Bodenstabilisierung mit hydraulischen und chemischen Mitteln

Autor(en): **Giudicetti, Franchino**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **96 (1978)**

Heft 15

PDF erstellt am: **11.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-73677

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

96. Jahrgang Heft 15 SCHWEIZERISCHE BAUZEITUNG 13. April 1978

HERAUSGEGEBEN VON DER VERLAGS-AKTIENGESELLSCHAFT DER AKADEMISCHEN TECHNISCHEN VEREINE, 8021 ZÜRICH, POSTFACH 630

Bodenstabilisierung mit hydraulischen und chemischen Mitteln

Von **Franchino Giudicetti**, Bern*)

Der Titel dieser zusammenfassenden Darstellung, die einen einfachen *Überblick der wichtigsten Einflussfaktoren* ermitteln soll, bedarf einer erklärenden Einleitung. Unter hydraulischen Bindemitteln (Kalziumsilikate und/oder -Aluminate und/oder -Ferrite) sollen hier die verstanden werden, die eine meistens langdauernde, auch im Wasser stattfindende Erhärtung und Festigkeitsentwicklung unter Bildung neuer wasserunlöslichen Bodenbestandteile, insbesondere durch Hydrolyse und Hydratation, ergeben. Die hydraulische Erhärtung setzt immer genügend Wasser voraus. Sie kann einerseits praktisch unabhängig von der Bodenart geschehen, wie bei den geeigneten körnigen Materialien hinzugegebenen Zementen und hydraulischen Kalken, anderseits durch Mitwirkung einer in den aktivierbaren Bodenteilchen vorzufindenden Bindemittelkomponente, d.h. der Alumosilikate der Tonkristalle. Dies ist z.B. der Fall der Langzeitreaktion einer Behandlung toniger Böden mit Kalk, der ansonst als chemisches Mittel zu betrachten ist. Zwischenerscheinungen sind möglich, so die Nacherhärtung toniger Böden bei einer Zementstabilisierung durch freiwerdendes Kalzium während der Hydratation des Zementes oder die gleichzeitige Zugabe der Bindemittelkomponenten, z.B. Kalk und die Hydraulefaktoren (Puzzolane, z.B. Flugasche), bei fehlenden Tonmineralien im Boden.

Unter *chemischer Bodenbehandlung*, selten eine echte Stabilisierung mit damit verbundener bleibender Festigkeitsentwicklung, wird hier die Zugabe von anorganischen oder organischen chemischen Verbindungen verstanden, die vor allem bei den feinkörnigen tonigen Böden chemisch-physikalische Oberflächenreaktionen mit dem Bodenteilchen, z.B. Ionenaustausch, und mit dem Bodenwasser hervorrufen, die eher instabiler Art sind. Bindende Chemikalien, z.B. Resine, haben anderseits mit einer hydraulischen Erhärtung nichts Gemeinsames. Eine Kombination der Zusatzmittel und der Stabilisierungsvorgänge im Boden ist oft möglich.

Bei den hydraulischen Bindemitteln ist die grundsätzlich andere Grössenordnung der wirkenden Oberfläche der in kleinen Volumenprozenten beigegebenen Bindemitteln (einige Tausende von cm^2/g) gegenüber der aktiven Oberfläche der Feinstteilchen im Boden (teilweise Kolloide, bis Hunderte von m^2/g) zu beachten. Für Böden mit auch sehr kleiner Tonfraktion und einer spezifischen Oberfläche bis zu wenigen m^2/g kann somit die bindende Wirkung nie das Einzelteilchen, sondern höchstens Aggregate betreffen. Anders bei den meisten chemischen Mitteln, die jedes Teilchen erreichen sollten, solange keine natürliche Aggregierung bereits vorliegt. Nach Winterkorn [1] wird der Boden als von den feinkörnigen Anteilen bzw. von elektrisch-chemischen Oberflächeneigenschaften massgeblich bestimmt dann betrachtet, wenn der Ton- und Siltanteil rund 35% oder mehr beträgt.

Aus obiger Unterteilung ist die Stellung der bituminösen viskos-kolloidalen Bindemittel einzusehen, die eher zu den chemischen organischen Mitteln gehören. Ihre bindende Wirkung ist auf adhäsive und kohäsive chemisch-physikalische Kräfte, die den molekularen Bereich betreffen, zurückzuführen. Sie bewirken im Gegensatz zu den hydraulischen Bindemitteln keine Kristallisation und folglich keine Erstarrung mit der gewissermassen damit verbundenen Irreversibilität der Verkittung, da es sich in erster Linie um Probleme der «flexiblen» Haftung handelt.

Vergleichende Laborversuche

Problemstellung – Untersuchte Bindemittel und Böden

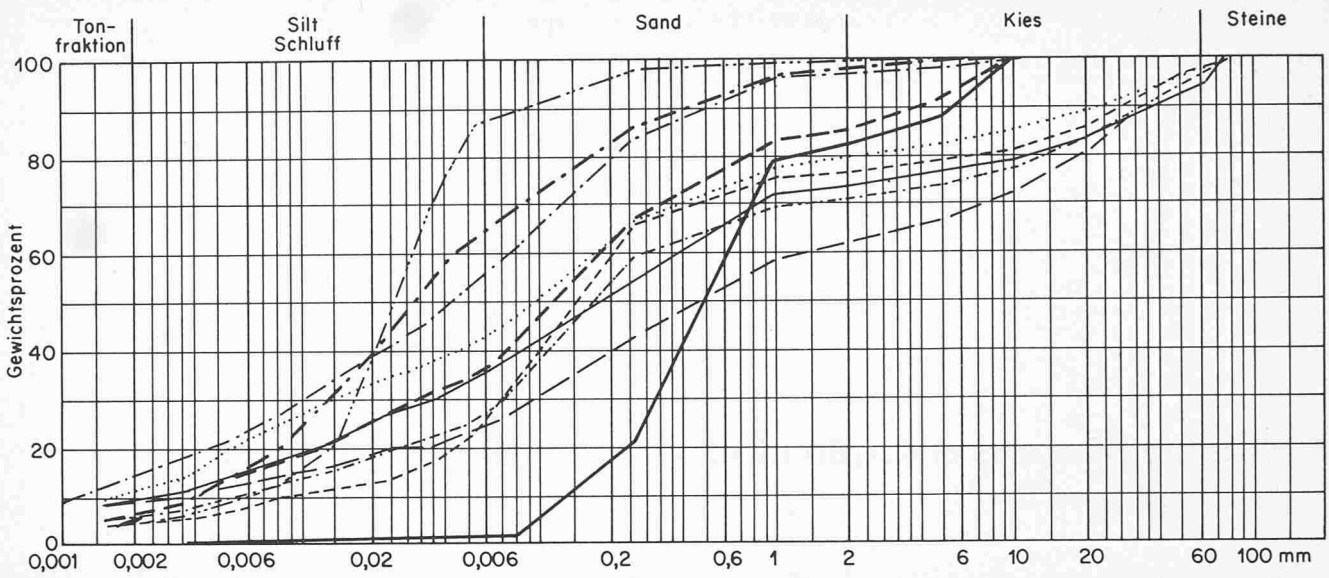
Die Problemstellung ergibt sich aus dem *Nationalstrassenbau*. Bezweckt wird eine *festigkeitsergebende Stabilisierung* nicht nur körniger, kiesiger Materialien mit Zement, evtl. Mörtelbinder, wie bisher die schweizerische Praxis ist, sondern *feinkörniger und sandiger Böden* mit verschiedenen hydraulischen Bindemitteln. Diese Böden, meistens mit einem Wassergehalt höher als der optimale, bilden vor allem im Mittelland auf der Molasse einen Problemkreis für sich [2]. Solche stabilisierte Materialien sollten nicht ausschliesslich als Untergrund/Unterbau, sondern auch als *Fundationsschicht* verwendet werden können. Eine genügende Festigkeit, Frost- und Wasserstabilität ist dabei unerlässlich. Diese Probleme bestehen analog auch im forstlichen Strassenbau, wo z.B. die Kalkbehandlung von Grenzböden nicht immer hinreichend sein kann.

Untersuchungen mit hydraulischen Bindemitteln wurden für den bernischen Nationalstrassenbau vorgenommen und sollen hier auszugsweise besprochen werden [3]. Einige ausgewählte und ausgewertete Versuchsergebnisse früherer Untersuchungen werden hier ebenfalls wiedergegeben [4, 5, 6].

Als *Bindemittel* wurden in verschiedenen Versuchsreihen im Strassenbaulaboratorium des Autobahnamtes verwendet:

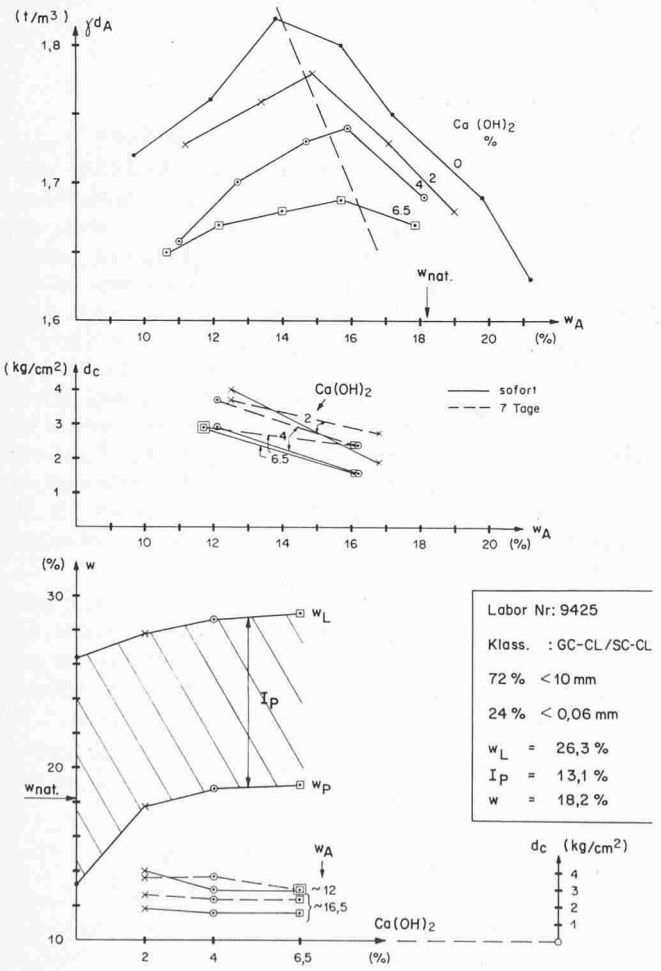
- *normaler Portlandzement* PC (SIA 115)
- *hochwertiger Portlandzement* HPC (SIA 115)
- ein *hydrophober Spezialzement* aus Deutschland, *Pectacrete*. Dieser Portlandzement der Festigkeitsklasse PZ 350 F nach DIN 1164 wird in *Deutschland* seit etwa 15 Jahren mit Erfolg

*) Vortrag, gehalten am Kurs über Wald- und Güterstrassenbau an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (4. bis 6. Oktober 1976).



