



**Kalk**®

Innovativ seit Jahrtausenden.

**Bodenverbesserung  
Bodenverfestigung**

**mit Kalk**





**Kalk**®  
Innovativ seit Jahrtausenden.

© 2004

**Bundesverband der  
Deutschen Kalkindustrie e.V.**

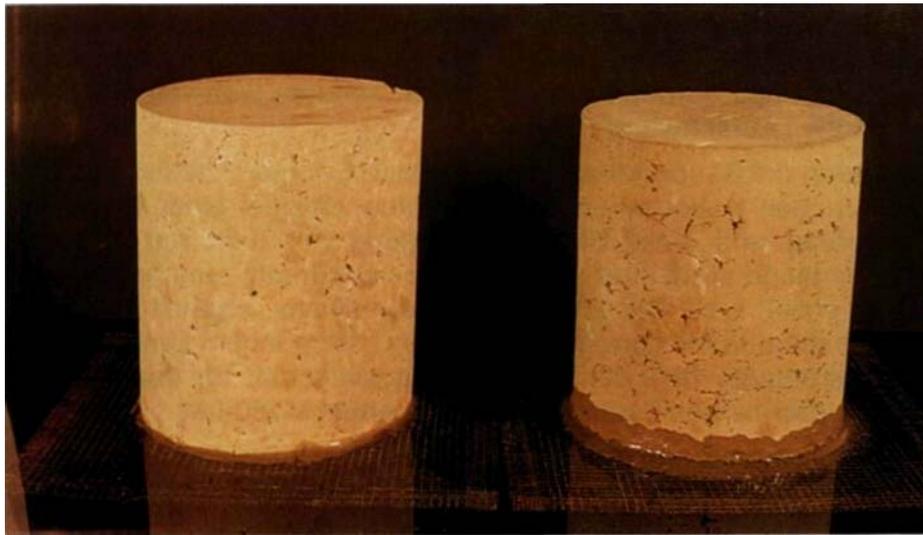
Annastraße 67 – 71

50968 Köln

[www.kalk.de](http://www.kalk.de)

Alle Rechte vorbehalten

## Bodenprobekörper



mit Kalk

1 Min. im Wasser

ohne Kalk



mit Kalk

8 Std. im Wasser

ohne Kalk

## **Vorwort**

Die Verwendung von Kalk im Erdbau ist eine alte, bewährte Baume-thode. In den vierziger Jahren dieses Jahrhunderts wurde dieses Ver-fahren neu aufgegriffen und nahm seitdem weltweit einen beachtli-chen Aufschwung.

Es waren die Baupraktiker, die die ersten Erfolge erzielten und ihre Erfahrungen weitergaben. Sie erkannten, dass bei einer Bodenver-besserung und einer Bodenverfestigung mit Kalk nur einfache Ar-beitsgänge nötig sind und daher kostengünstig eine hohe Effektivität erzielt wird. Die Erkenntnisse der Praxis, die zahlreichen wissen-schaftlichen Untersuchungen, der Stand des Regelwerkes, die aufge-tretenen Veränderungen der Randbedingungen und die Behandlung innerhalb der Europäischen Normung nehmen wir zum Anlass, den mit Ausschreibungen und Ausführungen befassten Praktiker diese Informationsschrift als Nachschlagewerk für den täglichen Gebrauch zu überreichen.

**BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN KALKINDUSTRIE E.V.**

März 2004

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Allgemeines</b> .....	<b>6</b>
1.1 Entwicklung der Bodenbehandlung mit Kalk .....	6
1.2 Anwendungsgebiete .....	6
1.3 Bodenbehandlung mit Kalk im Blickpunkt der Gesetze .....	7
<b>2. Definitionen</b> .....	<b>8</b>
2.1 Bodenbehandlung.....	8
2.2 Bodenverbesserung .....	8
2.3 Qualifizierte Bodenverbesserung.....	8
2.4 Bodenverfestigung .....	8
2.5 Kalke für die Bodenbehandlung .....	8
<b>3. Wirkungsweise der Kalke bei der Bodenverbesserung und Bodenverfestigung</b> .....	<b>10</b>
3.1 Reaktionspartner Boden .....	10
3.2 Einteilung der Böden .....	12
3.3 Sofortreaktion – beim Einsatz von Kalk .....	12
3.4 Wassergehaltsreduzierung bei der Sofortreaktion .....	14
3.5 Veränderung wichtiger bodenmechanischer Eigenschaften bei der Sofortreaktion.....	15
3.6 Langzeitreaktion – beim Einsatz von Kalk .....	16
3.7 Veränderung umweltrelevanter Eigenschaften .....	17
<b>4. Das Boden-Kalk-Gemisch, Kalkdosierung</b> .....	<b>18</b>
<b>5. Bauausführung</b> .....	<b>19</b>
5.1 Allgemein .....	19
5.2 Vorbereitende Arbeiten .....	20
5.3 Verteilen des Kalkes.....	20
5.4 Einmischen des Kalkes in den Boden .....	20
5.5 Planieren und Verdichten des Boden-Kalk-Gemisches .....	21
5.6 Nachbehandlung .....	21
5.7 Witterungseinflüsse .....	22
5.8 Bodenstabilisierung mit Kalk im Ingenieurbau .....	22
5.9 Kalkbehandelte Böden als Verfüllmaterialien.....	22
5.10 Kalkpfähle .....	23
<b>6. Anforderungen</b> .....	<b>23</b>
6.1 Allgemein .....	23
6.2 Anforderungen an den mit Kalk verbesserten Boden (Schicht).....	23
6.3 Anforderung an den mit Kalk verfestigten Boden (Schicht).....	24
<b>7. Prüfungen</b> .....	<b>24</b>
7.1 Allgemein .....	24
7.2 Eignungsprüfungen .....	25
7.3 Eigenüberwachungsprüfungen .....	25
7.4 Kontrollprüfung .....	25
<b>8. Zusammenfassung</b> .....	<b>28</b>
<b>9. Begriffe</b> .....	<b>29</b>
<b>10. Literatur</b> .....	<b>34</b>
10.1 Vorschriften, Richtlinien, Merkblätter .....	34
10.2 Veröffentlichungen .....	34
<b>11. Beispiele für Geräte und die Ausführung der Bodenverbesserung und Bodenverfestigung mit Kalk</b> .....	<b>40</b>

## 1. Allgemeines

### 1.1 Entwicklung der Bodenbehandlung mit Kalk

Die Tradition der Bodenbehandlung mit Kalk reicht bis ins Altertum zurück. In China wurden sowohl beim Bau der großen Mauer als auch bei den Shensi-Pyramiden Boden-Kalk-Gemische verwendet. In der Antike zeigte es sich, dass die Beigabe von Kalk zu puzzolanisch reagierenden Stoffen zu einer dauerhaften Verfestigung führt. Neben Ziegelmehl wurde von den Römern vor allem natürlich vorkommende Puzzolane verwendet. Nur auf der Basis dieser wasser- und witterungsbeständigen Grundlage konnten die großen Bauten der Römer, die uns teilweise noch heute eindeutiges Zeugnis liefern, errichtet werden.

Nach Jahrhunderten des Vergessens dieser Methode beim Bau von Straßen fanden die ersten Anwendungen wieder zu Beginn des 20. Jahrhunderts statt. Die Bodenbehandlung mit Kalk gewann ab 1950 sehr schnell an Bedeutung im Bereich der Bodenverbesserung, auch ohne dass theoretische Untersuchungen vorlagen. Die Verbreitung der Kenntnisse der theoretischen Grundlage dieser Bauweise führte Anfang der 60iger Jahre zu der Erkenntnis, dass, wenn im Boden reaktionsfähige Bestandteile in ausreichendem Maße zur Verfügung standen, neben der Bodenverbesserung auch eine dauerhafte witterungsbeständige Verfestigung möglich ist.

Die erste bekannte Baumaßnahme mit einer kalkverfestigten Frostschuttschicht auf einer klassifizierten Straße wurde 1959/1960 auf der heutigen B 289 bei Seulbitz durchgeführt. 1966 wurden in Baden-Württemberg bei Hohenbuch und in Hessen bei Kleinseelheim Versuchsstrecken angelegt, bei denen auf Teilstrecken die Frostschuttschicht durch mit Weißfeinkalk (heute CL 90-Q) verfestigten feinkörnigen Böden ersetzt wurden. Intensive und umfangreiche Messungen auf den Strecken belegen, dass diese Straßen immer noch einwandfrei liegen.

Neben der konventionellen flächigen Bodenbehandlung mit Kalk haben sich im Laufe der Jahre unterschiedliche Einsatzmöglichkeiten, wie z. B. die Kalkpfahlmethode, die Baugrundverbesserung und die Aufbereitung von Kanalverfüllböden, herauskristallisiert. Neueste Entwicklungen zeigen auch die Möglichkeit des Einsatzes des Kalkes bei der Immobilisierung von Schwermetallen im Boden.

### 1.2 Anwendungsgebiete

Kalk verbessert und verfestigt Böden des Untergrundes und des Unterbaues von Straßen, Wegen und anderen Verkehrsflächen.

Sonst ungeeignete feinkörnige (bindige) Böden oder gemischtkörnige Böden werden durch Kalk sofort verarbeitbar und in einen Zustand versetzt, der einen reibungslosen und termingerechten Ablauf der Baumaßnahmen bewirkt.

Sowohl übernässte, nicht verdichtbare als auch trockene, verdichtbare Böden werden durch die Behandlung mit Kalk derart in ihren Eigenschaften verändert, dass im Betriebszustand auf Dauer, selbst unter extremen Verkehrsbedingungen und Witterungsverhältnissen und bei Wasserandrang, ein hoher Gebrauchswert erhalten bleibt.

Verkehrsflächen, deren Untergrund (anstehender Boden) und/oder Unterbau (Damm-schüttung) mit Kalk verbessert und verfestigt werden, sind

- Bundesautobahnen, Bundesstraßen, Landesstraßen, Kreisstraßen, kommunale Straßen
- Gleisanlagen
- Start-, Lande- und Rollbahnen auf Flugplätzen
- Parkplätze, Betriebshöfe
- land- und forstwirtschaftliche Wege

Die Verbesserung und Verfestigung mit Kalk wird auch erfolgreich eingesetzt bei

- Baugrundstabilisierungen zur Erhöhung der Bodenpressung unter Bauwerken
- Verlegung von Rohrleitungen aller Art (Grabenverfüllung)
- Dämmen im Wasserbau (Flussdeiche, Kanalbau, Wasserbecken)
- Stabilisierung von Böschungen (Vermeiden oder Beseitigen von Rutschungen)
- Schutzmaßnahmen für das Erdplanum
- Baustellen-Transportwegen
- Stabilisierung mit Kalkpfählen (z. B. bei tiefgründigen Verbesserungen im Unterbau oder Untergrund).

Durch eine Bodenverbesserung oder Bodenverfestigung mit Kalk können nicht geeignete Böden in weiten Bereichen des Bauwesens als Baustoff genutzt werden. Hierbei werden die Kosten für aufwendige Bauweisen gespart, der Bodenaustausch entfällt und Straßen- und Transportwege werden nicht unnötig beansprucht. Dem Gedanken der Wiederverwendung - in diesem Fall des Bodens - wird Rechnung getragen.

### **1.3 Bodenbehandlung mit Kalk im Blickpunkt der Gesetze**

Die Bodenbehandlung mit Kalk hat im Einklang mit den bodenschutzrechtlichen Bestimmungen zu erfolgen.

Grundlegende Regelungen zum Bodenschutz finden sich im Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) vom 17.03.1998, in der darauf basierenden Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 12.07.1999, in den Bodenschutzgesetzen der Länder und in verschiedenen Fachgesetzen. Sofern sich diese Fachgesetze bereits mit Einwirkungen auf den Boden befassen und bodenschützende Regelungen enthalten, tritt das Bundes-Bodenschutzgesetz als subsidiär zurück. Hier sind beispielsweise die anlagenbezogenen Vorschriften des Umwelt- und sonstigen Zulassungsrechts (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz, Klärschlamm- und Bioabfallverordnung, Bundes-Immissionsschutzgesetz) sowie "Vorschriften über Bau, Änderung, Unterhaltung und Betrieb von Verkehrswegen..." (§ 3 Abs. 1 Nr. 8 BBodSchG) zu nennen. Die zahlreichen Richtlinien des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW) zum Bau und zur baulichen Erhaltung von Verkehrsflächen erfassen allerdings die Bodenbehandlung mit Kalk nicht.

Ziel des Bodenschutzes ist die Erhaltung oder Wiederherstellung der Bodenfunktionen für Menschen, Tiere und Pflanzen und deren Sicherung für zukünftige Nutzungen. Hierzu verlangt das Bundes-Bodenschutzgesetz, schädliche Bodenveränderungen abzuwehren, den Boden und Altlasten sowie dadurch verursachte Gewässerverunreinigungen zu sanieren und Vorsorge gegen nachteilige Einwirkungen auf den Boden zu treffen.

Unter schädlichen Bodenveränderungen als zentralem Begriff des Bundes-Bodenschutzgesetzes versteht der Gesetzgeber Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen (Lebensraum, Naturhaushalt, Rohstofflager etc.), die geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für den Einzelnen oder die Allgemeinheit herbeizuführen. Die Beurteilung, ob solche Gefahren oder Nachteile entstehen, erfolgt vor allem auf der Basis der Prüf-, Maßnahmen- und Vorsorgewerte des Anhangs 2 der BBodSchV. Dort wird zwischen den Wirkungspfaden Boden - Mensch, Boden - Nutzpflanze und Boden - Grundwasser unterschieden. Grundsätzlich kann die Feststellung getroffen werden, dass durch die Behandlung des Bodens mit Kalk die Werte des Anhangs 2 der BBodSchV nicht überschritten werden. Schädliche Bodenveränderungen werden demnach durch Kalk nicht hervorgerufen.

Sofern allerdings Vorbelastungen des Bodens oder naturbedingt erhöhte Schadstoffgehalte vorliegen, muss im Einzelfall geprüft werden, ob durch den Einsatz von Kalk eine solche Verbesserung der Bodenbeschaffenheit erreicht werden kann und damit die Einhaltung der Bodenwerte gewährleistet ist.

Im Normalfall wird Kalk bei der Bodenbehandlung nicht mit dem Grundwasser in Berührung kommen. In der Regel erfolgt keine Aufbringung in der sog. gesättigten Zone. Sollte Kalk dennoch über das Sickerwasser in das Grundwasser gelangen, liegt nach den Grundsätzen der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) keine Verunreinigung des Grundwassers vor, wenn trotz einer Erhöhung der Stoffgehalte gegenüber den regionalen Hintergrundwerten im oder durch das Grundwasser keine relevanten ökotoxikologischen Wirkungen auftreten können und wenn außerdem die Anforderungen der Trinkwasserverordnung oder entsprechend abgeleitete Werte eingehalten werden. Hier können wiederum die Prüfwerte der BBodSchV für den Wirkungspfad Boden - Grundwasser herangezogen werden.

