

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse
Herausgeber: Schweizerischer Forstverein
Band: 131 (1980)
Heft: 7

Artikel: Bodenstabilisierung
Autor: Kuonen, V.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-766554>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 06.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Bodenstabilisierung¹

Von V. Kuonen, ETH Zürich

Oxf.: 383.4

1. Begriff der Stabilität — Ziel der Bodenstabilisierung

Unter- und Oberbau einer Strasse bilden eine relativ dünne Schicht an der Erdoberfläche, welche in hohem Masse den Witterungseinflüssen ausgesetzt ist. Es sind dies vor allem die Einflüsse des Wassers (Benetzung und Austrocknung) und die Frostwirkungen (Gefrieren und Auftauen). Diese Einwirkungen können zu einer Änderung des Volumens und der Festigkeit des Bodens führen. Dieses Verhalten ist der Grund dafür, dass neben der Festigkeit der Begriff der Stabilität bzw. Instabilität eingeführt werden muss. *Stabilität* bedeutet in diesem Zusammenhang *Konstanz der Festigkeit und des Volumens* bei Einwirkung der Umgebungsbedingungen Wasser und Frost.

Von Natur aus absolut stabile Böden gibt es nicht. Untersuchungen und Beobachtungen zeigen aber, dass saubere Kiese und Sande (< 5 Gewichts-% Feinanteile bei 0,06 mm) als stabile Materialien bezeichnet werden können. Die Änderungen der Festigkeit und des Volumens durch Benetzen, Austrocknen, Gefrieren und Auftauen bleiben begrenzt, führen zu keinen Schäden und sind deshalb tolerierbar.

Böden mit grösseren Mengen (> 5 Gewichts-%) an Feinanteilen sind dagegen instabil, das heisst Böden mit siltigen und tonigen Anteilen ändern bei Einwirken von Wasser und Frost ihr Volumen und ihre Festigkeit beträchtlich.

Das Ziel der Bodenstabilisierung besteht nun darin, von Natur aus instabile Böden stabil zu machen, das heisst sie so zu verändern, dass die Änderung der Festigkeit und des Volumens bei Einwirken von Wasser und Frost in zulässigen Grenzen bleibt. Als zulässig betrachtet man Werte, bei welchen keine Schäden an der Strasse entstehen.

Bei den bekannten Stabilisierungsarten wird in allen Fällen die Festigkeit der Böden vergrössert.

¹ Gastvorlesung, gehalten an der Aristotelion-Universität, Thessaloniki (26.—30. 3. 1979).

Die Vergrößerung der Festigkeit ($\tau = c + \sigma \cdot \text{tg}\phi$) wird erreicht durch die Vergrößerung der beiden Anteile der Scherfestigkeit, das heisst durch

- die Vergrößerung des Kohäsionsanteils (c) und/oder
- die Vergrößerung des Reibungsanteils ($\sigma \cdot \text{tg}\phi$)

Die Kohäsion natürlicher Böden ist eine Eigenschaft der Tonminerale. Ihre Grösse ist vom Wassergehalt und von der Lagerungsdichte abhängig. Durch Verkleinerung des Wassergehaltes (Austrocknung) und Vergrößerung der Lagerungsdichte (Verdichtung) wird die Kohäsion vergrössert.

Die zweite Komponente der Festigkeit — der Reibungsanteil — kann durch Verdichtung, durch Verbesserung der Kornzusammensetzung und durch die Zugabe von Stabilisierungsmitteln vergrössert werden. Durch die Verdichtung werden die Bodenkörner dichter gelagert und dadurch grössere Reibungsflächen geschaffen, so dass der Reibungsanteil grösser wird. Die Tatsache, dass die Verdichtbarkeit eines Bodens von der Kornzusammensetzung abhängt, ist bekannt. Je mehr sich die Kornverteilung einer Parabel nähert, desto dichter kann ein Material gelagert werden.

Die Festigkeit eines Bodens ist also abhängig vom Raumgewicht und vom Wassergehalt. Je höher das Raumgewicht und je kleiner der Wassergehalt, desto grösser ist die Festigkeit. Das Ziel der Bodenstabilisierung liegt nun in der dauernden Beibehaltung der einmal erreichten Festigkeit, was dadurch erzielt wird, dass Wassergehalt und Raumgewicht konstant gehalten werden können.

Die Stabilität des Bodens, das heisst die Festigkeits- und Volumenkonstanz, wird praktisch durchwegs mit den traditionellen Stabilisierungsmitteln Kalk, Zement, Teer, Bitumen oder mit der mechanischen Stabilisierung erreicht.

Die verschiedenen Massnahmen zur Vergrößerung der Scherfestigkeit können zusammengefasst der Darstellung 1 entnommen werden.

Darstellung 1. Massnahmen zur Erhöhung der Scherfestigkeit.

Massnahme	Kohäsionsanteil c	Reibungsanteil $\sigma \cdot \text{tg}$
Verdichtung	+	+
Mechanische Stabilisierung	(+)	+
Stabilisierung mit Kalk	+	(+)
Stabilisierung mit Zement	+	—
Stabilisierung mit bituminösen Bindemitteln	+	—

- + Vergrößerung des betreffenden Anteils
- (+) mögliche Vergrößerung
- keine Vergrößerung

In neuerer Zeit sind aber auch andere Stabilisierungsmittel im Handel, wie z. B. Arquad, Terrabind, Allphob, Soil Consolid RPS, Chlorkalzium usw., die in bezug auf den Stabilisierungseffekt teilweise gute Resultate ergeben. Die Schwierigkeit dieser relativ teuren Stabilisierungsmittel liegt aber darin, dass sie — um noch wirtschaftlich zu sein — in sehr kleinen Dosierungen oder teilweise in flüssiger Form (Wassergehaltserhöhung!) zur Anwendung kommen. Die gleichmässige Verteilung und homogene Durchmischung derartiger Zugaben ist aber auf der Baustelle kaum durchzuführen.

2. Arbeitsverfahren der Bodenstabilisierung

Die wichtigste Voraussetzung für das Gelingen einer Bodenstabilisierung ist eine vollständige und gleichmässige Vermischung von Boden, Stabilisierungsmittel und Wasser. Für den Mischvorgang werden zwei Verfahren angewandt:

- das Orts- oder Baumischverfahren (mix-in-place)
- das Zentralmischverfahren (mix-in-plant).

Beide Verfahren sind nahezu gleichwertig, wenn so lange gemischt wird, bis das Stabilisierungsmittel gleichmässig verteilt ist (homogene Farbe des Mischgutes).

Anstehende oder bereits eingebrachte Böden werden im Ortsmischverfahren stabilisiert. Wird Bodenmaterial an einer bestimmten Entnahmestelle gewonnen, können beide Verfahren zur Anwendung kommen. In der Schweiz wird in diesem Fall fast ausschliesslich im Zentralmischverfahren gearbeitet. Entscheidend für die Wahl des Mischverfahrens ist schliesslich die Wirtschaftlichkeit.

