

Untersuchungen zum Reaktionsverhalten von Mischbindemitteln zur Bodenbehandlung

FA 5.130

Forschungsstelle: IFM Dr. Schellenberg, Institut für Materialprüfung, Ing.-GmbH, Leipzig

Bearbeiter: Schade, H.-W.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn

Abschluss: Mai 2005

1. Aufgabenstellung

Bodenbehandlungen mit Bindemitteln werden seit mehr als 60 Jahren in Deutschland durchgeführt und leisten einen wichtigen Beitrag zur Ressourcenschonung. Je nach Bodenart und Vernässungsgrad können hydraulisch wirkende Bindemittel (Zement nach DIN EN 197-1 und hydraulischer Tragschichtbinder nach DIN 18 506) oder Baukalk nach DIN EN 459-1 eingesetzt werden. In den letzten Jahren wurden verstärkt Gemische dieser Bindemittel auf dem Markt angeboten, welche die jeweils spezifischen Vorteile der Bindemittel – z. B. Wassergehaltreduktion bei Feinkalken und Festigkeitsentwicklung bei hydraulischen Bindemitteln – vereinigen sollen. Ziel ist, bei stärker vernässten bindigen und gemischtkörnigen Bodenarten in einem Arbeitsgang gleichzeitig eine Abtrocknung und Bearbeitung des Bodens zu ermöglichen, sowie die beabsichtigte oder evtl. gewünschte Festigkeitssteigerung zu erreichen. Eignungsprüfungen für Zement und Kalk werden gemäß den Prüfvorschriften TP BF-StB, Teil B 11.1 für Zement oder TP BF-STB, Teil B 11.5 für Kalk durchgeführt. Entsprechend der Wirkungsweise der Bindemittel betragen die Reaktionszeiten (Zeitdauer zwischen Einmischen des Bindemittels und Verdichten) beim Zement 1 Stunde und beim Weißfeinkalk 24 Stunden. Für Mischbindemittel gibt es noch keine Prüfvorschrift. Ziel dieser Forschungsarbeit ist es, die entsprechenden Grundlagen für eine derartige Prüfvorschrift zu liefern. Weiterhin soll mit der vorliegenden Arbeit untersucht werden, wie Mischbindemittel im Vergleich zu den genormten Bindemitteln Kalk und Zement bei der Bodenverbesserung eingesetzt werden können und welcher Vergleich bezüglich Tragfähigkeits- und Wassergehaltsveränderung gezogen werden kann.

2. Untersuchungsmethodik

Für die Versuche wurden 3 Böden der Bodengruppen TL, TM, GU* nach DIN 18196 ausgewählt. Von den Böden wurden zunächst die Grundkennwerte bestimmt. Anschließend wurden Eignungsprüfungen mit den Bindemittelsorten

- 100 % Zement CEM I, 32,5 R,
- 100 % Weißfeinkalk CL 90 Q,
- Mischbindemittel 1 MB 30/70 mit 30 M-% CL 90 Q und 70 M-% CEM I,
- Mischbindemittel 2 MB 50/50 mit 50 M-% CL 90 Q und 50 M-% CEM I und
- Sonderbindemittel SB mit 50 M-% CL 90 Q und 50 % CEM III, B 32,5 N

durchgeführt. Hergestellt wurden Proctorprobekörper mit Bindemittelmengen von 1 M-%, 3 M-% und 5 M-%. In den Eignungsprüfungen wurde der Einfluss der Reaktionszeiten von 1 Stunde, 4 Stunden und 24 Stunden untersucht. Weiterhin wurden Temperaturmessungen an den Boden-Bindemittel-Gemischen unmittelbar nach Probenherstellung durchgeführt.

Die Festigkeiten wurden bei einer Bindemittelzugabe von 3 M-% in CBR-Versuchen und einaxialen Druckversuchen an Probekörpern mit einem Prüfalter von 2 Tagen, 7 Tagen und 28 Tagen gemessen. In gesonderten Versuchsserien wurde außerdem der Einfluss einer Wasserlagerung und des Einbauwassergehaltes überprüft.

