

## Entwicklung eines Verfahrens zur Beurteilung der Eignung von Böden zur Behandlung mit Kalk

A. Lottmann, H.-J. Ritter, S. Hogewoning

AiF-Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben

Nr 13894 BG

Forschungsstelle 1:                      Forschungsinstitut der  
Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e.V.  
Annastraße 67 - 71  
50968 Köln

Forschungsstelle 2:                      Brandenburgische Technische Universität Cottbus  
Lehrstuhl für Bodenmechanik und Grundbau/Geotechnik  
Konrad-Wachsmann-Allee 1  
03046 Cottbus



---

**Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e.V.**

Annastraße 67 - 71 · 50968 Köln · Telefon: 0221/93 46 74-0 · Telefax 0221/93 46 74-14

Alle Rechte vorbehalten

Veröffentlichungen und Vervielfältigungen - auch auszugsweise - nur mit Genehmigung der Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e.V.

---

Diese Forschungsarbeit wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft (BMWi) im Rahmen eines von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF) durchgeführten Forschungsvorhabens gefördert.

## INHALT

<b>1</b>	<b>Ziel und Vorgehensweise</b> .....	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Materialien</b> .....	<b>3</b>
2.1	Versuchsböden.....	3
2.2	Kalk.....	5
<b>3</b>	<b>Eignungsprüfungen nach TP BF-StB Teil B 11.5</b> .....	<b>7</b>
3.1	Proctorversuche und Wassergehaltsreduktion .....	7
3.2	Frost-Tau-Wechselversuche nach TP BF-StB Teil B 11.5 .....	10
<b>4</b>	<b>CBR<sub>w</sub>-Versuche</b> .....	<b>13</b>
<b>5</b>	<b>Scherversuche</b> .....	<b>17</b>
<b>6</b>	<b>pH-Wert Änderung</b> .....	<b>19</b>
<b>7</b>	<b>Veränderung des CaO-Gehaltes</b> .....	<b>20</b>
<b>8</b>	<b>Veränderung des Mineralbestandes</b> .....	<b>21</b>
8.1	Probenvorbereitung .....	22
8.2	Hinweise zur den Analysenergebnissen .....	22
8.3	Interpretation.....	25
8.3.1	Unbehandelte Bodenproben .....	25
8.3.2	Tonfraktionen der Bodenproben .....	25
8.3.3	Boden-Kalk-Gemische .....	26
<b>9</b>	<b>Anionen/Kationen-Austauschkapazität</b> .....	<b>27</b>
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>27</b>
	<b>Anhang</b> .....	<b>30</b>

## 1 Ziel und Vorgehensweise

Ziel dieser Forschungsarbeit war die Entwicklung eines Verfahrens („Schnelltest“) mit dem die Eignung von Böden zur Behandlung mit Kalk vorausgesagt werden kann. Die BTU Cottbus ermittelte die Eignung der Böden anhand von konventionellen geotechnischen Methoden, die Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e.V. versuchte auf der Basis der Ergebnisse der BTU Cottbus geeignete Verfahren für eine kurzfristige Prognose der Eignung der Böden zu entwickeln.

Für die gesamte Untersuchung wurden drei unterschiedliche Böden ausgewählt. Hierbei sollten diese Böden möglichst repräsentativ, aber gleichzeitig noch für die Behandlung mit Kalk geeignet sein. Die ausgewählten Böden wurden hinsichtlich ihrer bodenmechanischen und bodenphysikalischen Eigenschaften untersucht und charakterisiert. Um die grundsätzliche Eignung der in Betracht kommenden Schnelltests abzudecken wurden 2 unterschiedliche Kalkarten (Weißfeinkalk CL 90-Q und Dolomitfeinkalk DL 85-Q) verwendet. Die festgelegten Kalkdosierungen (2, 4, 6 M.-%) liegen im Bereich der für die Kalkbehandlung (Bodenverbesserung und Bodenverfestigung) im Regelwerk des Straßenbaus beschriebenen Größenordnung.

Im Rahmen der Eignungstests wurden Proctorversuche an den 18 Boden-Kalk-Gemischen durchgeführt um die Bedingungen für die Herstellung der Probekörper festzulegen. Der Ablauf der Eignungstests entsprach den Technischen Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau (TP BF-StB, Teil B 11.5), bei der die einaxiale Druckfestigkeit nach Frost-Tau-Beanspruchung ( $q_{uF}$ ) ermittelt wird. Bei den Eignungstests wurde neben den Böden, der Kalkart und der Kalkdosierung auch das Prüfalter der Probekörper (7, 28, 90 Tage) variiert. Die Ergebnisse der einaxialen Druckfestigkeit nach Frost-Tau-Beanspruchung ( $q_{uF}$ ) sollten als Basis für die Bewertung der Schnelltests dienen. Um die Bandbreite möglicher Schnelltests zu erweitern, wurden alternative Eignungsprüfungen mit CBR-Versuchen nach viertägiger Wasserlagerung sowie Scherversuche durchgeführt.

Als Schnelltests wurden verschiedene chemisch-mineralogischen Verfahren überprüft: Phasenneubildung, Abnahme des nichtgebundenen  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  im Boden-Kalk-Gemisch, pH-Wert Änderung des Bodens bzw. Boden-Kalk-Gemisches, Anionen/Kationen-Austauschkapazität.

## 2 Materialien

### 2.1 Versuchsböden

Für die Laborversuchsreihen wurden von der BTU drei Böden ausgewählt, beschafft und in Cottbus gelagert. Die entnommenen Böden standen oberflächennah an. Lediglich der darüber befindliche Mutterboden musste entfernt werden.

Die ausgewählten Böden erhielten nach ihrer Herkunft die folgenden Bezeichnungen:

- Köln: Der Boden wurde in Kerpen – Blatzheim, in der Nähe von Köln, innerhalb eines Kieswerkes entnommen. Es handelte sich um einen Decklehm.
- Wallhausen: Der Boden stammt aus dem Ort Wallhausen in Sachsen-Anhalt. Der Boden wurde im Zusammenhang mit der Freilegung eines darunter anstehenden Kieses entnommen. Es handelte sich um einen Auelehm.
- Stuttgart: Der Boden stammt aus dem Ort Göppingen (Stadtteil Holzheim) in der Nähe von Stuttgart (Baden-Württemberg) und wurde im Zusammenhang mit einem Tunnelbau in offener Bauweise ausgehoben. Es handelt sich um einen Verwitterungslehm bzw. Tonmergel.

Die Böden wurden im Labor vor ihrer Weiterverarbeitung aufbereitet und homogenisiert. Sie wurden vorsichtig zerkleinert und der dann vorhandene Anteil  $\leq 4$  mm abgesiebt. Dieser Anteil bildete das Ausgangsmaterial für alle weiteren Untersuchungen. Die wenigen noch vorhandenen Bodenpartikel  $> 4$  mm wurden verworfen.

Zur Charakterisierung der Böden wurden die folgenden Eigenschaften und Kenngrößen ausgewählt:

- Korngrößenverteilung, ermittelt durch eine kombinierte Sieb- und Schlämmanalyse gemäß DIN 18123 [1]
- Plastizität bzw. Atterberg'schen Konsistenzgrenzen gemäß DIN 18122-1 [2] ( $w_L$  = Wassergehalt an der Fließgrenze,  $w_P$  = Wassergehalt an der Ausrollgrenze,  $I_P$  = Plastizitätszahl)
- Verdichtbarkeit bzw. Proctorversuch gemäß DIN 18127 [3] (Bestimmung des Proctorwassergehaltes  $w_{Pr}$  und der Proctordichte  $\rho_{Pr}$ )
- Glühverlust ( $V_{gl}$ ) gemäß DIN 18128 [4]
- Kalkgehalt, ermittelt in der Karbonat-Bombe nach MÜLLER und GASTNER
- Scherparameter ( $c'$  = Kohäsion,  $\varphi'$  = innerer Reibungswinkel) gemäß DIN 18137 [5]
- CBR<sub>0</sub>-Wert (CBR-Wert ohne besondere Beanspruchung) gemäß TP BF StB Teil B 7.1 [6]

- CBR<sub>w</sub>-Wert (CBR-Wert nach viertägiger Wasserlagerung) gemäß TP BF StB Teil B 7.1 [6]

Die ermittelten Kennwerte der Böden sind nachfolgend (Tabelle 1) dargestellt.

Boden	Stuttgart	Köln	Wallhausen
Geologische Bezeichnung	verwitterter Tonmergel	Decklehm / oberflächlich verlehmt Löß	Auelehm
Bodengruppe nach DIN 18 196	TM	SU/SU*	TL
Bodenart nach DIN 40 22	T, u*, fs'	fS, ms, gs', u', fg', t'	U, fs, t', ms', gs', fg'
Anteil ≤ 2 mm [M.-%]	100	94	98
Anteil ≤ 0,063 mm [M.-%]	95	11	76
Anteil ≤ 0,002 mm [M.-%]	57	3	12
w <sub>L</sub> [%]	48	23	30
w <sub>P</sub> [%]	27	20	19
I <sub>P</sub> [%]	21	3	11
w <sub>Pr</sub> [%]	21	12	14
ρ <sub>Pr</sub> [g/cm <sup>3</sup> ]	1,654	1,947	1,895
V <sub>gl</sub> [%]	5,9	1,5	2,3
Kalkgehalt [%]	1,9	0	12,6
φ' [°] bei ρ = ρ <sub>Pr</sub> und w = w <sub>Pr</sub>	16	38	32
c' [kN/m <sup>2</sup> ] bei ρ = ρ <sub>Pr</sub> und w = w <sub>Pr</sub>	90	80	100
CBR <sub>0</sub> -Wert [%] bei ρ = ρ <sub>Pr</sub> und w = w <sub>Pr</sub>	6	13	10
CBR <sub>w</sub> -Wert [%] bei ρ = ρ <sub>Pr</sub> und w = w <sub>Pr</sub>	2	12	2

Tabelle 1: Kennwerte der Böden

Der Boden „Köln“ ist der Bodengruppe SU/SU\* zu zuordnen. Der Anteil der Tonfraktion (≤ 0,002 mm) betrug 3 M.-% und war somit im Vergleich zu den anderen beiden Böden am geringsten. „Wallhausen“ ist in die Bodengruppe TL einzustufen. Der Anteil der Tonfraktion betrug 12 M.-%. „Stuttgart“ wurde der Bodengruppe TM zugeordnet. Er besaß mit 57 M.-% im Vergleich zu den anderen beiden Böden den höchsten Anteil der Tonfraktion (≤ 0,002 mm). Die Angabe der Masse der Tonfraktion erfolgt unter dem Aspekt, dass dort die Reaktionspartner der Kalke vorhanden sind.

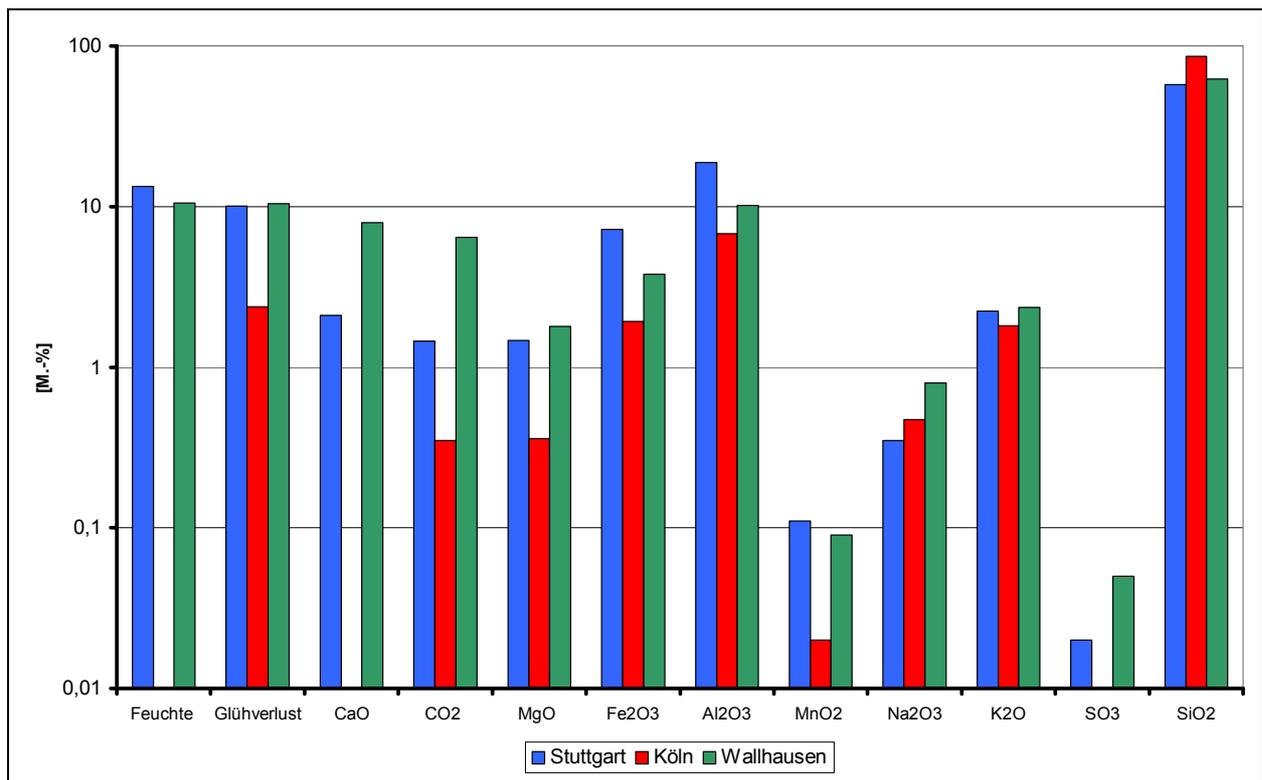


Abbildung 1: Mineralogisch-chemische Zusammensetzung der Böden

Die Bestimmung der mineralogisch-chemischen Zusammensetzung der Böden (Abbildung 1 und Anhang A, Tabelle A1) zeigt eine deutliche Differenzierung. Die Zusammensetzung und die Größenordnung der Werte der Böden Stuttgart und Wallhausen ist, bis auf wenige Ausnahmen, annähernd gleich. Der Boden Köln unterscheidet sich deutlich von den beiden anderen Böden. Letzterer ist als kalkfrei zu bezeichnen, mit dem höchsten  $\text{SiO}_2$  - Gehalt. Der Glühverlust beträgt nur ein Fünftel der Glühverluste der beiden anderen Böden. Der Boden Stuttgart ist gekennzeichnet durch den höchsten  $\text{Al}_2\text{O}_3$  - Anteil und den geringsten  $\text{SiO}_2$  - Anteil. Der Boden Wallhausen weist den höchsten Kalkgehalt und mittlere  $\text{SiO}_2$  - bzw.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  - Gehalte auf.