Beim *Ortsmischverfahren* fahren die Mischgeräte über den zu stabilisierenden Boden. Die Mischung erfolgt an Ort und Stelle, ohne den Boden aufzunehmen (Maschine durch Boden). Bei den Mischgeräten wird zwischen den sogenannten Eingangsmischern (ein Mischdurchgang stellt die fertige Mischung her) und den Mehrgangmischern (mehrere Mischdurchgänge sind nötig) unterschieden. Im «kleinen» Strassenbau werden fast ausschliesslich Mehrgangmischer eingesetzt.

Beim *Zentralmischverfahren* werden Boden, Stabilisierungsmittel und Wasser in stationären Mischanlagen gemischt (Boden durch Maschine), das heisst in Betonmischern für die Zementstabilisierung und in Aufbereitungsanlagen für die Stabilisierung mit bituminösen Bindemitteln. In der Schweiz kommen relativ häufig mobile Anlagen zum Einsatz, welche mit kleinem Aufwand montiert, demontiert und verschoben werden können.

In der folgenden Darstellung sind die wichtigsten Arbeitsgänge, welche ausser der Mischung für das Gelingen einer Stabilisierung entscheidend sind, für beide Mischverfahren zusammengestellt.

Darstellung 2. Arbeitsgänge.

<i>Ortsmischverfahren</i>	<i>Zentralmischverfahren</i>
Planieren und eventuelles Vorverdichten der zu stabilisierenden Bodenschicht	Planieren der Unterlage, auf welche das stabilisierte Mischgut eingebracht wird
Verteilen des Stabilisierungsmittels	Aufbereiten des Mischgutes in Zentrale (genaue Dosierung von Stabilisierungsmittel und Wasser möglich)
Mischen	
eventuelle Wasserbeigabe	Transport des Mischgutes auf die Baustelle
Kontrolle	
Korrekturen	Einbringen (Verteilen)
Planieren	Planieren des Mischgutes (Kontrolle)
Verdichten	Verdichten
Kontrolle; eventuell Korrekturen	Kontrolle; eventuell Korrekturen
eventuell Nachbehandeln	eventuell Nachbehandeln

Die mechanische Stabilisierung und die Stabilisierung mit Kalk werden fast ausschliesslich im Ortsmischverfahren ausgeführt, während für die Stabilisierung mit Zement und mit bituminösen Bindemitteln beide Verfahren angewandt werden.

Details über Dosierung, Verteilen der Stabilisierungsmittel, Mischen, Verdichten usw. werden bei den einzelnen Verfahren besprochen.

3. Die mechanische Bodenstabilisierung

Das Prinzip der mechanischen Bodenstabilisierung besteht darin, die Kornverteilung eines Bodens so zu verändern, dass die Festigkeits- und Stabilitätseigenschaften verbessert werden. Dies wird erreicht durch die Herstellung von Korngemischen, die sich möglichst hohlraumarm verdichten lassen; das heisst die verschiedenen Korngrössen müssen in einer solchen Verteilung vertreten sein, dass jeweils die Hohlräume zwischen den groben Körnern von den nächst kleineren ausgefüllt werden. Die Kornverteilungskurve solcher Mischungen ist parabelförmig und hat die folgende Formel:

$$p = 100 \frac{d^m}{D^m}$$

- p Durchgang in % durch das Sieb mit der Sieböffnung d
- D Durchmesser des Grösstkorns
- d Durchmesser des Kornes für Siebdurchgang p
- m Parabelexponent

Hohlraumarme Gemische ergeben sich für Parabelexponenten von 0,4 ... 0,55 (Fullerkurve $m = 0,5$).

Die Materialien der Fundations- respektive der Kies-Sand-Tragschicht und der ton-wasser- respektive kalk-wasser-gebundenen Verschleisschicht werden nach den Prinzipien der mechanischen Stabilisierung zusammengesetzt. Es werden für die verschiedenen Schichten Kornverteilungsbereiche vorgeschrieben, so dass die zulässigen Materialien die Grundsätze der mechanischen Stabilisierung erfüllen (siehe Darstellung 3: Tragschichtmaterial und Darstellung 4: Material für tonwassergebundene Verschleisschicht).

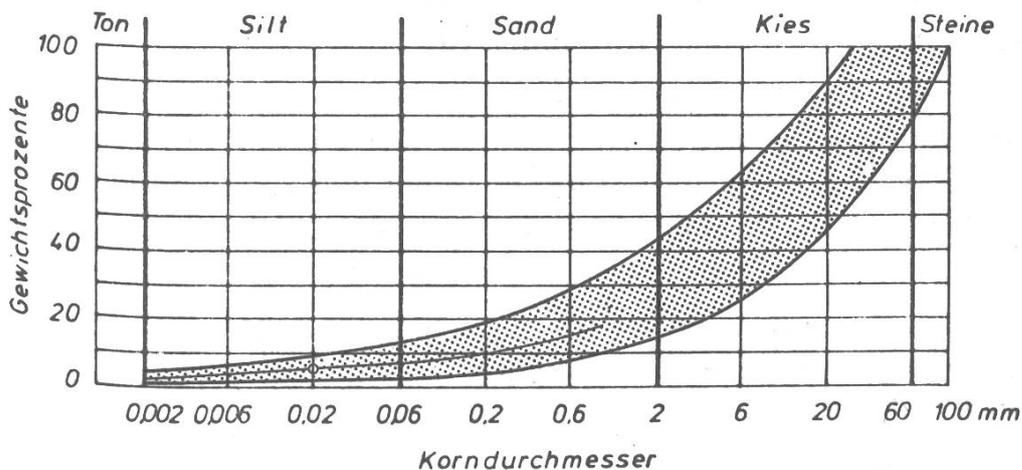
Vielfach stehen natürliche Bodenmaterialien an, welche ohne besondere Aufbereitung den Anforderungen der mechanischen Bodenstabilisierung entsprechen. Wenn sie aber den Anforderungen nicht entsprechen, so können sie durch die folgenden Massnahmen aufbereitet werden:

- Mischung des Bodens mit einem oder mehreren Böden oder mineralischen Zuschlagsstoffen
- Eliminierung ungeeigneter Kornfraktionen durch Waschen, Sieben oder Brechen

Die Mischung von Böden, z. B. zur Erreichung eines körnigen Traggerüsts in einem Untergrund, wird aus Kostengründen in der Schweiz kaum praktiziert.