Labor Nr.	Signatur	w (%)	w_L (%)	I_P (%)	SNV 670 008	Labor Nr.	Signatur	w (%	w_L (%)	I_P (%)	SNV 670 008	Anteil >10mm %
9423	———	5,1	28,2	13,0	SC – CL	9656	—···—	24,7	34,5	13,9	CL	—
9425	— —	18,2	26,3	13,1	GC – CL	9663	-·-·-·-	—	14,7	5,7	SM – SC	23
9426	- - - - -	11,3	20,0	7,1	SC – CL	74/533	—·—	—	24,8	8,6	CL	—
9427+9429	—·—	—	24,2	11,3	CL	74/526	— — —	—	15,0	4,0	SM – ML	~30
9432	·····	37,2	25,4	12,9	SC – CL	74/527	———	—	—	—	SP	~ 15

Bild 1. Untersuchte Böden



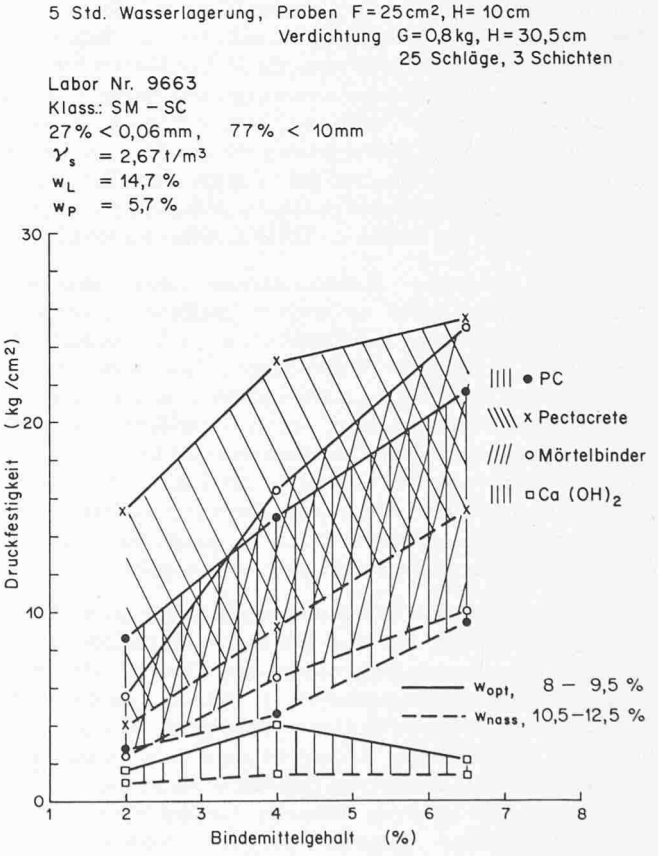


Bild 2 (links). Stabilisierungsversuche mit Kalk

Bild 3 (oben). Druckfestigkeit nach 7 Tagen

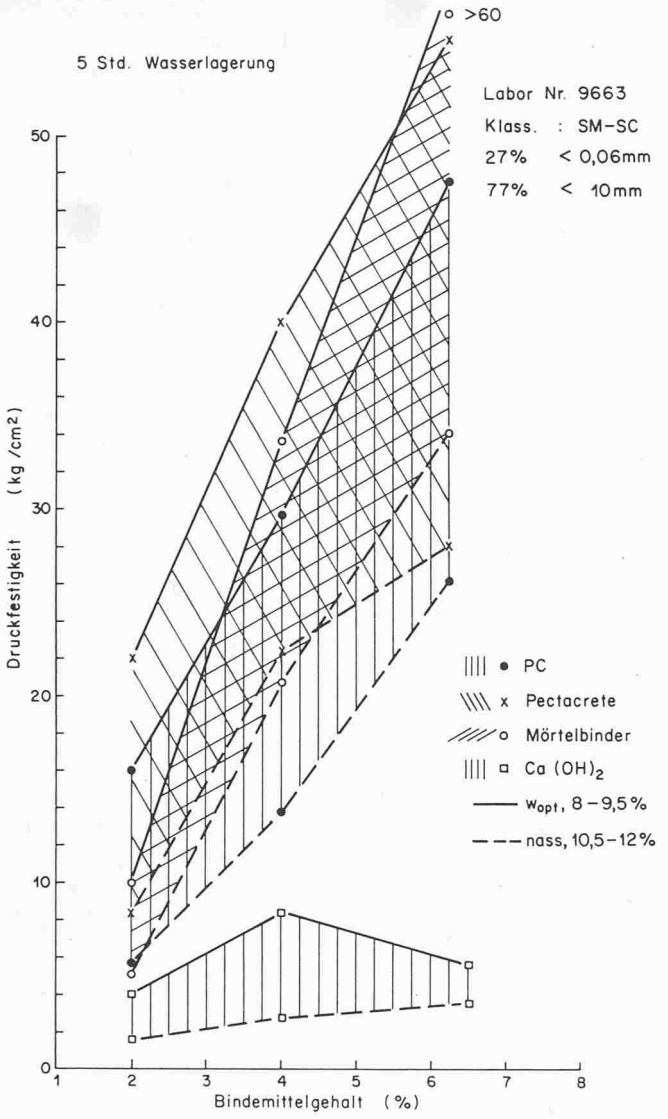


Bild 4 (links). Druckfestigkeit nach 4 Monaten

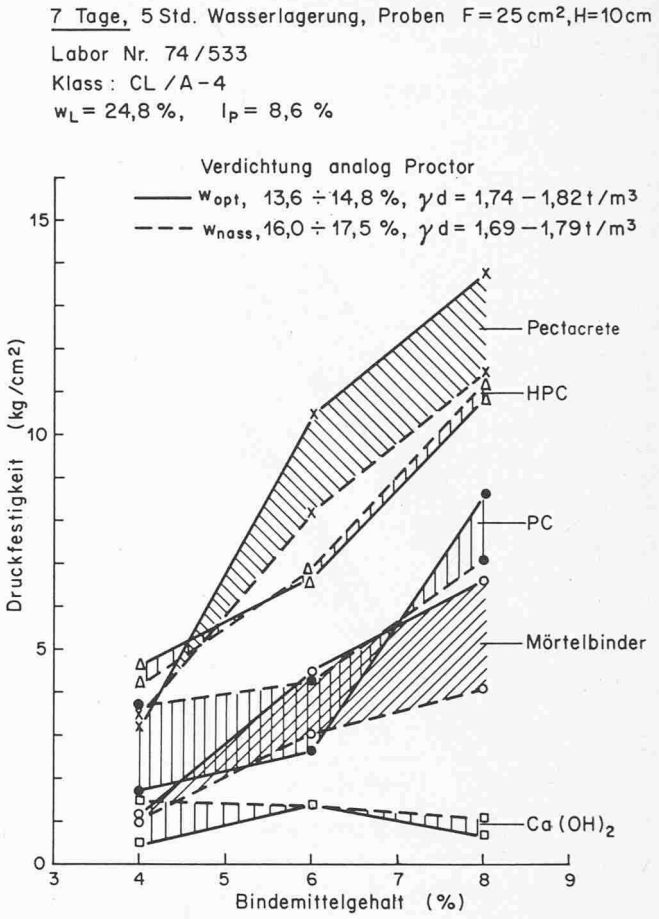


Bild 5 (oben). Druckfestigkeit in Abhängigkeit des Bindemittels

verwendet. Von der umfangreichen darüber existierenden Literatur, auch in der deutschen allgemeinen Forstzeitschrift, sei hier nur ein Aufsatz grundsätzlicher Art angegeben [7]. In der Schweiz wurden erste Versuche mit Pectacrete 1966 für militärische Zwecke durchgeführt [4].

- Ein *hochhydraulischer Kalk* nach DIN 1060, aus Zementklinkern und Ölschiefermineralien hergestellt, dem ein hydrophober Zusatz beigegeben ist, ebenfalls aus Deutschland, Mörtelbinder (Rocadur). Zur Stabilisierung von Kiesmaterialien wird dieses Bindemittel seit etwa drei Jahren in der Ostschweiz [8], sowie als Zusatz zu Teerstabilisierungen, verwendet.
- *Handelsübliches Kalkhydrat,* $Ca(OH)_2$, bzw. Branntkalk, CaO (SIA 115).

Die *Kornverteilungen* der verwendeten Bindemittel sind im Anhang dargestellt. Die Kornverteilungen der untersuchten Böden für die Laborversuche sind aus Bild 1 ersichtlich. Es handelt sich um tonig bis siltige Sande und tonige Silte.

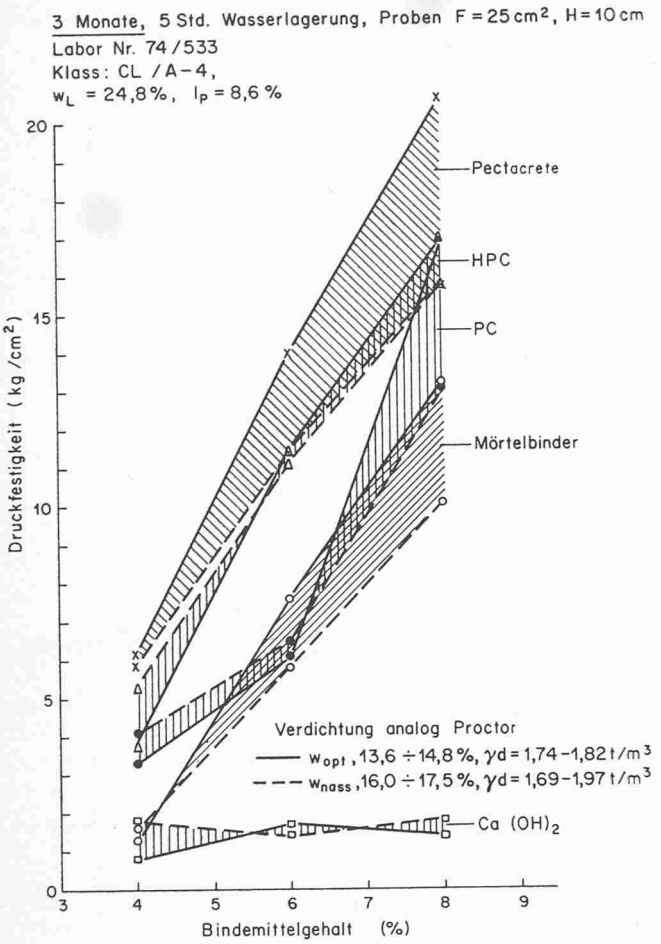
Laborversuche

Vorerst wurde die Stabilisierbarkeit dieser Böden mit Kalk abgeklärt (Beispiel Bild 2). Es zeigte sich, dass bei den untersuchten Böden mit einem Plastizitätsindex I_p = 11–14% mit rund 3% $Ca(OH)_2$ eine Erhöhung der Ausrollgrenze w_p um 3–5% und eine Verkleinerung von I_p um 3–4% erreichbar ist. Der optimale Wassergehalt wird um 1–2% erhöht. Die Druckfestigkeit nach sieben Tagen ohne Wasserlagerung betrug je nach Wassergehalt maximal 3–4 kg/cm² (mit 4% $Ca(OH)_2$). Die Stabilisierbarkeit dieser Böden mit Kalk wird als kritisch betrachtet.