Kalkprodukte unterliegen genau wie andere Bauprodukte der Gefahrstoffverordnung. Die entsprechenden Hinweise in den Sicherheitsdatenblättern der Produzenten und Lieferanten sind vom Anwender zu beachten.

## **2. Definitionen**

### **2.1 Bodenbehandlung**

Die Begriffe Bodenverbesserung und Bodenverfestigung werden zusammenfassend mit dem Begriff Bodenbehandlung beschrieben. Nachfolgend wird dieser Begriff verwendet, wenn eine Unterscheidung nicht erforderlich ist.

### **2.2 Bodenverbesserung**

Bodenverbesserung ist ein Verfahren zur sofort erreichbaren Verbesserung der Einbaufähigkeit und Verdichtbarkeit von Böden und Baustoffen sowie zur Erleichterung der Ausführung von Bauarbeiten.

### **2.3 Qualifizierte Bodenverbesserung**

Qualifizierte Bodenverbesserung ist ein Verfahren der Bodenverbesserung, bei dem erhöhte Anforderungen hinsichtlich des Frost- und Tragfähigkeitsverhaltens gestellt werden. Geeignete Böden der Frostempfindlichkeitsklasse F3 können hierdurch z.B. die Eigenschaften eines Bodens der Frostempfindlichkeitsklasse F2 erreichen.

### **2.4 Bodenverfestigung**

Bodenverfestigung ist ein Verfahren, in dem zusätzlich zu den Effekten der Bodenverbesserung die Widerstandsfähigkeit des Bodens oder Baustoffes gegen Beanspruchungen durch Verkehr und Klima durch die Zugabe von Bindemittel langfristig erhöht wird. Der Boden und/oder der Baustoff wird hierdurch im Sinne der ZTV E-StB dauerhaft tragfähig, wasserunempfindlich und frostbeständig. Als Bodenverfestigung mit Kalk wird auch die fertige, mit Kalk verfestigte Bodenschicht bezeichnet.

### **2.5 Kalke für die Bodenbehandlung**

Kalk wird in dieser Informationsschrift als Sammelbezeichnung für die aus Kalkstein durch industrielle Veredlungsprozesse gewonnenen Spezialprodukte für die Bodenverbesserung und Bodenverfestigung verwendet. Bei der Bodenbehandlung werden die folgenden Kalke eingesetzt:

- Feinkalk (FK) - Baukalk nach DIN EN 459 (Weißfeinkalk, Dolomitfeinkalk)
- Kalkhydrat (KH) - Baukalk nach DIN EN 459 (Weißkalkhydrat, Dolomitmalkhydrat)

Feinkalk und Kalkhydrat sind Luftkalke, die vorwiegend aus Calciumoxid und Magnesiumoxid oder Calciumhydroxid und Magnesiumhydroxid bestehen, die unter Einwirkung atmosphärischen Kohlenstoffdioxids an der Luft langsam erhärten. Da diese Kalke keine hydraulischen Eigenschaften aufweisen, erhärten sie im allgemeinen nicht unter Wasser. Feinkalke werden auch als ungelöschte Kalke und Kalkhydrate als gelöschte Kalke bezeichnet. Die Bezeichnung der Kalke erfolgt gemäß Tabelle 1.

**Tabelle 1: Arten von Baukalk nach DIN EN 459-1**

Benennung	Kurzzeichen
Weißkalk 90	CL 90
Weißkalk 80	CL 80
Dolomitkalk 85	DL 85
Dolomitkalk 80	DL 80

<sup>a</sup> Luftkalke werden darüber hinaus nach ihren Lieferbedingungen als ungelöschte Kalke (Q) und Kalkhydrate (S) klassifiziert. Bei gelöschten Dolomitkalcken wird der Grad der Hydratation als S1: halbgelöscht und S2: vollständig gelöscht bezeichnet.

Die Klassifizierung der bei der Bodenbehandlung eingesetzten Kalke erfolgt nach ihrem Calciumoxid- bzw. Magnesiumoxidgehalt. Feinkalke müssen die chemischen Anforderungen der DIN EN 459-1 sowie die Anforderungen an die Reaktivität (siehe Tabelle 2) und die Anforderungen an die Korngrößenverteilung (Tabelle 3) erfüllen. Kalkhydrate müssen die chemischen und physikalischen Anforderungen der Tabelle 4 erfüllen.

**Tabelle 2: Feinkalk - Chemische Anforderungen und Reaktivität**

Baukalkart	CaO + MgO	MgO	CO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	Reaktionsfähigkeit <sup>a</sup>
CL 90-Q	≥ 90	≤ 5	≤ 4	≤ 2	t <sub>60°C</sub> ≤ 25 min
CL 80-Q	≥ 80	≤ 5	≤ 7	≤ 2	t <sub>50°C</sub> ≤ 25 min
DL 85-Q	≥ 85	≥ 30	≤ 7	≤ 2	t <sub>40°C</sub> ≤ 25 min
DL 80-Q	≥ 80	≥ 5	≤ 7	≤ 2	t <sub>35°C</sub> ≤ 25 min

<sup>a</sup>) Die Reaktionsfähigkeit des Feinkalk wird nach DIN EN 459-2 bestimmt. Feinkalk der Mahlfineinheitsklasse 2 (Tab.3) werden vor der Bestimmung der Reaktionsfähigkeit auf eine Korngrößenverteilung mit einem Rückstand von ≤ 5 M.-% auf dem 0,2 mm-Sieb aufgemahlen.

**Tabelle 3: Feinkalk - Anforderungen an die Korngrößenverteilung**

Siebgrößen mm	Mahlfineinheit	
	Rückstand [M.-%]*	
	Klasse 1 (fein)	Klasse 2 (körnig)
10	0	0
5	0	≤ 5
2	0	--
0,2	≤ 5	--
0,09	≤ 15	--

\*) ≥ 2 mm = Trockensiebung; < 2 mm = Luftstrahlsiebung

**Tabelle 4: Kalkhydrat - Chemische und physikalische Anforderungen**

Baukalkart	CaO + MgO	MgO	CO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	Feinheit		Freies Wasser
					Rückstand 0,09 mm	Rückstand 0,2 mm	%
CL 90-S	≥ 90	≤ 5	≤ 4	≤ 2	≤ 7	≤ 2	≤ 2
CL 80-S	≥ 80	≤ 5	≤ 7	≤ 2	≤ 7	≤ 2	≤ 2
DL 85-S	≥ 85	≥ 30	≤ 7	≤ 2	≤ 7	≤ 2	≤ 2
DL 80-S	≥ 80	≥ 5	≤ 7	≤ 2	≤ 7	≤ 2	≤ 2

Die für die Bodenbehandlung mit Kalk geeigneten Baukalke unterliegen der Gütesicherung RAL-GZ 543 „Baukalk“, werden fremdüberwacht und durch das Gütezeichen „Baukalk“ gekennzeichnet.



### 3. Wirkungsweise der Kalke bei der Bodenverbesserung und Bodenverfestigung

#### 3.1 Reaktionspartner Boden

Die Reaktionen der verschiedenen Kalke im Boden sind ähnlich und werden nachfolgend anhand der Ca-Reaktion beschrieben. Die Bodenbereiche für die Kalke sind in Bild 1 dargestellt.

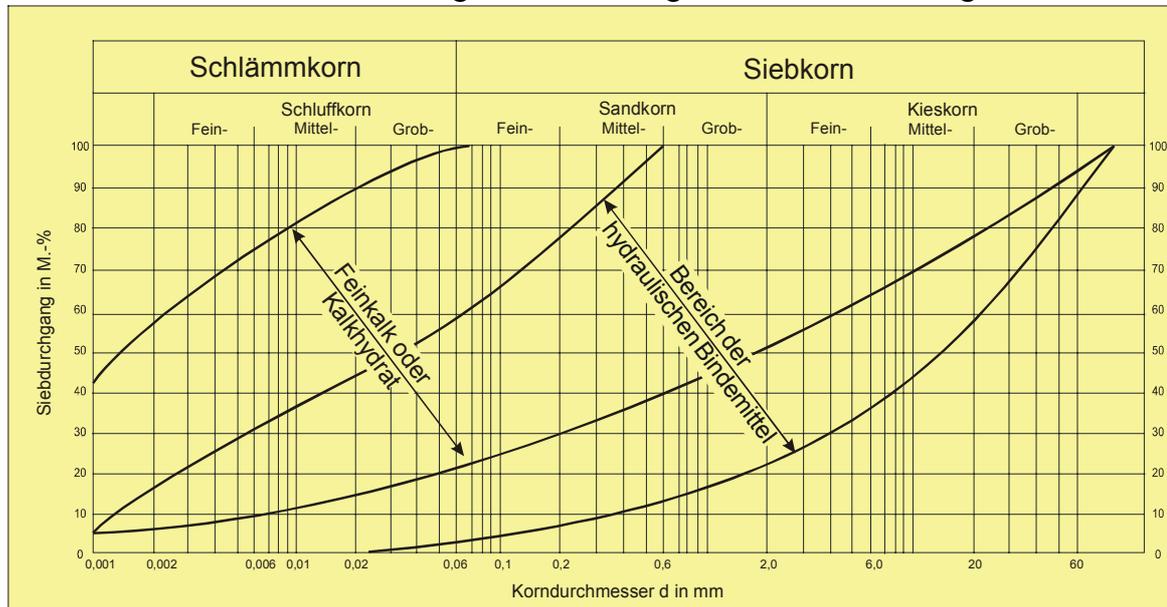
Grundsätzlich sind die Abläufe den Vorgängen der adsorptiven Wasserbindung, des Ionenaustausches, der Koagulation und der Ca-Brückenbildung zuzuordnen. Die Reaktion adsorptive Wasserbindung und Koagulation lassen sich zum Teil in der Veränderung der physikalischen Eigenschaften des Bodens, der Plastizität und Verdichtbarkeit, welche einem bestimmten Wassergehalt zugeordnet werden können, direkt beobachten. Die Ionenaustauschreaktion und Ca-Brückenbildung, wie auch die CSH-Phasenneubildung lassen sich jedoch nur durch chemische Verfahren vor und nach der Bodenbehandlung mit Kalk indirekt bestimmen.

#### - Adsorptive Wasserbindung

Das im Boden vorhandene Wasser wird einerseits an den Grenzflächen der Bodenteilchen, vor allen an den Tonmineralen und Tonteilchen adsorbiert und befindet sich andererseits als freies Wasser in den Porenkanälen zwischen den gebundenen Wasserschichten. Da die Adsorption von Wasser an den Grenzflächen der Bodenteilchen auftritt, nimmt sie mit der spezifischen Oberfläche des Bodens zu. Die durch diese Adsorption des Bodenwassers entstehende Wasserhülle an den Tonteilchen ist von großer Bedeutung für die boden-

mechanischen Eigenschaften der bindigen Böden. Es ist eine Abhängigkeit der Plastizität, der Scherfestigkeit und der Durchlässigkeit von dieser adsorptiv gebundenen Wasserhülle vorhanden. Eine Veränderung dieser Eigenschaften ist somit durch die Art adsorbierter Ionen gegeben.

**Bild 1: Boden - Bereiche der Korngrößenverteilung für Bodenbehandlung mit Kalk**



#### - Ionenaustausch

Um einen Ionenaustausch zu ermöglichen, findet zunächst die chemische Aufspaltung des Calciumhydroxid  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  statt. Die daraufhin in der Bodenlösung vorhandenen  $\text{Ca}^{++}$  Ionen verdrängen aufgrund ihrer höheren Eintauschstärke einwertige Kationen, wie zum Beispiel  $\text{H}^+$ ,  $\text{Na}^+$  oder  $\text{K}^+$  von den elektronegativen Bindungsstellen der Austauscher. Zu den Austauschern gehören Humusstoffe, freie Oxide und Tonminerale, wobei die Tonminerale hierbei den größten Einfluss haben.

#### - Koagulation

Die Koagulation, die parallel zum Ionenaustausch stattfindet, ist die erste wahrnehmbare Veränderung im Boden als Folge der Kalkzugabe. Es handelt sich hierbei um eine Ausflockung der Tonminerale, die durch das elektrokinetische Potential des Kolloids (feinzerteilter Stoff) bestimmt wird. Für das Potential der Tonteilchen ist die elektrische Ladung der Kolloide und die Hydratation der adsorbierten Kationen ausschlaggebend. Eine Zunahme der elektrischen Ladung und Hydratation lässt dieses Potential ansteigen. Durch die Kalkzugabe kann dieses Potential wesentlich gesenkt werden. Abstoßende Kationen werden peptisiert, d.h. in eine kolloidale Lösung überführt und dieser Prozess veranlaßt, dass die bindigen Bodenbestandteile sich zu größeren Koagulaten zusammenballen und sich somit der Gehalt an Feinstanteilen ( $> 0,002$  mm) und Schluffanteilen (0,002 mm - 0,06 mm) reduziert.

#### - Ca-Brückenbildung

Mit der Ca-Brückenbildung wird der Prozess umschrieben, der besonders bei quellfähigen Tonmineralen, insbesondere bei Montmorilloniten auftreten kann. Aufgrund der schon beschriebenen Ionenaustauschkapazität, ist es den Calciumionen möglich in die kristallinen Zwischenschichten einzuwandern und eine Festigung der einzelnen Tonschichten zu bewirken. Dadurch wird das dort vorhandene Wasser zwischen den Tonplättchen festgehalten. Diese physikalische Wasserbindung wird als innere Austrocknung bezeichnet. Sie führt zu einer Erhöhung des Verdichtungswassergehaltes und der Ausrollgrenze.

### 3.2 Einteilung der Böden

Boden wird durch seinen natürlichen Gehalt an Tonmineralen zum geeigneten Reaktionspartner für Kalke. Während feinkörnige Böden besonders gut mit FK und KH umsetzbar sind, brauchen gemischtkörnige Böden beim Einsatz des Kalkes ausreichend reaktionsfähige Bodenbestandteile. Der Boden wird durch die Korngrößenverteilung und die Plastizitätseigenschaften nach DIN 18196 beurteilt. Die Beschreibung der verschiedenen Bodengruppen nach Korngrößenverteilung, Plastizitätseigenschaften und Frostempfindlichkeit ist der Tabelle 5 zu entnehmen.

Auch Böden mit Beimengungen humoser Art können erfolgreich mit Kalk behandelt werden. Hierbei sollte vorher geprüft werden, ob der Boden mit dem Kalk reagiert.