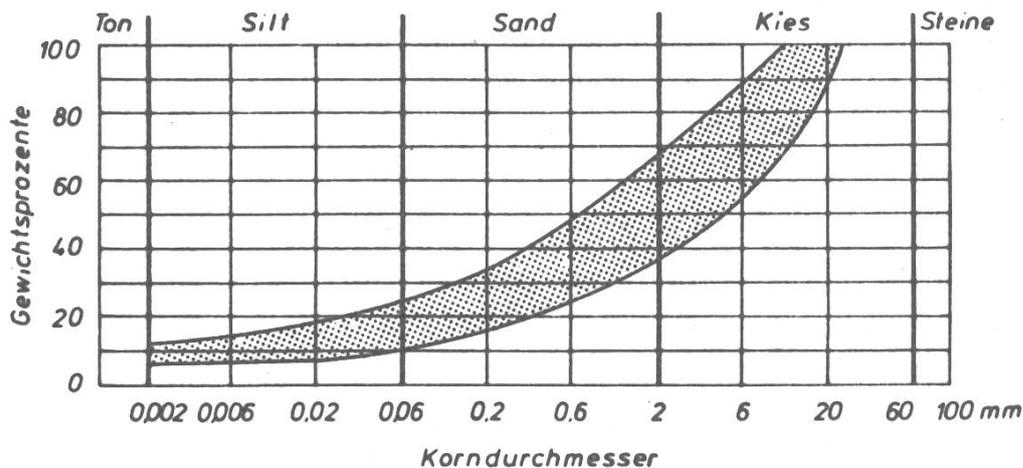
Die Zuschlagsstoffe für Beton und Heissmischgut sind ebenfalls nach den Prinzipien der mechanischen Stabilisierung zusammengesetzt. Die Einstellung idealer Korngemische erfolgt hier durch Fraktionierung natürlicher oder aufbereiteter Bodenmaterialien und nachträgliche Zusammensetzung entsprechend den strengen Spezifikationen für eine möglichst hohe Verdichtbarkeit.

Darstellung 3. Kornverteilung von Material für Kies-Sand-Tragschichten.



Plastizitätseigenschaften des Materials $< 1,0 \text{ mm } \phi$
 Fließgrenze : $W_L < 25 \%$
 Plastizitätsgrenze : $I_P < 5$

Darstellung 4. Kornverteilung von Material für ton-wasser-gebundene Verschleisschichten.



Grösstkorn: 15—25 mm

Plastizitätseigenschaften des Materials $< 1,0 \text{ mm } \phi$

Fliessgrenze : $W_L < 35 \%$

Plastizitätsindex : $I_P = 6-15$

Siebdurchgang bei 0,06 mm sollte nicht mehr als $\frac{2}{3}$ des Siebdurchganges bei 0,6 mm sein.

Schwach beanspruchte Strassen (Wald- und Güterstrassen) werden häufig als Naturstrassen gebaut. Die Deckschicht der Naturstrassen, die sogenannte ton-wasser-gebundene Verschleisschicht, ist ebenfalls nach den Prinzipien der mechanischen Stabilisierung zusammengesetzt (Darstellung 4). In diesem Material muss ein bestimmter Tonanteil vorhanden sein, damit durch die natürliche Kohäsion die Bodenkörner möglichst gut verkittet werden. Vielerorts stehen keine natürlichen Materialien mit genügend Tonanteil zur Verfügung. In diesen Fällen muss dem Kiesmaterial ein Ton (z. B. Opalit) zugemischt werden, so dass die ideale Kornabstufung mit dem notwendigen kohäsiven Feinanteil vorhanden ist.

Anstelle von Ton kann auch «Kalkmehl» die bindende Wirkung übernehmen. In den letzten Jahren ist es durch den Einsatz moderner, mobiler Brechanlagen (z. B. Kombination Backenbrecher und Hammermühle) möglich geworden, Kalkgestein zu einem hochwertigen Verschleisschichtmaterial mit einem Grösstkorn von 15 bis 25 mm aufzubereiten (vgl. Darstellung 5).

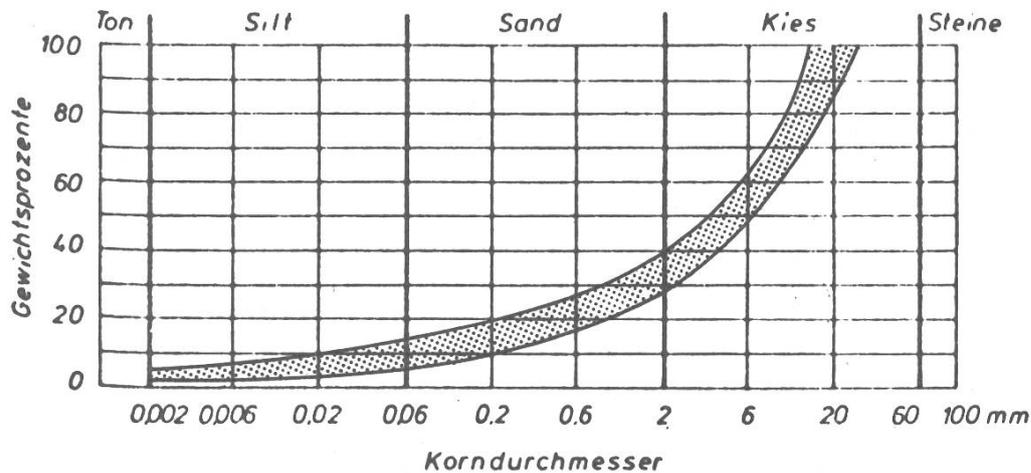
Das Waschen von Kiessanden für die Schichten des Strassenoberbaus zur Eliminierung von instabilen Feinanteilen kommt aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und des Umweltschutzes kaum mehr in Frage.

Das Sieben von natürlich anstehenden Materialien hat insbesondere für die Begrenzung des Maximalkorns eine gewisse Bedeutung.

Eine häufige und zunehmend wichtigere Massnahme zur Verbesserung der Kornverteilungskurve (Abstufung und Grösstkorn) ist das Brechen von Stei-

nen und Blöcken aus Moränen, Schutthalden, Bachbetten, Felsabträgen usw. Die modernen Brechanlagen liefern dabei gut abgestufte Materialien, die etwa den Prinzipien der mechanischen Stabilisierung entsprechen und eine hohe Tragfähigkeit gewährleisten (a -Wert = 0,14).

Darstellung 5. Kalk-wasser-gebundenes Verschleisschichtmaterial.