Vergleichsversuche der verschiedenen Bindemittel wurden dann mit vier Böden durchgeführt: Labor Nr. 9663, SM-SC; 74/533, CL; Nr. 74/526, SM-ML und 74/527, SP.

Es wurden die *Druckfestigkeit und die Frost-Auftaubeständigkeit* nach dem Abbürstverfahren gemäss ASTM D 60–57 bestimmt.

Die *Wasseraufnahme* während der Wasserlagerung vor dem Abdrücken der Proben (keine Wasserlagerung bei der Lagerungszeit von fünf Std.) wurde ebenfalls gemessen. Die folgenden Bilder zeigen einige Ergebnisse der Untersuchung. Der *Einfluss des Bindemittelgehaltes und des Wassergehaltes* ist für zwei typische Untergrundmaterialien (Kornverteilungen in Bild 1) aus den Bildern 3 bis 6 ersichtlich. Ein rund 3% über das Optimum liegender Wassergehalt bewirkt eine wesentliche



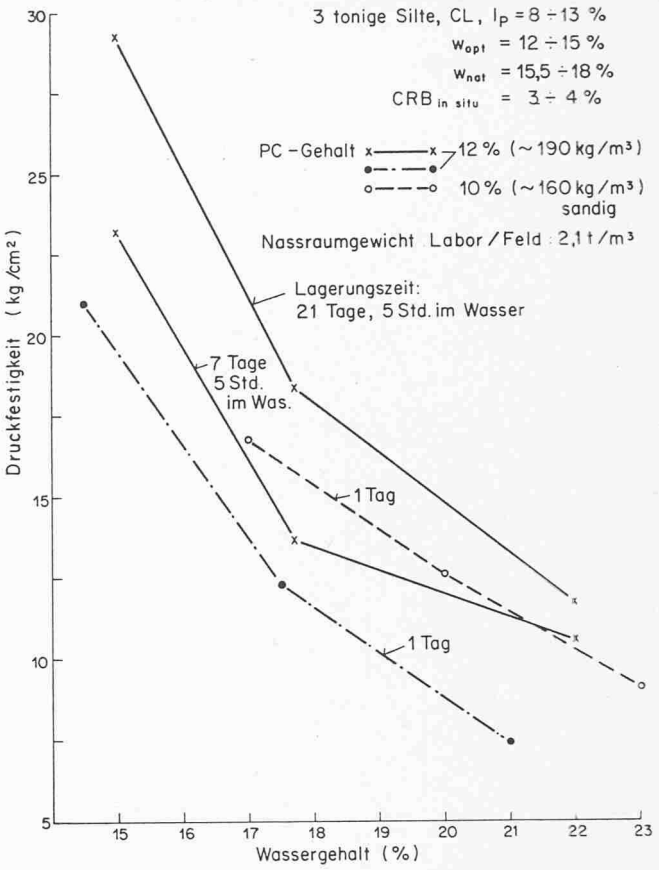


Bild 6 (links). Druckfestigkeit in Abhängigkeit des Bindemittels

Bild 7 (oben). Druckfestigkeit – Wassergehalt

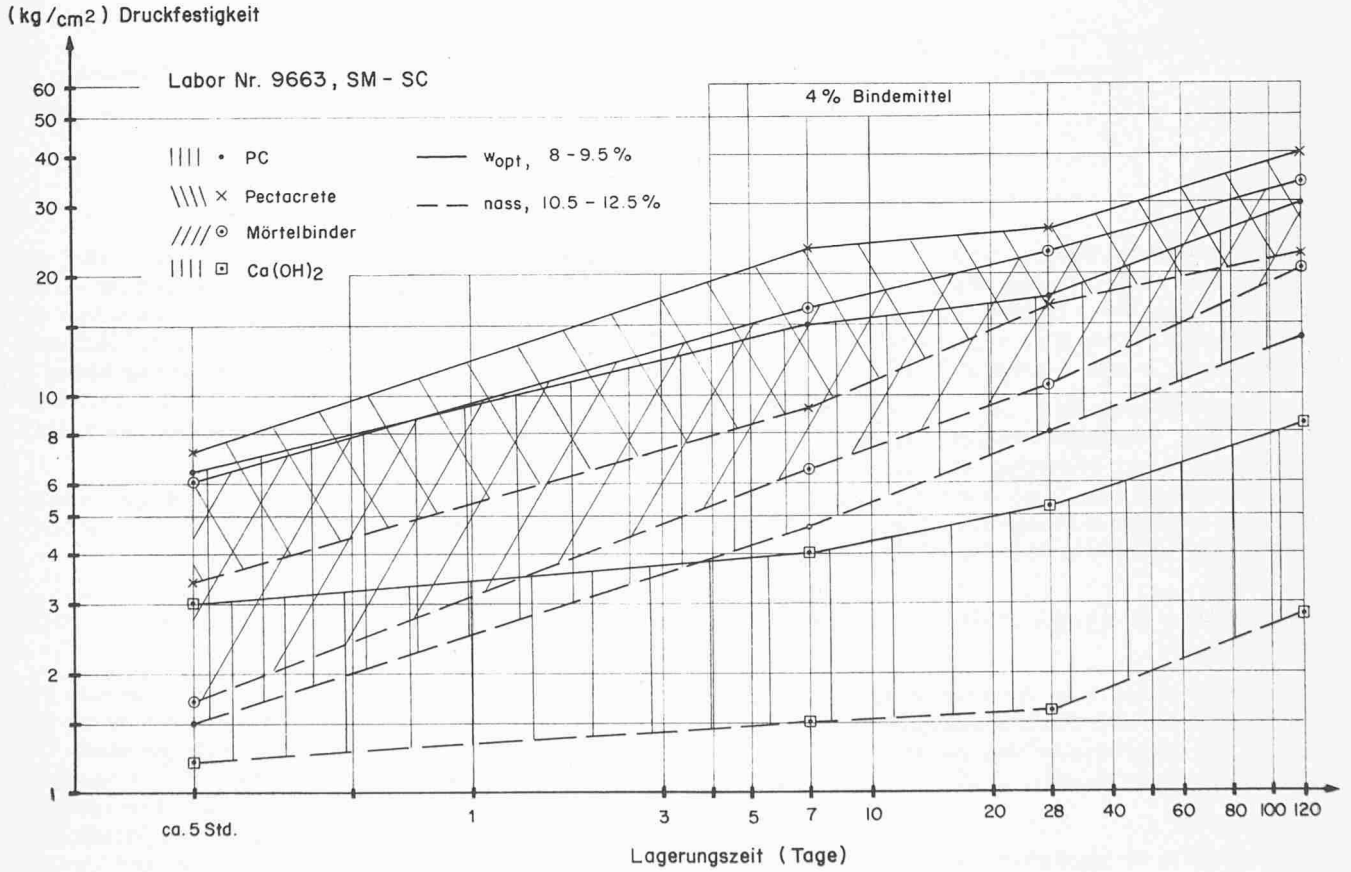


Bild 8. Druckfestigkeit – Lagerungszeit

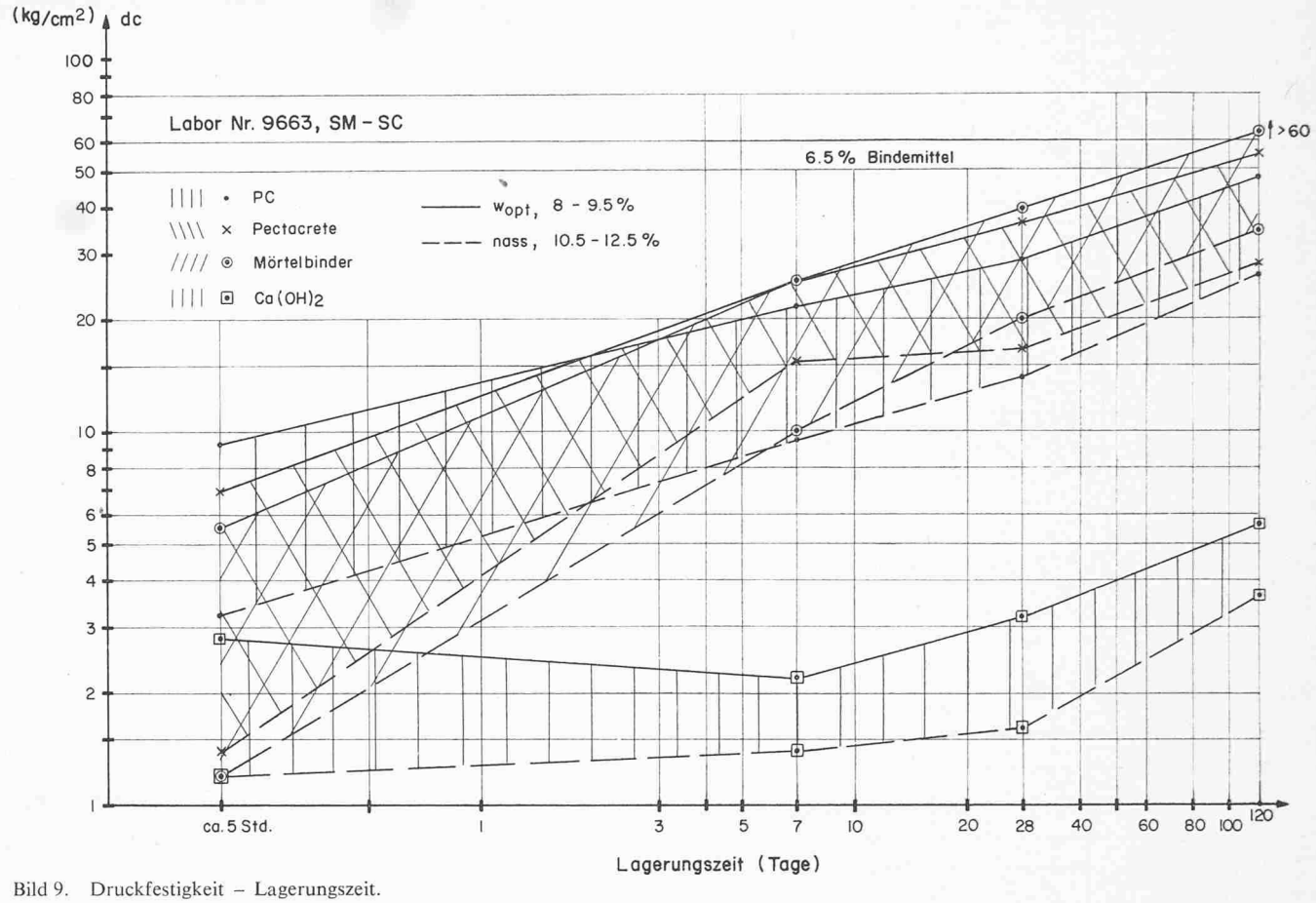


Bild 9. Druckfestigkeit – Lagerungszeit.

Verminderung der Druckfestigkeit – bis 50% –, wobei beim tonigen Silt die Abnahme kleiner ist als beim tonig-siltigen Sand. Bild 7 zeigt die Druckfestigkeit in Abhängigkeit des Wassergehaltes für andere tonige Silte [4]. Auf der nassen Seite des Optimums bleibt eine relativ grosse Festigkeit immerhin bestehen. Auf der trockenen Seite ist die Druckfestigkeit, insbesondere bei längeren Lagerungszeiten, ebenfalls kleiner als beim Optimum. Mit zunehmendem Bindemittelgehalt nimmt die Festigkeit zu. Eine Ausnahme bildet Kalk, bei dem mindestens bei w_{opt} ein optimaler Bindemittelgehalt besteht. Nach vier- bzw. dreimonatiger Lagerungszeit ist die Festigkeitszunahme in Funktion des Bindemittelgehaltes höher als nach sieben Tagen. Der *Einfluss der Lagerungszeit* ist im weiteren für zwei Bindemittelgehalte aus Bild 8 und 9 für einen der obigen Böden, sowie in Bild 10 und 11 aus früheren Untersuchungen ersichtlich [4, 5, 6]. Die Festigkeitszunahme mit der Zeit ist wesentlich. Sie darf zur Beurteilung des allgemeinen Verhaltens der Stabilisierung nicht ausser acht gelassen werden, falls eine Beschädigung in den ersten Zeiten kleinerer Festigkeit, z.B. durch unzulässiges frühzeitiges Befahren, nicht erwartet wird. Für eine *PC-Stabilisierung* sind etwa folgende *Umrechnungsfaktoren* typisch:

d_c 28 Tage = (1,2–1,5) · d_c 7 Tage
d_c 3–4 Monate = (1,7–2,2) · d_c 7 Tage
d_c 2 Jahre = (2,2 und mehr) · d_c 7 Tage