**Tabelle 5: Bodengruppen nach DIN 18196**

Hauptgruppe	Korngrößenanteile in Gew.-% ≤ 0,06 mm	Plastizitätszahl iP und Lage zur A-Linie	Gruppen	Kennzeichen bei Fließgrenze $W_L$ in Gew.-%		
				≤ 35	35 bis 50	> 50
				leicht plastisch	mittel plastisch	ausgeprägt plastisch
<b>Fein- körnige Böden</b>	> 40	IP ≤ 4 Gew.-% <b>oder</b> unterhalb der A-Linie	Schluffe (U)	UL	UM	---
		IP ≥ 7 Gew.-% <b>und</b> oberhalb der A-Linie	Tone (T)	TL	TM	TA

Hauptgruppe	Korngrößenanteile in Gew.-%		Gruppen	Kennzeichen bei Korngrößenanteil ≤ 0,06 mm	
	≤ 0,06 mm	> 2 mm		5 bis 15	15 bis 40
<b>Gemischt- körnige Böden</b>	5 bis 40	> 40	Kies-Schluff-Gemische	GU	GÜ
			Kies-Ton-Gemische	GT	GT
		≤ 40	Sand-Schluff-Gemische	SU	SÜ
			Sand-Ton-Gemische	ST	ST

Hauptgruppe	Korngrößenanteile in Gew.-%		Gruppen	Kennzeichen		
	≤ 0,06 mm	> 2 mm		eng- gestuft	weit- gestuft	intermittierend gestuft
<b>Grob- körnige Böden</b>	≤ 5	> 40	Kiese (G)	GE	GW	GI
		≤ 40	Sande (S)	SE	SW	SI

F 1= nicht frostempfindlich
  F 2= gering bis mittel frostempfindlich
  F 3= sehr frostempfindlich

### 3.3 Sofortreaktion – beim Einsatz von Kalk

Feinkalk und Kalkhydrat lösen in den feinkörnigen, bindigen Bodenbestandteilen Reaktionen aus, die man nach ihrem zeitlichen Ablauf und ihrer Wirksamkeit als Sofort- und Langzeitreaktionen beschreibt.

Aus einer Sofortreaktion entsteht eine Langzeitreaktion. Die Wahl der Kalkart und -menge beeinflusst in Abhängigkeit von der Bodenart und dem Wassergehalt, ob eine Sofortreaktion – und damit eine Bodenverbesserung – oder eine Langzeitreaktion – und damit eine Bodenverfestigung – in den Vordergrund tritt.

Trockene Böden werden mit Kalk behandelt und in der Regel durch gleichzeitige Zugabe von Wasser auf den erforderlichen Einbauwassergehalt gebracht, um eine spätere Gefährdung des Bodens durch Stau- oder Grundwasser oder durch veränderte Wasserführung auszuschließen. Damit wird sichergestellt, dass geforderte Verdichtungsgrade bzw. Verformungsmoduln (z.B.  $E_{v2} > 45 \text{ N/mm}^2$ ) auch bei Wasserandrang erhalten bleiben.

**Tabelle 6: Merkmale der Bodenverbesserung und der Bodenverfestigung mit Kalk**

Baufgabe	wird erreicht über
<b>Bodenverbesserung mit Kalk</b>	<b>Sofortreaktion</b> Reduzierung des Wassergehaltes und Krümelbildung führen zu: <ul style="list-style-type: none"> <li>□ Verbesserung der Plastizitätseigenschaften</li> <li>□ Verbesserung und Verdichtbarkeit</li> <li>□ Erhöhung der Tragfähigkeit</li> <li>□ Unempfindlichkeit gegen Wasser</li> </ul>
<b>Bodenverfestigung mit Kalk</b>	<b>Langzeitreaktion</b> Puzzolanische Verfestigung bei FK und KH Verfestigung bei hydraulischen Bindemitteln führen zur <ul style="list-style-type: none"> <li>□ Raumbeständigkeit</li> <li>□ langfristige Zunahme der Festigkeit</li> <li>□ dauerhafte Tragfestigkeit</li> <li>□ Frostbeständigkeit</li> </ul>

Schnell ablaufende Vorgänge sind der Entzug von Wasser durch

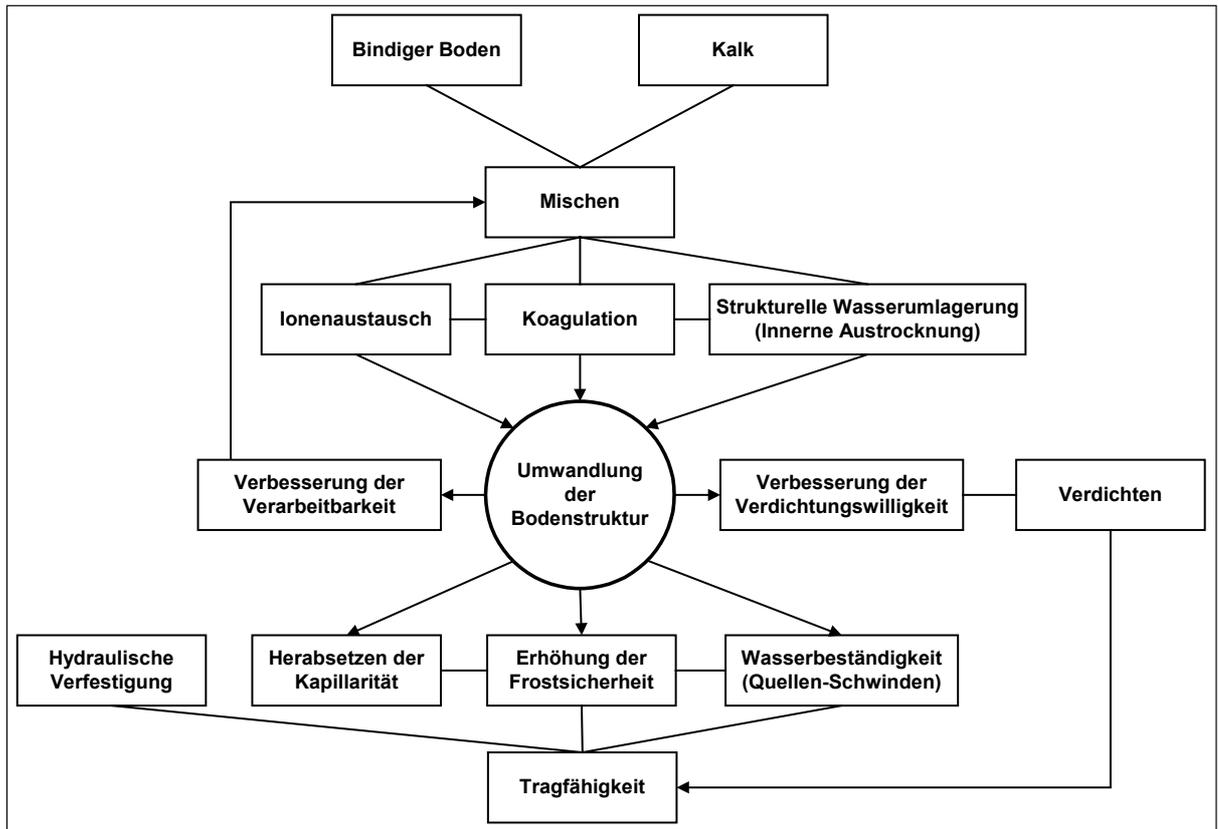
- Bindung des kapillaren Wassers durch  $\text{Ca(OH)}_2$ -Bildung
- physikalisches Verdampfen von Wasser
- chemisch-mineralogische Reaktionen im Tonmineral
- Reaktion an den Grenzflächen des Tonminerals.

Aufgrund dieser Vorgänge findet eine Krümelbildung statt. Die bodenmechanischen Eigenschaften werden in so günstiger Weise verändert, dass Erdbauarbeiten meistens überhaupt erst ermöglicht, mindestens aber erleichtert werden.

Wird einem Boden Kalk zugegeben, so löst dies Reaktionen aus, die sich in ihrer Wirksamkeit und zeitlichem Ablauf unterscheiden. Durch Sofortreaktion wird eine Verbesserung der Einbaufähigkeit und Verdichtbarkeit des Bodens sowie eine Erleichterung der Ausführung von Bauarbeiten erreicht (Bodenverbesserung). Die Aggregatbildung ist die wichtigste Veränderung, die in einem bindigen Boden unmittelbar nach der Kalkzugabe erreicht wird. Es kommt durch sie zu einer Verbesserung in der Verarbeitbarkeit und Verdichtbarkeit, was sich letztendlich günstig auf die Tragfähigkeit auswirkt.

Während die mechanische Bodenverbesserung auf die Ausbildung eines Stützgerüsts abzielt und Bodenverbesserung mittels Bitumen oder Zement eine Verklebung und Verkittung der Bodenkörner bewirkt, wird die Verbesserung durch Kalkzugabe vor allem durch eine Strukturumwandlung des Bodens erreicht. Die Umwandlung der Bodenstruktur wird durch die im Bild 2 aufgezeigten chemischen und physikalischen Vorgänge hervorgerufen.

**Bild 2: Wirkungsweise der Kalkstabilisierung (Brand 1959)**



### 3.4 Wassergehaltsreduzierung bei der Sofortreaktion

Fein- und gemischtkörnige Böden enthalten meistens so viel Wasser, dass sie nur ungenügend verdichtet und dadurch die vorgeschriebenen Verdichtungsgrade bzw. Verformungsmoduln im Untergrund bzw. im Unterbau nicht erreicht werden können.

Kalk reduziert - je nach Art und Menge - den Wassergehalt auf einen Wert oder einen Bereich, der ein optimales Verdichten und damit das Einhalten der vorgeschriebenen Verdichtungsgrade oder Verformungsmoduln ermöglicht.

Durch die beim Einsatz eines Feinkalkes stattfindende spontane chemische Reaktion mit dem freien Wasser des Bodens entsteht als eine neue Verbindung: Kalkhydrat. Die hierbei auftretende starke Erwärmung des Boden-Kalk-Gemisches führt zum Verdampfen von überschüssigem Wasser. Dieser Vorgang kann durch weitere Mischvorgänge verstärkt werden.

**Tabelle 7: Reaktion - Feinkalk mit Wasser**

Calciumoxid	+ Wasser	⇌	□ Calciumhydroxid
CaO	+ H <sub>2</sub> O	⇌	□ Ca (OH) <sub>2</sub> + Wärme

Die mit dem Wasserentzug einhergehende Krümelbildung des Boden-Kalk-Gemisches wirkt sich vorteilhaft auf den weiteren Arbeitsprozess aus.

Die Höhe der Wassergehaltsreduzierung wird beeinflusst durch

- durch die Art und Menge des Kalkes
- die Anzahl der Mischdurchgänge
- Art des Wetters (Wind oder Windstille, niedrige oder hohe Luftfeuchte, hohe oder niedrige Temperatur)

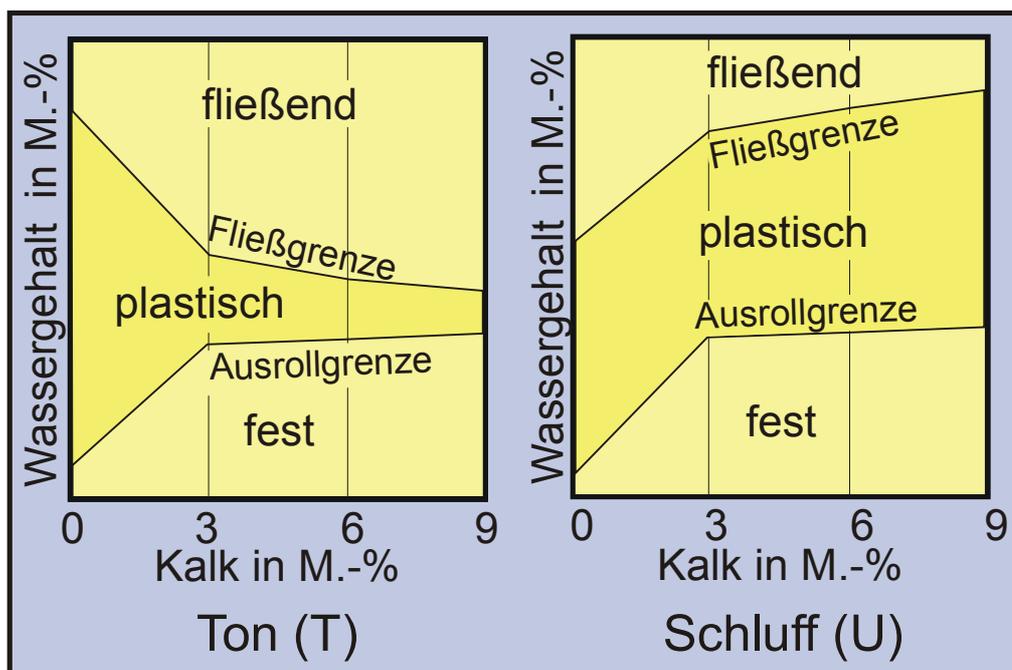
Ausgehend von einer Kombination aller Einflüsse ergibt sich für mittlere Verhältnisse die folgende Faustformel für die sofortige Verringerung der Wassermenge des Bodens:

- Feinkalk: das 2-fache des Kalkgewichtes
- Kalkhydrat: das 1-fache des Kalkgewichtes

### 3.5 Veränderung wichtiger bodenmechanischer Eigenschaften bei der Sofortreaktion

Die Plastizitätszahl  $I_p$  (Bildsamkeit) eines feinkörnigen Bodens oder des feinkörnigen Anteils eines gemischtkörnigen Bodens wird durch Kalkzugabe verändert (Bild 3). Der Wassergehalt der Ausrollgrenze wird immer erhöht, während im Regelfall der Wassergehalt der Fließgrenze bei Schluff höher und bei Ton geringer wird. Die Plastizitätszahl bei Schluff ändert sich daher kaum. Die Plastizitätszahl bei Ton wird meistens kleiner.