Vor der Versuchsdurchführung wurde zunächst eine Literaturrecherche durchgeführt und in einer Produkthanfrage bei den Bindemittelherstellern geklärt, welche Mischbindemittel derzeit im Handel sind.

3. Untersuchungsergebnisse

3.1 Temperaturmessungen

Die stärkste Reaktion mit einer Temperaturerhöhung von ca. 20° C im Boden-Bindemittel-Gemisch wurde beim Weißfeinkalk bei allen Versuchsböden bei einer Bindemittelmenge von 5 M-% gemessen. Nach ca. 12 bis 14 Stunden waren nur noch geringe Temperaturerhöhungen vorhanden. Beim Zement hat sich die Temperatur nur unwesentlich gegenüber der Ausgangstemperatur erhöht. Beim MB 50/50 wurden nennenswerte Temperaturerhöhungen über einen Zeitraum von ca. 8 bis 10 Stunden und beim MB 30/70 über einen Zeitraum von ca. 4 bis 6 Stunden gemessen. Die Temperaturerhöhungen sind eine Folge der Kalkzugabe und werden bei den Mischbindemitteln in Abhängigkeit von der Kalkmenge beeinflusst.

3.2 Proctorversuche

Durch Zugabe der Bindemittel wird die Trockendichte reduziert und der optimale Wassergehalt in Richtung nasse Seite der Proctorkurve verschoben. Diese Änderungen sind beim Weißfeinkalk am höchsten und beim Zement am geringsten (Bild 1). Die Mischbindemittel können je nach dem Kalkanteil zwischen den beiden Ausgangsbindemitteln eingeordnet werden.

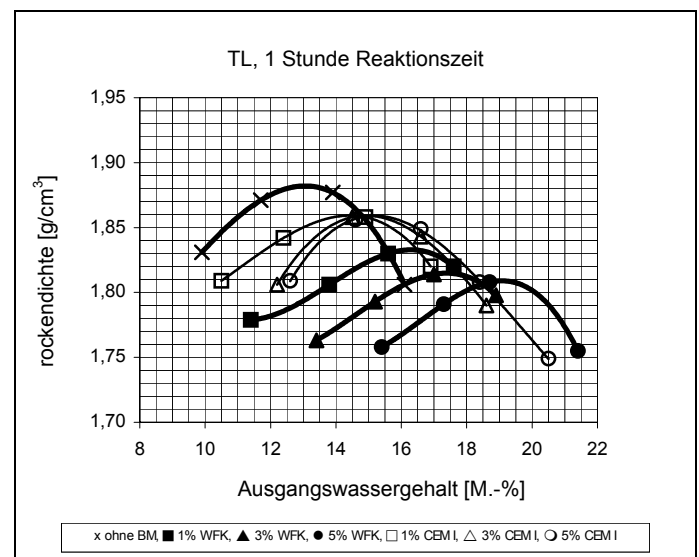


Bild 1: Vergleich der Proctorkurven von Boden-Bindemittel-Gemischen beim TL mit CL 90 Q und CEM I bei 1 Stunde Reaktionszeit

Im Vergleich der beiden Mischbindemittel 50/50 mit langsam und schnell reagierendem Zement hat sich gezeigt, dass bei 1 Stunde Reaktionszeit der langsam reagierende Zement

CEM III zu geringfügig größeren Proctordichten gegenüber dem schnell reagierenden Zement CEM I führt. Bei einer Verlängerung der Reaktionszeit von 1 Stunde auf 24 Stunden verändert sich die Proctordichte bei Zugabe von CL 90 Q nur geringfügig. Der optimale Wassergehalt bleibt nahezu konstant. Im Gegensatz dazu hat eine Verlängerung der Reaktionszeit beim Zement einen deutlichen Einfluss auf die Trockendichte und den optimalen Wassergehalt (Bild 2).