Bei der *Kalk-Flugasche-Stabilisierung* (sehr kalkreaktive, ausserordentlich feinkörnige Flugasche, SiO_2-Gehalt rund 80%) ist die frühe Festigkeitsentwicklung wesentlich grösser: d_c 2–3 Monate = (6–8) · d_c 7 Tage, die späte hingegen langsamer.

Die Bilder 12 und 13 zeigen ein Beispiel für die *Frost-Auftauprüfung*. Der Gewichtsverlust ergibt sich aus dem normierten Abbürsten, das an nach Norm mit w_{opt} hergestellten und während 12 Zyklen gelagerten Proctor-Probekörpern, Gefriertemperatur —23 °C, Auftauen 21 °C, vorgenommen wird. Bei zunehmendem Bindemittelgehalt ist allgemein ein kleinerer Gewichtsverlust zu verzeichnen. Die Anforderungen sind von der Portland Cement Association gegeben.

Der *Einfluss des Bindemittels* selber ist für zwei Untergrundmaterialien aus den Bildern 14 und 15 ersichtlich, wobei hier als Kriterium die Druckfestigkeit bei zwei Bindemittelgehalten gewählt wurde. Es zeigt sich, dass manchmal die Frost-Auftaubeständigkeit massgebend war, d.h. höhere Bindemittelgehalte ergab, obwohl die Reihenfolge der Bindemittel meistens erhalten blieb. Folgende *vergleichbare Dosierungen* sind unter Berücksichtigung beider Kriterien, d.h. entweder gleicher Druckfestigkeit oder genügender Frost-Auftaubeständigkeit, als *typisch* zu betrachten:

Tonig-siltige Sande (zwei Böden): 70% Pectacrete = 85% Mörtelbinder = 100% PC.

Toniger Silt (ein Boden): 75% Pectacrete = 85% HPC = 100% PC (Mörtelbinder hier ungeeigneter als Zement).

Bei einer erwünschten Druckfestigkeit von beispielsweise d_{c7} = 20 kg/cm² ergeben sich für die tonig-siltigen Sande, $w = w_{opt}$, etwa: 75 kg/m³ Pectacrete, 90 kg/m³ Mörtelbinder, 110 kg/m³ PC. Mit diesen an sich bescheidenen Dosierungen ist bei Wassergehalten bis etwa 3% über dem Optimum noch eine hinreichende Festigkeit um 10 kg/cm² zu erwarten. Der saubere gleichförmige Sand braucht mehr Bindemittel und

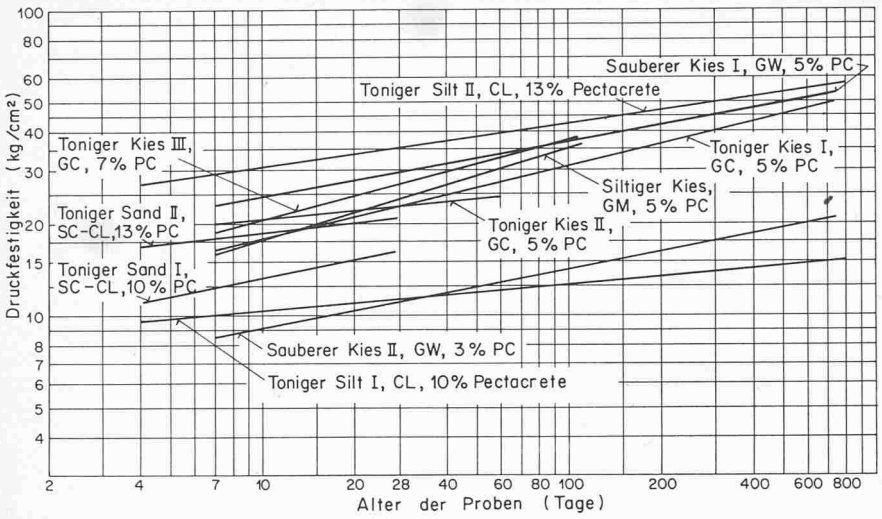


Bild 10. Druckfestigkeit – Alter der Proben.
10 typische Böden.
Bodenanteil < 10 mm
Zylindr. Probekörper, F = 25 cm², h = 10 cm
Verdichtet zu den Proctorwerten
Wasserlagerung vor dem Abdrücken

Bild 11. Druckfestigkeit – Zeit

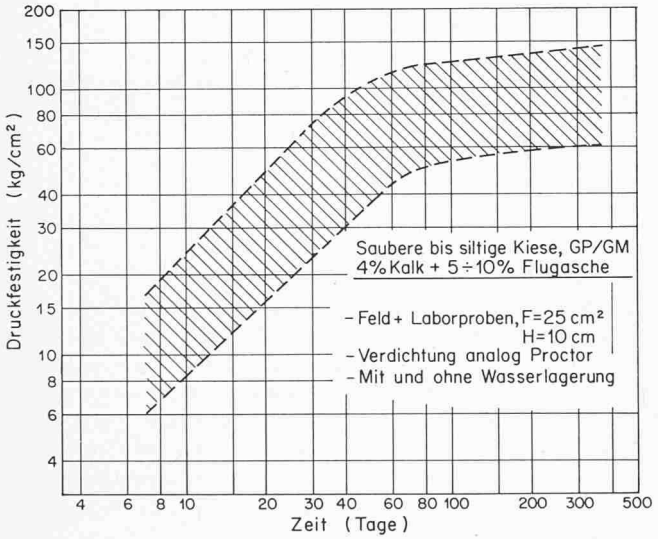


Bild 12. Verlauf der Frostauftauprüfung, Abbürsten
Labor Nr. 74/526, < 10 mm Bindemittelgehalt: 5 %
Klassierung: SM–ML/A–2–4 Anfangswassergehalt: 7,3 bis 7,7 %
Anfangstrockenraumgewicht: 2,05 bis 2,09 t/m³:
Δ G = totaler Gewichtsverlust Proctorproben und -verdichtung
— . — . — Ofentrocknung

