



AiF Projekt GmbH
ZIM – Kooperationsprojekte
Tschaikowskistraße 49
13156 Berlin

Verwendungsnachweis, Teil Sachbericht

Kurzbezeichnung des Gesamtprojekts (max. 250 Zeichen)

Entwicklung von vorkonfektionierten Trockenmörtelsystemen auf der Basis von industriellen Reststoffen zur Stabilisierung problematischer Böden

Hinweis: Gemäß ZIM-Richtlinie Nr. 2.2 können kleine und mittlere Unternehmen (KMU) Leistungen externer Dritter zur Markteinführung der Ergebnisse des ZIM-geförderten FuE-Projekts in einem Kostenrahmen bis zu 50.000 € zur Förderung beantragen. Ein entsprechender Antrag wäre bis spätestens 6 Monate nach Laufzeitende des geförderten FuE-Projektes einzureichen. Informationen dazu unter: zim.de/ZIM/Redaktion/DE/Artikel/markteinfuehrung.html

Zuwendungsempfänger

Zuwendungsempfänger Förderkennzeichen / Laufzeit	Name(n) der/des Unterzeichner/s	rechtsverbindliche Unter- schrift(en) des/der Vertretungsbefugten Datum 24.10.2018
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center; margin-bottom: 10px;">K-UTEC AG Salt Technologies</div> <p>FKZ: ZF 4041701HF5 Laufzeit: vom 01.11.2015 bis 30.09.2018</p>	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">Dr. H. Marx</div> <div style="border: 1px solid black; height: 20px; margin-bottom: 5px;"></div> <div style="border: 1px solid black; height: 20px;"></div>	<div style="text-align: center; font-size: 1.5em; font-family: cursive;"> </div> <div style="border: 1px solid black; height: 20px; margin-top: 5px;"></div>

Prüfvermerk Projektträger

Sachlich richtig

.....

Datum / Unterschrift des PT- Mitarbeiters





Auftragnehmende FuE-Partner

Auftragnehmer 1
<input type="radio"/> Unternehmen <input type="radio"/> Forschungseinrichtung
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;">nicht zutreffend</div>





1. Zusammenfassung des Projekts (max. 1.200 Zeichen)

Bei vielen Baumaßnahmen, insbesondere im Straßen- und Tiefbau, existieren problematische Böden, die mehr oder weniger tragfähig sind oder ein deutlich bis stark ausgeprägtes Quell- und Schrumpfverhalten besitzen oder organogene Bestandteile enthalten und damit für Straßenbaumaßnahmen nur wenig oder bedingt geeignet sind.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung von Trockenmörtelsystemen zur Verbesserung der bodenmechanischen Eigenschaften von organischen und weichen Böden. Um die zu entwickelnden Trockenmörtelsysteme nachhaltig und effizient im Erdbau einsetzen zu können, müssten die technischen Voraussetzungen in der Anwendung der Materialien durch die Kenntnis der Eignung jeweiliger Böden geschaffen werden.

Innerhalb der Projektlaufzeit sind verschiedene Reststoffe, wie z.B. Gesteinsmehle und Salze, auf ihre Eignung als Bestandteil der Trockenmörtelsysteme beim Einsatz in repräsentativen Böden untersucht worden. Hierbei konnte auf das umfangreiche Wissen der Projektpartner hinsichtlich der Anwendung von Materialien in der Bodenstabilisierung und -verbesserung zurückgegriffen werden.

2. Arbeitspakete gemäß Anlage 5 des Antrags (Antragsteller)

- Die Arbeitspakete wurden wie geplant bearbeitet
- Die Arbeitspakete wurden nicht wie geplant bearbeitet

2.1 Arbeitspakete gemäß Anlage 6.3b) des Antrages (auftragnehmende FuE-Partner)

Auftragnehmer Nr. 1

- Die Arbeitspakete wurden wie geplant bearbeitet
- Die Arbeitspakete wurden nicht wie geplant bearbeitet





3. Ergebnisse des Projekts einschließlich eines Vergleichs der angestrebten und erreichten technischen Parameter

mit Bezug auf Meilensteine, technische Zielstellung, Begründung für Nichterreichung
(max 50.000 Zeichen - entspricht ca. 10 Seiten)

- Bilder/Grafiken sind beigelegt
(optional)
- folgende weitere Dokumente sind beigelegt:
(optional)

weitere Dokumente

Anhang 1 und 2

In einem ersten Schritt des Projektes wurde eine Analyse der Einflussfaktoren und Wirkmechanismen der verschiedenen Stabilisierungsmethoden auf die zu behandelten Böden recherchiert und die Geltung dieser Verfahrensweisen auf das innovative Stabilisierungssystem abgebildet. Um das Ziel des Projektes zu erreichen, war die Prüfung und Erstellung der Anforderungen an die verwertbaren Zusätze, die einzusetzenden Stabilisierungsmaterialien und das Einbauverfahren notwendig.

Für die Entscheidung, welches Bodenhandlungsverfahren und welches Stabilisierungsmittel eingesetzt wird, ist vorrangig das Ziel der Bodenbehandlung zu klären und der anliegende Boden zu klassifizieren. Die genaue Anwendung und Prüfungen der Bodenstabilisierung sind in verschiedenen Normungen geregelt.

Durch Bodenbehandlungen werden die geeigneten Böden so verändert, dass die Bodenwiderstandsfähigkeit gegenüber Verkehrsbelastungen und Klimaeinflüssen erhöht wird und so der Boden tragfähig und frostbeständig wird (Bodenverfestigung) bzw. die Verdichtbarkeit und somit die Einbaufähigkeit der Böden wesentlich verbessert werden (Bodenverbesserung).

Bodenbehandlungen können als Mixed-in-Plant- oder als Mixed-in-Place-Verfahren durchgeführt werden, dabei wird zum einen das Bodenmaterial entnommen und in einer zentralen Mischanlage mit den Stabilisierungsmitteln gemischt oder zum anderen das Bindemittel auf den zu behandelten Bodenbereich aufgetragen und mit dem Boden vor Ort eingefräst und vermischt. Das Mixed-in-Plant-Verfahren stellt dabei ein Sonderverfahren dar, da es sehr unwirtschaftlich ist und nur in besonderen Anwendungsfällen zum Einsatz kommt.

Das Auftragen und das gleichmäßige Verteilen der Bindemittel erfolgt im Mixed-in-Place-Verfahren mittels selbstfahrender oder gezogener Streuer (siehe Anhang 1, Bild 2 - 4). Hierbei wird das Stabilisierungsmittel je nach erforderlicher Bindemittelmenge über das Streuwerk gleichmäßig über den Boden verteilt. Das vorgestreute Material wird danach mittels Bodenstabilisierfräse mit dem Boden gemischt und homogenisiert. Der Boden kann dabei bis zu 50 cm Tiefe stabilisiert werden (siehe Anhang 1, Bild 1, 5 - 6). Bei bestimmten Bodenbedingungen und Anforderungen an die Stabilisierung sind mehrere Fräsübergänge notwendig.