## 2.2 Kalk

Für die Versuche wurden die folgenden Kalke verwendet.

- Weißfeinkalk CL 90 -Q
- Dolomitfeinkalk DL 85 -Q.

Um während der gesamten Dauer des Forschungsvorhabens reaktionsfähige „frische“ Kalke zur Verfügung zu haben, wurden die benötigten Mengen für die einzelnen Untersuchungsabschnitte, bei Bedarf direkt bei den Produzenten angefordert.

Die Übereinstimmung der Kalke mit den Forderungen der DIN EN 459-1 [7] und dem ARS Nr. 7/2002 [8] sowie die Gleichmäßigkeit wurde durch die Prüfung der chemisch - physikalischen Eigenschaften und der Reaktionsfähigkeit (Naßlöschkurve) im Rahmen der werkseitigen Produktionskontrolle der Kalkwerke und bei jeder Lieferung durch die Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e.V., Köln kontrolliert. Die Gleichmäßigkeit der verwendeten Kalke während der Durchführung des Forschungsvorhabens ist durch die Spannweite der Eigenschaftskennwerte (Tabelle 2) dargestellt. Die Einzelergebnisse der jeweiligen Lieferungen enthalten die Tabellen A2 und A3 im Anhang A. Die verwendeten Kalke erfüllen die Anforderungen der DIN EN 459-1 und des ARS Nr. 7/2002.

<b>Kalkart</b>	<b>CL 90 - Q</b>		<b>DL 85 - Q</b>	
	min	max	min	max
<b>Chemische Analyse</b>	M.-%			
CaO	93,3	93,9	55,4	59,3
MgO	0,7	0,7	31,0	34,0
SiO <sub>2</sub>	0,9	1,2	2,3	3,0
CO <sub>2</sub>	1,7	2,3	1,7	4,9
Glühverlust	2,5	3,2	2,9	5,7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,4	0,6	0,7	0,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,4	0,6	0,6	1,1
MnO <sub>2</sub>	0,1	0,1	0,1	0,1
Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0	0,0	0,0	0,1
K <sub>2</sub> O	0,1	0,1	0,2	0,6
SO <sub>3</sub>	0,2	0,3	0,2	0,7
<b>Reaktivität</b>	t <sub>60°C</sub>		t <sub>40°C</sub>	
Minuten	3,4	3,9	8,1	19,0
<b>Korngrößenverteilung</b>	µm			
d <sub>10</sub>	1,1	1,2	1,4	1,8
d <sub>50</sub>	8,1	10,9	11,8	14,9
d <sub>90</sub>	39,3	45,0	39,2	42,1

Tabelle 2: Eigenschaftskennwerte der Kalke

Für die Versuchsreihen wurden die drei Kalkdosierungen 2 M.-%, 4 M.-% und 6 M.-% gewählt. Die Zugabemenge des Kalkes bezieht sich auf die Trockenmasse des Bodens.

### 3 Eignungsprüfungen nach TP BF-StB Teil B 11.5

#### 3.1 Proctorversuche und Wassergehaltsreduktion

Die Proctorversuche zur Bestimmung der Herstellbedingungen für die Probekörper wurden an 18 Boden-Kalk-Gemischen (Tabelle 3) durchgeführt.

Stuttgart + 2 % CL 90	Köln + 2 % CL 90	Wallhausen + 2 % CL 90
Stuttgart + 4 % CL 90	Köln + 4 % CL 90	Wallhausen + 4 % CL 90
Stuttgart + 6 % CL 90	Köln + 6 % CL 90	Wallhausen + 6 % CL 90
Stuttgart + 2 % DL 85	Köln + 2 % DL 85	Wallhausen + 2 % DL 85
Stuttgart + 4 % DL 85	Köln + 4 % DL 85	Wallhausen + 4 % DL 85
Stuttgart + 6 % DL 85	Köln + 6 % DL 85	Wallhausen + 6 % DL 85

Tabelle 3: Varianten der Boden-Kalk-Gemische

Die Herstellung der Proben erfolgte entsprechend der TP BF-StB Teil B 11.5 [9] und die Durchführung der Proctorversuche entsprechend der DIN 18127: Nachdem eine genügend große Probe des Bodens mit dem geforderten Wassergehalt vorbereitet war, wurde die vorgesehene Kalkmenge zugegeben. Zuerst wurde von Hand und dann 120 Sekunden lang maschinell gemischt. Das Boden-Kalk-Gemisch wurde 24 Stunden lang verschlossen gelagert. Danach erfolgte ein zweiter Mischprozess von 120 Sekunden Dauer. Das so vorbereitete Boden-Kalk-Gemisch wurde in den Proctorzylinder ( $d/h = 100/120$  mm) eingefüllt und mit einfacher Proctorarbeit verdichtet.

Die Ergebnisse der Proctorversuche (optimaler Wassergehalt  $w_{Pr}$  und maximale Trockenichte  $\rho_{Pr}$ ) sind für die Boden-Kalk-Gemische aus dem Boden „Köln“ in Tabelle 4 zusammengestellt.

Boden-Kalk-Gemisch	$w_{Pr}$ [%]	$\rho_{Pr}$ [g/cm <sup>3</sup> ]
Köln + 2 % CL 90	13,0	1,929
Köln + 4 % CL 90	13,5	1,916
Köln + 6 % CL 90	14,0	1,870
Köln + 2 % DL 85	12,3	1,946
Köln + 4 % DL 85	12,3	1,932
Köln + 6 % DL 85	12,3	1,909

Tabelle 4: Ergebnisse Proctorversuche - Boden „Köln“ + Kalke

Gegenüber dem Ausgangsboden ( $w_{Pr} = 12 \%$ ) hat sich der Proctorwassergehalt bei Zugabe von 2 M.-% CL 90 um 1 % erhöht, bei Zugabe von 4 M.-% CL 90 um 1,5 % und bei Zugabe von 6 M.-% CL 90 um 2 %.

Bei Zugabe von DL 85 hat der Proctorwassergehalt, unabhängig von der Dosierung, gegenüber dem Ausgangsboden gering um 0,3 % zugenommen. Die Proctordichten wurden mit steigender Dosierung gegenüber dem unbehandelten Ausgangsboden reduziert.

Durch das Einmischen des Kalkes wurde der Wassergehalt verringert. Die Differenz des Wassergehaltes vor und nach dem Einmischen des Kalkes ( $\Delta w$ ) betrug beim Boden „Köln“:

- bei Verwendung von 2 % CL 90:  $\Delta w$  im Mittel 1,8 %
- bei Verwendung von 4 % CL 90:  $\Delta w$  im Mittel 2,8 %
- bei Verwendung von 6 % CL 90:  $\Delta w$  im Mittel 5,0 %
  
- bei Verwendung von 2 % DL 85:  $\Delta w$  im Mittel 2,1 %
- bei Verwendung von 4 % DL 85:  $\Delta w$  im Mittel 2,5 %
- bei Verwendung von 6 % DL 85:  $\Delta w$  im Mittel 3,6 %

Die Ergebnisse der Proctorversuche sind für die Boden-Kalk-Gemische aus dem Boden „Wallhausen“ in Tabelle 5 als Übersicht zusammengestellt.

Boden-Kalk-Gemisch	$w_{Pr}$ [%]	$\rho_{Pr}$ [g/cm <sup>3</sup> ]
Wallhausen + 2 % CL 90	18,5	1,767
Wallhausen + 4 % CL 90	18,7	1,739
Wallhausen + 6 % CL 90	18,8	1,700
Wallhausen + 2 % DL 85	17,9	1,761
Wallhausen + 4 % DL 85	18,6	1,758
Wallhausen + 6 % DL 85	18,8	1,748

Tabelle 5: Ergebnisse Proctorversuche - Boden „Wallhausen“ + Kalke

Gegenüber dem unbehandelten Boden ( $w_{Pr} = 14 \%$ ) hat sich der Proctorwassergehalt bei Zugabe von 2 M.-% CL 90 um 4,5 %, bei Zugabe von 4 M.-% CL 90 um 4,7 % und bei Zugabe von 6 M.-% CL 90 um 4,8 % erhöht.

Bei Zugabe von 2 bis 6 M.-% DL 85 hat der Proctorwassergehalt um 3,9 bis 4,8 % im Vergleich zum unbehandelten Boden zugenommen. Die Proctordichten wurden mit steigender Dosierung gegenüber dem unbehandelten Ausgangsboden reduziert.

Die Wassergehaltsreduktion, d.h. die Differenz des Wassergehaltes vor und nach dem Einmischen des Kalkes ( $\Delta w$ ), betrug bei dem Boden „Wallhausen“:

- bei Verwendung von 2 % CL 90:  $\Delta w$  im Mittel 1,8 %
- bei Verwendung von 4 % CL 90:  $\Delta w$  im Mittel 3,0 %
- bei Verwendung von 6 % CL 90:  $\Delta w$  im Mittel 4,3 %
  
- bei Verwendung von 2 % DL 85:  $\Delta w$  im Mittel 1,1 %
- bei Verwendung von 4 % DL 85:  $\Delta w$  im Mittel 2,0 %
- bei Verwendung von 6 % DL 85:  $\Delta w$  im Mittel 2,7 %

Die Ergebnisse der Proctorversuche sind für die Boden-Kalk-Gemische aus dem Boden „Stuttgart“ in Tabelle 6 aufgelistet.

Boden-Kalk-Gemisch	$w_{Pr}$ [%]	$\rho_{Pr}$ [g/cm <sup>3</sup> ]
Stuttgart + 2 % CL 90	25,0	1,550
Stuttgart + 4 % CL 90	25,0	1,506
Stuttgart + 6 % CL 90	25,0	1,474
Stuttgart + 2 % DL 85	22,7	1,630
Stuttgart + 4 % DL 85	24,2	1,581
Stuttgart + 6 % DL 85	24,8	1,560

Tabelle 6: Ergebnisse Proctorversuche - Boden „Stuttgart“ + Kalke

Gegenüber dem unbehandelten Boden ( $w_{Pr} = 21$  %) hat sich der Proctorwassergehalt bei Zugabe von CL 90 um 4 % erhöht. Bei Zugabe von DL 85 hat der Proctorwassergehalt je nach Kalkdosierung gegenüber dem unbehandelten Ausgangsboden um 1,7 bis 3,8 % zugenommen. Die Proctordichten wurden mit steigender Dosierung gegenüber dem unbehandelten Ausgangsboden reduziert.

Die Wassergehaltsreduktion, d.h. die Differenz des Wassergehaltes vor und nach dem Einmischen des Kalkes ( $\Delta w$ ), betrug bei dem Boden aus Stuttgart wie folgt:

- bei Verwendung von 2 % CL 90:  $\Delta w$  im Mittel 2,0 %
- bei Verwendung von 4 % CL 90:  $\Delta w$  im Mittel 3,4 %
- bei Verwendung von 6 % CL 90:  $\Delta w$  im Mittel 4,6 %
  
- bei Verwendung von 2 % DL 85:  $\Delta w$  im Mittel 1,9 %
- bei Verwendung von 4 % DL 85:  $\Delta w$  im Mittel 2,6 %
- bei Verwendung von 6 % DL 85:  $\Delta w$  im Mittel 4,1 %

### 3.2 Frost-Tau-Wechselversuche nach TP BF-StB Teil B 11.5

Zur Beurteilung der Eignung eines Bodens zur Verfestigung mit Kalk werden gemäß TP BF-StB Teil B 11.5 Frost-Tau-Wechselversuche durchgeführt. Dazu werden Probekörper ( $d/h = 100/120$  mm) mit dem optimalen Wassergehalt und der Proctordichte im Proctorzylinder hergestellt. Anschließend werden die Proben entnommen, in Klarsichtfolie eingeschlagen und zusätzlich in Plastikbeuteln verpackt. Die Lagerungsdauer beträgt 7 Tage im Feuchtraum bei  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Nach der Lagerung und dem Auspacken werden die Proben 4 Stunden auf ein feuchtes Filz zum Wassersaugen gestellt und dann den 12 Frost-Tau-Wechseln unterworfen. Nach der letzten Tauphase wird die einaxiale Druckfestigkeit ermittelt. Mit einer Festigkeit  $q_{uF} \geq 0,2\text{ N/mm}^2$  erfüllt das Boden-Kalk-Gemisch die Anforderungen der ZTVE-StB [10] für eine Verfestigung

In Ergänzung zu den Versuchen der Eignungsprüfung nach TP BF-StB Teil B 11.5, bei denen die Probekörper ein Prüfalter von 7 Tage besitzen, wurden außerdem weitere Probekörper hergestellt, die für 28 Tage und 90 Tage im Feuchtraum bei  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  lagerten und anschließend dem Frostversuch unterzogen wurden.

Die einaxialen Druckfestigkeiten nach Frost-Tau-Beanspruchung ( $q_{uF}$ ), als arithmetische Mittelwerte aus drei Einzelversuchen, sind in Anhang A Tabelle A.4 für die beiden Kalkarten CL 90 und DL 85 und für die Prüfalter 7, 28 und 90 Tagen dargestellt. Die Ergebnisse für die unterschiedlichen Lagerungszeiten sind in der Abbildung 2, Abbildung 3 und Abbildung 4 dargestellt.