Materialherkunft: Kalkgestein, Schutthalden (zum Beispiel Calanda, Hauenstein)
 Grösstkorn : 15—25 mm
 Plastizität : klein
 Schichtdicke : > 6,0 cm

4. Bodenstabilisierung mit Kalk

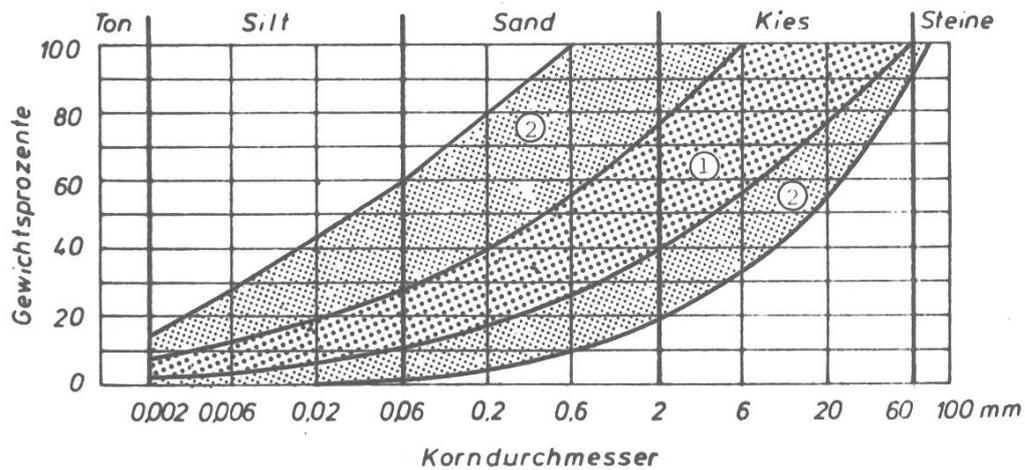
Über die Bodenstabilisierung mit Kalk wurde vor wenigen Jahren an anderer Stelle ausführlich berichtet, so dass hier auf die Wiedergabe des Vortrages in Thessaloniki verzichtet wird (z. B. Schweiz. Zeitschrift für Forstwesen 10/1966 und 8/1967; Strassenbautechnik 8/1975; Kurs über Wald- und Güterstrassenbau 10/1976).

5. Stabilisierung mit Zement

5.1 Grundsätzliches

Zement und einige weitere hydraulische Bindemittel, wie Mörtelbinder, Pectacrete-Zement, hydraulischer Kalk und andere mehr, vermörteln durch ihre hydraulischen Eigenschaften die Körner eines Mineralgemisches. Deshalb gelten bei der Stabilisierung mit hydraulischen Bindemitteln hinsichtlich Abbinden, Erhärten, Nachbehandeln usw. ähnliche Grundsätze wie in der Betontechnologie. Für die Herstellung von Beton sind aber hochwertige, stabile Zuschlagsstoffe vorgeschrieben. Die Bodenstabilisierung mit Zement dagegen wird in Böden angewandt, die wegen ihres hohen Feinanteilgehaltes

Darstellung 6. Bereich der mit Zement stabilisierten Böden.



- ① Kornverteilungsbereich der in der Schweiz am häufigsten mit Zement stabilisierten Böden
- ② Bereich der mit Zement stabilisierbaren Böden; in der Schweiz selten ausgeführt

nicht stabil sind und deshalb ohne besondere Behandlung im Strassenoberbau nicht verwendet werden können.

5.2 Stabilisierbare Böden

Der Kornverteilungsbereich der mit Zement stabilisierbaren Böden geht aus der Darstellung 6 hervor.

Generell wären — mit Ausnahme der organischen — alle Böden mit Zement stabilisierbar. Die Menge und die Plastizität der Feinanteile setzen aber technische und wirtschaftliche Grenzen. Bei grosser Plastizität ($I_p > 15$) ist die Mischbarkeit derart erschwert, dass eine genügende Mischqualität nur noch mit unwirtschaftlich hohem Aufwand erreicht werden kann. Erfahrungsgemäss steigt zudem mit der Zunahme des Feinanteils auch der notwendige Zementgehalt. In sehr feinkörnigen Böden müssen zur Erreichung einer genügenden Stabilität Dosierungen von wesentlich über 10 % angewandt werden, so dass die Wirtschaftlichkeit fraglich wird.

In der Schweiz werden deshalb vor allem körnige Bodenmaterialien mit Zement stabilisiert, welche den Qualitätsvorschriften für Fundations- und Tragschichtmaterialien nicht mehr entsprechen, das heisst Kiese und Sande, die wegen ihres hohen Feinanteilgehaltes nicht wasser- und froststabil sind.

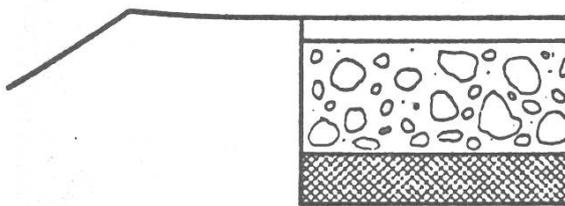
5.3 Lage der zementstabilisierten Schicht im Aufbau der Strasse

Zementstabilisierte Schichten können im Unter- oder Oberbau eingebaut werden (Darstellung 7). Im Unterbau ist es grundsätzlich die oberste Schicht des Untergrundes respektive Unterbaus (oft als Zementbehandlung bezeichnet). Im Oberbau kann die mit Zement stabilisierte Schicht folgende Lage haben:

- als Übergangsschicht bzw. unterer Teil der Tragschicht bei inhomogenem, schlecht tragfähigem Untergrund (Sandwich-Methode);
- als oberer Teil der Tragschicht;
- als gesamte Tragschicht (full depth).

Stabilisierungsarbeiten brauchen Installationen oder Maschinen. Wie die Darstellungen 8 und 9 zeigen, können diese für die Stabilisierung mit Zement auch relativ bescheiden sein (Sortierrechen, Ladeschaufel, eventuell Wassertank). Die Stabilisierung mit Zement erlaubt aber die Verwendung von zweit- und drittklassigen Kiesen, welche oft im Projektgebiet selbst zu finden sind. Der Tragfähigkeitswert des mit Zement stabilisierten Materials ist aber

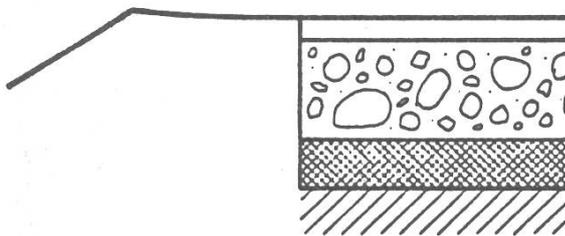
Darstellung 7. Lage der zementstabilisierten Schicht bei Wald- und Güterstrassen.