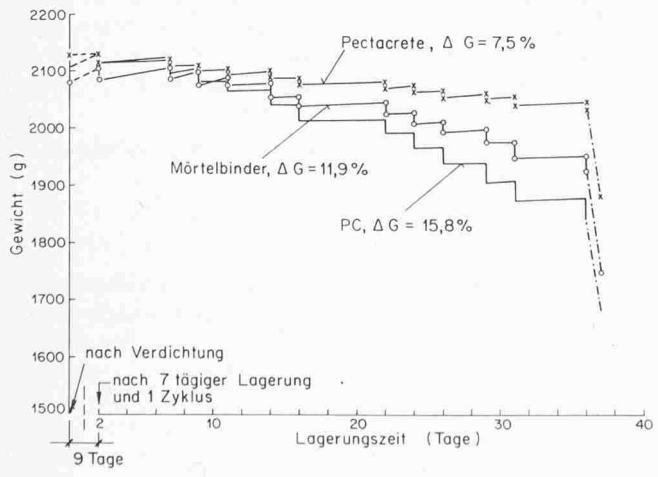
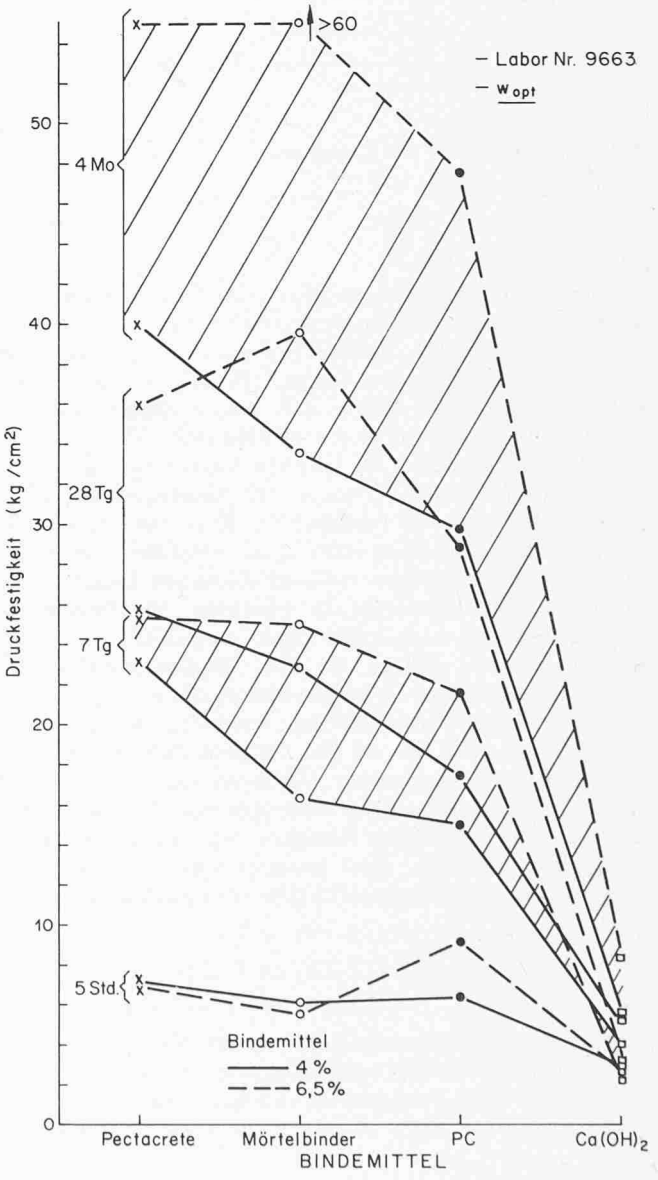


Bild 14. Druckfestigkeit – Bindemittel



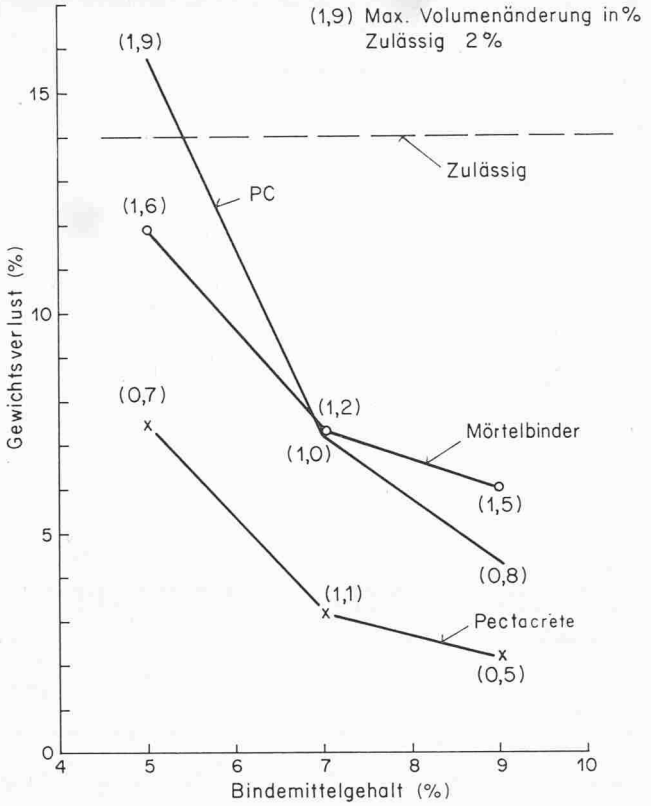


Bild 13. Gewichtsverlust in Abhängigkeit des Bindemittelgehalts
Labor Nr. 74/526, < 10 mm 70 % < 10 mm
Klassierung: SM–ML/A–2–4 25 % < 0,06 mm
Anfangswassergehalt: 7,0 bis 7,9 %
Anfangstrockenraumgewicht: 2,02 bis 2,11 t/m³

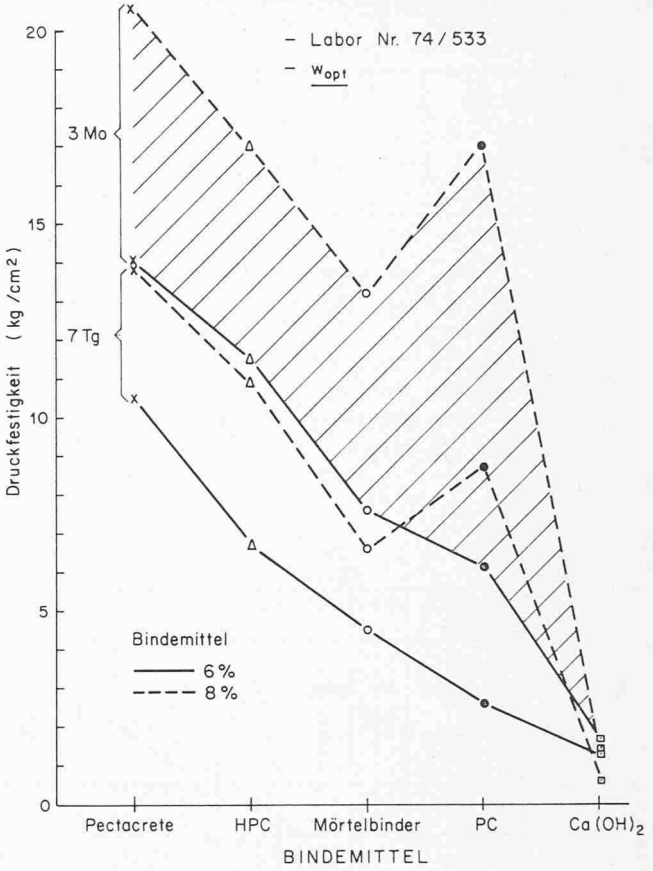


Bild 15. Druckfestigkeit – Bindemittel

auch mehr Mörtelbinder als PC. Für den tonigen Silt ergibt sich entsprechend für $d_{c7} = 10$ kg/cm²: 100 kg/m³ Pectacrete, 130 kg/m³ HPC, 145 kg/m³ PC.

Die *Wasserstabilität* der mit Pectacrete stabilisierten Proben war im weiteren am grössten.

Eine *Druckfestigkeit* um 20 kg/cm² darf für die obere, eine um 10 kg/cm² für die untere Fundationsschicht bzw. den Unterbau als hinreichend betrachtet werden. Die entsprechenden Tragfähigkeitswerte nach AASHO können zu $a = 0{,}15$ bzw. $a = 0{,}12$ angenommen werden (Kiessand = 0,11, Asphaltbeton = 0,44).

Feldversuche

Anhand von Feldversuchen sollte als erstes untersucht werden, ob mit dem *Mix-in-place-Verfahren* eine wirksame Beimischung der Bindemittel in den *feinkörnigen tonigen und nassen Böden* möglich ist und zweitens, wie sich die verschiedenen Bindemittel in relativ kleiner Dosierung in bezug auf die Tragfähigkeitsentwicklung verhalten würden. Die Anlage der Ende Mai 1975 gebauten Versuchsstrecke ist in Bild 16 dargestellt. Die zwei nicht stabilisierten Abschnitte 11 und 12 werden hier nicht weiter behandelt. Es wurden für jedes Bindemittel die aus der Laboruntersuchung als typisch zu betrachtenden und wirtschaftlich auch vertretbaren Gehalte von 90 bzw. 140 kg/m³ (5,5 bzw. 8,5 %) gewählt. Die Kornverteilungen des stabilisierten Bodens, die CBR-Werte und die zeitlich stark variierenden Wassergehalte sind aus den Bildern 16 und 17 ersichtlich. Der Boden kann mit Labor Nr. 74/533 verglichen werden. Er hatte vor der Stabilisierung einen um 5 % höheren Wassergehalt als der optimale. Nach den Stabilisierungsarbeiten lag der Wassergehalt knapp über dem Optimum und unterhalb der stabilisierten Schicht lag er um 3 % darüber. Vorgängig wurde der Boden durch zwei Passen eines Traxes mit vier Aufreisszähnen aufgelockert und mit einer Passe eines Howardmischers zerkleinert. Die Vermörtelung mit drei Passen des Howardgerätes war trotz des hohen Wassergehaltes gleichmässig. Nach einer Passe betrug der Rückstand auf dem 5-mm-Sieb 50 %, nach drei Passen 35 %, Variationskoeffizienten $\bar{s} = 17$–18 %. Die Dicke betrug nach Verdichtung im Mittel 18 cm (14), $\bar{s} = 11$ %, das Trockenraumgewicht 1,78 t/m³ (10), $\bar{s} = 2$ %. An während der Stabilisierung hergestellten und in bezug auf Trockenraumgewicht vergleichbaren Probekörpern wurden nach sieben Tagen und fünfstündiger Wasserlagerung folgende *mittlere Druckfestigkeiten* bestimmt:

Mörtelbinder:	2,1–3,8 kg/cm²
PC:	4,5–5,1 kg/cm²
HPC:	7,7–7,8 kg/cm²
Pectacrete:	8,3–8,8 kg/cm²

(CaO: 0,8–1,4 kg/cm²; nach 30 Tagen: 1,5–1,8 kg/cm²)

