

Untersuchung der Eignung von Mischbindemitteln für Bodenverfestigungen

FA 5.164

Forschungsstelle: Bauhaus-Universität Weimar, Materialforschungs- und -prüfanstalt (Prof. Dr.-Ing. K. J. Witt)
 Bearbeiter: Witt, K. J. / Köditz, J. / Damaschke, A.
 Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn
 Abschluss: Dezember 2012

1 Aufgabenstellung

Aus dem heutigen Verkehrswegebau ist die Bodenbehandlung mit Bindemitteln nicht mehr wegzudenken. Durch den gezielten Einsatz von Baukalken, Zementen, Mischbindemitteln und Spezialbindemitteln werden Böden in ihrer Verarbeitbarkeit verbessert, trag- und frostbeständig gemacht. Die Eignung der verschiedenen Bindemittel ist vom jeweiligen Boden, den baustellenspezifischen Anforderungen und dem erwünschten Effekt abhängig.

Zur Eignungsprüfung bei Maßnahmen der Bodenverfestigung, mit denen eine dauerhafte Tragfähigkeitserhöhung und Frostbeständigkeit des Bodens erreicht werden sollen, stehen für hydraulische Bindemittel und Kalke die Technischen Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau (TP BF-StB Teil B 11.1 und B 11.5) zur Verfügung, in denen die Probenaufbereitung und Prüfverfahren beschrieben sind. Die Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau (ZTV E-StB 09) geben die quantitativen Anforderungen für den Nachweis der Druckfestigkeit und Frostbeständigkeit vor.

Zur fachlichen Begründung und Absicherung eines zweckmäßigen Prüfverfahrens bei Bodenverfestigungen mit Mischbindemitteln, die Bestandteil der neuen TP BF-StB Teil B 11.1 (2012) sind, wurden in dem Forschungsvorhaben Laborversuche an verschiedenen Boden-Bindemittel-Gemischen durchgeführt und bewertet. Die oben genannten Prüfvorschriften für hydraulische Bindemittel und Kalke dienten als Orientierung, um die Qualität der eingesetzten Mischbindemittel zu beurteilen und geeignete Bewertungskriterien für die Eignungsprüfung bei Bodenverfestigungen mit Mischbindemitteln abzuleiten.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden die bodenmechanischen Eigenschaften von 30 Boden-Bindemittel-Gemischen untersucht. Als Grundlage für ihre Herstellung dienten zwei Böden, ein gemischtkörniger Boden GU sowie ein feinkörniger Boden TL. Diese wurden mit fünf Bindemitteln, einem Kalk CL 90 Q, einem Zement CEM I 32,5 R sowie drei Mischbindemitteln mit einem Kalk/Zement-Verhältnis von 70/30, 50/50 und 30/70, in Dosierungen von 4, 7, 10 M.-% bezogen auf 100 % Trockenmasse des Boden-Bindemittel-Gemisches vermengt.

Geprüft wurde nach den TP BF-StB Teil B 11.1 (2012). Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wurden alle Prüfungen einheitlich an allen Boden-Bindemittel-Gemischen durchgeführt: 1. Proctorversuch (DIN 18127): ρ_{Pr} / w_{opt} , 2. einaxialer Druckversuch (DIN 18136) vor und nach Frostbeanspruchung: $\sigma_{u,28d} / \sigma_{u,28dF}$, 3. Frostprüfung: ΔL .

Für die Festigkeitsprüfungen wurden entsprechend den ermittelten Proctorkennwerten Prüfkörper hergestellt und diese für 28 Tage im Feuchtraum gelagert. Während der Lagerungszeit fanden Ultraschallmessungen an den Prüfkörpern statt, um anhand der gemessenen Schallgeschwindigkeiten Aussagen zum Abbindeverhalten der Boden-Bindemittel-Gemische treffen zu können.

2 Untersuchungsmethodik

Zu Beginn der Eignungsuntersuchungen wurden an den Ausgangsböden GU und TL genormte Klassifizierungsversuche zur Bestimmung von Korngrößenverteilung (DIN 18123), Zustandsgrenzen (DIN 18122), Proctordichte (DIN 18127), Glühverlust (DIN 18128), Kalkgehalt (DIN 18129) und Korndichte (DIN 18124-KP) durchgeführt.