Deckschicht

Kies-Sand-Tragschicht

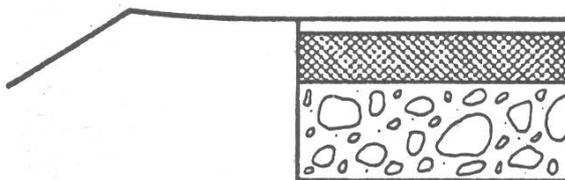
Zementstabilisierte Schicht als oberste Schicht des Untergrundes respektive Unterbaus



Deckschicht

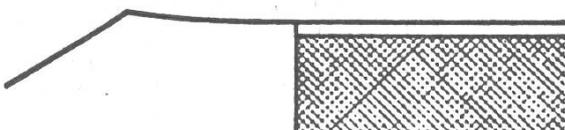
Kies-Sand-Tragschicht

Zementstabilisierte Schicht als Übergangsschicht respektive unterer Teil der Tragschicht



Deckschicht, eventuell Cutbackbelag
zementstabilisierte Schicht als oberer Teil der Tragschicht

Kies-Sand-Tragschicht



Deckschicht, eventuell Cutbackbelag
Gesamte Tragschicht mit Zement stabilisiert (full depth)

Darstellungen 8 und 9. Ladeschaufel beim «Verteilen» von Zement und «Mischen» von Kies-Sand und Zement.



etwa doppelt so hoch wie der eines guten, von Natur aus stabilen Kiesel (a-Wert des stabilisierten Materials zirka 0,20). Anstelle mehrerer Schichten wird daher in Zukunft die gesamte Tragschicht vermehrt nur noch aus zementstabilisiertem Material bestehen. Der ganze Arbeitsablauf, insbesondere auch der Einbau des Materials, wird dadurch wesentlich vereinfacht.

Wird der obere Teil oder die gesamte Tragschicht mit Zement stabilisiert, ist eine bituminöse Deckschicht nötig. Zweifache Oberflächenbehandlungen (OB) und dünne (ca. 2 cm) Asphaltbetonbeläge (AB) haben dabei zum Teil zu unbefriedigenden Resultaten geführt, weil diese dünnen Schichten an einzelnen Stellen abgeplatzt und Schlaglöcher entstanden sind. Der AB 10 oder AB 16 muss dicker aufgebracht werden (> 3 cm). Denkbar wäre als Deckschicht auch ein flexibler Cutback-Belag (z. B. 3 bis 4 cm CB 10), weil durch den Verkehr die Risse, welche in einer zementstabilisierten Schicht auftreten können, wieder geschlossen werden.

5.4 Technologie der Bodenstabilisierung mit Zement

Die Bodenstabilisierung mit Zement beruht auf den Gesetzmässigkeiten der Bodenmechanik. Im Gegensatz zum Beton steht beim stabilisierten Material nicht die Festigkeit, sondern die Stabilität gegen Wasser- und Frosteinwirkungen im Vordergrund. Dazu sind minimale Druckfestigkeiten von etwa 20 kg/cm^2 erforderlich. Die Zementdosierungen liegen in der Regel mit 3 bis 6 % entsprechend 60 bis 150 kg pro Kubikmeter Bodenmaterial wesentlich tiefer als bei der Betonherstellung. Die Mischung des anstehenden Bodens mit dem Zement im Ortsmischverfahren entspricht der ursprünglichen Zielsetzung der Bodenstabilisierung, nämlich der Verbesserung des an Ort und Stelle anstehenden Bodens. Bei diesem Mischverfahren ist allerdings die homogene Mischung und die Einstellung des optimalen Wassergehaltes schwieriger.

Wider Erwarten sind gute Erfahrungen auch mit zementstabilisierten Materialien gemacht worden, deren Mischung mit einfachsten Mitteln erfolgte. In einer Kiesgrube sind zirka 10 m^3 Kies-Sand ab Wand (Zweitklasskies mit relativ vielen Feinanteilen) auf $4 \times 5 \text{ m}$ ausgebreitet worden. Mit der Ladeschaufel wurden darauf 900 kg Portlandzement gleichmässig verteilt, und anschliessend wurden durch «Umschaufeln» Kies-Sand und Zement vermischt und auf LKW verladen. Auf der Baustelle wurde das Gemisch mit einem Trax verteilt und möglichst gut planiert. Die Verdichtung erfolgte mit einer Vibrationswalze (zirka 1800 kg Eigengewicht). Das zementstabilisierte Material wurde in etwa 40 cm Dicke auf eine mit Kalk vorstabilisierte — von Natur aus sehr schlecht tragfähige — Unterlage aufgebracht. Deflektionsmessungen auf zirka drei Wochen alten derartigen Aufbauten ergaben sehr gute Resultate ($d = 1$ bis 2 mm).

Wird das Material aus Entnahmestellen (Kiesgruben, Moränen, Schutthalden) antransportiert, so ist es meistens zweckmässiger, das Stabilisierungs-

mischgut in Mischanlagen (mix-in-plant) aufzubereiten. Zement und Wasser können hier genauer dosiert werden, und die Mischung wird homogener. Zur Vermeidung von Schwindrissen wird empfohlen, die Verdichtung unterhalb des optimalen Wassergehaltes auszuführen. Der Wasserzementwert liegt mit etwa 1 allerdings immer noch wesentlich über demjenigen des Betons.

Für die Dimensionierung des Oberbaus werden die sogenannten Tragfähigkeitskoeffizienten in Funktion der Festigkeit angegeben:

<i>Druckfestigkeit nach 7 Tagen</i>	<i>a-Wert</i>
$dc_7 > 50 \text{ kg/cm}^2$	0,23
$dc_7 30\text{--}50 \text{ kg/cm}^2$	0,20
$dc_7 < 30 \text{ kg/cm}^2$	0,15

Daraus geht hervor, dass es nicht sinnvoll ist, den Zementgehalt so anzuheben, dass die Druckfestigkeit wesentlich über 30 kg/cm^2 steigt, da der a-Wert nur noch unwesentlich ansteigt. Eine Erhöhung der Tragfähigkeit bzw. des Stärkenindex wird dann nur noch durch eine grössere Schichtdicke erreicht.

5.5 Zemente

In der Schweiz wird für die Stabilisierung fast ausschliesslich Portlandzement (PC) verwendet. Ausnahmsweise gelangt hochwertiger Portlandzement (HPC) mit hoher Anfangsfestigkeit zum Einsatz, damit die stabilisierte Schicht möglichst bald befahren werden kann.

Für feinsandige, siltige Böden mit steiler Kornverteilungskurve scheint ein Spezialzement gute Resultate zu ergeben. Der sogenannte Pectacrete-Zement ist ein hydrophober Zement, der seine wasserabstossende Wirkung erst durch intensive Mischung mit dem Boden und dem Wasser verliert. Durch diesen Effekt steht die gesamte Zementmenge für die Festigkeitsreaktion zur Verfügung, so dass für den gleichen Boden praktisch nur die halbe Pectacrete-Zementdosierung notwendig ist, um die gleiche Festigkeit wie mit normalem Portlandzement zu erreichen. Mit dem Pectacrete-Zement hat man in Deutschland gute Erfahrungen gemacht; in der Schweiz ist er bisher nur wenig verarbeitet worden.