Die Auswahl der Bindemittel erfolgt je nach Ziel der Bodenstabilisierung, des mineralogischen und bodenmechanischen Bodencharakters.

Die Eignung der Böden und der jeweils einzusetzenden Bindemitteln für Verfestigungen





und Verbesserungen beruhen auf Erfahrungswerte und sind tabellarisch u. a. in den Richtlinie „FGSV-Merkblatt über Bodenverfestigungen und Bodenverbesserungen mit Bindemitteln“ dargestellt (siehe Anhang 1, Tabelle 1 - 2).

Um die Stabilisierung bei schwierigen Bedingungen zuzüglich zu beeinflussen, wurden bisher unterschiedlichste Zusatzstoffe, Abbindebeschleuniger und andere Zusätze oder Reststoffe beigemischt.

Im Rahmen der Patentanalyse wurden hierzu aus über 1.100 Patenten ca. 100 Patente aus dem Bereich Zusätze/Abbindebeschleuniger ausgewertet.

Neben diversen Aschen, Stäuben, Mehlen, Schlacken und Hüttensande werden Polyelektrolyte, Silikatglas, anorganische Geliermittel, Epoxidharzester, Schichtsilikate, wasserlösliche Salze sowie als Abbindebeschleuniger verschiedene Aluminate, Sulfate, Lithium- und Aluminiumsalze, Karbonate, Kalziumformiat, Alkanolamine und Phosphate in den Patenten als patentierter Zusatz aufgelistet. Unter heutigen Umweltstandards ist jedoch festzustellen, dass ein Einsatz der meisten dieser Stoffe problematisch ist. Deshalb wird der Einsatz von mineralischen Gesteinsmehlen und Reststoffen bzw. natürlichen Zusätzen ausschließlich betrachtet.

Basierend auf den Ergebnissen der Analysen wurde eine Anforderungsmatrix erstellt, aus der folgende Anforderungen an die System-/Anwendungspunkte gestellt werden:

- Anforderungen an Verfahren und Technik:
- Anforderungen Material/Abbindebeschleuniger/Zusätze
- Anforderungen Boden
- Anforderungen Endnutzer

Im Anschluss an den Vorarbeiten wurden in Zusammenarbeit der Projektpartner mögliche Zusätze und Reststoffe auf eine Anwendbarkeit charakterisiert und ausgewählt. Auf Grundlage einer Beschreibung in Publikationen und dem Anfall der Stoffe bei den Projektpartnern sind Gesteinsmehle (Diabasmehl, Kalksteinmehl) und Salze (Grobsalz (Natriumchlorid), Staubsalz) sowie Bypass-Staub als mögliche Zusätze ausgewählt worden (siehe Anhang 1, Bild 7 - 11):

Die Gesteinsmehle, wie z. B. Kalksteinmehl, werden aufgrund ihrer Partikelgröße u.a. als Füller im Straßenbau eingesetzt. Durch die Struktur des basischen Diabasmehls können neben der Wasserbindung z. T. auch Schadstoffen (z. B. Phenole) immobilisiert werden.

Bypass-Staub, der bei der Zementproduktion als Abfall anfällt, wird dosiert dem Zement zugesetzt oder kommt z. B. im Bergversatz zum Einsatz, solange der Gehalt an Schwermetallen und anderen Gefahrstoffen nicht zu hoch ist. Derzeit wird er bereits als Zusatzstoff mit beschleunigender Wirkung eingesetzt.

Das Grobsalz ähnelt einem Streusalz, erfüllt jedoch aufgrund des zu niedrigen NaCl-Gehaltes nicht die Anforderungen der TL Streu.





Des Weiteren wurden von den Partnern verschiedene Böden aus dem Bereich der Münchberger-Helmbrechtser Hochfläche (siehe Anhang 1, Bild 12) und der Region um Erlbach-Kirchberg in Sachsen (siehe Anhang 1, Bild 13) beschafft.

Das ausgewählte Bindemittel Bodenstab50, bestehend aus Weißfeinkalk und Zement, in einem Mischungsverhältnis von 50:50 und wurde mit dem „Boden 1“ in unterschiedlichen Prozentanteilen gemischt. Mit jeder dieser Mischungen wurden einaxial Druckfestigkeitsversuche nach 7, 28 und 56 Tagen durchgeführt. Alle Proben wurden mit einem optimalem Feuchtegehalt sowie maximaler Trockendichte hergestellt und anschließend bei 98 % relativer Luftfeuchte und 22 °C bis zum Prüfzeitpunkt gelagert. Bild 14 in Anlage 1 zeigt die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung bei verschiedenen Mischungsverhältnissen von Boden1 und Bodenstab50 nach 7, 28 und 56 Tagen. Je höher die Menge an Bodenstab50 ist, desto höher ist die Druckfestigkeit. Dabei ist die Festigkeitszunahme bis zum 28. Tag höher als in der Folge bis zum 56. Tag (siehe Anhang 1, Bild 15). Die Mischung mit einem Gehalt von 7 M.-% Bodenstab50 und einer Aushärtezeit von 28 Tagen erreicht eine Druckfestigkeit von 1726 kPA. Bei der Mischung mit der doppelten (14 M.-%) Menge an Bodenstab50 wird diese Festigkeit bereits nach sieben Tagen erreicht. Dies bedeutet, dass durch einen höheren Bindemittelgehalt die gleiche Festigkeit in kürzerer Zeit erreicht wird. Ziel des Projekts ist es die Kosten zu senken, indem die gleichen mechanischen Eigenschaften in kürzerer Zeit erreicht werden. Um das Ziel zu erreichen, wird die Anwendung von Salz als Beschleuniger untersucht, um dadurch die Festigkeit von problematischen Böden zu erhöhen.

Um die Wirkung des Salzes als Beschleuniger mit unterschiedlichen prozentualen Beimengungen zu untersuchen, wurden verschiedene Mischung aus Boden und Bodenstab50 in unterschiedlichen Mischungsverhältnissen eingebracht und nach 7 sowie 28 Tagen verschiedene Prüfkriterien ermittelt. Das in diesen Mischungen verwendete Salz war grobes NaCl-Salz. Das Salz wurde zuerst in destilliertem Wasser gelöst, bevor es mit einer trockenen Mischung aus Boden und Bodenstab50 gemischt wurde. Alle Proben wurden bei optimalem Wassergehalt und der zugehörigen Proctordichte hergestellt. Die Bilder 16...19 in Anlage 1 zeigen die Ergebnisse der einaxialen Druckfestigkeitstests der Boden-Bodenstab50-Mischung mit 0,25 M.-%, 0,5 M.-%, 1 M.-% und 1,5 M.-% Salz. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass das eingesetzte Salz die Festigkeit des stabilisierten Bodens erhöht und die Festigkeitsentwicklung beschleunigt.