Der Einfluss des Bindemittelgehaltes und einer weiteren gründlichen Durchmischung war mit Ausnahme des Mörtelbinders sehr klein. Die Wasseraufnahme vor der Prüfung war beim Pectacrete und auch beim Mörtelbinder am kleinsten, die Wassergehaltsreduktion beim Einbau erwartungsgemäss für den Kalk am grössten. Die Bilder 18 und 19 zeigen die vor und nach der Stabilisierung gemessenen *Tragfähigkeitswerte*. Vergleiche in den Feldern 8–10 und mit den Deflektionen nach viereinhalb Tagen sind nicht unmittelbar möglich: Eine verspätete Verdichtung beeinträchtigte wahrscheinlich den Abbindevorgang eines Teiles dieser Felder. Im allgemeinen betrug aber die *Deflektion* nach 28 Tagen etwa 80–90 % der

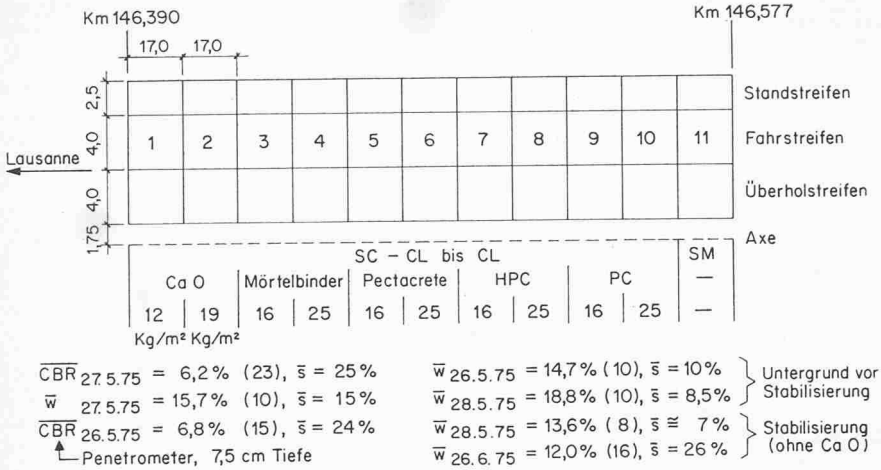


Bild 16. Anlage der Versuchsstrecke
11 Felder
Feldlänge 17 m, Feldbreite 10,5 m
Dicke der Stabilisierung: 18 cm

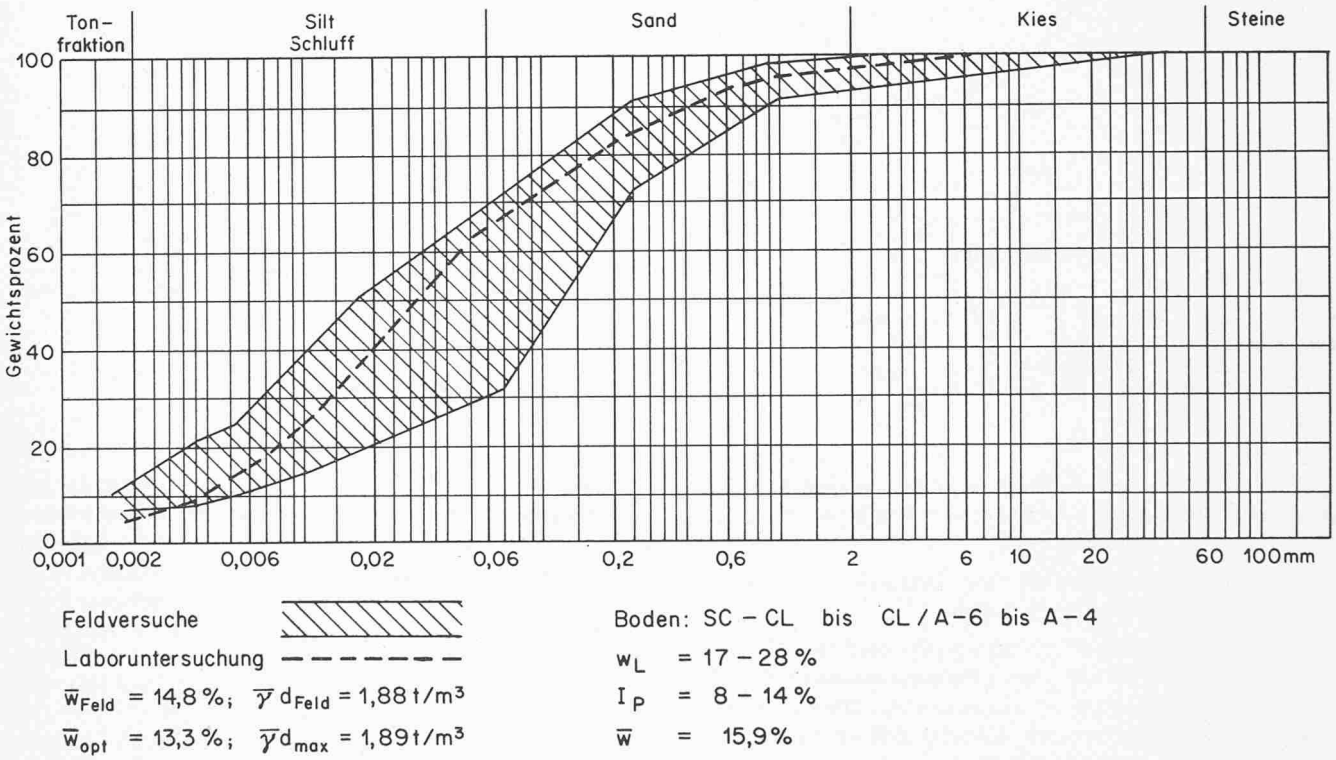


Bild 17. Versuchsstrecke. Stabilisierter Boden

Bild 18. M_E-Werte

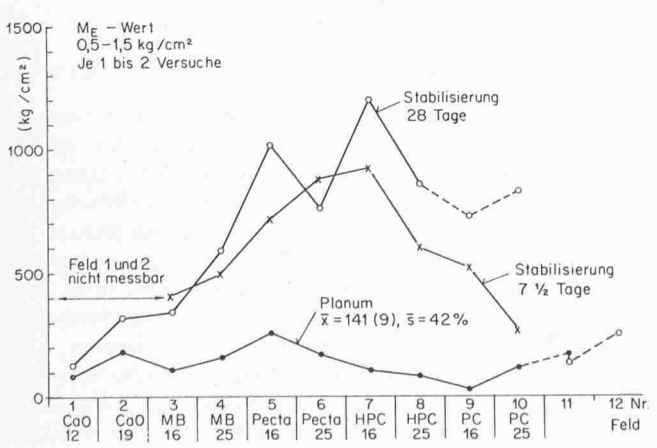
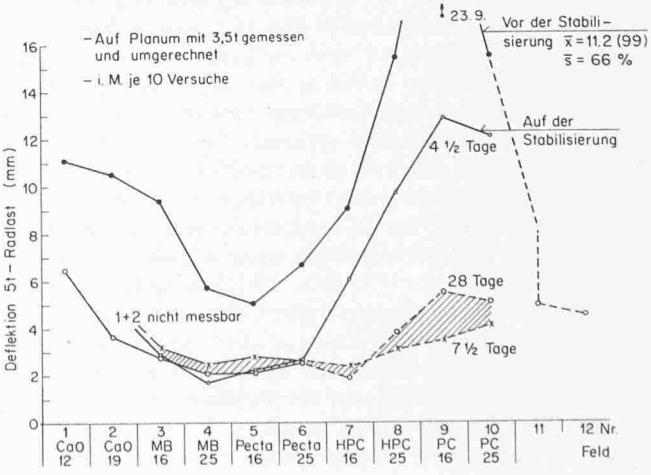


Bild 19. Deflektionen



Werte nach sieben Tagen, die M_E-*Werte* etwa 120–140% und teilweise mehr, was auf eine normale Erhärtung hinweist. Die absolute Tragfähigkeitserhöhung ist bedeutend: Die Deflektionen des stabilisierten Bodens sind nach sieben Tagen 2–3mal (Felder 3–6) bzw. 4–7mal kleiner (Felder 8–10), je nach Tragfähigkeit des Untergrundes. Zu berücksichtigen ist allerdings, dass durch das Auflockern vor der Stabilisierung eine gewisse Homogenisierung stattfinden konnte. Die kleinsten Deflektionswerte um 2,5–3 mm sind bei Pectacrete, HPC und Mörtelbinder vorhanden. Bei PC ist unter Berücksichtigung der kleinen Tragfähigkeit des Untergrundes ebenfalls eine relativ kleine Deflektion erreicht worden. Analoge Beobachtungen können bei den M_E-Werten vorgenommen werden. Zu berücksichtigen ist, dass die M_E-Messung, insbesondere bei kleiner Laststufe, weniger als die Deflektionsmessung ein Kriterium für die Gesamttragfähigkeit sein kann, da der Einflussbereich in die Tiefe kleiner ist.

Der M_E-Wert ist mehr als die Deflektion ein *Massstab für die Festigkeit der Stabilisierung* selber. Dies ist übrigens ausschliesslich der Fall bei der CBR-Messung, die eine Festigkeitserhöhung angibt, die selbstverständlich nicht die (massgebende) des gesamten Aufbaus sein kann. Bild 20 zeigt einige Beispiele [4] für typische CBR-Werte von Untergrundstabilisierungen. Vergleiche zwischen M_E-, Deflektions- und CBR-Werten dürfen nur bei homogener und nicht geschichteter Unterlage vorgenommen werden.

Die Felduntersuchungen zeigten zusammenfassend, dass die Stabilisierung eines nassen, tonigen Siltes bis Sandes zwecks einer relativ raschen Festigkeitsentwicklung mit vertretbarem Aufwand und relativ bescheidenen Bindemittelgehalten möglich ist. Druckfestigkeiten um 8–10 kg/cm² nach sieben Tagen sind erreichbar. Die Festlegung der Dosierung des Bindemittels muss im Labor erfolgen, das eine differenziertere Beurteilung ermöglicht. Als das am besten geeignete Bindemittel hat sich Pectacrete herausgestellt. Am nächsten wirksam ist HPC, dann PC und Mörtelbinder, bei mehr tonigsandigen Materialien dürfte die Reihenfolge der Wirksamkeit bei PC und Mörtelbinder umgetauscht werden; dies in Übereinstimmung mit den Laborversuchen.

Die Tragfähigkeit des wenig tragfähigen Bodens kann zwei- bis dreimal erhöht werden, was als wesentlich zu bezeichnen ist. Typische wünschbare und erreichbare Tragfähigkeitswerte für ähnliche Böden wie der untersuchte dürften nach wirksamer Stabilisierung einer 18 cm dicken Schicht nach sieben Tagen sein: Deflektion (5 t Radlast) 2,5–3 mm; M_E-Werte (Laststufe 0,5–1,5 bzw. 2,5–3,5): 800 bzw. 650 kg/cm².