Ein weiterer Spezialzement ist der Mörtelbinder (Rocadur: auf Ölschieferbasis), welcher ähnliche Festigkeiten wie Portlandzement ergibt. Das Bodenmaterial bleibt bis zu 8 bis 12 Stunden einbaufähig, ohne dass ein Abfall der späteren Festigkeit festzustellen ist. Auch dieser Zement ist hydrophobiert.

5.6 Eignungsprüfungen — Dosierungen

Vor der Ausführung von Stabilisierungsarbeiten muss eine Eignungsprüfung im Labor durchgeführt werden. Fast alle Länder haben diesbezüg-

liche Normen herausgegeben (Schweiz: SNV 670 376). Die Eignungsprüfung muss vor allem über folgende Punkte Auskunft geben:

- Ist der Boden mit Zement stabilisierbar oder enthält er organische Anteile, welche das Abbinden oder Erhärten des Zementes beeinträchtigen (Natronlauge-Test; Bestimmung des pH-Wertes usw.)?
- Ist der Boden bearbeitbar, müssen Blöcke und Steine (> 60 mm) vorgängig entfernt oder gebrochen werden, kann der Boden infolge seiner Tonanteile mit den zur Verfügung stehenden Maschinen genügend zerkleinert und mit dem Zement homogen vermischt werden?
- Wie gross ist die erforderliche Zementdosierung? Grössenordnungen für die Dosierung können der Darstellung 10 entnommen werden.
- Bei welchem Wassergehalt soll das Boden-Zement-Gemisch verdichtet werden?

Eignungsprüfungen werden durch Speziallabors durchgeführt (z. B. Betonstrassen AG in Wildegg (Zementindustrie); private Labors; Labors der ETH).

Darstellung 10. Zementdosierungen.

Bodenart	Zementdosierung
Kiese: GW; GP; GM; GC; GM—ML; GC—CL	3— 5 Gew-%
Sande: SW; SP	5— 8 Gew-%
Silte, siltige Sande: SM; SM—ML	8—12 Gew-%
tonige Sande und siltige Tone: SC; SC—CL; CL	12—20 Gew-%

5.7 Arbeitsausführung

Grundsätzlich gelten die unter Ziffer 2 gemachten Angaben. Im grossen Strassenbau (Autobahnbau usw.) werden Stabilisierungen mit Zement fast ausschliesslich im Zentralmischverfahren ausgeführt, während im Wald- und Güterstrassenbau auch im Ortsmischverfahren gearbeitet wird. Mischung, Planie und Verdichtung müssen spätestens zirka 3 Stunden nach Arbeitsbeginn abgeschlossen sein (Abbinden, Erhärten), was einige organisatorische Probleme mit sich bringt. Die Wahl der Verdichtungsgeräte richtet sich nach dem Ausgangsboden: Vibrationsgeräte für kohäsionslose Böden; knetende Geräte (z. B. Gummiradwalzen) für kohäsive Böden. Unmittelbar nach der Verdichtung muss eine sogenannte Nachbehandlung erfolgen, damit das Austrocknen der Schicht verhindert wird. Dies geschieht in der Regel durch Aufspritzen einer basischen, rasch brechenden Bitumenemulsion (zirka 0,8 bis 1,0 kg/m²). Zementstabilisierte Schichten dürfen mindestens 7 Tage nach dem Einbau nicht befahren werden. Der Einbau über Kopf ist somit bei dieser Stabilisierungsart für längere Strecken ausgeschlossen.

6. Bodenstabilisierung mit bituminösen Bindemitteln

6.1 Grundsätzliches

Unter «bituminösen Bindemitteln» versteht man in der Schweiz Baustoffe, welche Bitumen oder Teere enthalten. Durch die Stabilisierung werden die Körner eines Mineralgemisches so verkittet, dass eine flexible, frost- und wasserbeständige Schicht entsteht. Meistens werden Kies-Sande, die relativ viele Feinanteile enthalten, mit bituminösen Bindemitteln stabilisiert. Das zu stabilisierende Material wird dabei nicht aufbereitet, das heisst nicht getrocknet oder aufgeheizt. Daher ist es notwendig, dass zur Bindung der Feinanteile und zur Erhöhung der Haftfähigkeit des Bindemittels ein Haftmittel beigemischt wird. In der Regel wird dazu Kalkhydrat $\text{Ca}(\text{OH})_2$ oder auch «Mörtelbinder» (Rocadur = Ölschieferasche + Klinker) verwendet.

6.2 Stabilisierbare Böden

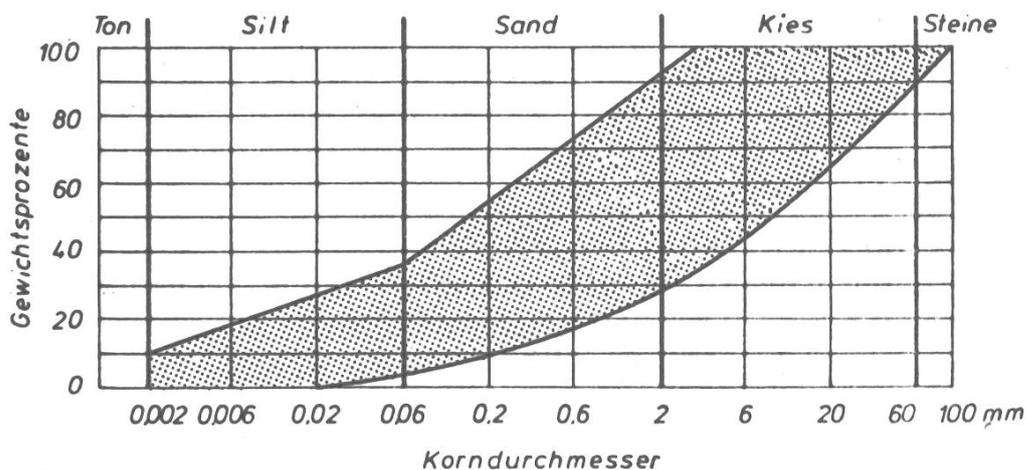
Aus der Darstellung 11 ist ersichtlich, dass der Kornverteilungsbereich der mit bituminösen Bindemitteln stabilisierbaren Böden enger begrenzt ist als der Bereich für die Stabilisierung mit Zement. Voraussetzung für das Gelingen einer Stabilisierung mit bituminösen Bindemitteln ist, dass sich die Böden leicht zerkleinern und mischen lassen. Die zulässige Menge an Feinanteilen ist daher hauptsächlich wirtschaftlich bedingt: hohe Kalk- und Teerdosierung, grosser Mischaufwand.

Andrerseits verlangt man von einem gut stabilisierten Boden einen minimalen Sandanteil von 25 bis 30 Gewichts-%. Das Grösstkorn des zu stabilisierenden Bodens darf aus maschinentechnischen Gründen nicht grösser als 60 mm sein.