Für die Herstellung der Boden-Bindemittel-Gemische wurden die Böden GU und TL mit der im Laborprogramm festgelegten Menge an Bindemittel gemischt. Die Proben wurden gemäß der TP BF-StB Teil B 11.1 (2012) aufbereitet und im Anschluss ein Proctorversuch nach DIN 18127 durchgeführt. Die ermittelten Kennwerte (100 % Proctordichte und optimaler Wassergehalt) dienten als Grundlage für die Herstellung der Prüfkörper im A-Proctor-Zylinder ($h = 120 \text{ mm}$, $d = 100 \text{ mm}$). Für die Durchführung der geplanten Festigkeitsprüfungen wurden sechs Prüfkörper je Boden-Bindemittel-Gemisch hergestellt.

Nach ihrer Herstellung wurden alle Prüfkörper für 28 Tage im Feuchtraum bei einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von mindestens 95 % gelagert. Während dieser Lagerungszeit fanden Ultraschallmessungen an jeweils drei Prüfkörpern je Probe statt, um Rückschlüsse zum Abbindeverhalten der Boden-Bindemittel-Gemische ziehen zu können (Festigkeitsentwicklung). Nach der Lagerungszeit wurden an diesen Prüfkörpern einaxiale Druckversuche nach DIN 18136 mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 1 mm/min durchgeführt, um die Druckfestigkeit $\sigma_{u,28d}$ zu ermitteln.

Die verbleibenden drei Prüfkörper je Probe wurden einer Frostprüfung mit 12 Frost-Tau-Wechseln unterzogen, bei der die Längenänderung der Prüfkörper ($\Delta L = \text{Hebung der Probe} = \text{Differenz der Längenänderung nach der 1. und 12. Frosteinwirkung bezogen auf die Ausgangslänge der Prüfkörper}$) ermittelt wurde. Nach der Frostprüfung wurden an den Prüfkörpern ebenfalls einaxiale Druckversuche nach DIN 18136 durchgeführt, um die Druckfestigkeit nach Frostbeanspruchung $\sigma_{u,28dF}$ zu bestimmen.

Für die Auswertung der umfangreichen Laborergebnisse wurden die Einzelwerte der Messungen je Probe gemittelt, um repräsentative Mittelwerte zu erhalten. Diese dienten weiterführend als Grundlage für die statistische Auswertung und Analyse. Sie sind im Bericht tabellarisch und/oder in Form von Diagrammen dargestellt.

3 Untersuchungsergebnisse

Im Rahmen der Arbeit wurde die Wirkungsweise von Mischbindemitteln im Vergleich zu reinem Kalk und Zement untersucht. Bei der Behandlung mit Mischbindemitteln zeigen die Böden

GU und TL unterschiedliche Ergebnisse. Während beim Boden TL wegen des hohen Feinkornanteils von 84,5 M.-% die Wirkmechanismen des zugegebenen Kalks dominieren, ist beim Boden GU (Feinkornanteil < 15 M.-%) die Wirkung des Zementanteils im zugegebenen Bindemittel dominant.

3.1 Verdichtbarkeit

Durch die Zugabe von CL 90 und den Mischbindemitteln 70/30, 50/50 bzw. 30/70 wird der Wassergehalt der Böden GU und TL reduziert und ihre Verdichtbarkeit optimiert. Dieser Effekt nimmt mit steigender Bindemittelmenge zu und bei sich verringерndem Kalkanteil im Bindemittel ab:

- Bei beiden Böden GU und TL führt eine Steigerung der Bindemittelmenge zur Erhöhung des optimalen Wassergehalts und zur Verringerung der Proctordichte, wobei beim Boden GU die Unterschiede zum unbehandelten Boden mit steigendem Zementanteil im Bindemittel geringer werden, während sie beim Boden TL relativ konstant bleiben.
- Beim Boden GU treten mit steigender Bindemittelmenge die Unterschiede in der Wirkung der einzelnen Bindemittelarten deutlich hervor. Die Wirkung der Mischbindemittel gliedert sich je nach Verhältnis von Kalk/Zement in prozentualen Abstufungen zwischen dem Kalk und dem Zement ein. Der absolute Zementanteil im Bindemittel dominiert.
- Beim Boden TL sind die Unterschiede zwischen den Mischbindemitteln und dem reinen Kalk nur gering. Sie zeigen bei allen Dosierungen ähnliche Effekte. Der steigende Zementanteil in den Mischbindemitteln hat kaum Einfluss, der Kalkanteil dominiert hier in seiner Wirkungsweise.