Bild 3: Veränderung der Plastizität durch Zugabe von Kalk

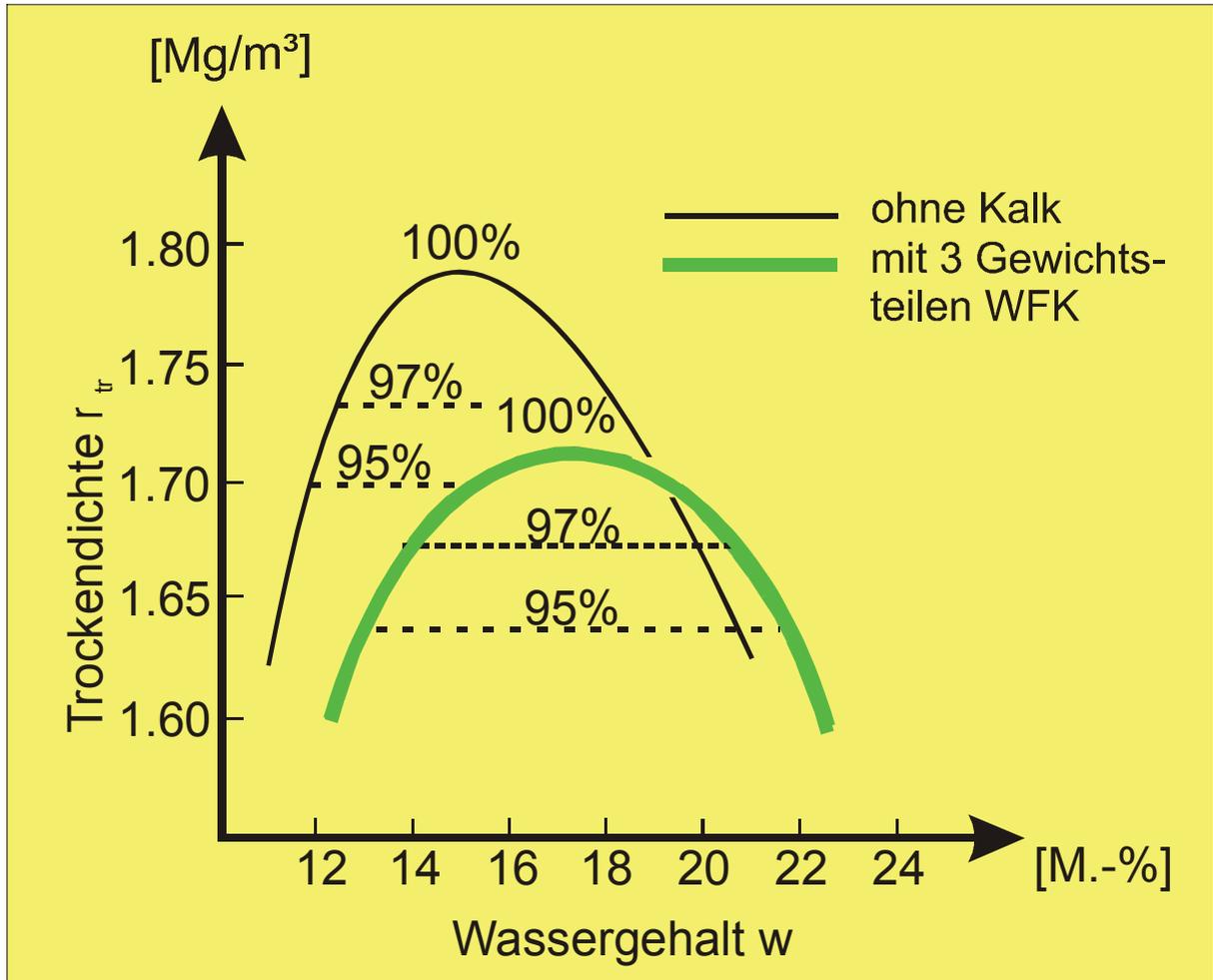


Ein guter Verdichtungsgrad kann nur unterhalb der Ausrollgrenze, d. h. im halbfesten Bereich, erzielt werden. Aus der Zugabe des Kalkes ist erkennbar, dass ein Boden nach der Behandlung mit Kalk auch bei höheren Wassergehalten verdichtbar ist. Die Zustandszahl (Konsistenzzahl) eines im Baufeld angetroffenen Bodens bietet somit einen guten Anhalt, die meist nicht ausreichende Verdichtungsfähigkeit dieses Bodens beurteilen zu können. Ein breiiger oder weicher Boden braucht immer, ein steifer Boden meistens Kalk. Die Zustandsform des Bodens wird durch die Zugabe von Kalk positiv verändert.

Beim Vergleich des natürlichen Wassergehaltes eines Bodens mit dem Verdichtungswassergehalt nach Proctor dieses Bodens ist meistens direkt erkennbar, dass dieser Boden nicht verdichtbar und auf einen geforderten Verdichtungsgrad (Bild 4) der einfachen

Proctordichte zu bringen ist. Wird der Proctorversuch am Boden-Kalk-Gemisch durchgeführt, wird der optimale Wassergehalt höher. Die Wassergehaltsspannen für den geforderten Verdichtungsgrad von 97 % oder 95 % - werden größer. Die Abstände zu hohen natürlichen Wassergehalten werden geringer. Daraus folgt, dass das Boden-Kalk-Gemisch verdichtbar ist.

Bild 4: Proctorkurve



Die nach der Kalkzugabe niedrigeren Trockendichten zeigen, dass die Bodenkrümel eine feste durch Verdichtungsarbeit nicht zerstörbare Struktur aufweisen und damit auch dauerhaft stabil sind. Durch die Reaktion des Kalkes mit den Bodenpartikeln und der daraus resultierenden Krümelbildung findet eine Veränderung der ursprünglich festgestellten Frostempfindlichkeitsklasse F3 in die Frostempfindlichkeitsklasse F2 statt (s. a. RStO 01, Tabelle 6).

### 3.6 Langzeitreaktion – beim Einsatz von Kalk

Langsamer ablaufende Vorgänge, wie die Umwandlung der Tonminerale durch puzzolanische Reaktion mit FK und KH zu neuen Verbindungen, führen zu höheren mechanischen Festigkeiten, z. B.

- höheren Druckfestigkeiten
  - höheren Scherfestigkeiten
  - höheren Zugfestigkeiten
- als sie der unbehandelte Boden besitzt.

Die entstehenden Festigkeiten sind nicht mit den Festigkeiten eines Betons vergleichbar, sondern in Relation mit den sehr geringen, oft gar nicht vorhandenen „Festigkeiten“ des Bodens zu sehen. Ein betonähnliches Verhalten der Bodenverfestigung ist ja auch nicht erwünscht, es könnte sogar schädlich sein, weil bei hohen Festigkeiten klaffende Risse auftreten können. Die wesentlichen Merkmale sind vielmehr

- dauerhafte Tragfähigkeit
- Wasserbeständigkeit
- Frostbeständigkeit.

Die bereits bei der Sofortreaktion erwähnte Ausbildung einer Verfestigung des mit Kalk behandelten Bodens ist der Beginn einer sich über einen längeren Zeitraum erstreckenden Festigkeitszunahme. Untersuchungen einer Bodenverfestigung mit Kalkhydrat haben gezeigt, dass noch viele Monate nach der Bauausführung mit einer Steigerung der Festigkeit zu rechnen ist. Diese Steigerung beruht im wesentlichen auf einer puzzolanischen Reaktion des Kalkes mit den bodenvorhandenen Tonmineralen. Es kommt aufgrund der sogenannten Hydraulefaktoren, die in bindigen Böden meist als Tonminerale oder als kolloidale Kieselsäure auftreten zu einer hydraulischen Verfestigung. Dieser Vorgang basiert auf Reaktionen zwischen dem Calciumhydroxid und den Aluminiumsilikaten der Tonminerale bzw. der kolloidalen Kieselsäure. Es handelt sich hierbei um einen sich langsam ausbildenden Prozess, der keinerlei negative Auswirkung auf die Verarbeitung hat. Ein Kalk behandelter Boden bleibt bis zu 4 Tage verarbeitbar und eine durch Kalk behandelte Bodenschicht kann noch länger abgehobelt oder profiliert werden, ohne dass dabei Schädigungen auftreten.

Die Widerstandsfähigkeit eines Bodens gegen Klimaeinflüsse wird durch eine Kalkbehandlung langfristig erhöht. Dies ist bei einer Bodenverfestigung mit Kalk von Bedeutung, wobei die Schicht wasserunempfindlicher und frostbeständiger wird. Ausschlaggebend für die Erhöhung der Frostsicherheit ist die Umwandlung der Bodenstruktur, die auch eine Herabsetzung der Kapillarität bewirkt.

Bei bindigen Böden, die im allgemeinen frostempfindlich sind, kann es in der Frostzone durch Kapillarität zur Ausbildung von zuhängenden Eislinsen und Eisschichten kommen. Die Eisbildungen werden durch nachsaugendes Wasser immer dicker und führen zu ungleichmäßigen Hebungen. Dadurch kann es bei dem Baukörper, der nicht frostfrei und auf frostempfindlichen Böden gegründet ist, zu Schädigungen kommen.

Es wurde über eine Baumaßnahme berichtet, bei der die Frostschutzschicht aus mit ca. 5 % Weißfeinkalk verfestigtem leichtplastischem Ton hergestellt wurde, die sich 30 Jahre später noch in einwandfreiem Zustand befindet. Dies zeigt, daß ein ursprünglich frostempfindlicher Boden mit Kalk auf lange Zeit frostsicher verfestigt werden kann. Die durch den Kalk hervorgerufenen Reaktionen führen in ihrer Gesamtheit zu einer dauerhaften Tragfähigkeit einer verdichten kalkbehandelten Bodenschicht.

### **3.7 Veränderung umweltrelevanter Eigenschaften**

Der Boden ist ein komplexes Medium bestehend aus einer porösen Matrix, in der Luft, Wasser sowie Bodenflora und -fauna enthalten sind. Der Stoff- und Flüssigkeitsaustausch findet in dieser komplexen Matrix statt. Eine Veränderung der natürlichen Prozesse im Boden zieht eine Veränderung in der Funktionsweise der Ökosysteme nach sich. Viele Umweltprobleme, die in anderen Medien zu Tage treten, wie zum Beispiel im Grundwasser, haben in Wirklichkeit ihren Ursprung im Boden.

## - Versauerung

Versauerung durch Niederschläge aus der Luft stellt nach wie vor ein Problem dar. Durch den Erfolg der in den vergangenen 30 Jahren entwickelten Konzepte, ist in Deutschland jedoch nicht mit einem weiteren Anstieg zu rechnen. Die Sanierung stark versauerter Böden ist schwierig, wenn nicht sogar unmöglich. Zur Versauerung des Bodens kommt es durch Emissionen von Fahrzeugen, Industrieprozessen und natürlichen biogeochemischen Kreisläufen bei denen versauernd wirkende Schadstoffe freigesetzt werden und eine Deposition auf der Bodenoberfläche namentlich durch Regen und trockene Ablagerungen erfolgt. Die Überschreitung der kritischen Belastungsraten der Versauerung und Eutrophierung der terrestrischen Ökosysteme ist gegenwärtig in wesentlichen auf Stickstoffablagerungen zurückzuführen. Durch diese Versauerung der Böden kommt es zu einem vermehrten Schadstoffeintrag von Schwermetallen ins Grundwasser.

In Deutschland im Bereich des Niederrheins müssen mehrere Wasserwerke spezielle Verfahren mit Kalk anwenden, um die Schwermetallkonzentrationen insbesondere von Nickel zu reduzieren und dem Verbraucher einwandfreies Trinkwasser zur Verfügung zu stellen. Durch die Verwendung von Kalk zur Bodenverbesserung und zur Bodenverfestigung insbesondere beim Verkehrswegebau wird die Pufferkapazität des Bodens erhöht. Somit kann ein Schwermetalleintrag in die Grundwässer langfristig vermieden werden.

## 4. Das Boden-Kalk-Gemisch, Kalkdosierung

Ein Boden-Kalk-Gemisch besteht aus dem anstehenden Boden inkl. des in ihm enthaltenen Wassers, dem zur Verwendung vorgesehenen Kalk und ggf. Wasser. Die geeignete Zusammensetzung richtet sich nach dem vorgesehenen Anwendungszweck. In Abhängigkeit von den vorgegebenen Komponenten Boden und Wasser werden Art und Menge des Kalkes aufgrund einer Eignungsprüfung gewählt.

Für eine Bodenverbesserung kann die Wahl der Kalkart und der Kalkmenge aufgrund des natürlichen Wassergehaltes des Bodens, der Proctordichte und des optimalen Wassergehaltes, der Korngrößenverteilung und der Zustandsgrenzen erfolgen. Hierbei kann ggf. auf vorhandene Erfahrungen zurückgegriffen werden.

**Tabelle 8: Anhaltswerte der Kalkgehalte für die Eignungsprüfung**

Anwendungsart	Kalkmenge bezogen auf das Trockengewicht des Bodens M.-%	
	Feinkalk	Kalkhydrat
Bodenverbesserung	2 bis 4	2 bis 5
Bodenverfestigung	4 bis 6	4 bis 8

Für eine Bodenverfestigung muß die Wahl der Kalkart und der Kalkmenge aufgrund einer Eignungsprüfung erfolgen. Sie ist rechtzeitig vor Baubeginn durchzuführen.

Sofern bei feinkörnigen und gemischtkörnigen Böden die natürlichen Wassergehalte des unbehandelten Bodens im Bereich des optimalen Verdichtungswassergehaltes liegen, ist die Verwendung eines Kalkhydrates zweckmäßig. Wird dieser Bereich, wie es in der Praxis meistens der Fall ist, überschritten, so ist ein Feinkalk erforderlich.

Für Bodenverfestigung mit Feinkalk und Kalkhydrat ist die Bindemittelmenge so zu bemessen, dass die bei der Eignungsprüfung ermittelten Werte der Zylinderdruckfestigkeit nach Frost-Tau-Beanspruchung die Anforderungen nicht unterschreiten.

**Tabelle 9: Kriterien für die Bestimmung der Menge an Feinkalk oder Kalkhydrat bei frostbeständiger Verfestigung fein- und gemischtkörniger Böden**

Bodenart	Nach Feuchtraumlagerung von 28 Tagen und 12 Frost-Tau-Wechseln	
	CBR-Wert an Probekörpern	Zylinderdruckfestigkeit an Proctorprobekörpern
	%	(N/mm <sup>2</sup> )
Feinkörnige Böden	≥ 20	≥ 0,2
Gemischtkörnige Böden	≥ 30	

## 5. Bauausführung

### 5.1 Allgemein

Der Ablauf der Arbeiten für die Bodenverbesserung und Bodenverfestigung mit Kalk gliedert sich in

- Vorbereitende Arbeiten
- Verteilen des Kalkes
- Einmischen des Kalkes in den Boden
- Planieren und Verdichten des Boden-Kalk-Gemisches
- ggf. Nachbehandeln.

Die allgemein für den Erdbau und für die Verwendung des Kalkes geltenden Vorschriften und Regelwerke sind zu beachten. Hierzu gehört vor allem, dass vor, während und nach der Verbesserungs- und Verfestigungsarbeit seitlich oder von unten eindringendes Wasser in den Baukörper ferngehalten wird. Ferner ist sicherzustellen, dass Niederschlagswasser nicht auf dem Planum stehenbleibt. Die Hinweise zum sicheren Umgang mit Kalk in den Sicherheitsdatenblättern der Kalkproduzenten sind zu beachten.

Die Baustoffgemische können sowohl im Baumischverfahren als auch im Zentralmischverfahren hergestellt werden. Zentralmischverfahren werden in der Regel nur in Ausnahmefällen angewendet.

Beim Baumischverfahren (mixed-in-place) fährt das Mischgerät auf der für die Bodenbehandlung vorbereiteten Schicht, reißt diese auf und mischt den Kalk und ggf. noch erforderliches Wasser ein.

Beim Zentralmischverfahren (mixed-in-plant) wird der Boden aufgenommen, transportiert, mit dem Kalk und dem ggf. erforderlichen Wasser in einer Mischanlage gemischt und zur Einbaustelle transportiert, verteilt und verdichtet.

Beim Baumischverfahren sind abhängig vom Ort der Entnahmestelle und der Einbaustelle Variationen in den Arbeitsabläufen möglich:

#### A.1 Baumischverfahren im Auftrag (Unterbau)

Der unbehandelte Boden wird von der Gewinnungsstätte - in der Regel im Zuge des Massenausgleiches, zur Einbaustelle transportiert, dort eingebaut und verfestigt oder verbessert.