6.3 Lage der stabilisierten Schicht in einem Strassenaufbau

Bituminöse Stabilisierungen werden — mit einigen Ausnahmen — vor allem auf Gemeinde-, Wald- und Güterstrassen ausgeführt. Grundsätzlich

Darstellung 11. Bereich der mit bituminösen Bindemitteln stabilisierbaren Böden.



wird dabei der obere Teil der Tragschicht stabilisiert, welche mit einer bituminösen Deckschicht abgedeckt werden muss. Als Deckschicht haben sich doppelte Oberflächenbehandlungen oder flexible Cutback-Beläge (z. B. CB 10) bewährt. Weniger gute Erfahrungen hat man mit den spröden Sandteppichbelägen oder mit dünnen Asphaltbetonbelägen (z. B. AB 10) gemacht. Die Flexibilität der stabilisierten Schicht ist bedeutend grösser als die der Deckschicht, so dass in der Deckschicht häufig Risse entstanden sind.

Bituminöse Stabilisierungen sind in den letzten 15 Jahren in der Schweiz sehr häufig zum Ausbau von sogenannten Naturstrassen ausgeführt worden. Durch die Stabilisierung wurden die Strassen gleichzeitig verstärkt, erosionsfest und staubfrei gemacht.

6.4 Bindemittel

Für die Stabilisierung gelangen niedrigviskose Bindemittel zur Anwendung, welche die Stabilisierung von feuchtem, kaltem Bodenmaterial im Ortsmischverfahren erlauben. Weitaus am häufigsten wird Strassenteer verwendet, und zwar je nach Jahreszeit T 80/120 oder T 135/250. Zum Teil kann seine Verwendung auch mit seiner Widerstandsfähigkeit gegenüber Humin-Säuren begründet werden (Phenol, welches als Herbizid wirkt).

Stabilisierungen mit Bitumenemulsion (Typ EL) oder Cutback als Bindemittel werden in der Schweiz kaum verwendet.

6.5 Eignungsprüfungen — Dosierungen

Auch bei der Bodenstabilisierung mit bituminösen Bindemitteln muss eine Eignungsprüfung ausgeführt werden. Besonders wichtig ist dabei die Festlegung der richtigen Dosierung. Während bei Kalk oder Zement eine kleine Überdosierung keine sehr grossen Nachteile nach sich zieht, hat eine Überdosierung mit bituminösen Bindemitteln zur Folge, dass das Gemisch «überfettet» wird und durch Verkehr und Sonnenbestrahlung massive Schäden erleiden kann. Für die in der Schweiz ausgeführten Stabilisierungen sind 3,5 bis 4,5 Gewichts-% Teer und 1,5 bis 2,0 Gewichts-% Kalkhydrat oder Mörtelbinder verwendet worden. Die stabilisierte Schicht wird meistens 10 bis 12 cm dick, das heisst es kommen 8 bis 9 kg/m² Teer und 3,5 bis 4,5 kg/m² Kalkhydrat oder Mörtelbinder zur Anwendung. (Eignungsprüfungen durch STIA, Pratteln.)

6.6 Arbeitsausführung

Stabilisierungen mit bituminösen Bindemitteln werden im Ortsmisch- und im Zentralmischverfahren ausgeführt.

Im *Ortsmischverfahren* wird vor allem beim Ausbau und bei der Verstärkung von bestehenden Strassen gearbeitet, sofern das vorhandene Kies-

Sand-Material geeignet ist. Bei der Arbeitsausführung muss darauf geachtet werden, dass die geforderte Planiegenauigkeit bereits vor der Mischphase vorhanden ist.

Der «Mischzug» besteht aus einem Kalkverteilergerät, aus einem Tankwagen mit dem Bindemittel und aus einer relativ hochoffenen Bodenfräse. Das Bindemittel wird durch eine Druckleitung direkt in den Mischkasten der Bodenfräse geführt und dort über Düsen in das aufgewirbelte Material gespritzt.

Mit dem *Zentralmischverfahren* wird vor allem bei der Stabilisierung von Fremdmaterial gearbeitet, das heisst insbesondere dann, wenn an einer Entnahmestelle geeignetes Kies-Sand-Material gewonnen wird. Der Einbau des Mischgutes erfolgt beim Zentralmischverfahren fast ausschliesslich mit dem Fertiger. Dosierung, Mischung und Einbauqualität sind im Zentralmischverfahren besser als im Ortsmischverfahren, insbesondere treten keine Über- oder Unterdosierungen an den «Längsfugen» der einzelnen Arbeitsstreifen auf.

Die Verdichtung erfolgt beim optimalen Feuchtigkeitsgehalt, wobei das Bindemittel zu 50 % als «Feuchtigkeit» in Rechnung gesetzt wird. Als zweckmässig hat sich folgendes Verdichtungsschema erwiesen: zuerst Anwalzen mit leichter Glattradwalze (zirka 2 t), nach 1 bis 2 Tagen Nachverdichtung und Abglätten der Oberfläche mit einer schweren Glattradwalze (mindestens 12 t), evtl. in Kombination mit einer Gummiradwalze.

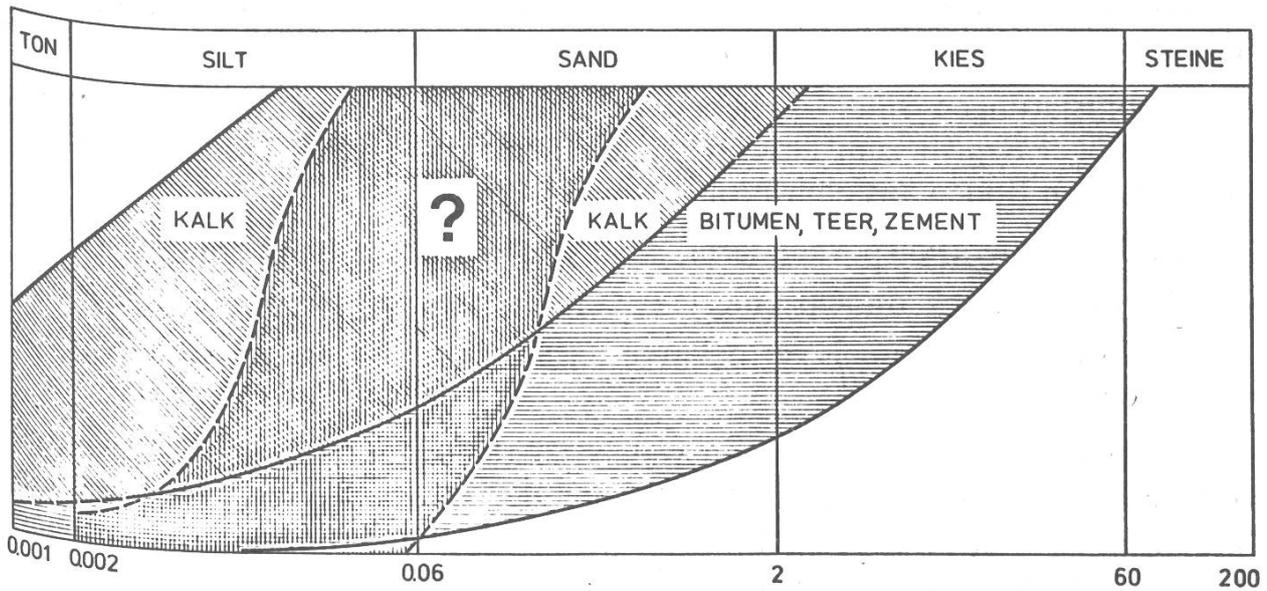
Eine mit bituminösen Bindemitteln stabilisierte Schicht kann sofort befahren werden. Nach vollständigem Austrocknen und «Abbinden» (nach zirka 3 Wochen) muss sie aber mit einer Deckschicht (OB; Cutback-Belag und dergleichen) versehen werden.