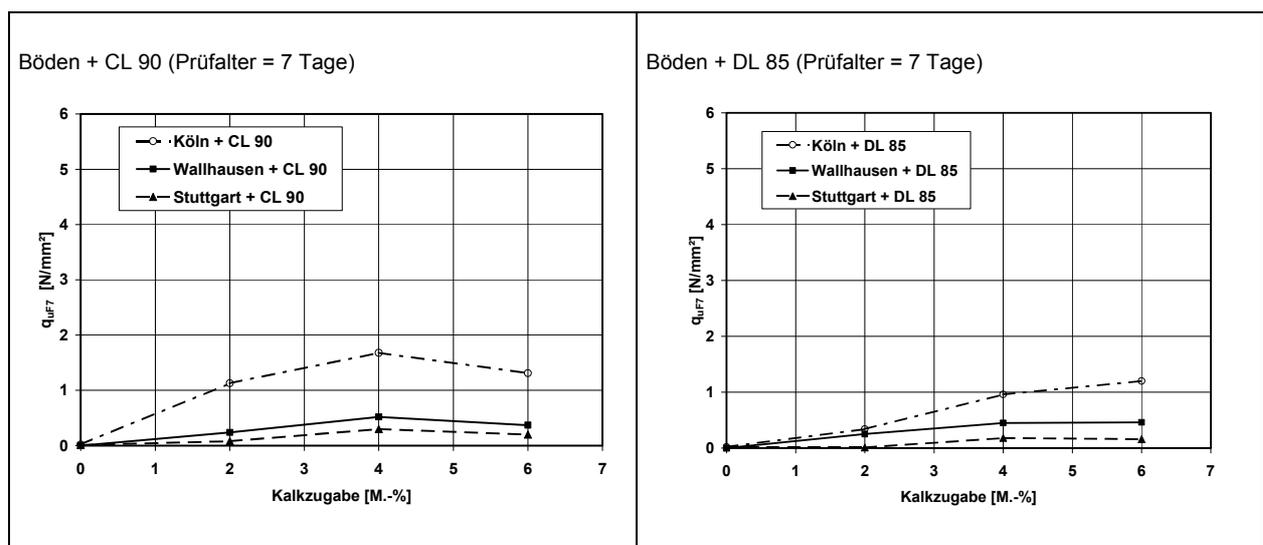


Abbildung 2: Einaxiale Druckfestigkeit nach Frost-Tau-Beanspruchung (Prüfalter 7 Tage)

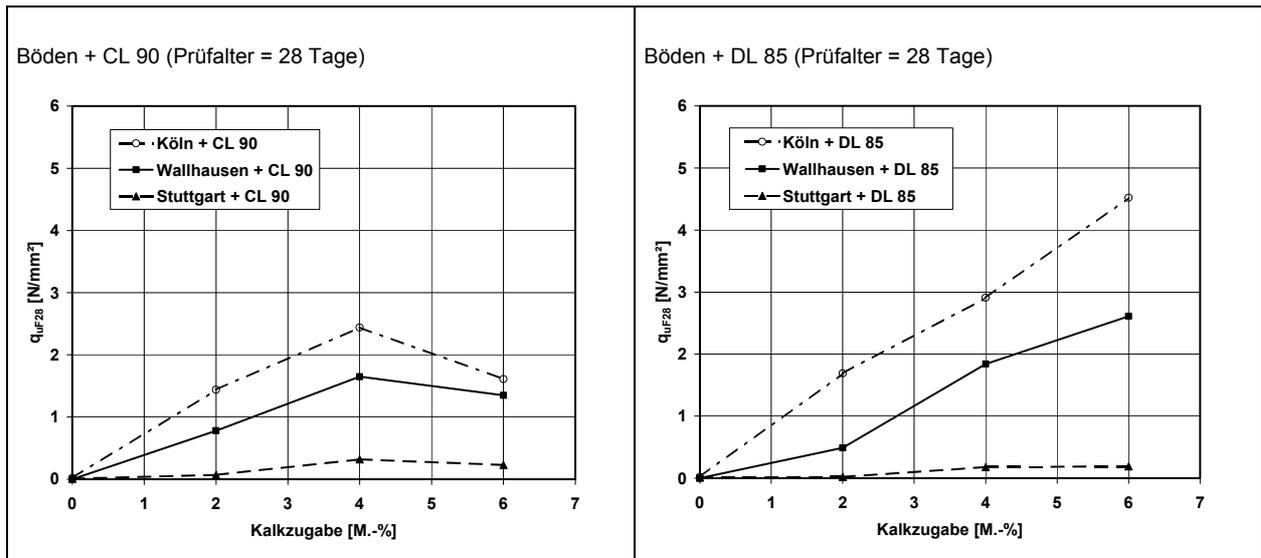


Abbildung 3: Einaxiale Druckfestigkeit nach Frost-Tau-Bearbeitung (Prüfalter 28 Tage)

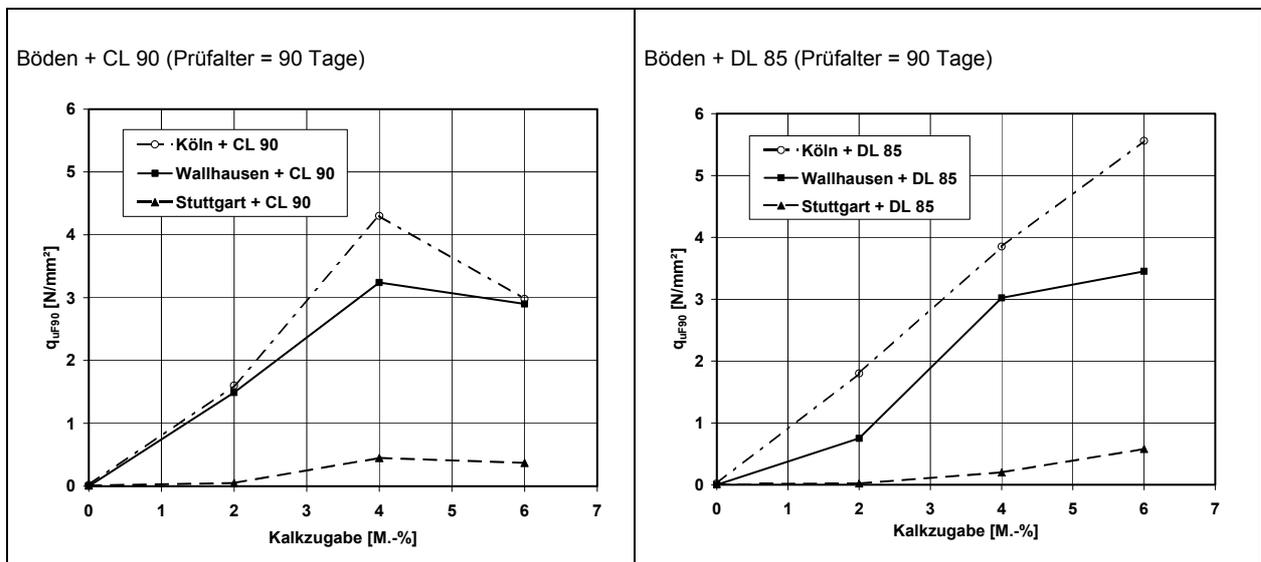


Abbildung 4: Einaxiale Druckfestigkeit nach Frost-Tau-Bearbeitung (Prüfalter 90 Tage)

Durch die Kalkbehandlung wird die Stabilität des Bodens gegenüber Frostbeanspruchung erhöht. Die Boden-Kalk-Gemische besaßen höhere einaxiale Druckfestigkeiten als die unbehandelten Ausgangsböden. Bei den Böden „Köln“ und „Wallhausen“ war die Festigkeitssteigerung durch Kalk sehr deutlich. Der Boden „Köln“ wies sowohl mit CL 90 als auch mit DL 85 im Allgemeinen die höchsten Druckfestigkeiten der drei Böden auf. Etwas geringere Festigkeiten wurden bei den Boden-Kalk-Gemischen „Wallhausen“ ermittelt. Die Boden-Kalk-Gemische „Stuttgart“ wiesen im Vergleich die geringsten einaxialen Druckfestigkeiten nach Frostbeanspruchung auf.

Die Gemische „Köln“ und „Wallhausen“ erreichten mit CL 90 und DL 85 bei den Dosierungen (2, 4, 6 M.-%) bei einem Prüfalter von 7 Tagen einaxiale Druckfestigkeiten nach Frostbeanspruchung  $> 0,2 \text{ N/mm}^2$  und damit das Kriterium der ZTVE-StB 94 für eine Bodenverfestigung.

Die Gemische „Stuttgart“ (Prüfalter 7 Tage) konnten  $0,2 \text{ N/mm}^2$  nur mit 4 M.-% CL 90 überschreiten. Bei der Verwendung von DL 85 wurde bei einem Prüfalter von 90 Tagen ab einer Dosierung von 4 M.-% eine axiale Druckfestigkeit von mindestens  $0,2 \text{ N/mm}^2$  erreicht. Die Boden-Kalk-Gemische „Stuttgart“ mit 2 M.-% CL 90 oder DL 85 erreichten auch nach 90 Tagen keine Druckfestigkeit von  $0,2 \text{ N/mm}^2$ .

Die einaxialen Druckfestigkeiten nach Frostbeanspruchung liegen bei der Verwendung von CL 90 und DL 85 in vergleichbaren Größenordnungen. Bei der Verwendung von DL 85 stieg mit wachsender Kalkdosierung die einaxiale Druckfestigkeit. Bei CL 90 stieg die einaxiale Druckfestigkeit bei „Wallhausen“ und „Stuttgart“ nicht mehr, wenn die Kalkzugabe von 4 auf 6 M.-% erhöht wurde.

Der Einfluss des Prüfalters (7, 28 und 90 Tage) auf die einaxialen Druckfestigkeiten nach Frost-Tau-Bearbeitung wird in der Abbildung 5, Abbildung 6 und Abbildung 7 für die verschiedenen Boden-Kalkgemische dargestellt.

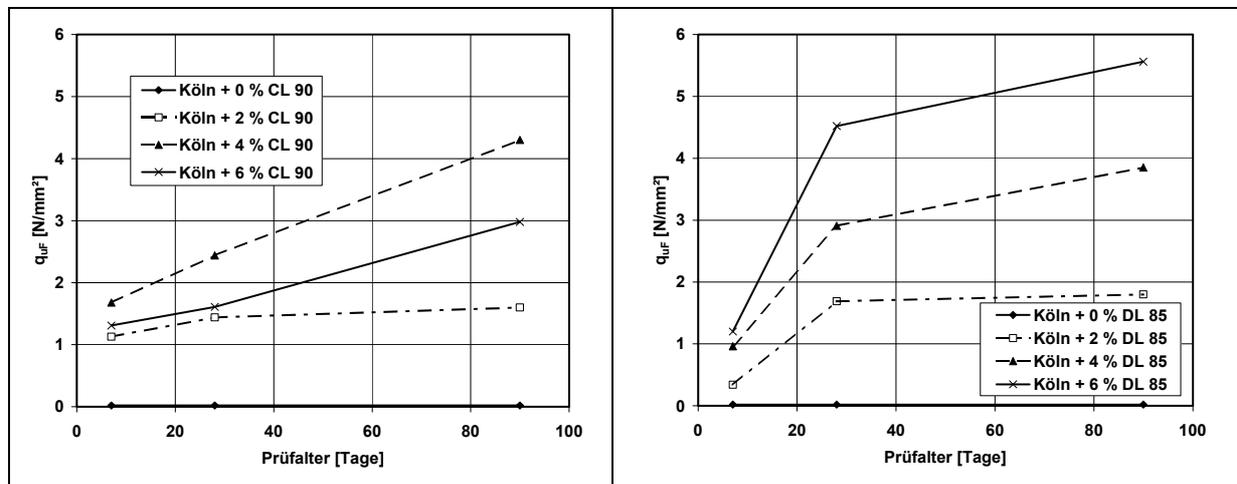


Abbildung 5: Boden „Köln“: einaxiale Druckfestigkeiten ( $q_{uF}$ ), Abhängigkeit vom Prüfalter

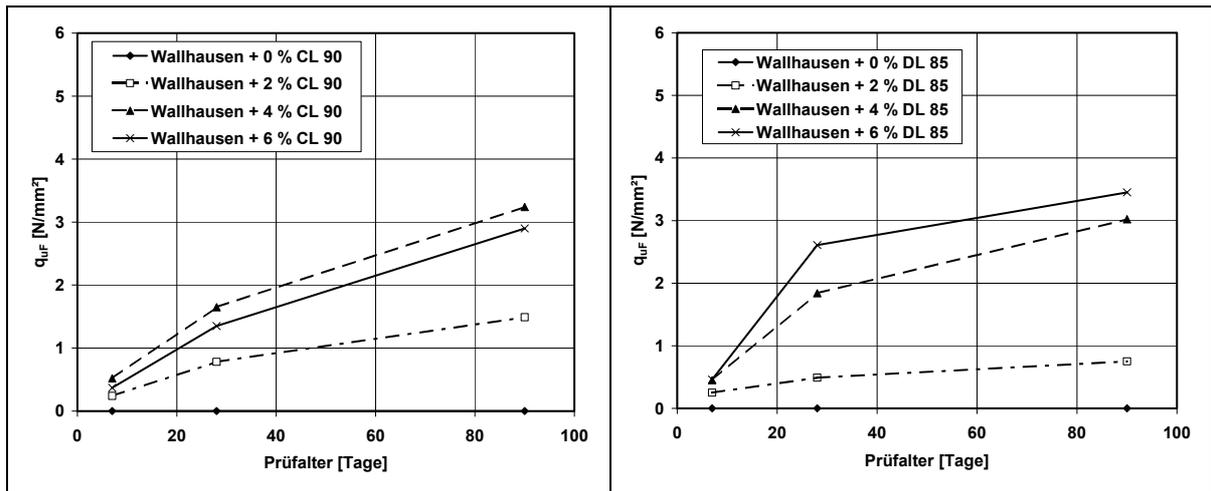


Abbildung 6: Boden „Wallhausen“: einaxiale Druckfestigkeiten ( $q_{uF}$ ), Abhängigkeit vom Prüfalter