#### A.2 Baumischverfahren am anstehenden Boden (Untergrund)

Der anstehende Boden wird ggf. nach Vorplanieren und Vorverdichten an Ort und Stelle verfestigt oder verbessert.

### **A.3 Baumischverfahren im Ab- und Auftrag**

Der Kalk wird im Boden an der Entnahmestelle zugegeben. Nach teilweisem Einmischen mit Fräsern, Grubbern, Raupen oder ähnlichen Geräten wird das Gemisch zur Einbaustelle transportiert, profilgerecht eingebaut, fertig gemischt, ggf. nachprofiliert und verdichtet.

### **A.4 Baumischverfahren im Abtrag und bei Zwischenlagerung**

Die Verteilung und Einmischung des Kalkes erfolgt an der Abtragstelle. Das fertige Boden-Kalk-Gemisch wird zur Zwischenlagerung oder zur Einbaustelle transportiert, profilgerecht verteilt und verdichtet.

Die Verfahren A1 und A2 sind für die Bodenverfestigung und die Verfahren A1 bis A4 für die Bodenverbesserung geeignet. Das Verfahren A4 kann anstelle des Zentralmischverfahrens angewendet werden, wenn am Einbauort kein Mischgerät eingesetzt werden kann (z. B. Leitungsgrabenverfüllungen, Bauwerkshinterfüllungen).

## **5.2 Vorbereitende Arbeiten**

Die vorbereitenden Arbeiten werden unterteilt in

- das Entfernen des Oberbodens, der pflanzlichen Bestandteile, evtl. vorhandener größerer Steine
- das Zerkleinern schwerer Böden mit Aufreißer, starkem Pflug oder anderen geeigneten Geräten
- das „Aufschließen“ sehr feuchter Böden mit 1-2 M.-% Feinkalk
- das Vorplanieren und Profilieren einer Querneigung mit Grader oder Raupe
- ggf. das Vorverdichten einer für die Bodenverfestigung vorgesehenen Schicht.

Diese Vorarbeiten sind sorgfältig auszuführen, damit der Kalk gleichmäßig dosiert werden kann und eine ebene Oberfläche und homogene Mischung in gleichbleibender Tiefe erreicht wird.

## **5.3 Verteilen des Kalkes**

Der Kalk wird in Silowagen vom Werk auf die Baustelle transportiert und dort entweder direkt in das Verteilergerät oder zunächst in ein stationäres oder fahrbares Zwischensilo gefüllt. Um einen kontinuierlichen Arbeitsablauf zu gewährleisten, ist - vor allem bei mittleren und größeren Baustellen - eine Zwischenlagerung im Silo vorteilhaft.

Der mit Kalk gefüllte Bindemittelverteiler muss über eine exakt arbeitende Dosiereinrichtung verfügen, um die in der Eignungsprüfung ermittelte Kalkmenge genau auszustreuen. Die Staubentwicklung beim Verteilen des Kalkes wird erheblich verringert, wenn die Oberfläche der Schicht, auf der der Kalk ausgebracht wird, aufgeraut wird, die Verteilerschnecke des Streugerätes ummantelt und unmittelbar nach dem Verteilen der Kalk in den Boden eingemischt wird. In besonderen Fällen kann auch ein körniger Kalk (Klasse 2) verwendet werden. Bei der Behandlung von trockenen Böden mit Kalk kann die Verwendung einer vom Kalklieferanten produzierten Kalkmilch sinnvoll sein.

Bei den Arbeiten mit Feinkalk und Kalkhydrat sind die Sicherheitsdatenblätter „Feinkalk“ und „Kalkhydrat“ zu beachten, die über den Kalkhersteller bezogen werden können.

## **5.4 Einmischen des Kalkes in den Boden**

Der verteilte Kalk wird beim Baumischverfahren mit geeigneten Maschinen und Geräten in den Boden eingemischt. Die Anzahl der Mischdurchgänge und die Mischtiefe sollte so

gewählt werden, dass eine homogene Mischung des Boden-Kalk-Gemisches entsteht. Das Mischen sollte erst dann beendet werden, wenn das Boden-Kalk-Gemisch eine einheitliche Farbe und Struktur aufweist. Die Mischtiefe einer Lage ist abhängig von der Art und Beschaffenheit des Bodens sowie von der Leistungsfähigkeit der Mischgeräte. Für eine erfolgreiche Bodenbehandlung mit Kalk ist zu prüfen, ob vorgegebene Dicken der verfestigten Lage mit den eingesetzten Geräten erzielt werden können. Bei mehr-lagigem Einbau muss eine Verzahnung der einzelnen Lagen durch die Mischtiefe sichergestellt werden.

Sofern für Bodenverbesserungen eine ausreichende Mischqualität gewährleistet wird, können auch andere Geräte allein oder in Kombination mit Spezialmaschinen eingesetzt werden, z. B.

- Elevatorscraper bei größeren Massenumsätzen
- Scheibeneggen bei schwer bearbeitbaren (ausgeprägt plastischen und grobkörnigen) Böden

Für das Zentralmischverfahren werden sowohl Chargen- als auch Durchlaufmischer verwendet. Das fertige Boden-Kalk-Gemisch kann mit einem LKW transportiert werden, sollte aber ggf. mit Planen vor Austrocknung und Vernässung geschützt werden. Das zentral gemischte Material wird meistens mit Gradern eingebaut.

## 5.5 Planieren und Verdichten des Boden-Kalk-Gemisches

Der Straßenoberbau setzt ein ausreichend ebenes Planum voraus. Schon bei Beginn der Arbeiten muß die Höhenlage des unverdichteten Planums so eingestellt werden, dass unter Berücksichtigung des Verdichtungsmaßes die Sollhöhen der fertig verdichteten Schicht um nicht mehr als 2 cm über- bzw. unterschritten werden. Vor dem Verdichten ist - soweit erforderlich - das Planum durch geeignete Geräte, z. B. Grader, profilgerecht abzugleichen. Für das Verdichten des Boden-Kalk-Gemisches eignen sich alle im Erdbau einsetzbaren Verdichtungsgeräte, mit denen die geforderten Werte des Verdichtungsgrades und des Verformungsmoduls erreicht werden.

Die Verarbeitungszeit des Boden-Kalkgemisches beträgt bis zu 48 Stunden nach dem Einmischen des Kalkes. Die Baudisposition wird durch diese weite Zeitspanne wesentlich erleichtert. Eine optimale Verdichtung des Boden-Kalk-Gemisches ist auch schon nach einer kurzen Reaktionszeit zwischen dem Boden und dem untergemischten Kalk möglich.

Da Bodenverbesserungen und Bodenverfestigungen mit Kalk überwiegend bei fein- und gemischtkörnigen Böden durchgeführt werden, hat sich die folgende Kombination der Arbeitsgänge bewährt:

- knetende Verdichtung mit Schafffußwalzen zur Erzielung des geforderten Verdichtungsgrades,
- Verdichten der oberen Zone sowie Ebenen und Glätten durch Glattmantelwalzen.

Zur Erzielung einer guten Tiefenwirkung bei der Verdichtung eignen sich besonders die vibrierenden Verdichtungsgeräte. Neben dem unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten sinnvollen Einsatz der Großgeräte auf Baustellen können Boden-Kalk-Gemische bei kleineren Baumaßnahmen auch durch den Einsatz von Anhängegeräten und leichten Verdichtungsgeräten anforderungsgerecht gemischt und verdichtet werden.

## 5.6 Nachbehandlung

Bei Bodenverbesserungen sowie Bodenverfestigungen mit Feinkalk und Kalkhydrat ist in der Regel keine Nachbehandlung erforderlich. Allerdings sollten bei einer Bodenverfestigung bei

extremen Witterungsbedingungen, z. B. hohe Lufttemperatur, geeignete Maßnahmen, wie z. B. Feuchthalten des Planums oder Aufspritzen einer Bitumenemulsion, vorgenommen werden.

## 5.7 Witterungseinflüsse

Wird der für die ausreichende Verdichtung festgelegte Wassergehalt des Bodens durch Niederschläge überschritten und kann dadurch das Boden-Bindemittelgemisch nicht ausreichend verdichtet werden, so kann durch eine angemessene Erhöhung der Kalkzugabe der Wassergehalt auf den erforderlichen Wert eingestellt werden. Bei geringen Niederschlägen muß das Einfräsen des Kalkes in den Boden so schnell nach dem Verteilen erfolgen, dass eine Durchfeuchtung und damit eine Einschränkung der Reaktivität des Kalkes vermieden wird. Bei starken Niederschlägen sind die Arbeiten einzustellen.

Eine Bodenbehandlung von gefrorenem Boden mit Kalk ist nicht zulässig. Sowohl im Bauzustand als auch am fertig gestellten Objekt muss eine wirksame Entwässerung vorhanden sein, so dass keine Schäden durch stehendes oder fließendes Wasser entstehen kann.

Bei Boden- und Lufttemperaturen unter plus 5 °C sollten möglichst keine Verfestigungen ausgeführt werden. Sofern Bodenverfestigungen oder -verbesserungen bei Temperaturen unter plus 5 °C angeordnet werden, sind die erforderlichen Schutzmaßnahmen in die Leistungsbeschreibung aufzunehmen. Bodenverfestigungen mit Kalk sollen, sofern geringe Fröste mit beschränkter Tiefenwirkung zu erwarten sind, ausreichend gegen Frosteinwirkung geschützt werden, z. B. durch Fertigstellung des Oberbaus.

## 5.8 Bodenstabilisierung mit Kalk im Ingenieurbau

Die Sofort- und Langzeitreaktionen des Kalkes mit dem Boden führen zu einer Verbesserung der bodenmechanischen Eigenschaften und einer langfristigen Verfestigung, die auch im Ingenieurbau für viele Anwendungszwecke genutzt werden kann. Viele Bauwerke bzw. Bauteile werden auch dynamischen Belastungen ausgesetzt. Solche Beanspruchungen treten z. B. infolge Verkehr und bei Maschinengründungen auf. Durch Kalkzugabe besitzt der Boden ein um ein Vielfaches günstigeres Spannungs-Verformungsverhalten als der unbehandelte Boden.

Die Zunahme der einaxialen Druckfestigkeit und des Elastizitätsmoduls mit steigender Abbindezeit des kalkbehandelten Bodens führt zu einer dauerhaften Erhöhung der Tragfähigkeit. Gegenüber ausschließlich statischer Beanspruchung nehmen die Setzungen infolge dynamischer Belastung nur geringfügig zu. Die während der dynamischen Beanspruchung auftretenden Setzungen führen zu einer Abnahme der elastischen Verformung und damit zu verbessertem Steifigkeitsverhalten. Schon kurz nach Herstellung und Verdichtung weisen dynamisch beanspruchte, mit Kalk behandelte Böden, gegenüber dem unbehandelten Boden deutlich geringere Verformungen und erhöhte dynamische Verformungsmoduli auf. Die zeitliche Festigkeitszunahme durch Kalkzugabe führt zu einem weiter verbesserten Verformungs- und Steifigkeitsverhalten und bei dynamischen Beanspruchungen zu einer dauerhaften Erhöhung der Tragfähigkeit.

Bei Beachtung der notwendigen Voraussetzungen (reaktionsfähiger Boden und fachgerechte Bauausführung) kann die Bodenbehandlung mit Kalk als konstruktives Bauelement auch bei planmäßiger, dynamischer Beanspruchung erfolgreich eingesetzt werden.

## 5.9 Kalkbehandelte Böden als Verfüllmaterialien

Der Einsatz von kalkbehandelten Böden zur Bauwerkshinterfüllung ist seit langem bewährte Praxis. Das Verfahren der Bodenverbesserung mit Kalk lässt sich auch auf Aushubböden

anwenden, die im Rahmen von Baumaßnahmen, z. B. Kanalbau, anfallen. Hierdurch ist es möglich, das Aushubmaterial, bestehend aus feinkörnigen plastischen Böden, das in der Regel als ungeeignet für den Wiedereinbau beurteilt wird, als Verfüllmaterial zu nutzen.

Bei der Behandlung dieses Aushubmaterials, das als Verfüllmaterial wieder eingesetzt werden soll, ist darauf zu achten, dass mit geeigneter Gerätetechnik eine innige Durchmischung des Boden-Kalk-Gemisches bei geringer Kalkzugabe erfolgt. Primäres Ziel ist es, die Verarbeitbarkeit des Bodens durch die Kalkzugabe zu erhöhen. Die unter dieser Voraussetzung hergestellten Boden-Kalk-Gemische erfüllen nach Einbau die Anforderungen an die Tragfähigkeit. Durch die geringe Kalkzugabe wird die sonst übliche Festigkeitsentwicklung eingeschränkt, so dass bei einer evtl. notwendigen Öffnung des verfüllten Kanalgrabens ein lösbarer Boden ansteht.

## 5.10 Kalkpfähle

Die Anwendung von Kalkpfählen dient der Stabilisierung eines wasserhaltigen Untergrundes oder Unterbaues, rutschgefährdeter, vernässter Hänge oder eines Baugrundes, bei denen das Verfahren der flächenhaften Bodenbehandlung mit Kalk nicht anwendbar ist. In die zu verbessernde Fläche werden in einem Raster - Achsabstand ca. 1-3 m - Löcher gebohrt oder gestanzt. In diese Löcher wird entweder der ungelöschte Kalk eingefüllt oder bei anderen Verfahren durch den Bohrer in das Loch eingebracht und direkt mit dem Boden vermischt. Die Pfahltiefe kann bei diesem Verfahren bis 7 m betragen. Die stabilisierende Wirkung wird durch das Ablöschen des ungelöschten Kalkes mit dem Wasser des Bodens und durch die Erhöhung der Scherfestigkeit erreicht. Speziell die Erhöhung der Scherfestigkeit wirkt sich positiv auf die Sanierung von Hangrutschungen aus.

Der Einsatz der Kalkpfahlmethode ist auch im Bereich wechselnder Grundwasserspiegel erfolgreich. Die mit den Kalkpfählen erreichte tiefgründige Verbesserung eines solchen Bodens ist gegenüber den wechselnden Wasserspiegeln beständig. Durch die Kombination der Kalkpfahlmethode mit einer anschließend darüber ausgeführten flächenhaften Bodenverbesserung mit Kalk wird selbst bei schwierigen tiefgründig vernässten Böden eine dauerhaft tragfähige Grundlage für Bauobjekte erstellt.

Neben Kalkpfählen mit Durchmessern zwischen 8 - 15 cm können auch Kalkpfähle mit einem Durchmesser von ca. 50 cm und einer Tiefe bis 10 m mit besonders geeigneten Geräten hergestellt werden. Hierbei findet während des Niederbringens des Bohrgerätes und dem anschließenden Herausziehen das Einblasen des Kalkes und die direkte Vermischung statt. Die so hergestellten Kalkpfähle können überlappend hergestellt werden und bilden somit ein wirksames Instrument zur Erhöhung der Scherfestigkeit von Erdbauwerken.