Die Festigkeit, die mit 14 M.-% Bodenstab50 in 7 Tagen ohne Zugabe von Salz ermittelt wurde, wird mit 7 M.-% Bodenstab50 und 0,5 M.-% NaCl in der gleichen Aushärtezeit erreicht (Anhang 1, Bild 17). In diesem Fall kann der Zementgehalt demnach um 50 % reduziert werden, um die gleiche Festigkeit zu erreichen. Dadurch werden die Kosten für die Stabilisierung von Böden minimiert. Aus den Bildern 20 und 21 im Anhang 1 wird ersichtlich, dass bei Zugabemengen an Salz von 0,5 M.-% und 1,0 M.-% bessere Ergebnisse erzielt werden als bei 0,25 M.-% und 1,5 M.-%. Aus den gleichen Abbildungen geht auch hervor, dass bei höheren Bodenstab50-Gehalten (7 M.-%, 10 M.-%) ein verbesserter Wirkungsgrad des Salzes erzielt wird gegenüber Niedrigeren. Die Festigkeitssteigerung wird hauptsächlich durch puzzolanische Reaktionen zwischen Calcium mit Siliciumdioxid und Aluminiumoxid in der amorphen Phase erreicht. Nach Saldanha et al. (2016) korreliert die Erhöhung der Druckfestigkeit mit der Bildung von





Sekundärbindungen innerhalb der Natrium-Calcium-Silicat-Hydrat Verbindung, die bei der Wechselwirkung zwischen Boden-1, Kalk (Bodenstab50) und Elementen im Salz entstehen. Die Bilder Abbildungen 22 und 23 in Anhang 1 zeigen die Ergebnisse der Moduln der einaxialen Druckfestigkeit von Boden1+Bodenstab mit unterschiedlichen NaCl-Gehalten nach 7 und 28 Tagen. Die Verbesserung der Steifigkeit ist in beiden Fällen unter Zugabe von Salz deutlich zu erkennen. Ein höherer Salzgehalt (1,5 M.-%) reduziert jedoch die Steifigkeit sowohl bei der 7- als auch bei der 28-tägigen Aushärtung.

Boden 2 und Boden 3 wurden ebenfalls mit Bodenstab50 in unterschiedlichen Verhältnissen und mit 0,5 M.-% und 1,0 M.-% grobem NaCl Salz gemischt, da diese Salzgehalte nach den ersten Versuchen als effektivste herauskristallisiert haben. Die Bilder 24 und 25 in Anhang 1 zeigen die Ergebnisse des einaxialen Druckfestigkeitstests von Boden-2 und Boden-3 mit Bodenstab50 und NaCl Salz für unterschiedliche Aushärtezeiten. In beiden Abbildungen ist ersichtlich, dass das Salz die Festigkeit der Boden-Zement-Mischung sehr effektiv verbessert und beschleunigt. Die Festigkeit, die mit Boden-Bodenstab50-Salz in 7 Tagen erreicht wurde, ist vergleichbar mit der, die mit Boden+Bodenstab50 nach 28 Tagen erreicht wird. Zum Beispiel beträgt die Festigkeit, die nach 7 Tagen mit Boden 2 + 5 M.-% Bodenstab + 1 M.-% NaCl erreicht wurde, 740 kPa, was der Festigkeit der gleichen Mischung ohne Salz nach 28 Tagen entspricht (d. H. 765 kPa). Diese Ergebnisse zeigen auch die Bedeutung der Nutzung von Salz zur Verbesserung der Festigkeit von stabilisierten Böden. Die Bilder 26 und 27 in Anhang 1 zeigen die Ergebnisse der Moduln der einaxialen Druckfestigkeit von Boden 2 und Boden 3 mit Bodenstab50 und NaCl Salz nach 7 und 28 Tagen. Die Steifigkeit beider Böden (Boden1 und Boden2) steigt mit der Zugabe von Salz (NaCl).

Das ausgewählte Gesteinsmaterial "Diabasmehl" wurde ebenfalls in diesem Projekt als Zusatz verwendet, da es in Deutschland in entsprechenden Mengen vorhanden ist und derzeit als Abfallmaterial behandelt wird. Es wurde in unterschiedlichen Anteilen mit Boden-1 und 7 M.-% Bodenstab50 mit und ohne Salz gemischt. Dabei sind drei verschiedene Anteile an Diabasmehl mit Boden und Bodenstab50 vermischt worden. Die Ergebnisse der einaxialen Druckfestigkeitsversuche sind in Bild 28 im Anhang 1 dargestellt. Anhand dieser Ergebnisse wird festgestellt, dass die Druckfestigkeit von Boden-Bodenstab50-DM-Mischungen in Abhängigkeit vom DM-Gehalt zunimmt. Es übersteigt jedoch nicht die Festigkeit, die mit einer Mischung mit 7 M.-% Bodenstab50 und 0,5 M.-% Salz erzielt wurde. Die Mischung mit dem größten Anteil an Diabasmehl (Boden + 1,7 M.-% Bodenstab50 + 8 M.-% Diabasmehl + 0,5 M.-% Natriumchlorid, 7d) mit einer Druckfestigkeit von 1337 kPa erreicht nicht den Wert der gleichen Mischung (Boden 1 + 7 M.-% Bodenstab50 + 0,5 M.-% Natriumchlorid, 7d) ohne Diabasmehl (1531 kPa).

Das in diesem Projekt verwendete Material „Bypass-Staub“, fällt bei der Zementherstellung als Abfallstoff an. Für die Untersuchungen wurden drei verschiedene Anteile an Bypass-Staub (5 M.-%, 10 M.-% und 15 M.-%) anvisiert, welche mit Boden1 und Bodenstab50 sowie mit und ohne groben NaCl Salz gemischt wurde. Bei den Versuchen ist der Anteil an Bodenstab50 (5 M.-%) konstant gehalten worden. Die Ergebnisse der uneingeschränkten Druckfestigkeitsversuche sind in den Bilder 29 und im Anhang 1 dargestellt. Anfänglich kann eine sehr allmähliche Verbesserung der Festigkeit bei der Zugabe von Bypass-Staub festgestellt werden, sobald der Gehalt an Bypass-Staub signifikant erhöht wird, ist auch die Entwicklung der Festigkeit höher. Dies bedeutet, dass der Bypass-Staub als Ersatz für





Zement verwendet werden kann und damit einen Einsparungsfaktor darstellt.