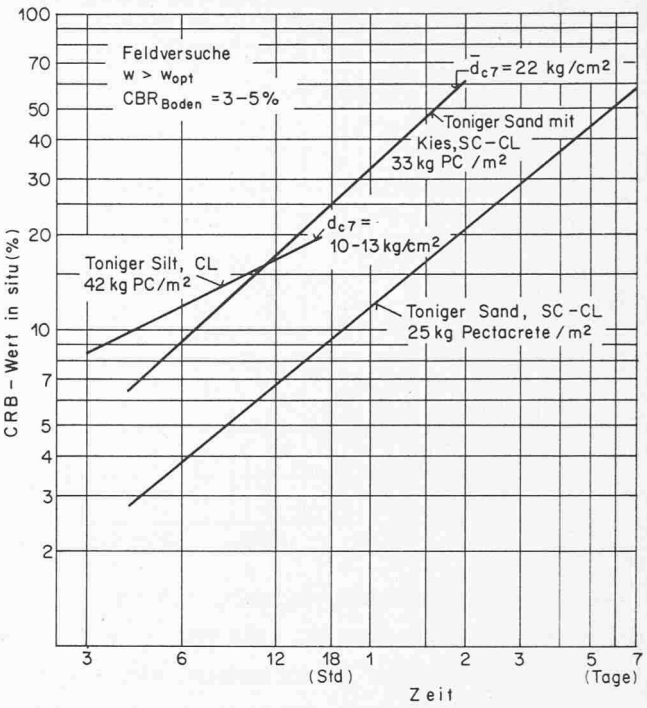


Bild 20. CBR-Wert der Stabilisierung in Abhängigkeit der Zeit

Bodenbehandlung mit Chemikalien

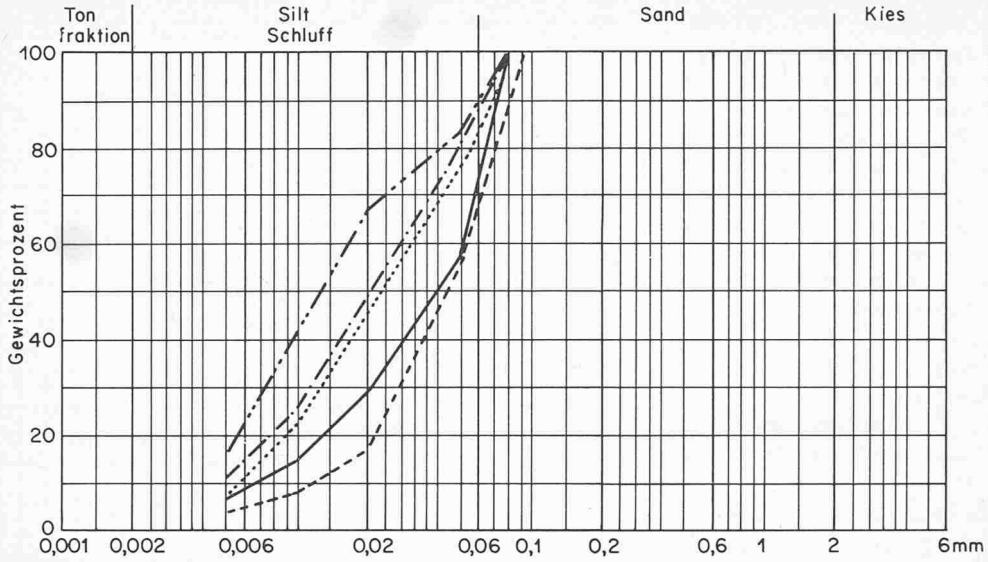
Die erfolgreiche Anwendung eines chemischen Mittels, das anorganisch oder organisch sein kann, bedingt die *richtige Einschätzung seiner Wechselwirkungen mit den Bodenteilchen und dem Bodenwasser.* Bei *feinkörnigen tonigen Böden,* die hier von Interesse sind, spielt die kolloidale Natur der Fraktion $< 1\ \mu$ bzw. die damit verbundenen, von der grossen spezifischen Oberfläche (> 10–20 m²/g) gegebenen Eigenschaften die wichtigste Rolle.

Bekanntlich weisen die meistens *blättrig ausgebildeten Tonmineralien* (Alumosilikate, in der Schweiz z.B. die Illite) an der Oberfläche, vornehmlich infolge isomorphen Ersatzes, eine negative elektrische Ladung an den flachen Seiten auf. Diese Ladung ist für die Bindung von geordneten Wassermolekülen, die starke Dipole sind, und von im Wasser vorhandenen Ionen, meistens positiv geladenen Kationen (Grössenordnung wenige Å) verantwortlich. Die Ionen hydratieren mit dem Wasser und stossen sich voneinander ab. Sie sind im weiteren austauschbar. Die Dicke der am Tonteilchen (der Grösse von wenigen Tausenden Å) gebundenen energiereichen Schicht hydratierter Ionen und Wasser (Grössenordnung wenige Hunderte von Å) ist im wesentlichen von der Art der Ionen und der Flüssigkeit abhängig.

Die zwischen den erwähnten Komponenten – Tonschichtkristalle, Ionen, Wassermoleküle – wirkenden chemisch-elektrischen anziehenden und abstossenden Kräfte sind tatsächlich reichlich kompliziert. Die an den Tonteilchen gebundene Schicht verhindert jedenfalls im Gegensatz zu dem relativ inaktiven Silt, Sand und Kies eine leichte Berührung, d.h. eine entsprechende stabile Gerüstbildung der festen Teilchen untereinander. Je dünner die Schicht ist, desto grösser ist aber die Wahrscheinlichkeit, dass mindestens eine (positiv geladene) Ecke eines Teilchens mit der negativ geladenen Fläche eines anderen Teilchens praktisch Kontakt nimmt. Die anziehenden Kräfte überwiegen in diesem Fall, die dabei auftretende nicht geordnete Struktur wird *flockuliert* genannt.

Ist hingegen die Dicke der angelagerten Schicht gross, so stehen die Teilchen infolge vorwiegend abstossenden Kräften in einigem Abstand parallel zueinander. Sie bilden dann, mindestens in kleinen Bereichen, eine *disperse Struktur.* Die mechanischen Eigenschaften des Bodens werden massgeblich von ihrer Struktur beeinflusst. Es ist nachgewiesen und einleuchtend, dass flockulierte Tone an sich eine grössere Festigkeit als disperse haben. Sie weisen aber eine grössere Durchlässigkeit und kleinere Dichten auf; insbesondere ist eine solche Struktur eher instabil, da Wasser zur Ausbildung vollständiger Schichten fehlt und folglich aufgenommen werden kann. Eine solche Struktur stellt sich bei normaler Verdichtung von trockenen Tonböden ein, $w < w_{opt}$.

Die Chemikalien beeinflussen in erster Linie die Ausbildung der an die Tonkristalle gebundenen Schichten und die Oberflächeneigenschaften der Bodenteilchen. Es können vereinfachend, je nach ihrer Wirkungsweise, vier grosse Klassen von chemischen Mitteln unterschieden werden [9, 10, 11, 12].



Anhang: Verwendete Bindemittel (Sedimentation in Aethylalkohol, nach Andreasen/EMPA, SNV 670 818)

—·—·— Calciumhydroxyd, $Ca(OH)_2$ (SIA 115), $\gamma_s = 2{,}36\ t/m^3$

– – – – – Portlandzement, PC (SIA 115), $\gamma_s = 3{,}25\ t/m^3$

——— Hochwertiger Portlandzement, HPC (SIA 115), $\gamma_s = 3{,}53\ t/m^3$

—·—·—·— Mörtelbinder (hochhydraulischer Kalk), (DIN 1060), $\gamma_s = 2{,}59\ t/m^3$

····· Pectacrete (hydrophober Spezialzement), Z 350 F (DIN 1164), $\gamma_s = 3{,}05\ t/m^3$

Aggregatbildende Mittel

Solche Chemikalien bewirken eine flockulierte Struktur. Dies wird erreicht durch Reduktion der Dicke der an den Tonpartikeln angelagerten Schicht, d.h. durch eine *Erhöhung der Anziehungskräfte zwischen den Teilchen,* meistens durch den Austausch der im Boden vorhandenen einwertigen Kationen der Alkalimetalle mit den hinzugegebenen mehrwertigen Kationen der Erdalkali- oder Erdmetalle des chemischen Mittels. Die Schicht wird allgemein durch kleinere hydratisierte Kationen, mehrwertige Kationen (es braucht dann weniger um die Ladung der Tonpartikeln zu neutralisieren), eine Erhöhung der Konzentration im Elektrolyt und eine sauere Umgebung reduziert. Einzelne dieser Erscheinungen treten beispielsweise als Sofortreaktion durch eine Zugabe von $Ca(OH)_2$ ein. Bindemittel, die flockulierend durch die Dissoziierung von metallischen Kationen wirken, sind z.B. anorganische Salze wie Kalzium- oder Eisenchlorid. Gewisse grosse organische Kationen und Kettenmakromoleküle, z.B. Krilium, und andere Flockungsmittel können ebenfalls als aggregatbildende Mittel verwendet werden. Das Trockenraumgewicht und der Plastizitätsindex nehmen bei einer solchen Bodenbehandlung meistens ab, der optimale Wassergehalt und die Durchlässigkeit werden grösser. Die Verarbeitbarkeit der nassen Böden wird verbessert.

Dispergierende Mittel

Entgegengesetzte Voraussetzungen zu den im vorangehenden Abschnitt besprochenen führen zu einer Dispergierung der Bodenteilchen. Wirkungsvoll ist vor allem die Zugabe von einwertigen Anionen, die von Nichtmetallen geliefert werden, insbesondere von Sulphaten und Phosphaten. Die *abstossenden Kräfte* werden durch die Absorption von Anionen oder den Kationenaustausch grösser, die Struktur wird dispers. Die Verdichtung und der Frostwiderstand werden begünstigt, das Raumgewicht und der Plastizitätsindex werden eher grösser, der optimale Wassergehalt wird reduziert, die Durchlässigkeit ebenfalls. Dispergierend wirkt auch Lignin, das in der Sulphitablauge aus der Papierherstellung enthalten ist.