In Frostperioden darf nicht stabilisiert werden. Während des Arbeitsvorganges soll die Aussentemperatur mindestens $+5^{\circ}\text{C}$ betragen. Bei starkem Regen ist die Arbeit zu unterbrechen; durchnässte Böden können nicht stabilisiert werden.

7. Schlussbemerkungen

Seit 1960 werden in der Schweiz die verschiedenen — wir können heute sagen — traditionellen Stabilisierungsverfahren mit Kalk, Zement, Teer und Bitumen vermehrt angewandt. Die Darstellung 12 hält als Zusammenfassung noch einmal fest, welche Böden mit welchen Mitteln stabilisiert werden können. Sie zeigt, dass vorwiegend tonige Böden mit Kalk und vorwiegend kiesig-sandige Böden mit Zement oder Teer stabilisiert werden können. Nach wie vor problematisch sind die reinen Silte (ML), die sandreichen Silte und die siltigen Sande (SM-ML).

Darstellung 12. Kornverteilungsbereiche für verschiedene Stabilisierungsverfahren.



Durch die Beimischung von ein paar Gewichtsprozenten Stabilisierungsmitteln zu einem von Natur aus instabilen Boden wird dieser zu einem hochwertigen, stabilen Baustoff. Aus dem AASHO-Test geht hervor, dass die Tragfähigkeitswerte (a -Werte) stabilisierter Böden höher liegen als diejenigen erstklassiger Kies-Sande (Darstellung 13). Besonders hervorgehoben

Darstellung 13. Tragfähigkeitskoeffizienten für «flexible» Materialien.

Baustoffe	a -Wert	TF*-Verhältnis bezüglich HMT B	Schichtdicke gleicher TF (cm)	Minimale Schichtdicke (cm)
AB 16 + AB 25	0,44	1,10	0,9	7
HMT B	0,40	1,00	1,0	7
HMT A	0,34	0,83	1,2	7
HMF	0,23	0,55	1,8	10
Bitumen-Stabilisierung	0,23	0,55	1,8	10—12
Stabilisierung mit Zement				
— $dc_7 > 50 \text{ kg/cm}^2$	0,23	0,55	1,8	} 15
— $dc_7 30—50 \text{ kg/cm}^2$	0,20	0,50	2,0	
— $dc_7 < 30 \text{ kg/cm}^2$	0,15	0,38	2,7	
Stabilisierung mit Kalk	$\sim 0,15$	0,38	2,7	15
Kies I gebrochen	0,14	0,35	2,9	} 20
Kies I rund	0,11	0,28	3,6	
Kies II gebrochen		0,28	3,6	
Kies II rund	0,07	0,18	5,7	

* TF = Tragfähigkeit

werden muss, dass ein toniger, nicht befahrbarer, stark vernässter Boden durch die Stabilisierung mit Kalk zu einem Baustoff wird, welcher tragfähigkeitsmässig etwa einem guten Kies gleichgesetzt werden kann.

Stabilisierungen sind — neben ingenieurbioologischen Massnahmen — ein wichtiger Schritt zum umweltfreundlichen Strassenbau. Durch die Stabilisierung von Böden aus dem Projektgebiet werden:

- die Baustellentransporte (Lärm, Abgase usw.) wesentlich vermindert;
- die oft schwach dimensionierten Zufahrtsstrassen weniger beansprucht;
- die hochwertigen noch verfügbaren Kiesreserven für andere Bauaufgaben geschont.

Welche Stabilisierungsart und welches Arbeitsverfahren gewählt werden soll, hängt ab von den Verhältnissen auf der Baustelle, von der Funktion und Lage der stabilisierten Schicht im Strassenaufbau, von organisatorischen Problemen und schliesslich von der Wirtschaftlichkeit.

Résumé

Stabilisation des sols

En plus de leur résistance, la stabilité des matériaux routiers joue un très grand rôle. Les deux méthodes de travail usuelles dans la stabilisation des sols, le malaxage en place et le malaxage en centrale, ainsi que leurs phases de travail sont décrites en détail. Les différents procédés de stabilisation des sols (stabilisation mécanique, stabilisation à la chaux, au ciment ou à liants bitumineux) sont traités d'une façon approfondie, à part la stabilisation à la chaux, qui a fait l'objet de différentes publications ces dernières années.

En Suisse, la stabilisation mécanique proprement dite n'est pas pratiquée; ses principes sont cependant encore appliqués pour la préparation ou l'appréciation de matériaux pour les couches de support en grave ou les couches d'usure.

Les stabilisations du sol à la chaux, au ciment ou à liants bitumineux acquièrent une importance toujours plus grande, car on doit de plus en plus éviter, pour différentes raisons, de transporter les matériaux routiers, en particulier le gravier, sur de longues distances. Il faut stabiliser les sols instables trouvés sur place à l'aide d'un liant approprié et en faire ainsi des matériaux de construction routière de première qualité.

Par l'adjonction de quelques pour-cent de produit stabilisant, on peut faire d'un sol instable un matériau avec un coefficient de portance (appelé valeur a) deux fois plus élevé qu'une grave naturelle de très bonne qualité. La tendance dans la construction des routes forestières et rurales est d'accorder toujours plus d'importance à la stabilisation à la chaux pour le terrain ou l'infrastructure. Pour la couche de support, on emploie toujours plus souvent le ciment; afin de sim-

plifier les travaux, on stabilise toute l'épaisseur de la couche de support, pour éviter le nivelage de plusieurs couches de différents matériaux, etc. La stabilisation bitumineuse s'effectue, comme jusqu'à maintenant, dans les 10 à 15 cm supérieurs de la couche de support.

Pour terminer, une figure représente les différents fuseaux granulométriques correspondant aux différents procédés de stabilisation et un tableau indique les coefficients de portance des différents matériaux routiers.

Traduction: *J. Walder*