## 6. Anforderungen

### 6.1 Allgemein

Die zu verbessernde bzw. zu verfestigende Schicht muß eine gleichmäßige Dicke und eine ausreichende Ebenheit aufweisen, um die ordnungsgemäße Durchführung der Arbeitsabläufe: Verteilen des Kalkes, Einmischen des Kalkes und Verdichten zu gewährleisten.

### 6.2 Anforderungen an den mit Kalk verbesserten Boden (Schicht)

Grundsätzlich gelten für Bodenverbesserungen die Verdichtungsanforderungen der ZTV E-StB. Diese Anforderungen richten sich an die jeweilige Bauausführung.

Die Anforderungen an die mit Kalk verbesserte Schicht gelten in Abhängigkeit von der Bodenart und von dem auf die Höhe des Planums bezogenen Bereich. Die Anforderungen an das 10 %-Mindestquantil für den Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  gemäß der Tabelle 3 der ZTV E-StB

sind im folgenden dargestellt.

**Tabelle 10: Anforderungen an das 10 %-Mindestquantil für den Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  und an das Verformungsmodul**

	Korngrößenanteile $\leq 0,06$ mm	Planum bis 0,5 m unter Planum	0,5 m unter Planum bis Dammsohle	Verformungs- modul auf dem Planum
	(Gew.-%)	$D_{Pr}$ (%)		(MN/m <sup>2</sup> )
Feinkörnige Böden	> 40	97	95	$\geq 45^a$
Gemischtkörnige Böden	15 - 40			
	5 - 15	100	97	

<sup>a)</sup> Qualifizierte Bodenverbesserung  $\geq 70$  MN/m<sup>2</sup>

### 6.3 Anforderung an den mit Kalk verfestigten Boden (Schicht)

**Verdichtungsgrad:** Unmittelbar nach Abschluss der Verdichtung muß ein Verdichtungsgrad  $D_{Pr} \geq 98\%$  des Boden-Kalk-Gemisches erreicht werden.

**Verformungsmodul:** Sind gemäß Bauvertrag sowohl Erdarbeiten als auch Arbeiten zur Herstellung des Oberbaus durchzuführen, müssen unmittelbar vor dem Einbau von Schichten des Oberbaus die Anforderungen an den Verformungsmodul  $E_{v2}$  nach ZTV E-StB erfüllt sein. Endet die Bauleistung mit der Herstellung des Planums, müssen Verformungsmoduli gemäß ZTV E-StB zur Abnahme nachgewiesen werden.

**Oberfläche:** Die zulässige Abweichung von der Sollhöhe darf nicht mehr als  $\pm 2$  cm betragen.

**Ebenheit:** Die Unebenheiten der Oberfläche von Bodenverfestigungen, die unmittelbar Unterlage des Oberbaus sind, müssen  $\leq 2$  cm innerhalb einer 4 m langen Messstrecke sein.

**Einbaudicke:** Die Einzelwerte für die Einbaudicke von Schichten und Lagen dürfen den Sollwert um nicht mehr als 10% unter- oder überschreiten.

**Kalkmenge:** Abweichungen vom gemäß der Eignungsprüfung festgelegten Wert für das gesamte Baulos: Unterschreitung  $\leq 5\%$  (relativ); Überschreitung  $\leq 8\%$  (relativ)  
Abweichung von Einzelwerten vom Sollwert in der Eignungsprüfung: Unterschreitung  $\leq 10\%$  (relativ); Überschreitung  $\leq 15\%$  (relativ)

## 7. Prüfungen

### 7.1 Allgemein

Es wird unterschieden zwischen

- Eignungsprüfungen
- Eigenüberwachungsprüfungen
- Kontrollprüfungen.

Art und Umfang der Prüfungen orientieren sich am Ziel der Baumaßnahme sowie an dem Merkblatt „Bodenverbesserung und Bodenverfestigung mit Bindemitteln“ und der ZTV E-StB und sind der Tabelle 11 zu entnehmen. Die Prüfumfänge für die dargestellten Eigenschaften sind der ZTV E-StB zu entnehmen.

## **7.2 Eignungsprüfungen**

Eignungsprüfungen sind Prüfungen des Auftragnehmers zum Nachweis der Eignung der Baustoffe und der Baustoffgemische für den vorgesehenen Verwendungszweck entsprechend den Anforderungen des Bauvertrages. Sie sind von einer vom Auftraggeber für die jeweiligen Baustoffe und Baustoffgemische anerkannten Prüfstelle zu erbringen.

Das Ergebnis der Eignungsprüfung liegt bei Bodenverbesserungen mit Kalk nach ca. 2 - 4 Tagen bei Bodenverfestigungen mit Kalk nach ca. 5 Wochen vor. Die Ergebnisse sollen Abschluss geben über

- Brauchbarkeit des Bodens oder Baustoffes
- Anwendbarkeit des Verfahrens (Bodenverbesserung oder Bodenverfestigung)
- Kalkart und -menge
- evtl. Zugabe von Wasser.

## **7.3 Eigenüberwachungsprüfungen**

Eigenüberwachungsprüfungen sind Prüfungen des Auftragnehmers, um festzustellen, ob die Eigenschaften der Baustoffe, der Baustoffgemische und der fertigen Leistung den vertraglichen Anforderungen entsprechen.

## **7.4 Kontrollprüfung**

Kontrollprüfungen sind Prüfungen des Auftraggebers, um festzustellen, ob die Güteeigenschaften der Baustoffe, der Baustoffgemische und der fertigen Leistung den vertraglichen Anforderungen entsprechen. Ihre Ergebnisse werden der Abnahme und Abrechnung zugrundegelegt.

Im Hinblick auf die kurze Verarbeitungszeit ist es zweckmäßig, Eigenüberwachungs- und Kontrollprüfungen gemeinsam und gleichzeitig durchzuführen, da die meisten Anforderungen nicht zu einem späteren Zeitpunkt mit den vorgeschriebenen Prüfverfahren bestimmt werden können und eine Korrektur nicht möglich ist. Alle Prüfungen müssen kontinuierlich und rechtzeitig vorgenommen werden.

**Tabelle 11: Eignungs-, Eigenüberwachungs- und Kontrollprüfungen bei Bodenbehandlungen mit Kalk**

Prüfungen	Eignungsprüfung				Eigenüberwachungsprüfung				Kontrollprüfung			
	Bodenverbesserung		Bodenverfestigung		Bodenverbesserung		Bodenverfestigung		Bodenverbesserung		Bodenverfestigung	
	FK	KH	FK	KH	FK	KH	FK	KH	FK	KH	FK	KH
<b>1. Boden</b>												
1.1 Wassergehalt	x	x	x	x	x	x	x	x	(x)	(x)	(x)	(x)
1.2 Protordichte	x	x	x	x	-	-	-	-	(x)	(x)	(x)	(x)
1.3 Verdichtungsgrad $D_{Pr}$	-	-	-	-	-	-	(x)	(x)	-	-	-	-
1.4 Profilhöhere Lage	-	-	-	-	-	-	x	x	-	-	(x)	(x)
1.5 Korngrößenverteilung	(x)	(x)	x	x	-	-	x	x	-	-	(x)	(x)
1.6 Zustandsgrenzen	(x)*	(x)*	(x)*	(x)*	-	-	x	x	(x)	(x)	(x)	(x)
1.7 Erhärtungsstörende Bestandteile	(x)*	(x)*	(x)*	(x)*	-	-	x	x	(x)	(x)	(x)	(x)
<b>2. Kalk</b>												
2.1 Anforderungen der DIN EN 459-1	x	x	x	x	x	x	x	x	(x)	(x)	(x)	(x)
2.2 Korngrößenverteilung	x	-	x	-	x	-	x	-	(x)	-	(x)	-
2.3 Reaktionsfähigkeit bei Feinkalken	x	-	x	-	x	-	x	-	(x)	-	(x)	-
<b>3. Boden-Kalk-Gemisch</b>												
3.1 Proctordichte	x	x	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-
3.2 Zustandsgrenzen	-	-	(x)*	(x)*	-	-	-	-	-	-	-	-
3.3 Frostprüfung	-	-	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-
3.4 Druckfestigkeit	-	-	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-
3.5 Kalkzugabe	-	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x
<b>4. Fertige Schicht oder Lage</b>												
4.1 Verdichtungsgrad $D_{Pr}$	-	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x
4.2 Verformungsmodul $E_{v2}$	-	-	-	-	(x)	(x)	(x)	(x)				
4.3 Profilhöhere Lage und Ebenheit	-	-	-	-	-	-	x	x	-	-	x	x
4.4 Einbaudicke	-	-	-	-	-	-	x	x	-	-	x	x

x = Prüfung; (x) = stichprobenweise; (x)\* alternativ oder ergänzend gefordert

### Hinweis

Für den Erfolg der Bodenverbesserungs- und Bodenverfestigungsmaßnahmen ist es notwendig, ständig die im Baufeld angetroffenen Bodenarten mit den bei der Eignungsprüfung verwendeten Bodenarten zu vergleichen und ferner die Wassergehalte des Bodens zu ermitteln.

Besonders bei Bodenverbesserungen müssen die auf der Baustelle angetroffenen wechselnden Wassergehalte des Bodens für die richtige Wahl der Kalkart und Kalkmenge beachtet werden.

Hierfür empfiehlt es sich, Tabellen oder Diagramme (siehe Tabelle 12 und Bild 5) dargestellt für jeweils gleiche Bodenarten, auf der Basis der Proctorwerte anzufertigen. Die Werte unter Berücksichtigung der Austrocknung (gestrichelte Linien) müssen zu Beginn der Bauarbeiten festgelegt werden, weil sie im wesentlichen die örtlichen Verhältnisse wiedergeben.

Wird z. B. aufgrund der in Bild 5 dargestellten Ergebnisse 3 M.-% Feinkalk gewählt, so wären ohne Berücksichtigung austrocknender Effekte und nur nach den Ergebnissen aus dem Proctorversuch bei Wassergehalten des Bodens von

17,5 M.-%	→	100 % der Proctordichte
20,5 M.-%	→	97 % der Proctordichte
22,0 M.-%	→	95 % der Proctordichte

erreichbar.

Bei Berücksichtigung zusätzlicher austrocknender und örtlich zu ermittelnder Effekte ergeben sich für Wassergehalte des Bodens von

20 M.-%	→	100 % der Proctordichte
23,5 M.-%	→	97 % der Proctordichte
25 M.-%	→	95 % der Proctordichte

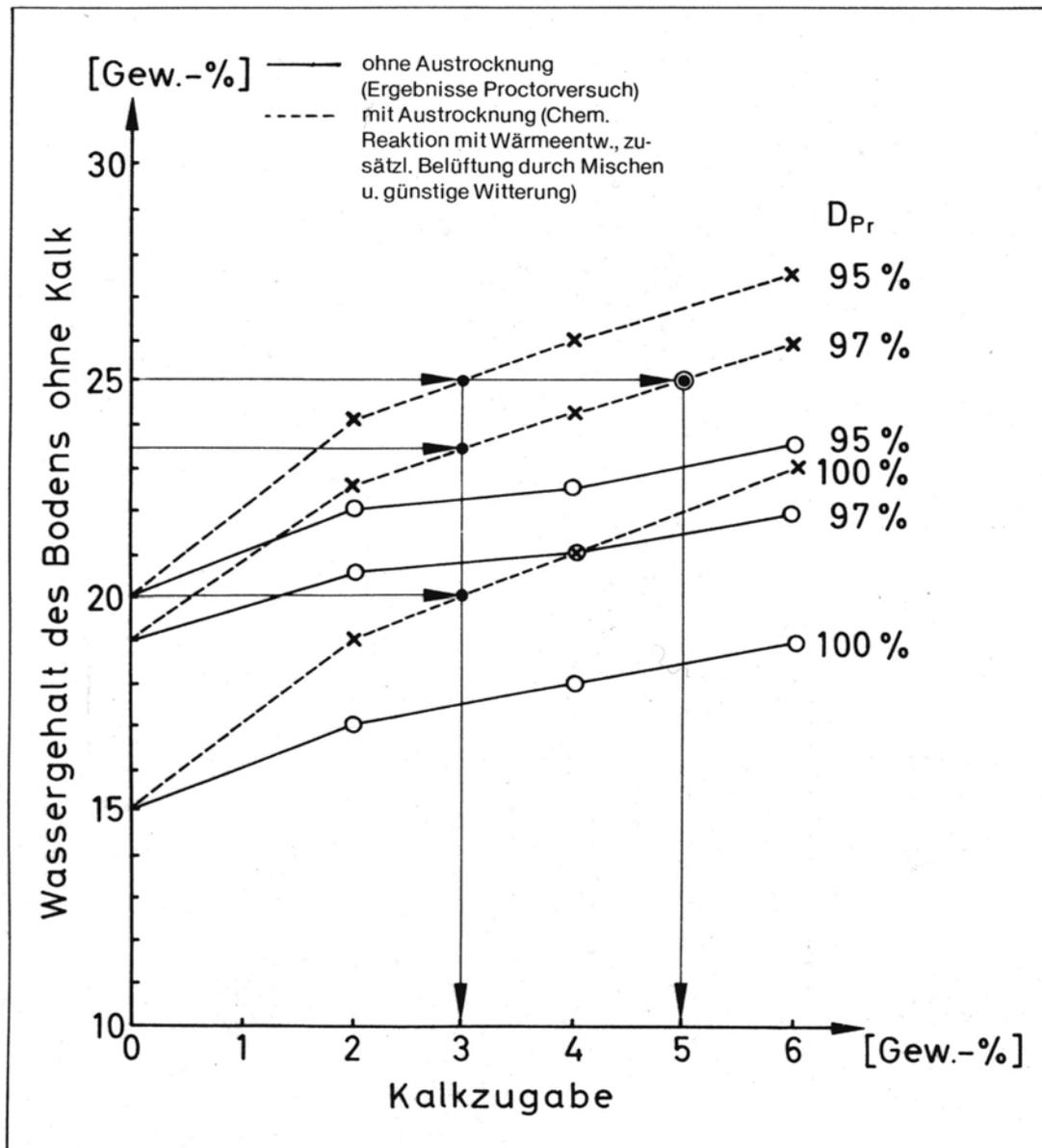
Werden die angegebenen Wassergehalte überschritten, so ist die Kalkmenge entsprechend zu erhöhen.

Hat der Boden z. B. mit 25 M.-% einen um 10 M.-% höheren Wassergehalt gegenüber seinem optimalen Wassergehalt bei 100 % Proctor und es soll ein Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  von 97 % erzielt werden, so kann dies im Beispiel durch Zusatz von 5 M.-% Feinkalk erreicht werden.

**Tabelle 12: Ergebnisse Proctorversuch**

Zugabe FK (Gew.-%)	Werte der Eignungsprüfung		
	Opt. Wassergehalt	Oberer Grenzwassergehalt	
	für 100 %	für 97 %	für 95 %
	der einfachen Proctordichte		
0	15	19	20
2	17	20,5	22
4	18	21	22,5
6	19	22	23,5

Bild 5: Beispiel zur Ermittlung des erforderlichen Gehaltes an FK bei vorhandenem Wassergehalt des Bodens und gefordertem Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  in %.