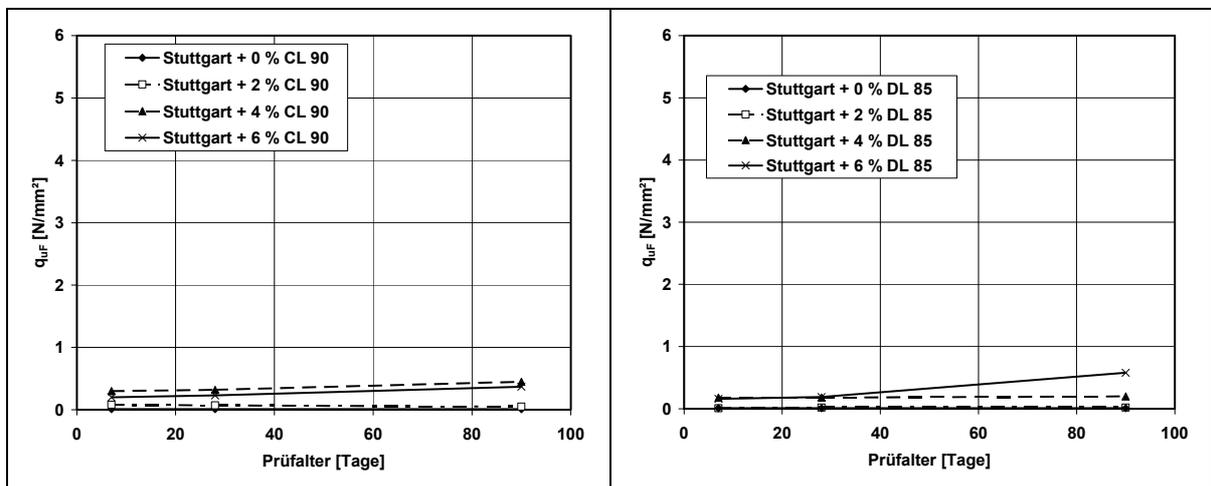


Abbildung 7: Boden „Stuttgart“: einaxiale Druckfestigkeiten ( $q_{uF}$ ), Abhängigkeit vom Prüfalter

Bei der Verwendung von 2 M.-% CL 90 und DL 85 erfolgte bei dem Boden „Stuttgart“ mit einer Erhöhung des Prüfalters keine Festigkeitssteigerung. Die anderen Boden-Kalk-Gemische zeigten mit Zunahme des Prüfalters eine Steigerung der einaxialen Druckfestigkeit nach Frostbeanspruchung. Dies belegt, dass mit Erhöhung des Prüfalters die Boden-Kalk-Gemische generell resistenter gegenüber Frostbeanspruchung wurden. Dies trifft nicht zu wenn der Boden weniger reaktiv und Kalkzugabemenge nicht ausreichend (Stuttgart + 2 M.-% Kalk) war.

#### 4 CBR<sub>w</sub>-Versuche

Für die CBR-Versuche wurden Probekörper im CBR-Topf ( $d/h = 150/125$  mm) hergestellt. Die Proben wurden anschließend aus dem Topf entnommen, in Klarsichtfolie und Plastikbeuteln verpackt und für 7, 28 und 90 Tage im Feuchtraum bei einer Temperatur von 40 °C ge-

lagert. Nach der Feuchtraumlagerung wurden die Proben für 4 Tage unter Wasser gelagert und anschließend der CBR-Wert ( $CBR_W$ -Wert) bestimmt. Die  $CBR_W$ -Werte sind in Anhang A, Tabelle A5 in Abhängigkeit von der Kalkzugabemenge und dem Prüfalter in Abbildung 8, Abbildung 9 und Abbildung 10 dargestellt.

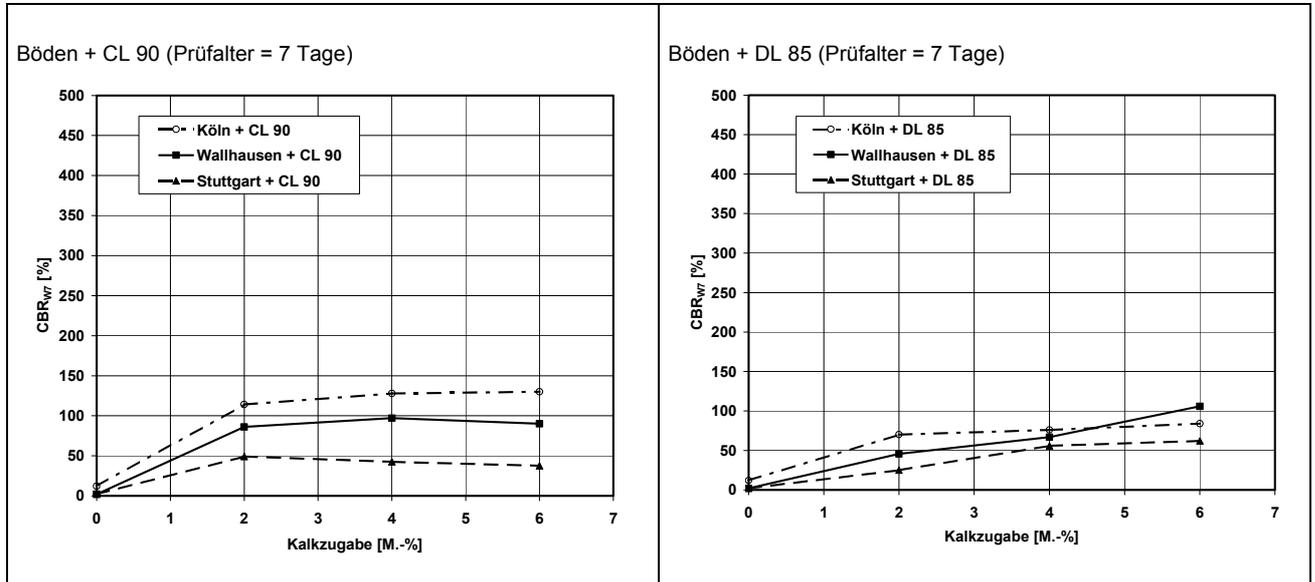


Abbildung 8:  $CBR_W$ -Werte (Prüfalter 7 Tage)

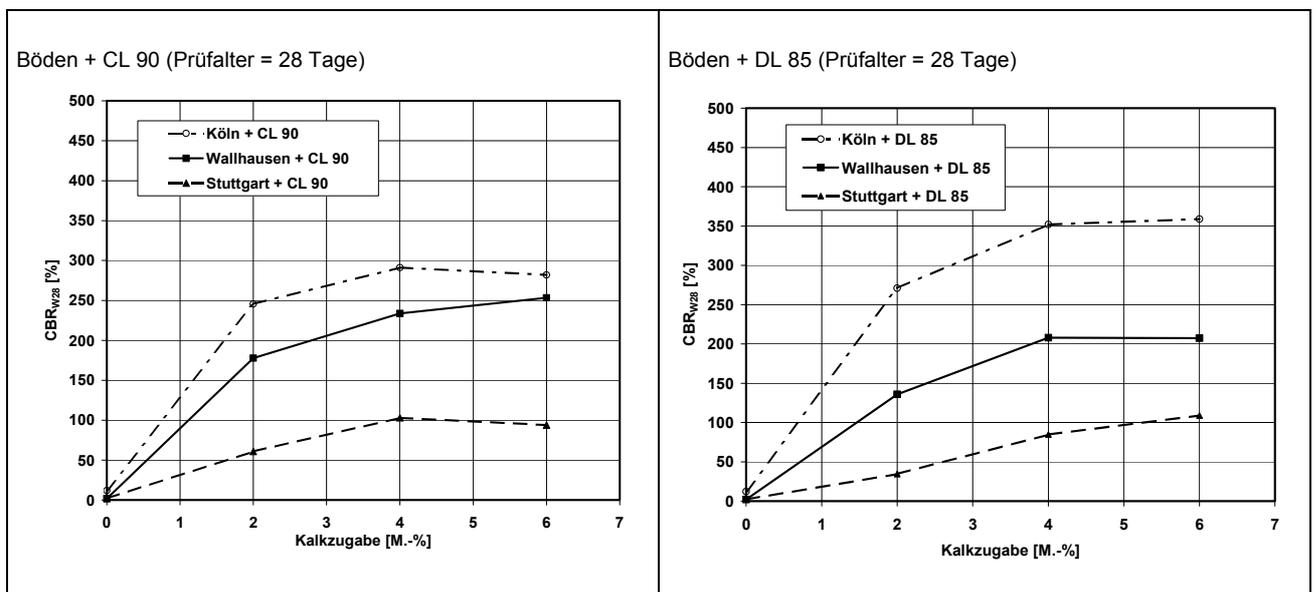


Abbildung 9:  $CBR_W$ -Werte (Prüfalter 28 Tage)

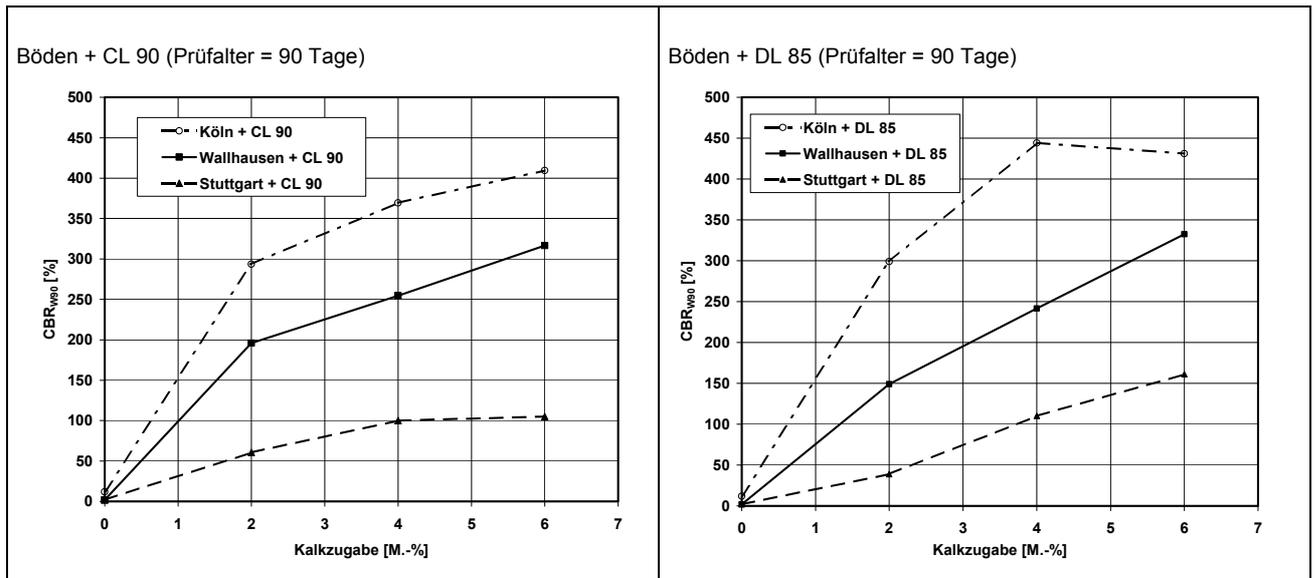


Abbildung 10: CBR<sub>W</sub>-Werte (Prüfalter 90 Tage)

Die Auswertung der CBR<sub>W</sub>-Werte zeigt:

- Durch die Kalkbehandlung wurden bei allen drei Böden die CBR<sub>W</sub>-Werte im Vergleich zum unbehandelten Ausgangsboden deutlich erhöht.
- Die Boden-Kalk-Gemische des Bodens „Köln“ besaßen bei einem Prüfalter von 7, 28 und auch 90 Tagen die höchsten CBR<sub>W</sub>-Werte. Die Boden-Kalk-Gemische des Bodens „Wallhausen“ lagen im mittleren Bereich, und die Boden-Kalk-Gemische des Bodens „Stuttgart“ befanden sich im unteren Bereich der gemessenen CBR<sub>W</sub>-Werte. Der geringste CBR<sub>W</sub>-Wert betrug 25 %.
- Die unterschiedliche Entwicklung der CBR-Werte war bei einem Prüfalter von 28 oder 90 Tagen besser zu erkennen als bei einem Prüfalter von 7 Tagen.
- Die Beurteilung der Eignung, die aus den CBR<sub>W</sub>-Versuchen resultierte, entsprach somit der Beurteilung, die auch aus den einaxialen Druckversuchen nach Frostbeanspruchung folgte.

Die Gleichartigkeit der Beurteilung und Einstufung der verschiedenen Boden-Kalk-Gemische im Hinblick auf ihre Eignung zur Bodenverfestigung lässt den Schluss zu, dass der CBR<sub>W</sub>-Versuch ein aussagefähiger Eignungstest ist. Dabei sollte bei der Anwendung des CBR<sub>W</sub>-Versuches als Eignungstest das Prüfalter nicht 7 Tage, sondern 28 Tage betragen.

Die Abbildung 11, Abbildung 12 und Abbildung 13 zeigen den Einfluss des Prüfalters auf die CBR<sub>W</sub>-Werte. Diese nahmen bei allen Boden-Kalk-Gemischen mit dem Prüfalter zu. Die stärksten Reaktionen zwischen Boden und Kalk fanden in den ersten 28 Tagen nach der Herstellung statt. Nach diesem Zeitpunkt erfolgte noch eine weitere Tragfähigkeitserhöhung

innerhalb der 90 Tage, sie fiel aber nicht mehr so deutlich aus wie vorher. Dieses Verhalten war bei den Druckversuchen nach Frostbeanspruchung im Ansatz schon zu erkennen.