Neben grobem NaCl-Salz wurden auch weitere verschiedene Salze, wie CaCl_2 , KCl und MgCl_2 in unterschiedlichen Verhältnissen mit Boden-1 und Boden-2 gemischt. Dabei wurde beim Boden-1 ein Gehalt an Bodenstab50 von 5 M.-% und beim Boden-2 von 5 M.-% und 7 M.-% eingesetzt. Als Salzgehalte wurden 0,5 M.-%, 1 M.-% und 2 M.-% ausgewählt. Bild 31 im Anhang 1 zeigt die Ergebnisse der Druckfestigkeitsversuche von Boden1 nach 28 Tagen und die Bilder 32...35 im Anhang 1 zeigen die Ergebnisse von Boden2 mit 5 M.-% bzw. 7 M.-% Bodenstab50 und verschiedenen Salzen nach 7 und 28 Tagen. Die Auswertungen zeigen keinen ausgeprägten Unterschied zwischen den Salzen hinsichtlich ihres Einflusses auf die Festigkeitsentwicklung.

Für Erstellung erster Materialrezepturen, deren bodenmechanischen und chemischen Bewertung, wurden die vorliegenden Bodenmaterialien und die einzusetzenden Zusatzkomponenten analysiert und charakterisiert.

Weiterhin wurden die Bodenmaterialien durch Mineralphasen- und thermischer Analyse beschrieben. Im Ergebnis der Sieb- (siehe Anhang 1, Bild 36) sowie der Sedimentationsanalyse (siehe Anhang 1, Bild 37) wurde festgestellt, dass die aus verschiedenen Regionen vorkommenden Materialien im annähernd gleichen Körnungsbereich liegen und als Boden der Bodengruppe SW (weitgestuftes Sand-Kies-Gemisch) klassifiziert. Die Böden sind somit in die Kategorie der mit Zement und Mischbinder zu stabilisierenden Böden einzustufen.

Hinsichtlich der zu verwendeten Reststoffe wurden die Materialien Bypass-Staub, NaCl-Grobsalz und Staubsalz analysiert. Die physikalische Parameter sowie die wichtigsten Bestandteile sind in Tabelle 3 im Anhang 1 zusammengestellt. Der Bypass-Staub und das Staubsalz haben eine ähnliche Korngrößenverteilung. Die beiden Salzproben haben annähernd die gleiche Reindichte. Beide bestehen hauptsächlich aus NaCl (rund 93 bis 95 %) sowie Calciumsulfat, Calciumchlorid und Magnesiumchlorid. Der Bypass-Staub ist aus Freikalk (51,5 %), Kalium- und Calciumsulfat, Kaliumchlorid, Aluminium- und Eisenoxiden sowie Siliziumdioxid bzw. Silikaten aufgebaut.

Des Weiteren wurden die Gesteinsmehle (Diabas-, Kalksteinmehl) materialtechnisch analysiert. Hierzu wurden u. a. die Korngrößenverteilung (Partikelgrößenanalyse) und die mineralische Analyse durchgeführt (siehe Anhang 1 Bild 38).

In einem Mischplan wurden verschiedene Mischzusammensetzungen unter Berücksichtigung der verschiedenen Zusatzstoffen (Gesteinsmehle, Salze) und unterschiedlicher Mengenanteile und entsprechenden Vergleichsmischungen mit Standard-Mischbinder zusammengestellt (siehe Anhang 1 - Tabelle 4 (Auszug)).

Um die Wirkung der Zusätze auf die Stabilisierung einzelner Böden zu dokumentieren, wurden für die Herstellung der verschiedenen stabilisierenden Boden-Mischbinder-Zusatz-Gemische mehrere Böden durch die Projektpartner beschafft. Für die ersten Untersuchungen wurde ein Boden1 aus der Gegend der Münchberger-Helmbrechtser Hochfläche durch die Beyer Baustoffe GmbH geliefert. Ein weiteres „rotliegendes“ Bodenmaterial 2 stammt aus dem vogtländischen Gebiet (Erlbach-Kirchberg) und durch die Meier Bodenstabilisierung GmbH beschafft (siehe Anlage 1 Bilder 12...13). Diese





Bodenmaterialien wurden hinsichtlich Kornzusammensetzung und mineralogischer Zusammensetzung untersucht. Die Bodenuntersuchungen ergaben, dass diese Böden trotz der unterschiedlichen Herkunft relativ gleiche Eigenschaften aufweisen. Die Korngrößen verteilen sich lt. Sedimentationsanalyse (siehe Anhang 1, Bild 37) über annähernd gleiche Verteilungslinien. Bei den physikalischen Parametern war z. T. ein unterschiedliches Eigenschaftsbild vorhanden. So war der natürliche Wassergehalt bei Boden 1 nur halb so hoch wie bei Boden 2. Ebenfalls waren die Plastizitätseigenschaften unterschiedlich. Boden 2 hat einen wesentlich höheren Wert der Fließgrenze und Plastizitätszahl. Korndichte, optimaler Wassergehalt und Proctordichte waren annähernd gleich groß (siehe Anhang 1, Tabelle 5), was sich bei der Verdichtbarkeit der Böden widerspiegelt. Nach Klassifizierung in die Bodengruppen ist Boden 1 ein Sand-Schluff/Sand-Ton-Gemisch SU-ST und Boden 2 ein mittelplastischer Schluff UM.

Ebenso sind lt. durchgeführter XRD-Analyse die Anteile der Nichttonminerale mit 70 bzw. 69 % und die der Tonminerale mit 30 bzw. 31 % gleich (siehe Anhang 1, Tabelle 6...7; Bilder 39...42). Die Tabelle 8 im Anhang 1 zeigt die Ergebnisse der Bestimmung der chemischen Elemente und bestätigte die Untersuchungen am IAB.

Mit diesen beiden Böden wurden in den ersten Versuchsreihen im Labor entsprechende Bodenmischungen und geprüft. Die Scherparameter des Bodens Bo1 waren bei Kohäsion um 1/3 höher als bei Boden 2, die Reibungswinkel relativ gleichwertig (siehe Anhang 1, Tabelle 9). Die Scherspannungen des Materials 1 waren entsprechend größer (siehe Anhang 1, Bild 43). Beim Kompressionsvermögen (Steifemodul) waren die Ergebnisse der ungesättigten Bodenproben annähernd gleich. Die Verdichtbarkeit der gesättigten Proben ist aber unterschiedlich (siehe Anhang 1, Bild 44).

In ersten Untersuchungen wurden diese Böden mit den BodenStab-Gemisch Mischbinder MB50 in unterschiedlichen Anteilen von 3 M.-%, 5 M.-%, 7 M.-%, 9 M.-%, 10 M.-%, und 14 M.-% vermischt und auf einaxiale Durchfestigkeit nach 7, 28 bzw. 56 Tagen geprüft sowie die jeweilige Proctordichte mit dem optimalen Wassergehalt bestimmt. Diese „0-Serie“ ist notwendig, um einen Vergleich des mit Mischbinder (in verschiedenen Anteilen) stabilisierten Bodenmaterials und den Boden-MB-Zusatz-Mischungen zu bekommen und so verfestigende Effekte der Zusätze zu erfassen oder auch negativ zu bewerten.