## 8. Zusammenfassung

In dieser Informationsschrift werden den Ausschreibenden, den Bauausführenden und den Interessierten, Hinweise für die Bodenverbesserung und die Bodenverfestigung mit Kalk gegeben.

Durch eine Bodenverbesserung mit Kalk werden aus sonst unbrauchbaren Böden gut einbau- und verdichtungsfähige Baustoffe. Kostenaufwendige Bauweisen können durch eine Bodenverfestigung mit Kalk unter Ausnutzung der vorhandenen Böden auf ein wirtschaftliches Maß reduziert werden. Ein Bodenaustausch und ein Aussetzen unbrauchbarer Bodenmassen sowie Schwierigkeiten bei der Beschaffung einer Deponie und eines einwandfreien Ersatzmaterials entfallen. Die vorhandenen Straßen und Transportwege werden durch den Ab- und Antransport doppelter Massen nicht überhöht beansprucht. Der normale Personen- und Güterverkehr - z. B. in Erholungsgebieten und in Industriegebieten - wird bei einer Bodenbehandlung mit Kalk nicht behindert.

Besondere Vorteile der Bodenverbesserung mit Kalk sind:

- Kontinuierliche Baudurchführung
- sofortige Befahrbarkeit des Arbeitsplanums
- kein Stillstand der Bauarbeiten bei schlechten Witterungsverhältnissen
- problemloses Erreichen des erforderlichen Verdichtungsgrades

Besondere Vorteile der Bodenverfestigung mit Kalk:

- Steigerung der Tragwerte und Verbesserung der Frostwiderstandsfähigkeit auf Dauer
- Verminderung von Schäden im Oberbau im Langzeitverhalten einer Straßenkonstruktion.

## 9. Begriffe

### A

#### A-Linie

Linie im Plastizitätsdiagramm nach DIN 18196 für Plastizitätszahl  $I_p = 0,73$  (Fließgrenze  $w_L - 20$ ), Trennlinie zwischen Ton und Schluff.

#### Ausrollgrenze

Wassergehalt eines bindigen Bodens am Übergang von der steifen zu halbfesten Konsistenz, DIN 18122.

### B

#### Baumischverfahren, mixed-in-place

Verfahren zur Herstellung von Bodenverbesserungen und Bodenverfestigungen, bei dem das Mischgerät auf dem vorbereiteten Boden fährt, ihn ggf. aufreisst, zerkleinert und mit Bindemitteln sowie erforderlichem Wasser und evtl. zusätzlichen Stoffen mischt.

#### Bindemittelverteiler

Fahrbares Gerät zum gleichmäßigen Ausstreuen und Verteilen von Bindemitteln für Bodenverbesserung und Bodenverfestigung beim Baumischverfahren.

#### Bindiger Boden

Feinkörniger Boden, bei dem die Bodenkörner aneinander haften und der mit steigendem Wassergehalt von einer festen über eine plastische in eine flüssige Masse übergeht.

#### Bodenart

Einteilung und Benennung der Böden nach dem gewichtsmäßig am stärksten vertretenen oder die bestimmenden Eigenschaften prägenden Korngrößenbereich.

#### Bodenfräse

Gerät zum Auflockern und Zerkleinern des Bodens und des Einmischens von Kalk.

#### Bodengruppe

Bodenart mit annähernd gleichem stofflichem Aufbau und ähnlichen bautechnischen Eigenschaften.

### C

#### CBR-Versuch

Stempeleindringversuch zur Ermittlung des CBR-Wertes, bei dem die Kraft gemessen wird, die notwendig ist, einen Stempel mit vorgegebenem Querschnitt mit einer vorgegebenen Geschwindigkeit bis zu einer bestimmten Tiefe in einen Boden einzudrücken.

## **CBR-Wert**

Verhältnis zwischen dem im CBR-Versuch ermittelten Druck und dem Druck, der sich bei gleichen Versuchsbedingungen in einem Standardboden ergibt. Empirisches Maß für die Festigkeit eines Bodens und zur Beurteilung von Bodenverfestigungen mit Kalk sowie der Frostempfindlichkeit von Böden.

## **D**

### **Dichte**

Quotient aus Masse und Volumen. Bei Boden gilt die Masse des feuchten Bodens einschließlich der mit Flüssigkeit und Gas gefüllten Poren.

### **Druckfestigkeit**

Rechnerische Druckspannung von Baustoffen beim Bruch von Probekörpern infolge axialer Druckbelastung.

## **E**

### **Ebenheit**

Übereinstimmungen der Form der tatsächlichen Schichtoberfläche (Ist-Oberfläche) mit der Form der projizierten oder aus Bestandsdaten definierten Oberfläche (Soll-Oberfläche).

### **Eignungsprüfung**

Prüfung zum Nachweis der Eignung der Baustoffe und der Baustoffgemische ( Boden-Bindemittelgemische) für den vorgesehenen Verwendungszweck entsprechend den Anforderungen des Bauvertrages.

## **F**

### **Feinkörniger Boden**

Boden mit mehr als 40 M.-% der Korngröße bis 0,06 mm ohne organische Bestandteile, DIN 18196.

### **Festigkeit**

Grenzspannung, bei der ein Bruch oder eine die Gebrauchstauglichkeit herabsetzende Verformung eintritt.

### **Fließgrenze**

Wassergehalt eines bindigen Bodens am Übergang von der flüssigen zur breiigen Konsistenz, DIN 18122.

### **Frostbeständigkeit**

Aufgrund eines Frost-Tau-Wechsel-Versuches beurteilte Beständigkeit von Boden-Bindemittelgemischen.

### **Frostempfindlicher Boden**

Boden, in dem sich aufgrund der Korngröße, Kornverteilung, Mineralart und mineralchemischen Einflüssen bei Frost unter Zutritt von Wasser Eislinsen oder Eisschichten bilden.

### **Frostempfindlichkeit**

Eigenschaft von Böden oder Baustoffen, die Gefügeveränderungen oder Schädigungen durch Frost unterliegen.

## **Frostempfindlichkeitsklassen (Boden)**

Einteilung der Boden oder Felsarten nach der Neigung zur Eislinsenbildung:

- F1: nicht frostempfindlich;
- F2: gering bis mittel frostempfindlich;
- F3: sehr frostempfindlich.

## **Frostversuch**

Beanspruchung einer Materialprobe durch Frost oder durch mehrere Frost-Tauwechsel Zyklen zur Bestimmung der Festigkeits-, Form und/oder Gefügeänderung nach dieser Beanspruchung.

## **G**

### **Gemischtkörniger Boden**

Boden ohne organische Bestandteile mit mehr als 5 M.-% und bis zu 40 M.-% der Korngröße  $\leq 0,06$  mm, DIN 18196

### **Glattmantelwalze**

Walze mit glatten Bandagen.

## **Grader**

Planiergerät, insbesondere für Feinplanie und zum Verteilen von Boden und Baustoffen und zum Ziehen und Planieren von Gräben und Böschungen.

### **Grobkörniger Boden**

Boden ohne organische Bestandteile mit bis zu 5 M.-% der Korngröße  $\leq 0,06$  mm, DIN 18196

## **H**

### **Humus**

Organische Bodenart auch pflanzlichen Resten, lebenden Organismen und deren Ausscheidungen, die mit anorganischen Bestandteilen den Oberboden bilden, DIN 4022.

## **K**

### **Korngröße**

Nennöffnungsweite des Analysensiebtes, durch die das Korn gerade noch hindurchgeht, oder die durch Sedimentation ermittelte Abmessung eines Kornes.

### **Korngrößenverteilung**

Die nach Kornklassen aufgliederten Massenanteile der in einer Bodenart enthaltenen Korngrößen.

### **Kornklasse**

Alle Korngrößen zwischen zwei gewählten Prüfkorngrößen, durch die sie bezeichnet werden, DIN 66100.

## **L**

### **Lage**

Der in einem Arbeitsgang aus Boden, Baustoffen oder Baustoffgemischen (Boden-Bindemittelgemischen) hergestellte Teil gleicher Zusammensetzung einer Schicht.

## **M**

N

O

### **Optimaler Wassergehalt**

Der der Proctordichte bzw. modifizierten Proctordichte zugeordnete Wassergehalt, DIN 18127.

P

### **Planierraupe**

Erdbaugerät auf Raupenfahrwerk mit Planierschild zum Abschieben und/oder Verteilen von Boden, Schüttgütern u. a.

### **Planum, Erdplanum**

Die technisch bearbeitete Oberfläche des Untergrunds oder des Unterbaus mit festgelegten geometrischen Merkmalen wie Ebenheit und Querneigung (Grenzfläche zwischen Untergrund bzw. Unterbau und Oberbau).

### **Plastizitätszahl**

Differenz zwischen Fließ- und Ausrollgrenze, DIN 4015, DIN 18122.

### **Plattendruckversuch**

Prüfverfahren zur Ermittlung des Verformungsmoduls von Untergrund, Unterbau oder ungebundenen Tragschichten.

### **Proctordichte**

Die im Proctorversuch erreichbare größte Trockendichte, DIN 18127.

### **Proctorversuch**

Verdichtungsversuch an Böden oder Baustoffgemischen (Boden-Bindemittelgemischen) unter festgelegten Versuchsbedingungen zur Ermittlung des Zusammenhangs zwischen Wassergehalt und Trockendichte, DIN 18127.

### **Profilgerechte Lage**

Eingehaltene, projektierte vertikale und horizontale Begrenzung sowie Abmessung einer Schichtoberfläche.

Q

### **Quantil**

Mindestquantil ist das kleinste zugelassene Quantil, unter dem nicht mehr als der vorgegebene Anteil von Merkmalswerten der Verteilung zugelassen ist.

Höchstquantil ist das größte zugelassene Quantil, über dem nicht mehr als der vorgegebene Anteil von Merkmalswerten der Verteilung zugelassen ist.

R

S

### **Schaffußwalze**

Walze mit Erhöhungen (Schaffüße) auf den Bandagen zum Verdichten von Boden.

### **Schicht**

Boden, Baustoff oder Baustoffgemisch (Boden-Bindemittelgemisch) gleicher Zusammensetzung, der bzw. das in einer oder mehreren Lagen eingebaut wird.

## **Schluff**

Mineralischer Boden mit einem Korngrößenbereich zwischen 0,002 und 0,06 mm, DIN 4022.

## **T**

### **Ton**

Mineralischer Boden mit Korngrößen < 0,002 mm bzw. Boden bei dem dieser Korngrößenbereich die Bodeneigenschaft bestimmt, DIN 4022.

### **Tragfähigkeit**

Mechanischer Widerstand einer Straßenbefestigung gegen kurzzeitige Verformungen.

### **Trockenrohdichte**

Quotient aus Trockenmasse und Volumen des Bodens, einschließlich etwa vorhandenen Porenraums.

## **U**

### **Unterbau**

Künstliche gestellte Erdkörper zwischen Untergrund und Oberbau.

### **Untergrund**

Der unmittelbar unter dem Ober- oder Unterbau angrenzende Boden bzw. Fels.

## **V**

### **Verdichtung**

Verringerung der Hohlräume in Böden, Baustoffen oder Baustoffgemischen. Durch mechanische Einwirkungen zur Erzielung einer größeren Lagerungsdichte.

### **Verdichtungsgrad**

Quotient aus der Trockendichte von Böden und deren Proctordichte.

### **Verformungsmodul**

Kenngröße für die Verformbarkeit eines vorhandenen oder eingebauten Bodens, bestimmt mit Hilfe der Neigung der Last-Setzungskurve eines Plattendruckversuchs, DIN 18134.

## **W**

### **Wassergehalt**

Verhältnis der Masse des im Boden vorhandenen Wassers zur Masse des trockenen Bodens.

## **Z**

### **Zentralmischverfahren, mixed-in-plant**

Verfahren zur Herstellung von Gemischen, insbesondere für Bodenverfestigungen, bei dem Boden oder Baustoff mit Bindemittel, ggf. zusätzlichen Stoffen und erforderlichem Wasser in stationären Mischanlagen gemischt wird.

## 10. Literatur

### 10.1 Vorschriften, Richtlinien, Merkblätter

ZTV E-StB	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen; Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau, Köln; Ausgabe 1997.
Merkblatt	für Bodenverfestigungen und Bodenverbesserungen mit Bindemitteln; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln; Ausgabe 2004.
TP BF-StB, Teil B 11.5	Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau - Eignungsprüfung bei Bodenverbesserung und Bodenverfestigung mit Feinkalk und Kalkhydrat; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln; Ausgabe 1991.
RStO 01	Richtlinie für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln; Ausgabe 2001.
ARS 7/2002	Allgemeines Rundschreiben Straßenbau „Anforderungen an Kalke für Bodenverfestigung und -verbesserung des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn, vom 11. April 2002

### 10.2. Veröffentlichungen

#### a) Allgemeine Grundlagen

Brand, W.	Die Bodenstabilisierung mit Kalk Straße und Autobahn 11 (1958)
Brand, W.	Die Verbesserung der technologischen Eigenschaften von Schluffböden für den Erdbau Straßen- und Tiefbau 5 (1959)
Schönberg	Beobachtungen bei der Verbesserung von Schluffböden Straßen- und Tiefbau 5 (1959)
Brand, W.	Systematik der Bodenverfestigung und Technologie der Bodenstabilisierung mit Kalk Straße und Autobahn, 10 (1960)
Brand, W.	Der Einfluss von Calciumhydroxyd auf die Eigenschaften schluffiger Böden im Straßenbau Dissertation, Aachen, 1962
Brand, W.	Über die Verteilung der Tonminerale auf die verschiedenen Korngrößengruppen der Böden Tonindustrie-Zeitung 10 (1962)
Meihorst, W.	Über die Stabilisierung bindiger Böden mit Kalk Dissertation, Hannover, 1963

- Brand, W. Die Bodenverfestigung als konstruktive und betriebstechnische Maßnahme im Erd- und Straßenbau  
Straßenbau-Technik 13 (1964)
- Frank, A.G.J. Einfluß der Boden-Kennziffern und der Wärme auf die Verfestigung schluffiger Böden mit Kalkhydrat im Straßenbau  
Dissertation, Aachen, 1964
- Reusche, E. Die Bodenverfestigung mit Kalk - Kurze Einführung in Grundlage und Praxis -  
BAU-Markt 20 (1965)
- Schleicher, E. Verfahren und Maschinen zur Verfestigung von Böden im Erd- und Straßenbau  
BAU-Markt 23 und 24 (1965)
- Kuonen, V. Bodenstabilisation mit Kalk  
Schweizerische Finanz-Zeitung 5 (1965)
- Kuonen, V.  
Hirt, R. Forschungsergebnisse über die Wirkungsweise des Kalkes in der Bodenstabilisierung  
Straße und Verkehr 52 (1966) 11, S. 567-572
- Brand, W. Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung von Kalk zur Stabilisierung bindiger Erdstoffe  
Der Bauingenieur 41 (1966) 3, S. 94-97
- Jessberger, H.L. Grundlagen und Anwendungen der Bodenstabilisierung  
152 S., Düsseldorf 1967
- Kuonen, V. Bodenstabilisierung mit Kalk - Einführungsreferat zu den Normen über Bodenstabilisierung -  
Straße und Verkehr 55 (1969) 7, S. 348-351
- Brandl, H. Zusammenhänge zwischen den chemisch-physikalischen Eigenschaften stabilisierter Böden  
Straßen- und Tiefbau 25 (1971) 4, S. 287-300
- Bürger, W. Verfestigungen bindiger Böden mit Kalk - Erfahrungen aus einigen europäischen Ländern -  
Straßenbau-Technik 25 (1972) 18, S. 45-52
- ATR, Paris  
FG, Köln  
VSS, Zürich Bodenstabilisierung mit Kalk  
Bericht der Kommission VI der ATR, FG und VSS  
Schriftenreihe Heft 3, 1973
- Fauveau, B. Die Bodenverfestigung mit Kalk  
Straßen- und Tiefbau 30 (1976) 3, S. 26-29