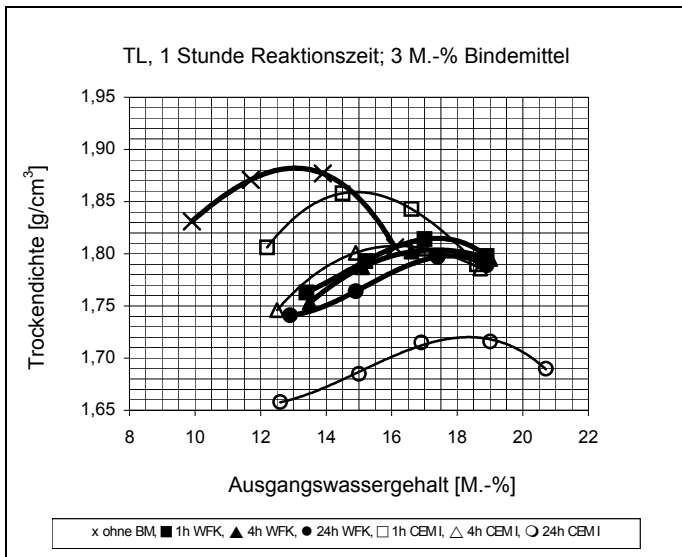


Bild 2: Veränderung der Proctorkurven durch Verlängerung der Reaktionszeiten für den Boden TL bei Zugabe von 3 % CL 90 Q bzw. CEM I

Aus einem Vergleich der Proctorkurven mit den Ausgangswassergehalten und den Wassergehalten nach dem Mischen mit Bindemittel kann der erforderliche Bindemittelgehalt bei einem vorgegebenen Wassergehalt des Ausgangsbodens abgeschätzt werden. Durch eine Verlängerung der Reaktionszeit ist der Bindemittelbedarf deutlich geringer, um den gleichen Verdichtungsgrad zu erreichen. Am deutlichsten wird dies beim CL 90 Q (Bild 3).

Eine Verlängerung der Reaktionszeit beim Zement hat jedoch zur Folge, dass die Hydratation eintritt und sich dadurch ein schwer verdichtbares grießiges Korngemisch ausbildet. Das Porenvolumen wird dadurch vergrößert und die Festigkeit sowie der Steifemodul des Bodens herabgesetzt. Verlängerungen der Reaktionszeit bis auf 24 Stunden sind daher nur beim Weißfeinkalk sinnvoll. Bei Mischbindemitteln muss in Abhängigkeit vom Zementanteil die Reaktionszeit der hydraulischen Komponente angepasst werden, sinnvoll sind unter diesen Gesichtspunkten Reaktionszeiten zwischen 4 und 6 Stunden.

3.3 CBR-Versuche

Eine Verlängerung der Reaktionszeit hat zur Folge, dass die CBR-Werte sich bei allen Versuchen verringern. Bei Bindemitteln mit einem hohen hydraulischen Anteil haben längere Reaktionszeiten zum Teil gravierende Festigkeitsverluste zur Folge. Mit zunehmenden Probenalter ist der Festigkeitszuwachs bei vergrößerter Reaktionszeit ebenfalls stark eingeschränkt.

Der Einbauwassergehalt wirkt sich auf die Größe des CBR-Wertes aus. Die größten CBR-Werte wurden bei dem Boden GU* und dem Boden TL auf der trockenen Seite der Proctorkurve erreicht. Bei dem Boden TM hat der Einbauwassergehalt im Bereich des hier untersuchten Schwankungsbereiches zwischen $0,9 \cdot W_{pr}$ und $1,1 \cdot W_{pr}$ nur einen geringen Einfluss auf die Größe des CBR-Wertes.