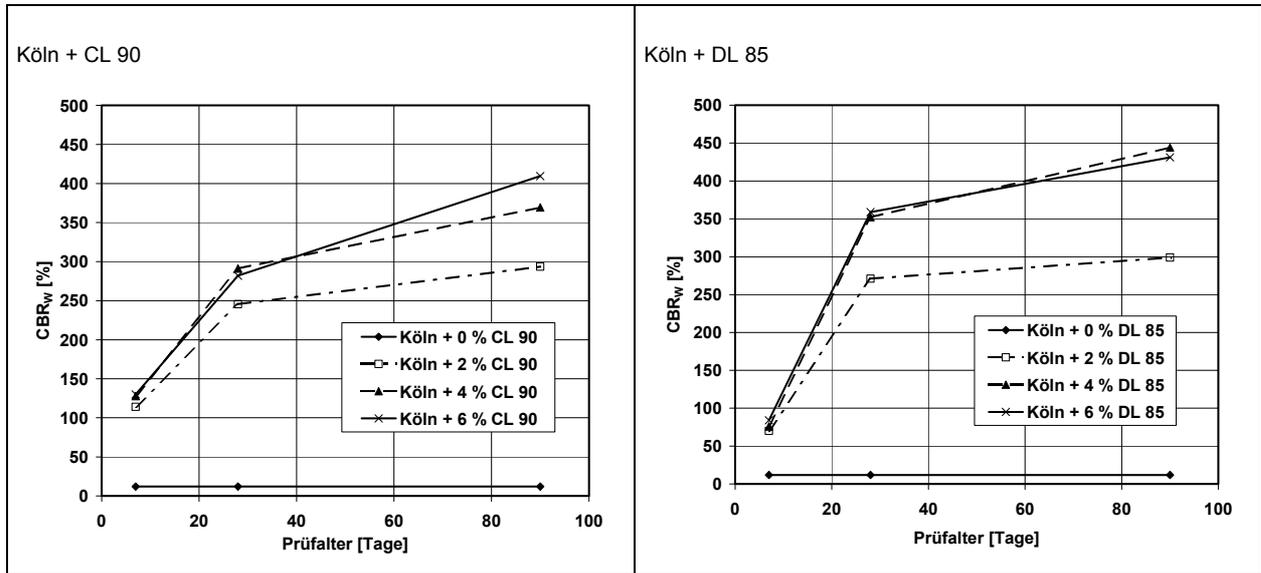


Abbildung 11: Boden „Köln“: CBR<sub>w</sub>-Werte in Abhängigkeit vom Prüfdauer

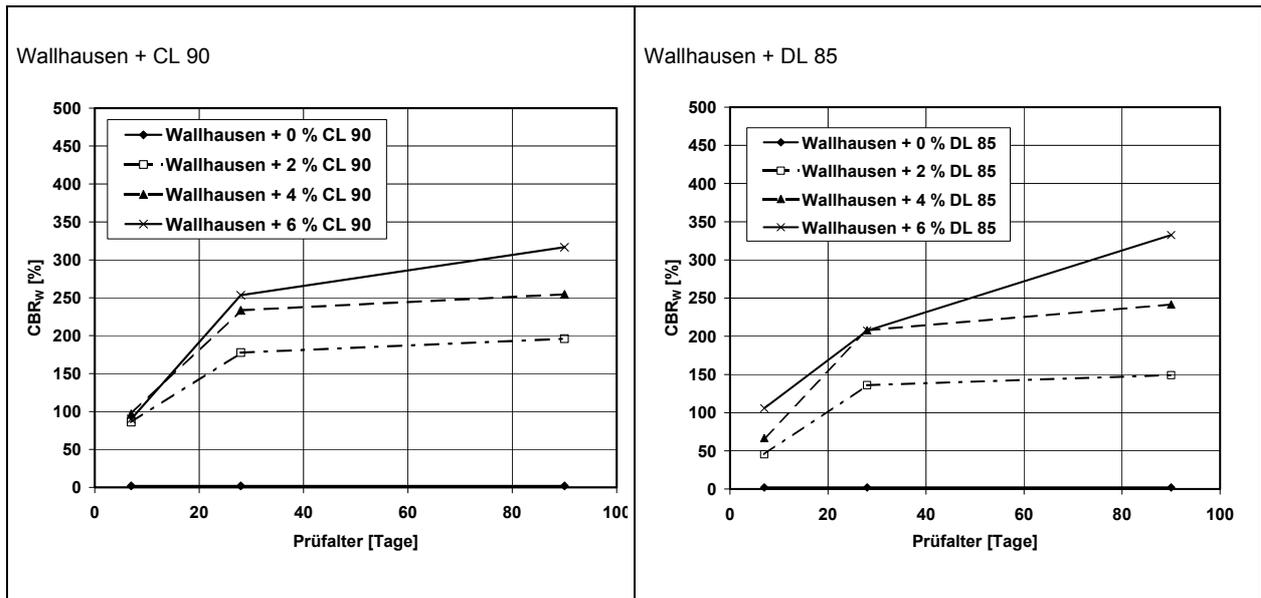


Abbildung 12: Boden „Wallhausen“: CBR<sub>w</sub>-Werte in Abhängigkeit vom Prüfdauer

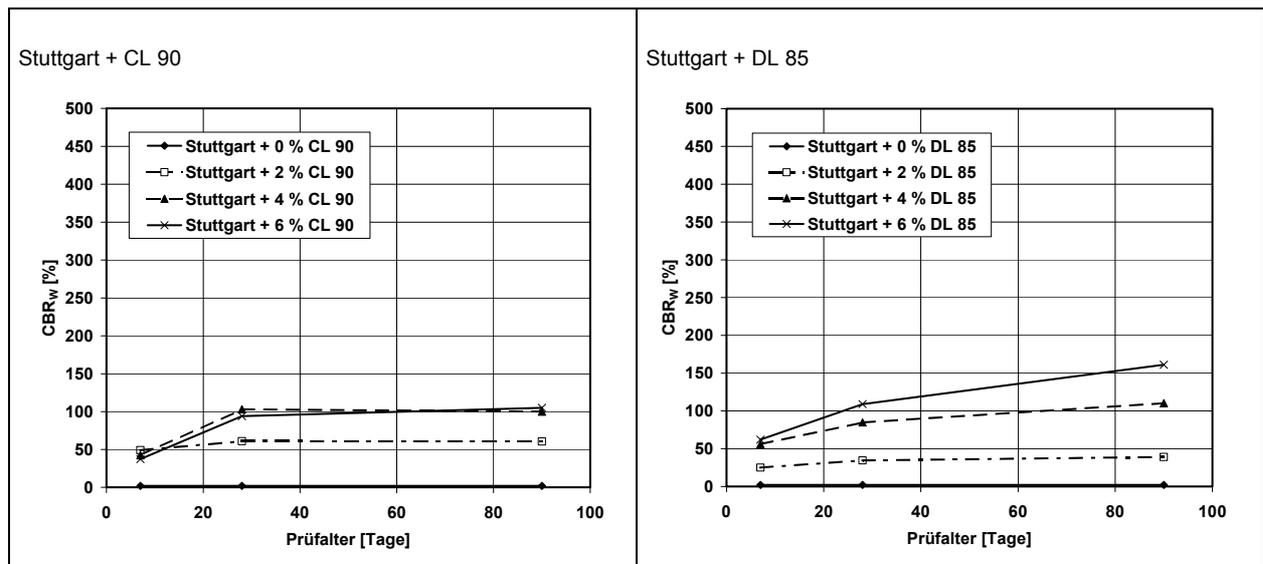


Abbildung 13: Boden „Stuttgart“: CBR<sub>w</sub>-Werte in Abhängigkeit vom Prüfalter

Die Eignung der Böden zur Behandlung mit Kalk, die aus den CBR<sub>w</sub>-Versuchen resultierte, entsprach der, die sich bei den einaxialen Druckversuchen nach Frostbeanspruchung ergab. Die Aussage war bei einem Prüfalter von 7 Tagen noch nicht eindeutig. Zuverlässiger zeigte sich die Eignung der Böden, wenn die Boden-Kalk-Gemische ein Prüfalter von 28 Tagen besaßen.

## 5 Scherversuche

Die Scherversuche an den Boden-Kalk-Gemischen bei einem Prüfalter von 0 und 7 Tagen wurden durchgeführt, um zu ermitteln, ob eine zeitliche Veränderung der Scherfestigkeit Hinweise auf die Reaktivität der Böden gibt.

Die Proben für die Scherversuche wurden analog der TP BF-StB Teil B 11.5 hergestellt. Der Boden wurde mit dem erforderlichen Wassergehalt zum Erreichen der optimalen Verdichtungsparameter vorbereitet und die entsprechende Kalkmenge eingemischt. Anschließend lagerte das Boden-Kalk-Gemisch 24 Stunden vor Luftzutritt geschützt. Die Probekörper wurden dann mit Proctordichte hergestellt. Um die zeitliche Veränderung der Scherfestigkeit zu ermitteln, wurden die Versuche direkt nach der Herstellung der Probekörper und nach einer Feuchtraumlagerung (7 Tage, 40 °C) durchgeführt.

Die Scherversuche wurden nur an Boden-Kalk-Gemischen mit 4 M.-% CL 90 bzw. DL 85 durchgeführt. Die Normalspannungen im Scherversuch betragen  $\sigma_1 = 100 \text{ kN/m}^2$ ,  $\sigma_2 = 200 \text{ kN/m}^2$  und  $\sigma_3 = 300 \text{ kN/m}^2$ . Es wurde eine Schergeschwindigkeit von

$v = 0,05$  mm/min und eine Höhe des Scherspalt von  $s = 0,2$  mm gewählt. Die Scherversuche erfolgten unkonsolidiert und drainiert.

In der Tabelle 7 sind die Ergebnisse der Scherversuche dargestellt. Wie aus der Tabelle zu erkennen ist, änderte sich der innere Reibungswinkel  $\varphi'$  bei den Boden-Kalk-Gemischen innerhalb der 7 Tage nicht. Es erhöhte sich jedoch während dieser Zeit die Kohäsion  $c'$  erheblich.

Werden die Mittelwerte der Änderung der Kohäsion von den Boden-Kalk-Gemischen mit CL 90 und DL 85 gebildet, so fällt auf, dass die Gemische des Bodens „Köln“ die größte Steigerung der Kohäsion vollzogen. Die Gemische des Bodens „Wallhausen“ lagen im mittleren Bereich, und die Boden-Kalk-Gemische des Bodens „Stuttgart“ zeigten den geringsten Mittelwert der Kohäsionszunahme. Die Mittelwerte der Zunahme der Kohäsion zeigten die gleiche Reihenfolge der Eignung der Böden zur Behandlung mit Kalk wie die einaxialen Druckfestigkeiten nach Frostbeanspruchung und die  $CBR_W$ -Ergebnisse.

Die Betrachtung der Einzelwerte  $\Delta c'$  hätte jedoch ergeben, dass der Boden „Stuttgart“ mit dem CL 90 besser reagiert hat als der Boden „Wallhausen“. Da die Kohäsionsanstiege keine zuverlässigen Kriterien zu sein scheinen, sollte der Scherversuch nicht als alternative Eignungsprüfung verwendet werden.

Böden und Boden-Kalk-Gemisch	$\varphi'$ [°] Prüfalter = 0 Tage	$\varphi'$ [°] Prüfalter = 7 Tage	$\Delta\varphi'$ [°]	$c'$ [kN/m <sup>2</sup> ] Prüfalter = 0 Tage	$c'$ [kN/m <sup>2</sup> ] Prüfalter = 7 Tage	$\Delta c'$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Mittelwerte $\Delta c'$ [N/mm <sup>2</sup> ]
Köln + 0 % CL90	38	-	-	78	-		
Köln + 4 % CL90	36	38	2	79	340	261	301
Köln + 4 % DL 85	37	45	8	82	423	341	
Wallhausen + 0 % CL90	32	-	-	100			
Wallhausen + 4 % CL90	35	40	5	104	280	176	226
Wallhausen + 4 % DL 85	35	35	0	90	365	275	
Stuttgart + 0 % CL90	16	-	-	90			
Stuttgart + 4 % CL90	21	21	0	113	347	234	218
Stuttgart + 4 % DL 85	20	25	5	118	320	202	

Tabelle 7: Ergebnisse der Scherversuche

## 6 pH-Wert Änderung

Für die Bestimmung des pH-Wertes mittels der pH-Elektrode wurden jeweils 10 g Boden und 100 ml Wasser gemäß VDLUFA-Methodenbuch, A 5.1.1 [11] eingewogen. Die verwendeten Böden waren zuvor auf den jeweiligen optimalen Wassergehalt nach Proctor eingestellt worden. Die Einwaage des Bodens bezog sich auf die Trockenmasse. Der pH-Wert wurde sowohl an den Ausgangsböden als auch an den abgesiebten Bodenanteilen < 0,063 mm bestimmt. Aufgrund des hohen Anteils < 0,063 mm des Bodens „Stuttgart“ (s. Tab.1) wurde dieser nicht abgesiebt.

Den Ausgangsböden und den separierten Anteilen < 0,063 mm wurden die festgelegten Kalkmengen von 2, 4 und 6 M.-% zugegeben. Nach dem Einmischen des Kalkes wurden die Boden-Kalk-Gemische 24 h (s. TP BF-StB Teil 11.5) verschlossen gelagert. Nach dieser Reaktionszeit sollte an den Gemischen direkt (0 h) und nach weiteren 1 h, 4 h, 8 h und 24 h der pH-Wert ermittelt werden.

