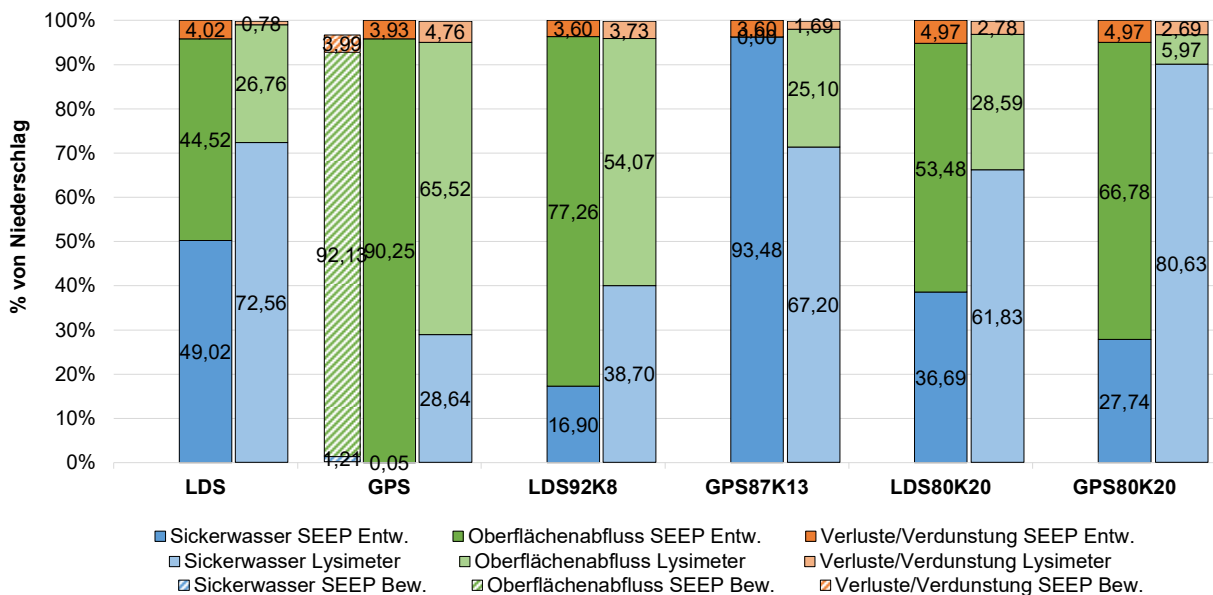


Bild 15: Prozentuale Ergebnisse der numerischen Modelle im Vergleich zu den Lysimeterversuchen

Als Ursache für die Ergebnisabweichungen ist auch hier der geringe Verdichtungsgrad vor allem bei den Lysimeterversuchen mit GPS₈₇K₁₃, LDS₈₀K₂₀ und GPS₈₀K₂₀ zu nennen, der starken Einfluss auf die hydraulische Leitfähigkeit und der Sickerwassermenge hatte.

Um die Sensitivität der Modelle bzgl. der hydraulischen Eigenschaften nachzuweisen, wurden zum Abschluss des dritten Arbeitspaketes Sensitivitätsanalysen für die Materialgemische LDS₉₂K₈ und LDS₈₀K₂₀ durchgeführt. Hier zeigte sich, dass die Sensitivität der Modelle in Bezug auf die gesättigten und ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten sehr groß ist und dabei besonders von den Durchlässigkeitseigenschaften im niedrigen Saugspannungsbereich, nahe der Sättigung, abhängen.

AP 4: Im nächsten Schritt wurden die Ergebnisse der numerischen Berechnungen (AP 3) auf reale Bauwerke übertragen und ihre Modelleignung überprüft. Als Modellvarianten wurde der Wasserhaushalt eines Straßendammes und eines Lärmschutzwalles (s. Bild 16) anhand der Vorgaben der Bauweise E nach MTS E-Merkblatt für die Kernmaterialien LDS und LDS₈₀K₂₀ betrachtet.