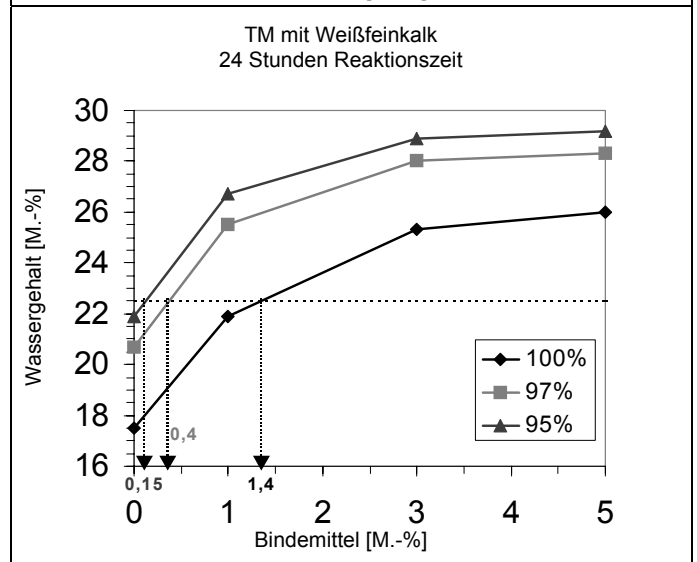
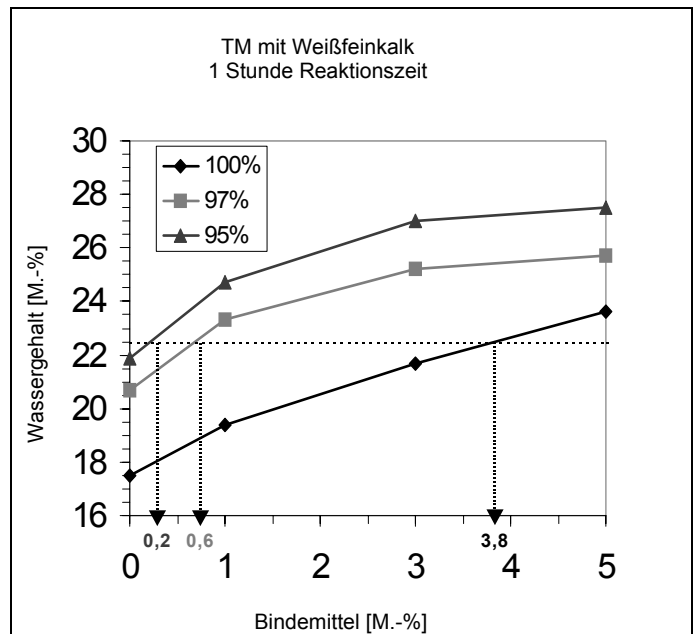


Bild 3: Vergleich der erforderlichen Bindemittelmenge bei 1 Stunde und 24 Stunden Reaktionszeit (Ausgangswassergehalt $W_1 = W_{opt} + 5\%$)

Die Wasserlagerung hat bei dem gemischtkörnigen Boden GU* bei Einsatz von Zement nahezu keinen Einfluss, bei Einsatz von CL 90 Q jedoch einen großen Einfluss auf den CBR-Wert. Beim TM wurde bei allen Bindemittelsorten in Folge Wasserlagerung eine Abnahme der CBR-Werte festgestellt. Die größten Abnahmen der CBR-Werte wurden stets bei einer Verlängerung der Reaktionszeit von 1 auf 4 Stunden festgestellt.

3.4 Einaxiale Druckversuche

Mit zunehmendem Probenalter vergrößert sich bei allen Böden und Bindemitteln die Druckfestigkeit. Die größte Steigerung tritt bei dem Boden GU* und dem Bindemittel CEM I bei einer Reaktionszeit von 1 Stunde auf. Nahezu kein Einfluss auf die Druckfestigkeit wurde bei dem Boden GU* bei dem Bindemittel CL 90 Q gemessen. Bei den Böden TL und TM ist bei Verwendung von CL 90 Q ebenfalls nur ein geringer Einfluss bei verlängerter Reaktionszeit auf die Druckfestigkeit aufgetreten. Die Versuche mit den Mischbindemitteln können zwischen den beiden Ausgangsbindemitteln eingeordnet werden, wobei eine Verlängerung der Reaktionszeit bei dem Mischbindemittel 30/70 einen etwas größeren Einfluss auf die Druckfestigkeit gegenüber dem Mischbindemittel 50/50 hat. Durch einen Austausch

der Zementsorten bei den Mischbindemitteln wurde festgestellt, dass beim langsam reagierenden CEM III etwas größere Festigkeitsverluste gegenüber dem CEM I auftreten.