Wasserabweisende Mittel

Durch die Zugabe von wasserabstossenden Mitteln wird eine Hydrophobierung der ansonst wasseraffinen Tonteilchen, meistens durch absorptive Umhüllung derselben, erreicht. Die *Wasseraufnahme* des Bodens wird durch diese oberflächenaktiven Stoffe (Tenside) *reduziert.* In dieser Richtung einwirkend sind einige organische kationische Chemikalien (grosse Kationen), welche die anorganischen Kationen ersetzen (z.B. Arquad), Aminazetate (z.B. Armac) sowie gewisse Resine wie Anilin-Furfural, Vinsol usw. Hydrophobierende Zusätze können oft in Richtung der aggregatbildenden Mittel wirken. Wasserabweisende Mittel werden auch als Haftverbesserer mit andern, vornehmlich bituminösen Bindemitteln, aber auch als Zusatz zu Zementen verwendet.

Bindemittel

Dies sind die eigentlichen erwünschten Stabilisierungsmittel. Die Chemikalien der drei vorangehenden Abschnitte üben nur *indirekt* einen Einfluss auf die Festigkeit aus, der nicht unbedingt zu bleibenden stabilen Zuständen führt. Es ergeben vor allem hochmolekulare organische Stoffe eine bindende Wirkung. Sie verkitten mit ihren langen Fadenmolekülen (Polymerisate) oder netzartigen Makromolekülen (Kunstharze) untereinander die einzelnen Bodenteilchen oder bilden selber ein *Netzwerk,* worin die Teilchen wie in einer Matrix stehen. Zudem können sie zu flockulierten Strukturen führen. Zementierend wirken Kalziumakrylat, Anilin-Furfural und andere *natürliche oder künstliche Harze,* z.B. Resine aus Formaldehyden, dann Chromlignin usw.

In dieser Gruppe sind auch die *Phosphorsäure,* sowie *Natriumsilikat* (Wasserglas) einzureihen, das durch Zugabe von Salzen (z.B. $CaCl_2$) ein zementierendes Gel bildet. Im weiteren

können hier die *gebrannten Gipse* und *gipshaltigen Zemente* (Fast-Fix) erwähnt werden, die, wie Versuche zeigten [4], zu relativ hohen Frühfestigkeiten führen können.

Die Chemikalien werden oft in Verbindung untereinander und als Zusätze zu anderen Stabilisierungsmitteln, z.B. Zement, verwendet.

Bei einer chemischen Bodenbehandlung ist für unsere Verhältnisse in erster Linie eine *dauernde bindende Wirkung in den fast immer zu nassen Böden* anzustreben. Chemische Mittel, die keine Gewähr für Wasser- und Frostabilität und die Aufrechterhaltung der eventuell vorhandenen natürlichen Festigkeit geben, sollten auf keinen Fall eingesetzt werden. Es ist zudem auf die bei vielen Chemikalien vorhandene Gefahr der *Auslaugung* durch Wasser, auf ihre *Gefährdung durch Bodenbakterien* (bei manchen organischen Verbindungen), sowie auf ihre *Giftigkeit* zu achten. Bindende, einigermassen bewährte Chemikalien, wie Kalziumakrylat, sind oft *sehr teuer*.

Den mit viel Propaganda angepriesenen chemischen Mitteln ist mit grösster Vorsicht zu begegnen [13]. Von diesen «Wundermitteln» wird oft auch nicht annähernd die Zusammensetzung bekanntgegeben, was die Voraussetzung für eine vernünftige Anwendung wäre. Allphob und Terrabind beispielsweise sollen eher wasserabweisende Mittel sein (bzw. Terrabind evtl. auch dispergierend), das erste aus Fettsäuren und Harzen, das zweite aus Sulphitablauge und metallischen Salzen bestehend. Consolid 444, anscheinend aus Polyamiden und Hartwachs bestehend, sollte wasserabweisend und flockulierend, RRP, Schwefelsäure, organische Substanzen und Salze enthaltend, eher flockulierend wirken, wie angegeben wird. Laborversuche aus Deutschland [14] sowie einige von zwei Bauunternehmungen auf bernischen Autobahnbaustellen der N1, N6 und N12 mit den zwei zuletzt erwähnten Chemikalien durchgeführte Feld- und teilweise Laborversuche zeigten gar keinen positiven Erfolg. Bereits die Tatsache, dass diese Mittel in Wasserlösung, die eine nicht zu vernachlässigende Erhöhung des natürlichen Wassergehaltes des Bodens (bis 3%) bewirken und in sehr kleinen Mengen (weniger als 0,5‰ des Bodengewichtes) zugemischt werden, ist mindestens für unsere Verhältnisse nasser bindiger Untergrundmaterialien nicht sinnvoll.

Die wirksame homogene Beimischung von wenigen Promille Zusatzmitteln ist bei allen «Spurenchemikalien» fraglich. Allgemein ist festzustellen, dass eine abgesicherte ingenieurmässige Anwendung von chemischen Mitteln immer noch aussteht, obwohl, insbesondere für militärische Zwecke, bereits wertvolle Erfahrungen gesammelt werden konnten [15].

Schlussfolgerung

Es wurde nach einer allgemeinen Einleitung versucht, einen Überblick über einige hydraulische Bindemittel zu geben. Die mit *PC, HPC, Pectacrete* und *Mörtelbinder* erreichbare Stabilisierungswirkung wurde für *typische Böden der Molasse* anhand von Labor- und Feldversuchen abgeklärt und untereinander verglichen. Diese Bindemittel, sowie *Flugasche* und *Kalk,* sind *alle verwendbar*. Relativ niedrige Dosierungen können stabile Zustände und brauchbare Festigkeiten ergeben. Der eingangs gesetzten Zielsetzung der Stabilisierung feinkörniger Böden mit hohem Wassergehalt kann entsprochen werden. Die Feldversuche bestätigen die *Mischbarkeit* der erwähnten hydraulischen Bindemittel im *Mix-in-place-Verfahren*. Eine beachtliche *Tragfähigkeitserhöhung* wurde erreicht. Das Langzeitverhalten muss noch abgeklärt werden; Überraschungen sind aber kaum zu erwarten.

Als zweite wichtige Folgerung der Untersuchung ergibt sich, dass die bewährten *Standard-Versuchs- und Arbeitsmethoden*, die in Übernahme und teilweiser Erweiterung der amerikanischen Praxis verschiedentlich empfohlen wurden (*Lehrstuhl für forstliches Ingenieurwesen; Betonstrassen AG; SAFS-Merkblätter* usw.) *hinreichend* zur Prüfung der einigermassen bekannten und auch neueren hydraulischen Bindemittel und zu deren Einbau sind. Die Anforderungen an die Bindemittel selber werden in der Norm SIA 115 beschrieben bzw. können analog zu ausländischen Normen noch erfasst und vorgeschrieben werden. Es sind Bindemittel des Ingenieurs für den Ingenieur.

Anhand einiger Beispiele werden kurz die im allgemeinen komplizierteren *Mittel des Chemikers* beschrieben. Verallgemeinerungen der Wirkungsweise der chemischen Mittel sind grundsätzlich nur bei genauer chemisch-physikalischer Kenntnis des zu behandelnden Bodens und der chemischen Zusammensetzung des Mittels selber möglich. Die Voruntersuchung im Labor muss demzufolge gründlich sein, die nicht nur mechanische Eigenschaften berücksichtigen soll. Sie bedingt eine *Erweiterung der bekannten Standardverfahren*.

Nur *selten* dürfen die chemischen Mittel als *echte Stabilisierungsmittel* bezeichnet werden, insbesondere in unseren Zonen feuchten Klimas und nasser Böden. Was in den Prospekten der Hersteller steht, ist von Fall zu Fall nachzuweisen. Grösste Zurückhaltung, besser noch *vorsichtige* Ablehnung bis zum Beweis des Gegenteils ist hier am Platze; dies mag die wichtigste Folgerung dieses Kapitels sein.

Literaturverzeichnis (Auswahl)

[1] *Winterkorn H.P.:* «The Science of Soil Stabilization.» Highway Research Board, Bulletin 108, Washington, 1955.

[2] *Kuonen V.:* «Boden und Strassenunterbau.» Schweiz. Bauzeitung, 10/1973.

[3] *Giudicetti F.:* Fünf interne Berichte des Autobahnamtes, 1974–75; vergl. auch «Strassen- und Tiefbau», 6/1976.

[4] *Giudicetti F.* (damals am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der ETHZ): Verschiedene Untersuchungen und Berichte zur Bodenstabilisierung mit Zement und andern Mitteln. 1966–71.

[5] *Giudicetti F., Hirt R., v. Krannichfeldt M.:* «Stabilisierung von Kies-Tragschichten mit Kalk und Flugasche.» Strasse und Verkehr, 12/1972.

[6] *Giudicetti F., Hirt R., v. Krannichfeldt M.:* «Couches de fondation et de base en grave stabilisée à liants hydrauliques.» XVe Congrès AIPCR, Mexico, 1975.

[7] *Wessel H., Kämmerer E.H.:* «Bodenverfestigung mit Spezialzement.» Strasse und Autobahn, 11/1968.

[8] *Müller A.:* «Oberbau im Abschnitt Attikon—Frauenfeld der N7.» Strasse und Verkehr, 2/1975.

[9] *Mainfort R.C.:* «Soil Stabilization with Resins and Chemicals.» HRB, Bull. 108, 1955.

[10] *Lambe T.W.:* «Soil Stabilization», Kap. 4 in Leonards «Foundation Engineering». New York, 1962.

[11] *Henke K.F. et al.:* «Zusammenstellung und Auswertung der Literatur über Bodenstabilisierung mit Chemikalien.» Otto-Graf-Institut, Schriftenreihe Heft 6, Stuttgart, 1962.

[12] *Deslandres D.:* «Contribution à l'étude des propriétés hydrauliques et mécaniques des sols fins compactés. Application à l'action des produits hydrophobants.» Annales de l'institut technique du bâtiment et des travaux publics, Sols et Fondations, Nr. 117, Paris, 1975.

[13] — «Vorläufige Stellungnahme zur Wirksamkeit chemischer Mittel bei der Bodenstabilisierung im Strassen- und Wegebau.» Strasse und Autobahn, 12/1974.

[14] *Hübner A., Suss G.:* «Untersuchungen über die Verfestigung eines Bodens mit Chemikalien.» Strassen- und Tiefbau, 6/1975.

[15] — «Conference on Soil Stabilization.» Massachusetts Institute of Technology, 1952.

Adresse des Verfassers: Dr. *F. Giudicetti,* dipl. Ing. ETH, Autobahnamt des Kantons Bern, Schermenweg 5, 3014 Bern.