Vergleichend in den Ergebnissen konnte festgestellt werden, dass mit Erhöhung des Anteils des entwickelten Mischbinders MB50 die einaxiale Druckfestigkeit der Mischproben mit Boden 1 sukzessive steigt. Man erreicht eine gleichmäßige Festigkeitssteigerung. Die Ergebnisse wurden durch die Projektpartner jeweils bestätigt (siehe Anhang 1, Bilder 45 - 46). Die gemessenen Festigkeiten der Mischungen mit Boden 3 und Mischbinder MB50 waren um ein vielfaches geringer. Dadurch wird deutlich, dass die Stabilisierungseffekte des entwickelten Mischbinders MB50 je nach Bodenart stark voneinander abweichen. Der Mischbinder kann somit verfestigend auf den Boden wirken. Bei anderen Bodenstrukturen sind die Effekte nicht festzustellen.

Die Werte der Druckfestigkeit wurden mit zunehmendem Anteil des Mischbinders und mit der Aushärtezeit größer. Die größte Erhöhung der Festigkeiten ist dabei in den ersten 28 Tagen zu verzeichnen. Die Werte der 56 Tage-Festigkeit erhöhen sich im Vergleich zu den 28 Tage-Festigkeiten nur noch gering. Die 28-Tage-Festigkeiten sind etwa doppelt so hoch wie die 7-Tage-Werte (siehe Anlage 1, Bild 46). Ein weiteres Ergebnis ist die





Feststellung, dass mit höherem Mischbinderanteil sich die Festigkeiten auch erhöhen. So sind die Festigkeiten nach 56 Tagen der Mischung mit 3 M.-% MB50 bei Mischungen mit 5 M.-% schon nach 7 Tagen erreicht. Dies ist auch vergleichend bei Mischung mit 7 M.-% und 14 M.-% festzustellen. Dies bedeutet, dass ein höherer Bindemittelgehalt benötigt wird, um in kurzer Zeit die gleichen Festigkeiten zu erreichen. Ziel des Projekts ist es, die Kosten für Bindemittel zu reduzieren, indem in kurzer Zeit die gleichen mechanischen Eigenschaften erreicht werden. Um das Ziel zu erreichen, wird die Anwendung von Zusätzen, wie z. B. Salz als Beschleuniger untersucht.

In den weiteren Versuchsreihen wurden hierzu Grobsalz NaCl, Bypass-Staub, Diabasmehl, kalziniertes Tonmehl und andere Zusätze in unterschiedlichen Konzentrationen zugemischt.

Das ausgewählte Diabasmehl ist ein anfallender Reststoff des Projektpartners Beyer Baustoffe GmbH. Die mineralogische Zusammensetzung wurde mittels XRD/DSC (siehe Anhang 1, Bilder 47-48) ermittelt. Es besteht aus 40 M.-% Tonminerale und 60 M.-% Nichttonminerale (siehe Anhang 1, Tabelle 6...7). Das Gesteinsmehl wurde durch Mischen in verschiedenen Anteilen von 1 - 25 M.-% mit Boden 1 bzw. 3 Mischbinder BM50 in 5 bzw. 7 M.-% untersucht. Bei den Untersuchungen des Projektpartners IBU wurden Anteile von 1, 10, 20 und 25 M.-% zugemischt. Die optimale Wassergehalte und die Proctordichten lagen bei denen der Mischungen ohne Zusätze (nur Boden-MB50) zwischen 13,7 - 13,9 M.-% (Bo1-Mischungen) und 18,3 - 18,5 M.-% Wassergehalt (Bo3-Mischungen) bzw. 1,67 - 1,71 g/cm³ Proctordichte. Im Ergebnis der einaxialen Druckfestigkeitsprüfung konnte festgestellt werden, dass die Zugabe des Diabasmehls keine Zunahme der Festigkeitswerte bewirkt. Die Zumischung des Zusatzes hatte keine bzw. negative Einflüsse auf die Festigkeiten im Vergleich zu den Boden-Mischbinder-Materialien. Die 28-Tage-Festigkeitswerte waren bei Boden Bo1 um 10 - 25 % geringer (siehe Anlage 1, Bild 49), bei Bo3 annähernd gleich (siehe Anlage 1, Bilder 50...51). Je größer der Anteil von Diabasmehl war, desto geringer waren die Festigkeiten. Auch bei den Untersuchungen der CAU Kiel wurde kein wesentlicher Effekt einer Festigkeitserhöhung durch die Zugabe des Diabasmehls (Anteilen 3, 5, 8 M.-%) festgestellt. Als alleiniger Zusatz ist Diabasmehl für die Stabilisierung nicht geeignet, deshalb wurde zusätzlich das Diabasmehl in Kombination mit Salzen untersucht.

Die ausgewählten Salzkomponenten Grobsalz und Staubsalz wurden dem Bodenmaterial und dem Mischbinder in verschiedenen Anteilen von 0,1 - 0,5 M.-% und 0,25 - 1,5 M.-%. In den Untersuchungen zur Festigkeitsentwicklung zeigte sich, dass die Beimischung des Grobsalzes zu Boden 1 eine Erhöhung der Festigkeitswerte bewirkt. So war die 28-Tage-Festigkeit bei Mischung Bo1 + MB50 5 M.-% + 0,1 M.-% NaCl um ca. 20 % höher als die der Mischung ohne Salz. Bei den Untersuchungen wurden ebenfalls größere Festigkeitserhöhungen (u. a. von ca. 30 M.-%) durch die Verwendung des Grobsalzes gegenüber den Boden 1-MB50-Mischungen ohne Salz gemessen (siehe Anlage 1, Bilder 52...54).

Dass die Effekte auch abhängig vom Bodenmaterial sind, zeigen die Ergebnisse mit Boden Bo 3. Bei diesem Boden konnten hingegen nur geringe bis keine Festigkeitssteigerungen gemessen werden (siehe Anlage 1, Bilder 49...51).

Als weiterer Zusatz wurde Bypass-Staub für die stabilisierende Bodenverbesserung angewendet. Hierzu wurde der Bypass-Staub in Anteilen von 5; 10 und 15 M.-% sowie als





Zusatzkombination mit NaCl (10 M.-%) eingesetzt. Aufgrund des Bindemittelcharakters führten die verfestigenden Eigenschaften des Bypass-Staubes zu entsprechend hohen Druckfestigkeitssteigerungen. So erhöhten sich die Festigkeitswerte gegenüber der reinen Boden-MB50-Mischungen z.T. um mehr als das Doppelte. Die Effekte waren auch bei den Mischungen mit der Zusatzkombination Bypass-Staub und Grobsalz NaCl zu verzeichnen (siehe Anlage 1, Bilder 49...51). Ebenso waren die verfestigenden Wirkungen des Zusatzes auch bei Zumischung in das Bodenmaterial Bo3 vorhanden. Im Gegensatz zu den anderen Zusätzen konnten auch hier positive Veränderungen in der Festigkeitsentwicklung festgestellt werden.