Boden	Kalk		pH-Wert nach h				
	Art	M.-%	0	1	4	8	24
Köln	--	--	8,3	--	--	--	--
	CL 90	2	13,1	12,9	12,4	12,8	12,5
	DL 85	2	12,9	12,5	12,7	12,5	12,4
Köln < 0,063	--	--	8,2	--	--	--	--
	CL 90	2	13,1	12,6	12,2	12,0	12,1
	DL 85	2	12,5	12,5	12,6	12,3	12,5
Wallhausen	-	-	8,7	--	--	--	--
	CL 90	2	12,7	12,7	12,4	12,2	11,9
	DL 85	2	12,8	12,9	12,2	12,4	11,9
Wallhausen < 0,063	-	-	8,7	--	--	--	--
	CL 90	2	12,6	12,4	11,9	12,2	12,3
	DL 85	2	12,5	12,4	12,6	12,3	12,1
Stuttgart	--	--	8,3	--	--	--	--
	CL 90	2	13,0	12,7	12,6	12,7	12,9
	DL 85	2	12,4	12,5	12,3	12,4	12,5

Tabelle 8: pH-Wert Änderung

Die Versuche mit einer Kalkzugabe von 2 M.-% zeigten jedoch schon, dass für die Messzeitpunkte 0 h und 24 h nur eine geringe Abnahme der pH-Werte stattfindet (siehe Tabelle 8). Die pH-Werte für die Messzeitpunkte 1h, 4h und 8h streuen innerhalb dieser geringen Veränderung. Die Ausgangsböden und die Bodenanteile < 0,063 mm verhalten sich dabei gleichartig.

Diese in keiner Weise signifikante pH-Wert Änderung innerhalb eines realistischen Zeitraumes von 24 h lässt den Schluss zu, dass dieses Verfahren nicht als Schnellversuch mit einem Bezug zu den Ergebnissen der anderen Versuche geeignet ist. Nach den Ergebnissen mit der Kalkzugabe von 2 M.-% ist bei den anderen Zugabemengen kein anderes Verhalten zu erwarten, da der pH-Wert und damit auch die Veränderung durch eine Steigerung der Kalkmenge nicht mehr beeinflusst wird. Andere Untersuchungen [Lit.1] zeigen zudem, dass sich die pH-Werte bei Lagerungszeiten von einem Jahr nur noch geringfügig verändern und etwa in der Größenordnung der Werte nach 24 h liegen.

## **7 Veränderung des CaO-Gehaltes**

Der Bestimmung des CaO-Gehaltes der Böden und der Boden-Kalk-Gemische lag die „Franke-Methode“ [12] zugrunde. Der Versuchsansatz war der gleiche wie bei der Bestimmung der pH-Wert Änderung, da die CaO-Gehalte an den gleichen Proben ermittelt werden sollten.

Bei der Kalkzugabe 2 M.-% zeigt sich jedoch, dass für die Messzeitpunkte 0 h und 24 h starke Schwankungen vorliegen (siehe Tabelle 9). Wiederholungen der Messungen bestätigen das Verhalten.

Die Ausgangsböden (Tab. A1) weisen unterschiedliche CaO-Gehalte auf, hierbei handelt es sich um den CaO-Anteil der in gebundener Form im Boden vorliegt. Betrachtet man den Boden Köln, den man als kalkfrei bezeichnen kann, so scheint die Abnahme des CaO-Gehaltes, ausgehend von der Kalkzugabe 2 M.-%, die Kalkbindung zu bestätigen. Die separierten Feinanteile dieses Bodens, normalerweise die „besseren“ Reaktionspartner des Kalles, verhalten sich für den Betrachtungszeitraum (0h – 24h) entgegengesetzt.

Boden	Kalk		CaO nach h	
	Art	M.-%	0	24
Köln	--	--	0	--
	CL 90	2	1,76	1,51
Köln < 0,063	--	--	0	--
	CL 90	2	1,61	1,65
Wallhausen	-	-	8,0	--
	CL 90	2	1,75	1,69
Wallhausen < 0,063	-	-	8,0	--
	CL 90	2	1,79	1,56
Stuttgart	--	--	2,1	--
	CL 90	2	1,65	1,59

Tabelle 9: Änderung des CaO-Gehaltes

Der Einsatz der anderen Kalkzugabemengen wird das Niveau der ermittelten CaO-Gehalte erhöhen, aber nicht das grundsätzliche Verhalten ändern, da dieses durch die Reaktionspartner vorgegeben ist. Die Schwankungen bei der Bestimmung der CaO-Gehalte werden auch dort bestehen. Mit der „Franke-Methode“ wird das freie d.h. das nicht gebundene CaO gemessen. Bei dem in der TP BF-StB, Teil B 11.5, Anhang 1, (Ausgabe 1981) beschriebenen Verfahren zur Bestimmung des Kalkbindevermögens von Böden würde im Gegensatz dazu das gebundene CaO bestimmt werden. Beide Verfahren sprechen den gleichen Reaktionsprozess zwischen Kalk und Boden an. Leider zeigten die in der Vergangenheit ermittelten Ergebnisse des TP BF-StB Verfahrens das gleiche Verhalten wie die „Franke-Methode“. Das „Kalkbindevermögen“ war kein verlässliches Schnellverfahren und wurde bei der Überarbeitung dieses Teils der TP BF-StB entfernt.

## 8 Veränderung des Mineralbestandes

Ausgangspunkt der Untersuchungen der Bodenproben sowie der Boden-Kalk-Gemische mittels Röntgendiffraktometrie war die Annahme, dass die durch die Kalkzugabe im Boden stattfindende Reaktion, beim Vorhandensein von reaktivem Aluminium und Silizium, zu einer Veränderung des Mineralphasenbestandes in Form von Mineralumbildungen bzw. -neubildungen führt. Unter der Voraussetzung, dass der quantitative Mengenanteil der veränderten / neuen Mineralphasen die untere Detektionsgrenze der Bestimmungsmethode überschreitet, sollte mit der Röntgenphasenanalyse eine qualitative und eventuell sogar halbquantitati-

ve oder quantitative Beschreibung der Mineralreaktionen möglich sein. Um die Veränderung des Mineralphasenbestandes deutlicher erkennen zu können wurde nur die Boden-Kalk-Gemische mit 6 M.-% Kalkzugabe betrachtet.

Da davon auszugehen war, dass die Reaktionen v. a. von den Schichtsilikaten (sog. Phyllosilikate wie Tone, Glimmer u. a.) induziert und gefördert werden, wurde neben der Bestimmung des Gesamtmineralbestandes der Proben der Ausgangsböden zusätzlich eine gesonderte Bestimmung des Mineralphasenbestandes der Anteile  $< 0,002$  mm durchgeführt, in dem eine Anreicherung der Phyllosilikate (v. a. Tonminerale) zu erwarten war. Eine gesicherte Bestimmung von Tonmineralen neben dem in Bodenproben im Allgemeinen vorherrschenden Quarz ist in der Regel erschwert. Durch die Separierung der Fraktion  $< 0,002$  mm wurde mit den unterschiedlichen durchschnittlichen Partikelgrößen eine Anreicherung der Tonminerale bei gleichzeitiger Abreicherung des Quarzes angestrebt.

### **8.1 Probenvorbereitung**

Die für die Untersuchungen benötigten Proben der Böden und der Bodenkalkgemische wurden bei  $40^{\circ}\text{C}$  im Trockenschrank getrocknet, anschließend aufgemahlen und im Mörser auf  $< 0,063$  mm zerkleinert. Teilproben der Ausgangsböden wurden nicht aufgemahlen, sondern zur Gewinnung der Anteile  $< 0,002$  mm mittels Nasssiebung auf  $< 2$  mm abgesiebt. Von dieser abgesiebten Fraktion wurde über die Dichtentrennung mit dem Sedimentations- und Schlämmverfahren nach Atterberg die Tonmineralfraktion ( $< 0,002$  mm) abgetrennt. Nach Trocknung dieser Tonmineralfraktions-Suspensionen bei  $40^{\circ}\text{C}$  wurden verklumpte Aggregate mit dem Mörser zerkleinert.

### **8.2 Hinweise zur den Analyseergebnissen**

Die Auswertung der Phasendiagramme umfasste den qualitativen Mineralphasenbestand, die Abschätzung der Mengenverhältnisse sowie die Frage der Mineralumbildungen und -neubildungen in den Boden-Kalk-Gemischen.

Die Identifikation der Mineralphasen bei der Röntgendiffraktometrie erfolgt über die Bestrahlung der Probe und der Messung des Winkels, mit dem die Strahlen von der Probe gebeugt werden. Die Beugung der Röntgenstrahlung findet am Kristallgitter der Minerale statt und wird durch dessen Geometrie bedingt. Dies hat zur Folge, dass bei Mineralen einer Mineralgruppe (z.B. Albit und Anorthit innerhalb der Gruppe der Feldspäte), die sich häufig nur durch den Austausch einer Ionenart unterscheiden (z.B.  $\text{K}^+$  gegen  $\text{Na}^+$ ) das Kristallgitter geometrisch fast gleich ist und sie somit im Diagramm nur schwer gegeneinander abzugrenzen

sind. Dies traf in den vorliegenden Proben auf die Phyllosilikate zu. Die Untergruppen Glimmer und Tonminerale konnten noch ausgehalten werden, daneben wurden auch weitere Phyllosilikate identifiziert und unter ‚Schichtsilikate‘ zusammengefasst. Auch die Identifikation der in den Proben vertretenen unterschiedlichen Feldspäte war nicht immer eindeutig.

Die Mengenverhältnisse der Mineralphasen innerhalb einer Probe relativ zueinander, können durch den Vergleich der Hauptreflexe im Diagramm grob abgeschätzt werden, indem die Reflexhöhe der Hauptreflexe der einzelnen Phasen miteinander verglichen werden. Eine Angabe von Absolutbeträgen ist damit aber nicht möglich.

Die Angabe der Mineralphasen der einzelnen Proben in Tabelle 10 erfolgt entsprechend der abgeschätzten Mengenverhältnisse in absteigender Reihenfolge. In Klammern gesetzte Bezeichnungen kennzeichnen das vermutliche Mineral der identifizierten Gruppe.

<b>Köln unbehandelt:</b>	<b>Köln - Tonmineralfraktion:</b>	<b>Köln + 6% CL90</b>	<b>Köln + 6% DL85</b>
Quarz Feldspat (Anorthoklas)  Schichtsilikate, evtl. Glimmer (Zinnwaldit oder Muscovit) Feldspat (Albit)  Calcium-Aluminium-Oxid-Hydrat	Quarz Schichtsilikate, evtl. Glimmer (Zinnwaldit oder Muscovit) Calcium-Aluminium-Oxid-Hydrat  Feldspat (Anorthoklas)	Quarz Feldspat (Anorthoklas)  Schichtsilikate, evtl. Glimmer (Zinnwaldit oder Muscovit) Calcium-Aluminium-Oxid-Carbonat-Hydrat	Quarz Feldspat (Albit)  Feldspat (Anorthoklas)  Schichtsilikate, evtl. Glimmer (Zinnwaldit oder Muscovit)
<b>Stuttgart unbehandelt:</b>	<b>Stuttgart - Tonmineralfraktion:</b>	<b>Stuttgart + 6% CL90</b>	<b>Stuttgart + 6% DL85</b>
Quarz Birnessit  Tonmineral (Nontronit)  Schichtsilikate, evtl. Glimmer (Zinnwaldit oder Muscovit) Feldspat (Albit) Goethit Calcit	Quarz Schichtsilikate (Zinnwaldit oder Muscovit) Birnessit  Tonmineral (Nontronit)	Quarz Birnessit  Schichtsilikate, evtl. Glimmer (Zinnwaldit oder Muscovit) Tonmineral (Nontronit)  Feldspat (Albit) Calcit Goethit	Quarz Schichtsilikate, evtl. Glimmer (Zinnwaldit oder Muscovit) Birnessit  Tonmineral (Nontronit)  Feldspat (Albit) Goethit Calcit
<b>Wallhausen unbehandelt:</b>	<b>Wallhausen - Tonmineralfraktion</b>	<b>Wallhausen + 6% CL90</b>	<b>Wallhausen + 6% DL85</b>
Quarz Calcit Feldspat (Albit)  Rutil  Tonmineral (Montmorillonit) Schichtsilikate, evtl. Glimmer (Zinnwaldit oder Muscovit) Fraipontit Hämatit	Quarz Calcit Tonmineral (Montmorillonit)  Schichtsilikate, evtl. Glimmer (Zinnwaldit oder Muscovit) Hämatit	Quarz Calcit  Feldspat (Albit) Schichtsilikate, evtl. Glimmer (Zinnwaldit oder Muscovit) Rutil  Tonmineral (Montmorillonit) Fraipontit	Quarz Calcit Schichtsilikate, evtl. Glimmer (Zinnwaldit oder Muscovit) Feldspat (Albit)  Rutil Fraipontit  Schichtsilikate (Klinochlor)

Tabelle 10: Mineralphasen der Böden und Boden-Kalk-Gemische

## **8.3 Interpretation**

### **8.3.1 Unbehandelte Bodenproben**

Die unbehandelten Bodenproben weisen alle erwartungsgemäß eine deutliche Quarz-Vorherrschaft auf. Ebenso sind in allen Bodenproben Feldspäte und Phyllosilikate nachzuweisen, deren Mengenanteilen und Varietäten in Abhängigkeit von Genese und Herkunft der Böden unterschiedlich ausgeprägt sind.

Das Diagramm der Bodenprobe Köln weist die geringste Untergrundintensität auf und zeigt v. a. im Anfangsbereich der Aufnahme ( $\sim 3 - 10^\circ 2\Theta$ ) deutlich geringere Untergrundsintensitäten als die Proben Stuttgart und Wallhausen. Es ist davon auszugehen, dass diese Probe einen geringeren Mengenanteil an Phyllosilikaten aufweist als dies bei den anderen Proben der Fall ist. Gestützt wird diese Vermutung auch vom qualitativen Phasenbestand, der nur ein Schichtsilikat aufweist, während die anderen Proben zwei bis drei verschiedene Phyllosilikate beinhalten.