Abicht Freudenberg Hundt	Das Langzeit-Tragfähigkeitsverhalten von Kalkstabilisierungen unter praktischen Bedingungen Die Straße 16 (1976) 15, S. 201-204
Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington D.C.	Stand der Technik: Stabilisierung mit Kalk Nr. 180, September 1976 (Eine vollständige Übersetzung liegt beim Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie e.V., Köln, vor)
Collumbi, A. Lampke, W.	Ersatzbauweisen, für Frostschutzschichten durch Bodenverfestigung mit Zement und Kalk F.A. 5.19 der Bundesanstalt für Straßenwesen, Köln März 1977
Jessberger, H. L. Ebel, W.	Frostbeständige Verfestigung frostempfindlicher Kies-Sand-Gemische Forschungsbericht F.A 5.005 G73F für BMIV, Oktober 1977
Jessberger, H. L. Ebel, W.	Frostbeständigkeitsprüfungen für Bodenverfestigung mit Zement und Kalk Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau 20 (1978) 4, S. 231-234
Ritter, H.-J.; Staaf, U.	Langzeitverhalten bindiger Böden nach der Verbesserung und Verfestigung mit Feinkalk; Tiefbau 5 (1991)
Jessberger, Jordan, fers	Bodenstabilisierung mit Kalk im Ingenieurbau; Schä-Tiefbau 7 (1992)
Vosteen, B.	Die Behandlung von Böden mit Bindemitteln in der Bundesrepublik Deutschland; Straße und Autobahn 6 (1998)
Listner, Karl	Frostempfindlichkeit kalkbehandelter Böden - Beobachtung am Planum und Oberbau von Straßen; FH Darmstadt 05/1999
Lottmann, A.	Einflüsse des Gebrauchsverhaltens kalkbehandelter, frostempfindlicher Böden im Planumbereich von Verkehrsflächen auf den frostsicheren Oberbau - Reduzierung der Oberbaudicke; FE 05.121/2000 /DGB im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Wohnungswesen (BMVBW), 2003

#### **b) Bodenverbesserung und Bodenverfestigung mit Kalk im ländlichen Wegebau**

Brand, W. Priemer, G.	Die Bodenstabilisierung mit Kalk als Bauelement im Wald- und Wirtschaftswegebau Der Forst- und Holzwirt 7 (1959)
Greiß, G.	Erfahrungsbericht über Versuche mit Bodenstabilisierung im mittelfränkischen Waldwegebau Straßen- und Tiefbau 5 (1959)

- Giesen, H.  
Hachenberg, F.                      Wirtschaftswegebau im einfachen Stabilisierungsverfahren  
Innere Kolonisation 1 (1959)
- Brand, W.  
Priemer, G.                         Die Bodenstabilisierung mit Kalk im Wirtschaftswegebau  
Wasser und Boden 11 (1959)3, S. 73 ff.
- Galensa, F.                         Wege in der Marsch  
Straßenbautechnik 12 (1959) 20, S. 787 - 792
- Priemer, G.                         Die Bodenverfestigung mit Kalk im Wirtschaftswegebau  
- Planung und Bauausführung -  
Straßenbau-Technik 6 (1961)
- Kuonen, V.                         Grundlagen und Anwendung der Bodenstabilisierung mit  
Kalk im schweizerischen Waldstraßenbau  
Straßenbau-Technik 16 (1963) 6, S. 283-288
- Abt, E.                                Die Kalkstabilisierung im Forststraßenbau  
Mitteilung der Schweizerischen Ges. Bodenmechanik und  
Foundationstechnik (1963) 42, S. 34-36
- Reusche, E.                         Straßenbau im Überschwemmungsgebiet - Bodenverfesti-  
gung mit Kalk unter extremer Beanspruchung  
Straßenbau-Technik 8 (1965)
- Klempert, B.                        Vorschriften und deren Anwendungsbereiche beim land-  
und forstwirtschaftlichen Wegebau in Nordrhein-Westfalen  
Straßenbau-Technik 19(1966) 10, S. 793-797
- Hintsteiner, E.                     Der ländliche Wegebau in der Steiermark  
Straße und Autobahn 20 (1969) 4, S. 138-142
- Borchard, F.                        Rationelle Forstwege durch Bodenverfestigung mit Kalk  
Die Waldarbeit (1970) 8, S. 187-192
- Bürger, W.                         Verfestigung mit Kalk in bindigen Böden der Bundesrepublik  
Straßenbau-Technik 25 (1972) 11 und 12, S. 27-34 und  
S.32-34

### **c) Bodenverbesserung und Bodenverfestigung mit Kalk im Erd- und Straßenbau**

- Sipe, JI.                              Frostschädenbeseitigung beim Straßenwiederaufbau in Neu-  
Mexiko  
"Better Roads", November 1956
- Conrad M. Kelley, NLA             Kalkstabilisierung beim Bau von Straßen mit geringem  
Kostenaufwand
- Boynton, R.S.  
Washington 5. DC                 Kalkstabilisierung von Böden für den Straßenbau und den  
Ingenieurbau

- Unger, R. Verbesserung von Schluffböden durch Kalk  
Straße und Autobahn 9 (1958) 11, S. 418-421
- Kalkstabilisierter Untergrund für das Kansas-"J"-Projekt  
Roads and Streets, Februar 1959 übersetzt von W. Brand
- Vincent, W.C. "Schwimmende Straße" überquert Sumpfgebiet  
Straßenbau-Technik 13 (1960) 16, S. 727-728
- Aichhorn, W. Zwölf Jahre Erfahrung bei Bodenstabilisierungen  
Straßen- und Tiefbau 14 (1960) 6, S. 436-443
- Aichhorn, W. Grundlagen der Bodenstabilisierung im Straßen- und Wege-  
bau  
Winterkorn, H. F. Selbstverl. Österreichischer Ing.- und Architektenverein,  
Wien 1960
- Scheiblaue, J. Erfahrungen mit Kalkstabilisierung im Erdbau  
Straßenbau-Technik 13 (1960) 22, S. 998-1001
- Bethäuser, A. Bodenverfestigung mit Kalk als rationelle Planumsverbesse-  
Brand, W. rung im Eisenbahnbau  
Der Tiefbau 4 (1961)
- Bermann, S. Kalk "zähmt" nassen Tonboden für zeitigen Start der Bau-  
Chicago Department arbeiten im Frühjahr  
of Public Works Straßenbau-Technik 16 (1963) 19, S. 1269 - 1271
- Brand, W. Probleme bei der Verwendung schluffiger und toniger Bö-  
den als Baustoff im Erd- und Straßenbau  
Zement-Kalk-Gips (1963) 13, S. 237 - 243
- Brand, W. Schluffige und tonige Böden als Baustoff im Erd- und Stra-  
ßenbau  
Bauwirtschaft 17 (1963) 25, S. 789 - 794
- Frey, E. Erfahrungen bei einer Bodenverbesserung mit Kalk im Erd-  
Bucher, K. bau  
Nies, V. Straßenbau-Technik 16 (1963) 17, S. 1134 - 1138
- Hakelberg, F. Der letzte Bauabschnitt der B 1 - Ruhr Schnellweg - im Be-  
reich des Landschaftsverbandes Westfalen-Lippe zwischen  
Dortmund und Dortmund-Sölde  
Straßenbau-Technik 17 (1964) 8, S. 565 - 569
- Hakelberg, F. Kostenvergleich: Stabilisierung unbrauchbarer Böden durch  
Kalkzugabe oder Einbau von Haldenmaterial  
Straßenbau-Technik 17 (1964) 16, S. 1114 - 1116
- Boros, J. Erfahrungen mit Branntkalk (CaO) bei Behandlung von  
Schüttmaterial wegen zu hohen Anlieferungs-Wasserge-  
haltes auf einer Großbaustelle  
Bauwirtschaft 19 (1965) 19, S. 594 - 596

- Brand, W.  
Nies, V. Hinweise für die Vorbereitung und Ausführung von Bodenverfestigungen im Erd- und Straßenbau  
Straßen- und Tiefbau 19 (1965) 9, S. 997 - 998
- Vogt, K Die praktische Anwendung der Bodenstabilisierung mit Kalk beim Bau der schweizerischen Nationalstraßen  
Schweizerische Finanz-Zeitung (1965) 28
- Behr, H. Über Wassergehaltsbeobachtungen im Unterbau und Untergrund einer Autobahn  
Straßen- und Tiefbau 20 (1966), S. 414 - 418
- Boros, J. Bodenstabilisierung. Erfahrungen beim Nationalstraßenbau in der Schweiz  
Baupraxis 18 (1966) 11
- Knoll, B  
sonSteinmann, F. Bodenverfestigung mit Kalk im Erdbau - ein neues, besonders leistungsfähiges Verfahren  
Straßen- und Tiefbau 20 (1966) 12, S. 1045 - 1051
- Knoll, B. Erweiterte Möglichkeiten für Kalk-Bodenverfestigung mit Einsatz von Motorschürfwagen  
Bohren-Sprengen-Räumen 15 (1966) 12, S. 321 ff.
- Stollba, R. Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung des Straßenuntergrundes durch Kalkpfähle  
Straßen- und Tiefbau 23 (1969) 3, S. 254 - 256
- Bucher, E. Erfahrungen mit Untergrundverfestigungen in Nordwürttemberg  
Straßen- und Tiefbau 24 (1970) 3, S. 657 - 660
- Jedelhauser, A. Durchquerung des Hanges Sonnenberg im Abschnitt August-Sissach der Nationalstraße N 2  
Straße und Verkehr 56 (1970) 10, S. 563 - 567
- Kilian, G. Mechanische Bodenverbesserung und Bodenstabilisierung mit Kalk in den USA  
Straße und Autobahn 26 (1975) 10, S. 362 - 370
- Homann, O. Ersatz von Frostschutzkies durch kalkstabilisierte Lehmschichten  
Straßen- und Tiefbau 30 (1976) 1, S. 13 - 15
- Eigenschenk, E. Flächige Bodenverbesserung mit Kalkpfählen; Die Tiefbau-Berufsgenossenschaft 8 (1993)
- Willmers, W. Sicherung von Böschungen mit Kalksäulen; Straßen- und Tiefbau 1 (1998)
- Begriffsbestimmungen; Teil: Straßenbautechnik Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln; Ausgabe 2003

11. Beispiele für Geräte und die Ausführung der Bodenverbesserung und Bodenverfestigung mit Kalk



Bild 11.1: Historischer Kalkstreuer



**Bild 11.2: Kalkübergabe von Silofahrzeug in den Verteiler**



**Bild 11.3: Verteileinrichtung**



Bild 11.4: Verteilen des Kalkes



Bild 11.5: Kombinierte Verteil- und Fräseinrichtung



**Bild 11.6: Einfräsen des Kalkes**



**Bild 11.7: Einfräsen des Kalkes**



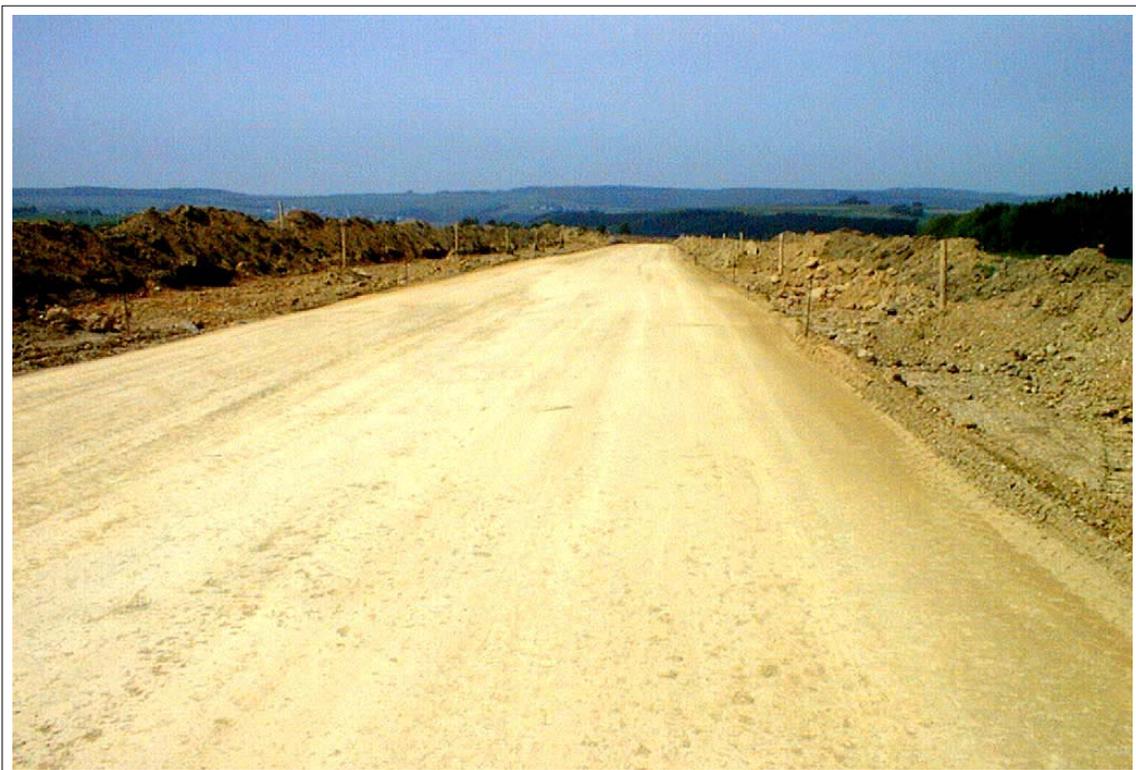
**Bild 11.8: Einfräsen des Kalkes - Staffelung von 2 Anhängеfräsen**



**Bild 11.9: Einfräsen des Kalkes - auch auf kleinen Flächen**



**Bild 11.10: Einfräsen des Kalkes und verdichten des Boden-Kalkgemisches**



**Bild 11.11: Abgeschlossene Bodenbehandlung mit Kalk**



**Bild 11.12: Kanalaushub vor der Behandlung mit Kalk**



**Bild 11.13: Kanalaushub nach der Behandlung mit Kalk**