Durch die Zumischung vom kalzinierten Tonmehl erhöhten sich die Druckfestigkeiten je nach Mengenzugabe von 10 M.-% bzw. 20 M.-% um ca. 50 bis 70 M.-%. (siehe Anlage 1, Bilder 49...51).

Durch die Zusätze Bypass-Staub und kalziniertes Tonmehl können bei Mischungen mit Boden Bo1 und auch bei Boden Bo3 stabilisierende und verfestigende Effekte erreicht werden. Diese Effekte können zu Einsparungen des eingesetzten Mischbinders bzw. Bindemittels führen. Des Weiteren finden diese Reststoffe so eine weitere Verwertbarkeit. Nach den Druckfestigkeitsuntersuchungen an den jeweiligen Prüfkörper wurden Proben entnommen und im Rasterelektronenmikroskop Phenom Pro x analysiert. In den Bildern 55...58 im Anhang 1 sind Beispiele der Materialstrukturen im mikroskopischen Maßstab aufgeführt. Weiterhin wurden mit der REM-Untersuchung die einzelnen Elemente der Materialproben bestimmt (siehe Anhang 1, Tabelle 10...13).

Die Ödometerversuche wurden mit Boden-Bodenstab50-Mischungen mit und ohne Salz durchgeführt. Bild 59 im Anhang 1 zeigt die Ergebnisse der Ödometerversuche für verschiedene Prozentsätze an Bodenstab50 mit Boden1 im ungesättigten und gesättigten Zustand nach 14 Tagen. Sowohl unter ungesättigten als auch unter gesättigten Bedingungen ist die Kompressibilität des Boden-Bodenstab50-Gemisches im Vergleich zum Ausgangsboden gering. Bild 60 im Anhang 1 zeigt das Ergebnis des Ödometerversuchs mit 0,5 M.-% NaCl nach 7 Tagen für die gleiche Boden-Bodenstab50-Mischung im ungesättigten und gesättigten Zustand. Bild 61 im Anhang 1 zeigt das Ergebnis für denselben Mix mit 1 M.-% NaCl. Die Kompressibilität der Boden-Bodenstab50-Mischung wird auch durch Zugabe von NaCl-Salz schon nach 7 Tagen reduziert, da die gleiche Kompressibilität nur bei der Boden-Bodenstab50-Mischung nach 14 Tage erreicht wird. 10 M.-% Bodenstab50 mit Boden mit oder ohne Salz hat die geringste Kompressibilität unter den Mischungen. Bei einer Zugabe von 5 M.-% bzw. 7 M.-% Bodenstab50 werden nahezu identische Lastverformungseigenschaften erzielt.

Bild 62 im Anhang 1 zeigt die Ergebnisse der Ödometerversuche von Boden 1 +Bodenstab50 5 M% mit unterschiedlichen Bypassstaub-Gehalten nach 28 Tagen. Bild 63 im Anhang 1 zeigt das Ergebnis für denselben Mix mit 0,5 M.-% NaCl. Die Kompressibilität ist mit der Zugabe von 5 M.-% Bypass-Staub höher und nimmt mit zunehmendem Gehalt an Bypass-Staub im gesättigten und ungesättigten Zustand ab (siehe Anhang 1, Bild 62).

Für die Bestätigung der Materialeigenschaften wurden weiterhin an den jeweiligen Materialmischungen am IAB REM-Untersuchungen mittels Rasterelektronen-mikroskop zur Begutachtung der strukturellen Besonderheiten der einzelnen Mischrezepturen bzw. Prüfkörper durchgeführt. Durch die gleichzeitige EDX-Analyse konnte auch eine Zusammensetzung der Proben in Form einer Elementenübersicht dargestellt werden.





Aufgrund der Vielzahl der einzelnen Versuchsreihen konnten sehr aufschlussreich die Mischungen auf ihre Verwertbarkeit als stabilisierendes Material verifiziert werden. So konnte im Ergebnis festgestellt werden, dass u. a. die Wirkung der Zusätze je nach Boden sehr unterschiedlich sein kann und somit die Anwendung der jeweiligen Zusätze bzw. Reststoffe sehr stark vom unbehandelten, vorliegenden Bodenmaterial abhängt. So können Salze bei bestimmten Böden als Abbindebeschleuniger wirken, wobei diese Komponenten bei anderen Bodenarten keine oder nur sehr geringe Abbindeeffekte vorweisen. Genauso können die Reaktionen der Gesteinsmehle auf die Festigkeitsentwicklung sehr unterschiedlich sein.

Aus dieser Vielzahl von Mischrezepturen und deren Untersuchungsergebnissen konnte für die weitere Entwicklung die Rezepturauswahl weiter spezifiziert werden, so dass im weiteren Projektverlauf die möglichen stabilisierenden Mischungen verbessert bzw. weiter konkretisiert wurden.

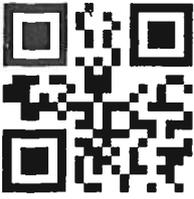
Ein Untersuchungspunkt war die Überprüfung vorhandener Schwankungsbreiten der ausgewählten Zusätze bzw. Reststoffe. Diese Materialkomponenten waren u. a. die eingesetzten Bypass-Stäube, Grobsalze und Staubsalze. Diese fallen in unterschiedlichen Mengen bei unterschiedlichen Prozessbedingungen an. Ebenfalls werden die Komponenten in verschiedenen Chargen zu verschiedenen Zeitpunkten geliefert, so dass die Zusätze natürlichen, wie auch prozessbedingten Schwankungen obliegen. In den Laboruntersuchungen wurden bisher konkret zwei unterschiedliche Bypass-Stäube eingesetzt, deren Daten in Tabelle 14 im Anhang 1 aufgeführt sind. Anhand der durchgeführten Analysen wurden Schwankungsbreiten für die Zusammensetzung und der physikalischen bzw. chemischen Eigenschaften der Stäube bestimmt. So wurden bei den gelieferten Bypassstäuben Nr. 1 und Nr. 2 Schwankungen im Korndurchmesser bei 10 % (d₁₀) bzw. 90 % (d₉₀) Siebdurchgang und bei den Anteilen vorhandener Elemente, wie z. B. Kalium, Chlorid, Calcium und Sulfat festgestellt. Kleinere minimale Unterschiede waren bei Magnesium und Natrium vernachlässigbar, so dass man davon ausgehen kann, dass die Materialproben gleicher Chargen relativ gleichwertige Materialeigenschaften und chemische Zusammensetzungen aufweisen.