Im Vergleich zu den anderen Proben zeigt der Mineralbestand des Bodens Köln auch keine deutlichen Verwitterungs- oder Umbildungsminerale auf. Allenfalls das nicht näher definierte Calcium-Aluminium-Oxid-Hydrat könnte eventuell auf eine Verwitterung hindeuten, die Reflexe dieser Phase sind jedoch so gering ausgebildet, dass diese Zuordnung als nur bedingt sicher anzusehen ist.

Dagegen sind in der Proben Stuttgart mit dem Nontronit und in der Wallhausen-Probe mit dem Montmorillonit typische Mineralphasen der chemischen Verwitterung vertreten, so dass bei diesen Proben von einer Umbildung und Überprägung des Bodens auszugehen ist. Zu dieser Annahme passt auch der in beiden Proben deutlich heterogenere Mineralbestand mit einer höheren Anzahl an unterschiedlichen Phasen.

### **8.3.2 Tonfraktionen der Bodenproben**

Die Untersuchung der Tonmineralfraktionen der Bodenproben zeigt, dass durch das Atterberg-Verfahren keine saubere Trennung der Mineralphasen möglich war. Alle Proben weisen weiterhin hohe Quarzgehalte auf, dies ist entweder auf sehr feinkörnige Quarzpartikel zurückzuführen oder aber bei der Durchführung des Schlämmverfahrens wurden größere Partikel als beabsichtigt mitsedimentiert und damit in die Tonfraktionsproben eingetragen.

Die in den Diagrammen scheinbar stärkere Ausprägung der Untergrundreflexe entsteht durch die Verringerung der Maximalintensität, so dass durch die Reduzierung der Ordinate eine höhere Auflösung der Einzelreflexe dargestellt wird.

Die Änderung der relativen Mengenverhältnisse in den Tonmineralfraktionen im Vergleich zu den unbehandelten Böden entsteht durch die bei der Separierung der Fraktion angestrebte An- bzw. Abreicherungen der Minerale.

Quarz stellt weiterhin die dominierende Phase dar, während einige andere Minerale (Albit, Rutil, Nontronit, Fraipontit und z. T. Zinnwaldit) vollständig abgetrennt wurden und damit in der Tonfraktion nicht mehr vertreten sind.

In den Proben Köln und Stuttgart konnten nach der Separation keinen weiteren Mineralphasen ermittelt werden, lediglich die Probe Wallhausen zeigt einen geringen Anteil einer zusätzlichen Phase, die als Hämatit angesprochen wurde.

### **8.3.3 Boden-Kalk-Gemische**

Eine gesicherte Aussage zu Änderungen des Mineralbestandes ist nur bei Neubildungen möglich, die Verschiebung von relativen Mengenverhältnissen kann hier nicht gesichert interpretiert werden, da neues Material (Kalk) zugegeben wurde.

Allen Proben gemeinsam ist, dass kein Calcium- oder Magnesium-Karbonat nachgewiesen wurde. Dies zeigt, dass die zugesetzten Kalkmengen (6M.-% CL90 bzw. DL85) vollständig (unter Beachtung der Nachweisgrenze) in der anzunehmenden Reaktion mit den vorhandenen Mineralphasen umgesetzt wurden. Freie Kalkphasen sind nach der Lagerungsdauer nicht zu erwarten und wurden auch nicht ermittelt.

Bei allen Proben sind keine großen Veränderungen des Röntgenphasendiagramms zu erkennen, dies wird v. a. bei der Darstellung der Reflexdarstellungen für die unbehandelte Probe, die Tonfraktion und das jeweilige Gemisch in einem Diagramm deutlich.

Die stärksten Veränderungen zeigt die Probe Köln + 6% CL90. Hier wurde offensichtlich der zugegebene Kalk in das Calcium-Aluminium-Oxid-Hydrat eingebaut, das jetzt als Calcium-Aluminium-Oxid-Carbonat-Hydrat vorliegt. Außerdem ist der Albit aus der Ursprungsprobe nicht mehr anzutreffen. In der Mischung Köln + 6% DL85 ist dagegen weder das Calcium-Aluminium-Oxid-Hydrat noch dessen Carbonat nachzuweisen. Dafür sind hier weiterhin alle anderen Phasen der Ursprungsprobe vorhanden.

Die Mineralphasen der Proben Stuttgart + 6% CL90 sowie Stuttgart + 6% DL85 weisen keine Unterschiede zu der Ausgangsprobe auf. In allen Proben ist die gleiche qualitative Mineralzusammensetzung anzutreffen.

Ebenso zeigt die Probe Wallhausen + 6% CL90 im Vergleich zur Ausgangsprobe bis auf das Fehlen von Hämatit keine Änderungen des Phasenbestandes. Ein ähnliches Bild liefert das

Gemisch mit 6% DL85, wobei hier der Montmorillonit durch Klinochlor ersetzt scheint. Die Beugungsreflexe dieser beiden Phyllosilikate liegen jedoch so dicht beieinander, dass auch eine Bestimmungsungenauigkeit vorliegen könnte.

Mit Ausnahme der Probe Köln geben weder die Betrachtung der identifizierten Mineralphasen noch der direkte Vergleich der Diagramme einen Hinweis auf Änderungen des Mineralbestandes nach der Zugabe der Kalke CL90 bzw. DL85. Aus diesem Ergebnis muss jedoch nicht zwangsläufig geschlossen werden, dass keine Mineralumbildungen oder –neubildungen stattgefunden haben, viel eher ist anzunehmen, dass die von den ablaufenden Prozessen betroffenen Mineralphasen einen zu kleinen prozentualen Anteil im Gesamtmineralbestand einnehmen, so dass ihre Beugungsreflexe von anderen Mineralphasen überprägt werden und nicht im Diagramm sichtbar sind.

Durch die Röntgendiffraktometrie konnte keine Veränderungen des Phasenbestandes der Boden-Kalk-Gemische gegenüber den Ausgangsböden festgestellt werden, aus denen sich die Eignung eines Bodens, durch das Vorhandensein bestimmter Mineralphasen, zu Behandlung mit Kalk unter Erfüllung der im Regelwerk festgelegten Anforderungen ableiten lässt.

## **9 Anionen/Kationen-Austauschkapazität**

Die potentielle Austauschkapazität der Böden wird hauptsächlich durch Art und Gehalt der Tonminerale und organischer Substanz bestimmt. Die festgestellten Gehalte an organischer Substanz, ausgedrückt durch den Glühverlust (Tab. A1), und die Zusammensetzung der Tonmineralfraktionen ließen diesen Ansatz zur Ermittlung eines Schnellverfahrens als nicht zielführend erscheinen.

## **10 Zusammenfassung**

Ziel der Forschungsarbeit war es, Böden hinsichtlich ihrer Eignung zur Behandlung mit Kalk anhand von konventionellen geotechnischen Prüfverfahren zu klassifizieren und Schnellverfahren zu entwickeln. Es wurden drei Böden mit den Bezeichnungen „Köln“, Wallhausen“ und „Stuttgart“ ausgewählt und ihre bodenmechanischen und bodenphysikalischen Eigenschaften bestimmt. Zur Herstellung von Boden-Kalk-Gemischen wurden ein Weißfeinkalk CL 90 - Q und ein Dolomitfeinkalk DL 85 – Q, jeweils in drei Dosierungen (2, 4, und 6 M.-%) verwendet.

Als Grundlage für die weiteren Untersuchungen und Betrachtungen wurden Eignungsprüfungen nach TP BF-StB Teil B 11.5 durchgeführt. Hierbei wurden ca. 550 Probekörper der Boden-Kalk-Gemische mit ihren optimalen Verdichtungsparametern nach Proctor hergestellt

und 7, 28 und 90 Tage im Feuchtraum (40 °C) gelagert. Nach dieser Lagerung erfolgten 12 Frost-Tau-Wechsel mit anschließender Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit.

Die Boden-Kalk-Gemische „Köln“ und „Wallhausen“, erfüllen unabhängig von der Art des verwendeten Kalkes, bei allen Kalkzugaben die Anforderungen der ZTVE-StB für eine Bodenverfestigung mit Kalk. Das Gemisch „Stuttgart“ erfüllt nur bei 4 und 6 M.-% CL 90 - Q diese Anforderung.

Neben der traditionellen Eignungsprüfung (s.o.) wurden auf der Suche nach Alternativ- oder Schnellverfahren CBR-Versuche nach Wasserlagerung durchgeführt. Die Herstellungs- und Lagerungsbedingungen entsprachen der Eignungsprüfung (s.o.). Im Anschluss wurden die Probekörper 4 Tage unter Wasser gelagert und der  $CBR_W$ -Wert bestimmt. Die Ergebnisse zeigen die gleiche Reihung der Böden wie bei der einaxialen Druckfestigkeit. Die Aussagekraft der  $CBR_{W28}$ -Werte (Prüfalter 28 Tage) war höher als der der  $CBR_{W7}$ -Werte (Prüfalter 7 Tage). Der  $CBR_W$ -Versuch ist als alternative Eignungsprüfung verwendbar.

Bei den Scherversuchen an den Boden-Kalk-Gemischen (Prüfalter 0 und 7 Tage) veränderte sich der Winkel der inneren Reibung nicht, aber die Kohäsion nahm zu. Die Reihung der Boden-Kalk-Gemische stellte sich gegenüber den v.g. beiden Verfahren anders dar. Im Vergleich mit diesen Verfahren scheint der Anstieg der Kohäsion nicht als Alternativ- oder Schnellverfahren geeignet.

Bei den Boden-Kalk-Gemischen war eine geringe Änderung des pH-Wertes in dem betrachteten Zeitraum (0 h bis 24 h) messbar. Allerdings streuten die Werte für die zwischengeschalteten Messzeitpunkte um diese pH-Wert-Abnahme. Dies betraf sowohl die mit Kalk behandelten Ausgangsböden als auch die mit Kalk behandelten separierten Bodenanteile  $< 0,063$  mm.

Die Messung der Veränderung der CaO-Gehalte der gekalkten Böden, als Nachweis der Einbindung des Kalkes, erwies sich innerhalb des Betrachtungszeitraumes als nicht aussagekräftig. Dies deckt sich mit den Erfahrungen bei der früheren Anwendung des Verfahrens „Bestimmung des Kalkbindevermögens von Böden“.

Da bei der Bodenbehandlung mit Kalk bekanntermaßen Reaktionen zwischen Bodenbestandteilen und Kalk stattfinden, wurde davon ausgegangen, dass beim Vorhandensein reaktiver Tonminerale eine Veränderung des Mineralphasenbestandes nachweisbar ist. Mit der Röntgendiffraktometrie konnte keine Veränderung des Phasenbestandes der Boden-Kalk-Gemische gegenüber den Ausgangsböden ermittelt werden.

Als Ergebnis der Untersuchungen ist festzustellen dass mit der Bestimmung des CBR-Wertes nach 4-tägiger Wasserlagerung ein Verfahren besteht, das alternativ zu der bisherigen Eignungsprüfung für Bodenverbesserung und Bodenverfestigung mit Feinkalk und Kalkhydrat eingesetzt werden kann. Die Beschreibung eines Schnellverfahrens, d.h. eines Verfahrens das für die Beurteilung der Eignung eines Bodens zur Behandlung mit Kalk Ergebnisse in kurzer Zeit, in diesem Fall innerhalb von 24 h, liefert, ist auf der Basis der in diesem Vorhaben überprüften Verfahren nicht möglich. Die Veränderung der gewählten Verfahrensparameter ist in der betrachteten frühen Phase durch die nicht gleichmäßigen Abläufe der Reaktionen zwischen den Bodenbestandteilen und dem Kalk sehr stark geprägt. Weitere Einflüsse resultieren sicherlich aus der, trotz der betriebenen intensiven Vergleichmäßigung der Böden, vorhandenen Inhomogenität der reaktiven Bodenanteile in den Proben. Die Probenpräparation und die für die chemisch-mineralogischen Untersuchungen notwendigen kleinen Probengrößen (Grammbereich) beeinflussen entscheidend die Aussagefähigkeit der ermittelten Ergebnisse im Hinblick auf die bewährten Verfahren.

Das Ziel des Forschungsvorhabens, ein Schnellverfahren für die Beurteilung von Böden hinsichtlich ihrer Eignung zur Behandlung mit Kalk zu entwickeln, wurde nicht erreicht.