3.2 Druckfestigkeit

Die verfestigende Wirkung durch Zementzugabe (Bildung eines Zementskeletts zwischen den einzelnen Bodenteilchen) konnte bei beiden Böden GU und TL durch entsprechend größere Bruchspannungen nachgewiesen werden. Es zeigt sich eine signifikante Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit (vor und nach Frostbeanspruchung) vom absoluten Zementanteil im Boden-Bindemittel-Gemisch, wobei die auf die Dosis bezogene Festigkeitszunahme im Boden GU stärker ausgeprägt ist als im Boden TL.

3.3 Frostbeständigkeit

Eine zuverlässige Frostbeständigkeit kann bei beiden Böden GU und TL unter Zugabe von reinem Zement CEM I sowie den Mischbindemitteln MB 30/70 und MB 50/50 erzielt werden, wobei bei diesen Bindemitteln schon eine Dosierung von 4 M.-% (bezogen auf 100 % Trockenmasse des Boden-Bindemittel-Gemischs) für eine Frostunempfindlichkeit der untersuchten Böden ausreichte.

Stellt man die Anforderungen der ZTV E-StB 09 zu Bodenverfestigungen mit hydraulischen Bindemitteln (Abschnitt 12.4.2.1)

und Baukalken (Abschnitt 12.4.2.2) den vorliegenden Ergebnissen des Versuchsprogramms zu Bodenverfestigungen mit Mischbindemitteln gegenüber (Tabelle 26/27), so können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

1. Bei der Eignungsprüfung von mit Mischbindemitteln behandelten Böden nach ZTV E-StB 09 Abschnitt 12.4.2.1 werden die Anforderungen ($\sigma_{u,28d} > 6,0 \frac{N}{mm^2}$, $\Delta L < 1 \text{‰}$) nur bei der Behandlung des Bodens GU mit 10 M.-% MB 30/70 erfüllt.
2. Bei der Eignungsprüfung von mit Mischbindemitteln behandelten Böden nach ZTV E-StB 09 Abschnitt 12.4.2.2 werden die Anforderungen ($\sigma_{u,28dF} > 0,2 \frac{N}{mm^2}$) bei beiden Böden GU und TL durch Zugabe von 4/7/10 M.-% der Mischbindemittel 70/30, 50/50, 30/70 erfüllt.

Die gemessenen Schallgeschwindigkeiten während des Abbindeprozesses unter Feuchtraumlagerung lassen sich zuverlässig mit den ermittelten Druckfestigkeiten korrelieren. Die zerstörungsfreie Prüfmethode ist somit geeignet, die Festigkeitsentwicklung der Boden-Bindemittel-Gemische zuverlässig zu prognostizieren.

4 Folgerungen für die Praxis

Durch den Vergleich der mit Mischbindemitteln erzielten Ergebnisse und den Referenzproben mit reinem Kalk CL 90 bzw. reinem Zement CEM I kann eine Handlungsempfehlung für die Eignungsprüfung bei Bodenverfestigungen mit Mischbindemitteln abgeleitet werden.

Bei Maßnahmen der Bodenverfestigung mit Mischbindemitteln werden als Eignungsprüfungen am Boden-Bindemittel-Gemisch empfohlen:

1. Proctorversuch (analog den TP BF-StB Teil B 11.1 und B 11.5),
2. Druckfestigkeitsprüfung nach Frostbeanspruchung (analog den TP BF-StB Teil B 11.5).

Gesonderte Prüfverfahren für den Eignungsnachweis bei Bodenverfestigungen mit Mischbindemitteln müssen nicht definiert werden. Aufgrund der Komplexität der Wirkmechanismen von Kalk und Zement auf die jeweilige Bodenstruktur ist es ratsam, die Wirkung von Mischbindemitteln noch detaillierter zu erforschen, z. B. durch

- weitere Eignungsprüfungen an fein- und gemischtkörnigen Böden mit höherer Plastizität und veränderter Tonmineralogie,
- die Fortführung der Ultraschallmessungen als zerstörungsfreie Prüfmethode zur Prognose der Festigkeitsentwicklung während der Lagerungszeit und die Verifizierung der vorliegenden Ergebnisse durch zusätzliche Druckfestigkeitsbestimmungen,
- Untersuchung älterer Probekörper, um auch die Langzeiteffekte einer Verfestigung durch puzzolanische Reaktionen quantitativ zu erfassen.