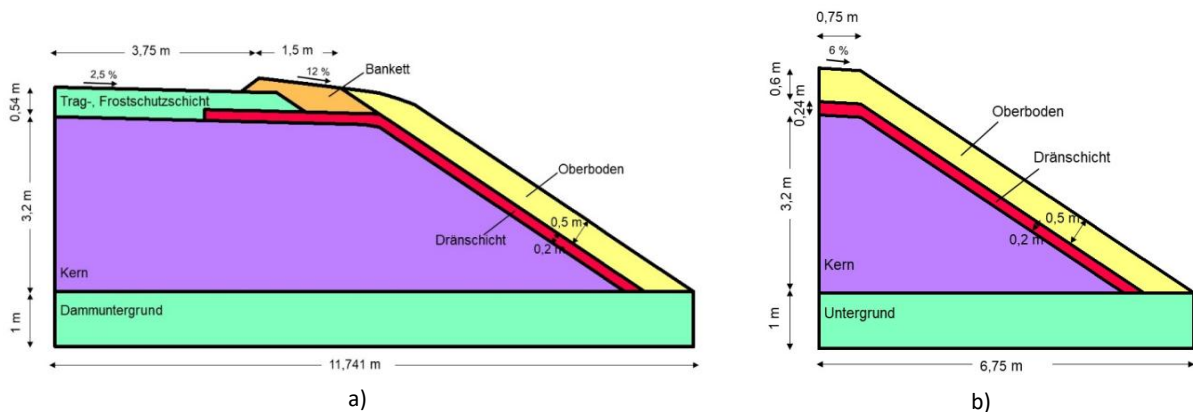


Bild 16: a) Modellgeometrie des Straßendammes, b) Modellgeometrie des Lärmschutzwalles

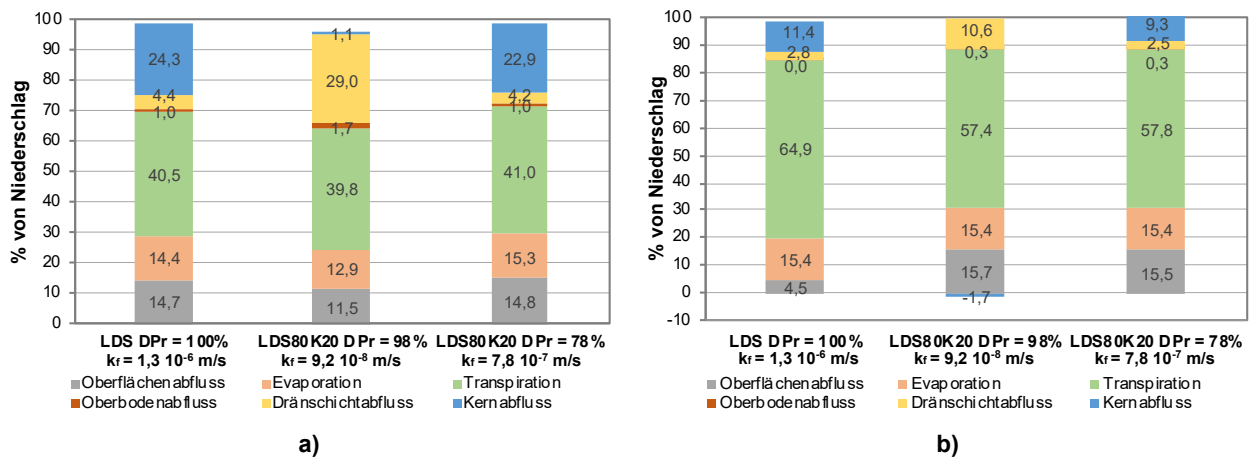


Bild 17: Vergleich der Modelle mit unterschiedlichen Kernmaterialien. a) Straßendamm, b) Lärmschutzwall

Aus dem Vergleich der durchgeführten Modelle mit einem Straßendamm wurde deutlich, dass die Sickerwassermengen (Kernabfluss) der LDS mit D_{Pr} = 100 % und LDS₈₀K₂₀ mit D_{Pr} = 78 % in einer ähnlichen Größenordnung von ca. 24 % (bezogen auf den Niederschlag) liegen, während sich bei der LDS₈₀K₂₀ mit D_{Pr} = 98% eine deutlich geringere Sickerwassermenge von ca.

1 % ergab, wobei die Berechnungen nur für die Straßendammseite durchgeführt wurden und infolge des Straßenabflusses mit einer höheren Sickerwassermenge zu rechnen ist. Für den gesamten Straßendamm würden sich deshalb geringere Sickerwassermengen ergeben.

Für die Modellvariante Lärmschutzwall wurde zu Beginn eine ungewöhnlich hohe Transpiration festgestellt, weshalb die wichtigsten Einflussfaktoren auf die an der Bodenoberfläche stattfindenden Prozesse durch Sensitivitätsanalysen herausgearbeitet wurden. Basierend auf diesen Analysen wurde für die weiteren Berechnungen des Lärmschuttwalls eine Kappung der hydraulischen Leitfähigkeit des Oberbodens bei einem Wert von $1 \cdot 10^{-10}$ m/s, eine Wurzeltiefe von 10 cm und der volumetrische Wassergehalt bei voller Sättigung θ_s des Oberbodens bei 28 % angesetzt, um sicherzustellen, dass die Transpiration bei der Modellrechnung nicht überschätzt wird. Die damit generierten Modelle im Vergleich zu den Sickerwassermengen der Materialien LDS mit $D_{Pr} = 100\%$ und LDS_{80K20} mit $D_{Pr} = 78\%$ lagen in einer ähnlichen Größenordnung von ca. 24 % (bezogen auf den Niederschlag), während sich für das Material LDS_{80K20} mit $D_{Pr} = 98\%$ eine deutlich geringere Sickerwassermenge von ca. 1 % ergab.