4. Folgerungen für die Praxis

Folgende Ergebnisse können aus den Versuchen abgeleitet werden:

- a) Mischbindemittel können für Bodenverbesserungen von gemischtkörnigen und leicht- bis mittelplastischen Böden eingesetzt werden. In einem Arbeitsgang wird bei geeigneten Böden gleichzeitig eine Reduzierung des natürlichen Wassergehaltes und eine Steigerung der Tragfähigkeit erreicht.
- b) Mit Hilfe von Weißfeinkalk wird der Wassergehalt eines Bodens deutlich stärker herabgesetzt, als bei Zugabe von Zement. Bei Bodenverbesserungen mit Weißfeinkalk ist daher weniger Bindemittel erforderlich, gegenüber Bodenverbesserungen mit Zement. Der Bindemittelbedarf bei Bodenverbesserungen mit Mischbindemitteln liegt zwischen denen für Kalk und Zement.
- c) Durch Zugabe von Weißfeinkalk wird die Proctordichte stärker im Vergleich zum Zement reduziert und der optimale Wassergehalt verschiebt sich in Richtung nasse Seite der Proctorkurve. In dieser Wirkung lassen sich die Mischbindemittel in Abhängigkeit von dem Kalkanteil zwischen den Bindemitteln Weißfeinkalk und Zement einordnen.
- d) Bei gemischtkörnigen und leichtplastischen Böden (TL, GU*) wird die Festigkeit bei gleichem Bindemittelgehalt durch den hydraulischen Anteil festgelegt. Die höchsten Festigkeiten werden bei reinem Zement oder Mischbindemittel mit hohem Zementanteil erreicht. Bei mittelplastischen Tonen (TM) liefern Mischbindemittel die größten Festigkeiten. Bei mittelplastischen Tonen im Übergangsbereich zu einem TA und bei hochplastischen Tonen werden die höchsten Festigkeiten bei der Verwendung von Kalk erreicht.
- e) Die Verlängerung der Reaktionszeit (Zeitdauer zwischen Einmischen des Bindemittels und der Verdichtung) hat einen starken Einfluss auf die Proctordichten und die

Festigkeiten (CBR-Werte und einaxiale Druckfestigkeiten). Die Proctordichte wird bei allen Bindemitteln verringert, der optische Wassergehalt wird erhöht. Gleichzeitig wird durch die Verlängerung der Reaktionszeit auch die Festigkeit des Boden-Bindemittel-Gemisches herabgesetzt. Deutliche Verringerungen der Festigkeiten treten bei verlängerten Reaktionszeiten beim Zement auf. Hier sollte die Reaktionszeit für die Bodenverfestigung von einer Stunde gemäß TP BF-StB, Teil B 11.1 auch für die Bodenverbesserung eingehalten werden. In diesem Fall wird die höchste Tragfähigkeit erreicht und das Boden-Bindemittel-Gemisch weist die geringste Empfindlichkeit gegen Wasserlagerung auf.

- f) Für Weißfeinkalk sind längere Reaktionszeiten erforderlich. Die Vorgaben gemäß TP BF-StB, Teil B 11.5 mit einer Reaktionszeit von 24 Stunden führen zur größten Verschiebung der Proctorkurve. Bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Festigkeitsentwicklung können auch – im Hinblick auf eine praxisgerechtere Arbeitsweise – kürzere Reaktionszeiten gewählt werden.
- g) Die Reaktionszeiten von Mischbindemitteln sind in Abhängigkeit von dem hydraulischen Anteil zwischen 3 und 5 Stunden festzulegen. Folgende Zeiten zwischen Einarbeiten des Bindemittels und Verdichten sollten eingehalten werden:

Bindemittel	-	CEM I	MB*	CL 90 Q
Reaktionszeit	h	1	4	≥ 6

** Anpassungen der Reaktionszeit der Mischbindemittel können in Abhängigkeit von den Hauptbindemittelkomponenten gegebenenfalls vorgenommen werden.*

Die Reaktionszeiten von Mischbindemitteln werden auch durch das Erstarrungsverhalten des Zementes beeinflusst. Wenn anstelle eines CEM I das Bindemittel CEM III mit einer langsamen Erhärtungscharakteristik gewählt wird, kann die Reaktionszeit verlängert werden.

- h) Nach den vorliegenden Untersuchungen müssen die bestehenden TP BF-StB zur Bodenverbesserung überarbeitet und für Mischbindemittel neu erstellt werden. Es müssen Vorgaben zur Prüfung des Festigkeitsverhaltens und zur Reaktionszeit festgelegt werden. □