Bei der Schwankungsbetrachtung einzelner Proben der gleichen Bypassstaubchargen waren die Schwankungsbreiten um ein Vielfaches geringer (siehe Anhang 1, Tabelle 15). Von dem im Technikum der K-UTEC AG anfallenden Grobsalz wurden im Abstand von mehreren Monaten Proben entnommen und auf ihre physikalischen und chemischen Eigenschaften untersucht. Die Schwankungsbreiten sind dabei gering (siehe Anhang 1, Tabelle 16).

Neben dem zuerst verwendeten Staubsalz wurde auch ein Feinsalz aus einem anderen Salzbergwerk auf seine Eignung als Abbindebeschleuniger getestet. Dessen physikalische und chemische Eigenschaften konnten an zwei Proben ermittelt und mit dem Staubsalz verglichen werden (siehe Anhang 1, Tabelle 17). Die Unterschiede der beiden Feinsalz-Proben sind sehr gering, die chemische Zusammensetzung stimmt fast genau mit der des Staubsalzes überein. Das Feinsalz ist jedoch deutlich gröber als das Staubsalz.

Zum Vergleich wurde aus den vorhandenen Reststoffen sowie handelsüblichen Bindemitteln ein bestehender Abbindebeschleuniger nachgebildet. Tabelle 18 im Anhang 1





zeigt die rechnerische Zusammensetzung einer Mischung ähnlich dem bisher im Projekt verwendeten Reststoff Bypass-Staub (mit Bindemittelcharakter) und Salz (überwiegend Natriumchlorid).

Ein weiterer Untersuchungsschwerpunkt war der Einfluss der Wasserlagerung auf die Festigkeitsentwicklung der einzelnen Mischungen. Die Reverenzproben zur Untersuchung des Einflusses wurden unter Umgebungsbedingungen gelagert. Dem gegenüber werden die Vergleichsproben bis zur Prüfung in einem Wasserbad mit Umgebungstemperatur eingelagert.

Bei den Mischungen von Boden 1 mit 5 M.-% Bodenstab50 ohne und mit NaCl-Salz wurden 2 Tagen im Exsikkator und anschließend in Wasser gelagert. Die Proben wurden 7 Tage und 28 Tage lang feucht gelagert und anschließend den einaxialen Tests unterzogen. Die Ergebnisse sind in den Bildern 64...65 im Anhang 1 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Festigkeitswerte nach der Wasserlagerung verringern. Der Verlust der Festigkeit mit der Wasserlagerung nahm mit der Aushärtung ebenfalls zu. Der Verlust der Festigkeit nach 28 Tagen bei den Mischungen mit 0 M.-%, 0,5 M.-% und 1 M.-% Salz beträgt 44 %, 32 % und 43 %, während diejenigen nach 7 Tagen 28 %, 35 % und 37 % betragen. Die Festigkeit nimmt jedoch mit der Aushärtezeit sowohl für wassergelagerte als auch für nicht wassergelagerte Proben zu. Auch die Festigkeit in Gegenwart von Salz ist höher als die ohne Salz für wassergelagerte und nicht wassergelagerte Proben.

Um die verwendeten Mischungen auf ihre Umweltverträglichkeit wurden aus den Proben Eluatproben gewonnen. Die Substanzen in der Probe sind in destilliertem Wasser gelöst worden. Der pH-Wert wurde ebenfalls für alle Proben, die einer Anionen- und Kationenanalyse unterzogen wurden, gemessen. Die Ergebnisse der Anionen- und Kationenanalyse wurden mit dem Computerprogramm PhreeqC überprüft. Für jede Analyse wurde eine Ionenbilanz erstellt, um die Plausibilität der Ergebnisse zu überprüfen. Die Ergebnisse der Messungen der Ionenkonzentration und des pH-Wertes für 5 M.-% Bodenstab50 mit verschiedenen Salzen für 7 und 28 Tage sind in den Bildern 66...67 im Anhang 1 dargestellt. Aus den Proben, die mit mehr Salz gemischt wurden, wurde mehr Natrium und Chlorid gelöst als aus den Proben ohne Salz. Die gelöste Menge an Ca^{2+} ist bei den Proben nach 28 Tage um bis zu 0,5 % erhöht. Bei einem Salzgehalt von 1 M.-% und einer Aushärtezeit von 28 Tagen nimmt die Ca^{2+} -Menge ab, ist aber immer noch höher als bei der Probe ohne Salz. Der pH-Wert steigt bis zu einem Salzgehalt von 0,5 M.-% an und fällt ab einem Gehalt an NaCl von 1 M.-% wieder ab. Die zweite Probe zeigt einen Anstieg des gelösten Ca^{2+} und einen Anstieg des pH-Wertes mit steigendem Salzgehalt.

Die Bilder 68 und 69 im Anhang 1 zeigen die Ergebnisse der Ionenkonzentration und des pH-Wertes für die Mischung mit 7 M.-% Bodenstab50 plus 0,5 M.-% bzw. 1 M.-% NaCl für Probekörper 7 und 28 Tage nach Herstellung. Bei der ersten und zweiten Probenahme der 7 Tageproben steigt der pH-Wert mit zunehmendem Salzgehalt, genau wie der Ca^{2+} -Gehalt (siehe Anhang 1, Bild 68). Ebenso werden mehr Natrium- und Chloridionen gelöst, wenn mehr Salz in die Bodenprobe gegeben wird. In der zweiten Probe ist bei einem Salzgehalt von 1 M.-% in der Bodenprobe der Ca^{2+} -Gehalt in der Lösung niedriger als in der Probe mit 0,5 M.-% Salz. Die Proben nach 28 Tage zeigen die gleichen Tendenzen wie nach 7 Tagen (siehe Anhang 1, Bild 69). Insgesamt kann festgestellt werden, je länger





sich die Proben im Wasser befinden, desto mehr Ionen werden herausgelöst. Je länger die Aushärtungszeit und höher der Salzgehalt, desto weniger Kalzium wird gelöst. Dies deutet auf eine schnellere Einbindung der Komponenten hin. Mehr Kalzium wird gelöst, wenn sich 7 M.-% BS50 in der Probe befindet. Allerdings werden weniger Natrium und Chlorid Ionen gelöst, wenn mehr Bodenstab (BS50) in den Proben verarbeitet wurde. Dies kann auch darauf zurückgeführt werden, dass die Materialien stärker eingebunden werden, sobald mehr Zement verwendet wird.