Fazit und Ausblick:

Im Rahmen des Vorgängervorhabens AiF 18746 N [5] wurde auf Laborebene für einige untersuchte Materialkombinationen der Nachweis erbracht, dass eine durch Feinkornanreicherung granulometrische Modifikation von industriellen Baustoffgemischen dazu führt, dass diese den Anforderungen des M T S E - Merkblattes entsprechen können. Auf Basis dieses Nachweises, sollte das vorliegende Anschlussvorhaben zeigen, dass industrielle Sekundärrohstoffen ihre Eignung für die M T S E Bauweise E auch im großmaßstäblichen Technikumsmaßstab nachweisen können.

Durch Hallenlysimeterversuche, sowie durch numerische Berechnungen und Übertragung der numerischen Berechnungen auf reale Bauwerke (Straßendamm und Lärmschutzwall) zeigte sich, dass die Ergebnisse, hier speziell die der Sickerwassermengen, sowohl während der Laborversuche, als auch vor allem die der Hallenlysimeter hauptsächlich vom erzielbaren Verdichtungsgrad beeinflusst wurden. Wobei dieser Punkt maßgeblich und kontraproduktiv durch die schlechte Mischbarkeit der Komponenten Schlacke, Kaolin und Wasser bedingt war. Als Folge zeigte sich, dass granulometrisch modifizierte Stahlwerksschlacken die nur auf einen Verdichtungsgrad von ca. 80 % verdichtet werden konnten, Sickerwassermengen aufweisen, die granulometrisch nicht optimierten Stahlwerksschlacken entsprechen. Dieses primäre Ergebnis ist jedoch in Anbetracht der Tatsache, dass eine Feinkornanreicherung die Durchlässigkeit stark senken sollte, nicht zielführend. Dies wird auch nicht von den Folgerungen des Vorgängerprojektes gestützt und wirft die Frage auf, wie die drei Komponenten Schlacke, Kaolin und Wasser optimal gemischt werden können, ohne dass diese verklumpen bzw. eine Pelletbildung zeigen und dies maßgeblich die Einbauqualität beeinflusst.

Obwohl das Forschungsvorhaben nur bedingte Ergebnisse lieferte, die den Eignungsnachweis granulometrisch modifizierter Stahlwerksschlacken für die M T S E - Bauweise auch auf Basis von Hallenlysimeterversuchen ergänzend darlegen, konnte aufgezeigt werden, wie sich der Fragestellungen optimal gewidmet werden kann. Der Umstand der schlechten Mischbarkeit der Ausgangskomponenten bedarf weiterführender Untersuchungen, die nicht nur technische, sondern auch physikalische Aspekte der Mischbarkeit von Baumaterialien beinhalten sollten. Die Beantwortung dieser Frage wird als wichtig und notwendig eingestuft, da zukünftig die Ressourcen- und Umweltschonung einen immer größeren Stellenwert einnehmen wird und Eisenhüttenschlacken in der M T S E-Bauweise einen Beitrag zu diesem Ziel beitragen können.

Kontakt:

FEhS-Institut: D. Demond, M. Sc. d.demond@fehs.de
TU München: Dr.-Ing. Emanuel Birle emanuel.birle@tum.de

Danksagung:

Das IGF-Vorhaben Nr. 20539 N des FEhS-Instituts für Baustoff-Forschung e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Autoren danken für diese Unterstützung.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Literatur:

- [1] FGSV (Hrsg.): Merkblatt über Bauweisen für Technische Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau - M T S E, Ausgabe 2017
- [2] Merkel, T.: Erzeugung und Nutzung von Eisenhüttenschlacken in Deutschland und Europa 2017. Report des FEhS-Instituts 25 Nr. 1, 2018, S. 34 - 35
- [3] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau- und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II – Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Berlin, 2016
- [4] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung, 09. Juli 2021
- [5] Bialucha, R; Demond, D; Birle, E; Barka; E: Nachhaltige Baustoffverwendung im Erdbau – Einsatz von Eisenhüttenschlacken bei Erdbauwerken mit technischen Sicherungsmaßnahmen, AiF 18746 N, Abschlussbericht, 2018
- [6] FGSV (Hrsg.): Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau – TP Gestein-StB, Teil 7.1.1: Schüttelverfahren (L/S = 10:1), Ausgabe 2016
- [7] DIN 19528:2009-01: Elution von Feststoffen – Perkolationsverfahren zur gemeinsamen Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen und organischen Stoffen
- [8] 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
- [9] DIN 18127:2012-09: Baugrund - Untersuchung von Bodenproben - Proctorversuch