Die XRD-Analyse wurde eingesetzt, um die Veränderungen in der Bodenzusammensetzung und Mikrostruktur ausgewählter Proben des Boden-Bodenstab-Gemisches mit verschiedenen NaCl-Gehalten zu. Die Bilder 70...76 im Anhang 1 zeigen die XRD-Analyse von Boden 1+Bodenstab50 5 M.-% und Boden1 + Bodenstab50 7 M.-% mit unterschiedlichem NaCl-Gehalt für Probekörper nach 7 und 28 Tage. Bei der XRD-Analyse wurde das Vorhandensein von CSH bei einem Abstand d von 3,04 im Beugungsmuster und zwei Beugungswinkeln (2θ) von 26,9 für alle Proben und 29,355° für das Boden-Bodenstab-Gemisch mit unterschiedlichen NaCl-Gehalten nachgewiesen.

Nach der Zugabe von Bodenstab50 zu Boden 1 entstehen mehrere neue Spitzen, die in den Bildern mit Pfeilen markiert sind. Noch mehr Peaks werden bei der Zugabe von NaCl-Salz im Vergleich zu den Proben ohne Salzzusatz identifiziert, insbesondere bei 28° (siehe Anhang 1, Bilder 74, 76) und 29,5° (siehe Anhang 1, Bild 71). Diese Studie zeigt, dass die Zugabe von NaCl zu zementiertem Boden (Boden-Bodenstab) die Bildung von Zementverbindungen verbessert.

Die XRD-Ergebnisse mit den in Wasser gelagerten und den in Normfeuchte gelagerten Proben sind in den Bildern 76...79 im Anhang 1 dargestellt. Die Proben bestehen aus Boden 1 mit 5 M.-% Bodenstab50 und 0,5 M.-% NaCl-Gehalt und wurden nach 7 und 28 Tagen geprüft. Bei den Proben mit Bodenstab50 mit und ohne Salzzusatz entstehen mehrere neue Spitzen. Allerdings haben die in Wasser eingelagerten Proben im Vergleich zu den nicht eingelagerten Proben geringere Intensitätsspitzen. Dies ist zum Beispiel in Bild 78 im Anhang 1 mit einem Pfeil bei 29,5 ° markiert.

Anhand der Auswertungen und den daraus resultierenden Ergebnissen der Laboruntersuchungen erfolgte die Planung der Feldversuche. In Absprache mit dem Berufsförderungswerk Sachsen war es möglich, den Großversuch in der Grube Gablenz bei Crimmitschau durchzuführen. Bei den ersten Vor-Ort-Terminen wurden Bodenproben (siehe Anhang 2, Bilder 1...3) für die weitere Untersuchung im Labor entnommen. An diesen Proben wurden die Korngrößenverteilung bestimmt und Proctroversuche zur Bestimmung des optimalen Wassergehaltes durchgeführt. Dabei konnte ermittelt werden, dass bei einer Dichte von 2,153 g/cm³ und einem Wassergehalt von 7,5 M.-% die größtmögliche Verdichtung erzielt wird. Die vollständigen Ergebnisse sind im Anhang 2, Bilder 4...5, dargestellt.

Auf einer Versuchsfläche von 10 x 25 m sind insgesamt sieben Testfelder angelegt worden (siehe Anhang 2, Bilder 6...7). Die einzelnen Testfelder bestehen aus folgenden Aufbauten:

Testfeld 1: Boden + GeoC + 20 M.-% Mischbinder

Testfeld 2: Boden + Grobsalz NaCl + 20 M.-% Mischbinder

Testfeld 3: Boden + 20 M.-% Mischbinder





Testfeld 4: Boden + 30 M.-% Diabasmehl
Testfeld 5: Boden + GeoC + 30 M.-% Mischbinder
Testfeld 6: Boden + Grobsalz NaCl + 30 M.-% Mischbinder
Testfeld 7: Boden + 30 M.-% Mischbinder.

Gleichzeit wurde ein entsprechender Versuchsplan erarbeitet, wo die genauen Standpunkte für die statischen Plattendruckversuche (siehe Anhang 2, Bild 8) verzeichnet sind und in welchen Arbeitsschritten der Stabilisierungsprozess ablaufen soll.

Für das Ausstreuen der einzelnen Mischungszusammensetzungen wurde ein Streuer „SW 16 MC“ (siehe Anhang 2, Bild 9) eingesetzt, welche die entsprechende Menge an Versuchsmaterial pro Flächeneinheit gleichmäßig verteilt hat. Im Anschluss wurden diese Materialien mit einer Bodenfräse „BOMAG MPH 122-2“ (siehe Anhang 2, Bilder 10...11) vergleichmäßig und eingefräst. Nach der Zugabe von Wasser (siehe Anhang 2, Bild 12) erfolgte ein zweiter Fräsvorgang, um eine optimale Vermischung zu erzielen. In einem letzten Arbeitsschritt wurde die Fläche mit einer Walze „HAMM 3412 HAT (12 t)“ (siehe Anhang 2, Bild 13) verdichtet.

Jeweils nach 1, 7 und 56 Tagen sind mittels des statischen Lastplattenversuches die Entwicklung der Tragfähigkeit an den einzelnen Versuchsflächen ermittelt worden (siehe Anhang 2, Bild 14). Die Auswertung der einzelnen Versuche (siehe Anhang 2, Bild 15) hat gezeigt, dass bei den Testflächen 1..3 und 5...7 der geforderte Wert E_{v2} von mindestens 120 MN/m² schon nach einem Tag erreicht ist (siehe Anhang 2 Tabelle 1). Nur bei der Testfläche mit dem Diabasmehl als Zusatzstoff könnte dieser Wert nicht bzw. unzureichend erreicht werden. Weiterhin hat sich herausgestellt, dass sich beim Gemisch mit Grobsalz und 30 M.-% Mischbinder prozentual gesehen die Endfestigkeit gegenüber den anderen Mischungszusammensetzungen am frühesten einstellt und auch durch Regenereignisse (siehe Anhang 2, Bild 16...17) nicht negativ beeinflusst wird. Die hohen Werte der Plattendruckprüfungen sind vor allem im Zusammenhang mit der Wetterlage der letzten Monate zu sehen. Die anhaltende Trockenheit hat zur Folge, dass der anstehende Boden schon sehr stark ausgetrocknet und damit selbstverfestigt ist. Dies wird durch die Kornzusammensetzung mit einem relativ hohen Feinanteil begünstigt.

Fasst man die Ergebnisse der Laboruntersuchungen und die Umsetzung in den Feldversuchen zusammen, sind die ausgewählten Zusatzstoffe für den Einsatz in der Bodenstabilisierung geeignet. Dabei hat sich herausgestellt, dass die Grobsalze sich hervorragend als Beschleuniger eignen, aber bei deren Einsatz auf die Einhaltung der eluierbaren Stoffe geachtet werden muss.

4 Verwertung der Ergebnisse

4.1 Die geplante Verwertung der Projektergebnisse kann erfolgen

- ja
- nein