## Anhang

### Anhang A

Parameter / Boden	Stuttgart	Köln	Wallhausen
	M.-%		
Feuchte	13,3	0,01	10,5
Glühverlust	10,03	2,37	10,4
CaO	2,1	0,01	7,97
CO <sub>2</sub>	1,45	0,35	6,42
MgO	1,46	0,36	1,79
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,22	1,92	3,79
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,75	6,77	10,16
MnO <sub>2</sub>	0,11	0,02	0,09
Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,35	0,47	0,8
K <sub>2</sub> O	2,24	1,81	2,36
SO <sub>3</sub>	0,02	0,01	0,05
SiO <sub>2</sub>	57,6	85,8	62,4

Tabelle A.1: Chemisch - mineralogische Zusammensetzung der Böden

Anhang A

<b>CL 90 - Q</b>						
Probedatum	27.10.03	05.12.03	01.02.04	26.02.04	26.04.04	16.06.04
<b>Chemische Analyse</b>	M.-%					
CaO	93,70	93,60	93,30	93,40	93,80	93,85
MgO	0,67	0,66	0,66	0,72	0,74	0,72
SiO <sub>2</sub>	0,94	0,95	1,23	1,22	0,93	0,99
CO <sub>2</sub>	2,30	2,30	1,70	1,70	1,90	1,80
Glühverlust	3,10	3,20	2,50	3,10	3,20	2,99
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,40	0,42	0,62	0,62	0,47	0,45
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,38	0,37	0,58	0,55	0,44	0,45
MnO <sub>2</sub>	0,05	0,05	0,07	0,07	0,06	0,05
Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02	0,01	0,03	0,02	< 0,01	0,01
K <sub>2</sub> O	0,08	0,08	0,13	0,12	0,08	0,07
SO <sub>3</sub>	0,21	0,21	0,28	0,29	0,24	0,24
<b>Raubeständigkeit</b>						
bestanden	ja	ja	ja	ja	ja	ja
<b>Reaktivität</b>	min					
t <sub>60°C</sub>	3,7	3,6	3,4	3,9	3,5	3,6
<b>Korngrößenverteilung</b>	µm					
d <sub>10</sub>	1,20	1,10	1,10	1,10	1,20	1,12
d <sub>50</sub>	10,90	10,30	8,20	8,40	8,70	8,11
d <sub>90</sub>	45,00	44,00	41,50	41,80	41,10	39,28

Tabelle A.2: Analysendaten der einzelnen WFK-Lieferungen

Anhang A

<b>DL 85 - Q</b>			
Probedatum	05.12.03	26.02.04	21.06.04
<b>Chemische Analyse</b>	M.-%		
CaO	55,4	59,3	58,8
MgO	34	31	32,25
SiO <sub>2</sub>	2,3	2,9	3,04
CO <sub>2</sub>	4,9	1,7	1,79
Glühverlust	5,7	2,9	2,88
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,7	0,87	0,91
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,61	1	1,09
MnO <sub>2</sub>	0,09	0,09	0,1
Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,03	0,08	0,07
K <sub>2</sub> O	0,15	0,54	0,56
SO <sub>3</sub>	0,17	0,67	0,72
<b>Raumbeständigkeit</b>			
bestanden	ja	ja	ja
<b>Reaktivität</b>	min		
t <sub>40°C</sub>	8,1	19,0	19,0
<b>Korngrößenverteilung</b>	µm		
d <sub>10</sub>	1,4	1,8	1,7
d <sub>50</sub>	11,8	14,9	14,6
d <sub>90</sub>	42,1	39,6	39,2

Tabelle A.3: Analysendaten der einzelnen DoFK-Lieferungen

Anhang A

Boden-Kalk- Gemisch	q <sub>uF</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]			q <sub>uF</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]		
	bei Verwendung von <b>CL 90</b>			bei Verwendung von <b>DL 85</b>		
	7 Tage	28 Tage	90 Tage	7 Tage	28 Tage	90 Tage
Köln + 0 %	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Köln + 2 %	1,13	1,44	1,60	0,34	1,69	1,80
Köln + 4 %	1,68	2,44	4,30	0,96	2,91	3,85
Köln + 6 %	1,31	1,61	2,98	1,20	4,52	5,56
Wallhausen + 0 %	0	0	0	0	0	0
Wallhausen + 2 %	0,24	0,78	1,49	0,25	0,49	0,75
Wallhausen + 4 %	0,52	1,65	3,24	0,45	1,84	3,02
Wallhausen + 6 %	0,37	1,35	2,90	0,46	2,61	3,45
Stuttgart + 0 %	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Stuttgart + 2 %	0,08	0,07	0,05	0,01	0,02	0,02
Stuttgart + 4 %	0,30	0,32	0,45	0,18	0,18	0,20
Stuttgart + 6 %	0,20	0,23	0,37	0,16	0,19	0,58

Tabelle A.4: Einaxiale Druckfestigkeiten

Boden-Kalk- Gemisch	CBR <sub>w</sub> [%]			CBR <sub>w</sub> [%]		
	bei Verwendung von <b>CL 90</b>			bei Verwendung von <b>DL 85</b>		
	7 Tage	28 Tage	90 Tage	7 Tage	28 Tage	90 Tage
Köln + 0 %	12	12	12	12	12	12
Köln + 2 %	114	246	294	84	271	299
Köln + 4 %	128	291	369	70	352	444
Köln + 6 %	130	282	410	76	359	431
Wallhausen + 0 %	2	2	2	2	2	2
Wallhausen + 2 %	86	178	196	46	136	149
Wallhausen + 4 %	97	234	255	67	208	242
Wallhausen + 6 %	90	253	317	106	207	332
Stuttgart + 0 %	2	2	2	2	2	2
Stuttgart + 2 %	49	61	61	25	35	39
Stuttgart + 4 %	43	103	100	56	85	110
Stuttgart + 6 %	38	94	105	62	109	161

Tabelle A.5: Ergebnisse der CBR-Versuche nach Wasserlagerung (CBR<sub>w</sub>)

## Anhang B

### B.1. Messparameter der Röntgendiffraktometrie

#### B.1.1 Geräteparameter:

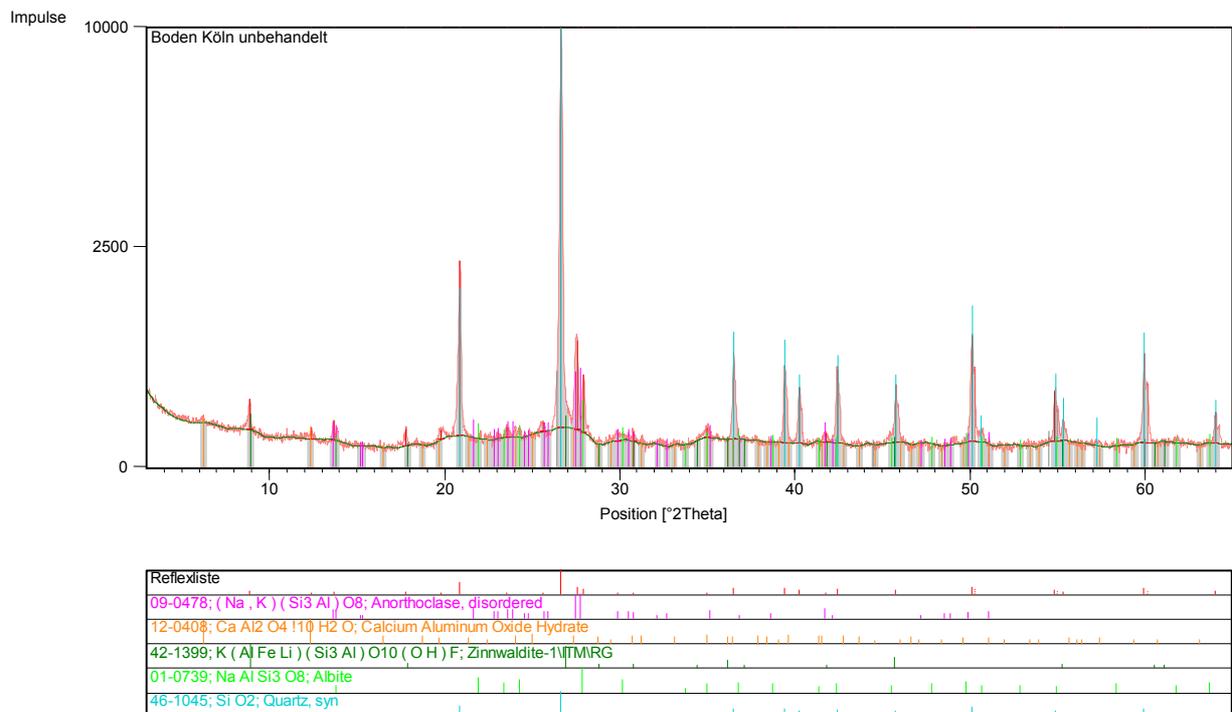
Goniometer	PW 3020
Generator	PW 1830
Kontrolleinheit	PW 3710
Röntgenröhre	PW 2230/20 mit Cu-Anode
Monochromator	Graphit
Angelegte Hochspannung	40 kV, 40 mA

#### B.1.2 Parameter der Messprogramme

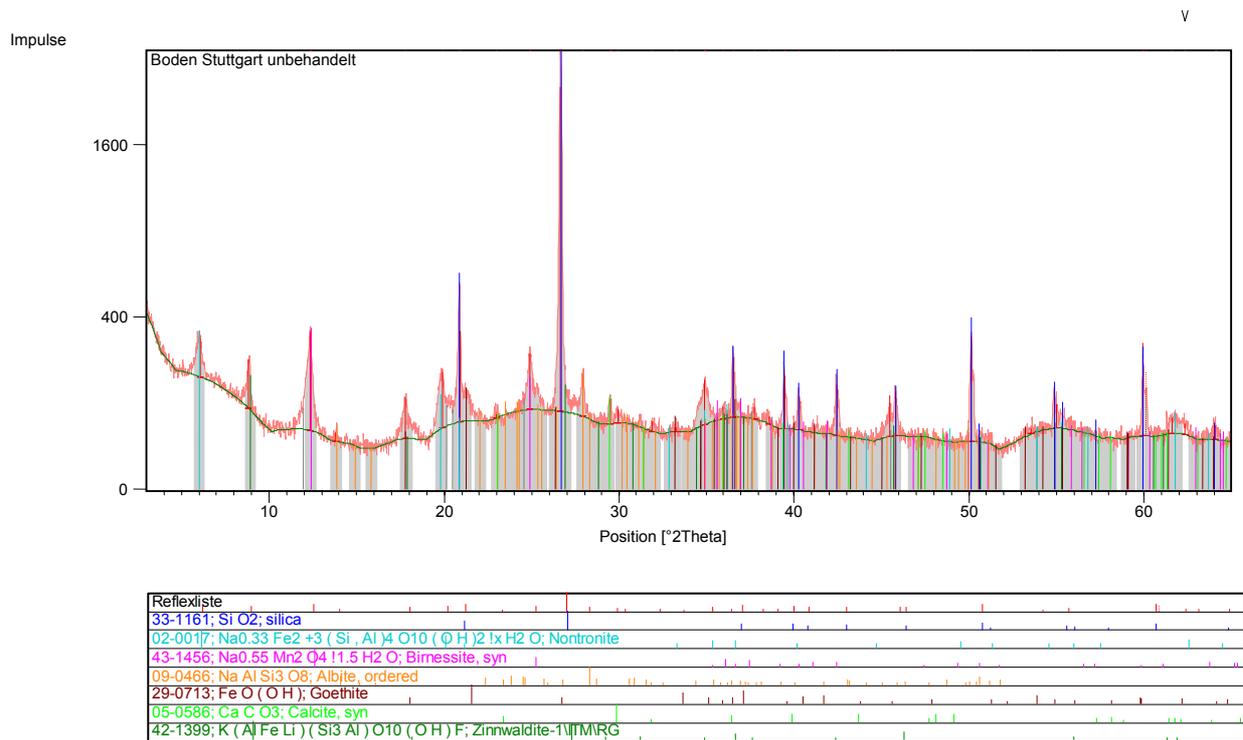
Messprogramm	Standard	Tone
Schrittweite [°]	0,02	0,01
Goniometergeschwindigkeit [°/sec]	0,02	0,02
Beugungswinkel Start [°2 $\theta$ ]	3,0	2,5
Beugungswinkel Ende [°2 $\theta$ ]	65,0	65,0
Art der Messung	kontinuierlich	kontinuierlich

### B.2. Röntgendiffraktometrie Diagramme

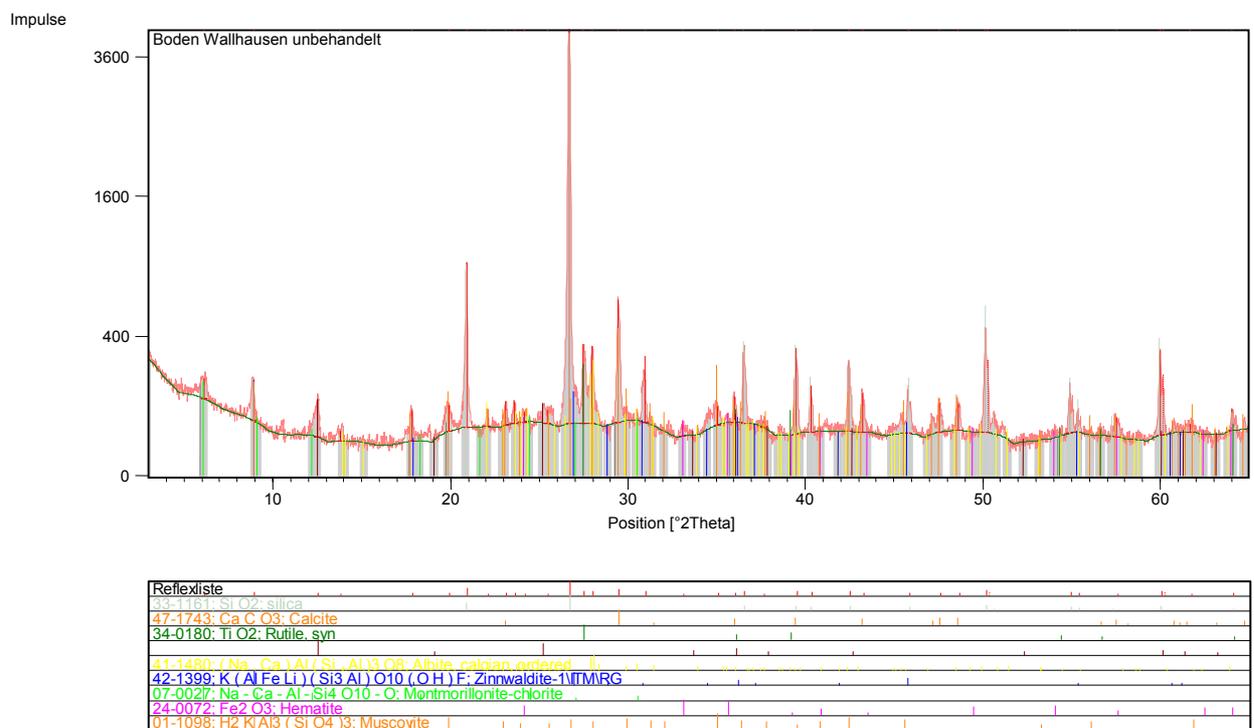
#### B.2.1 Unbehandelte Böden



Unbehandelter Boden Köln

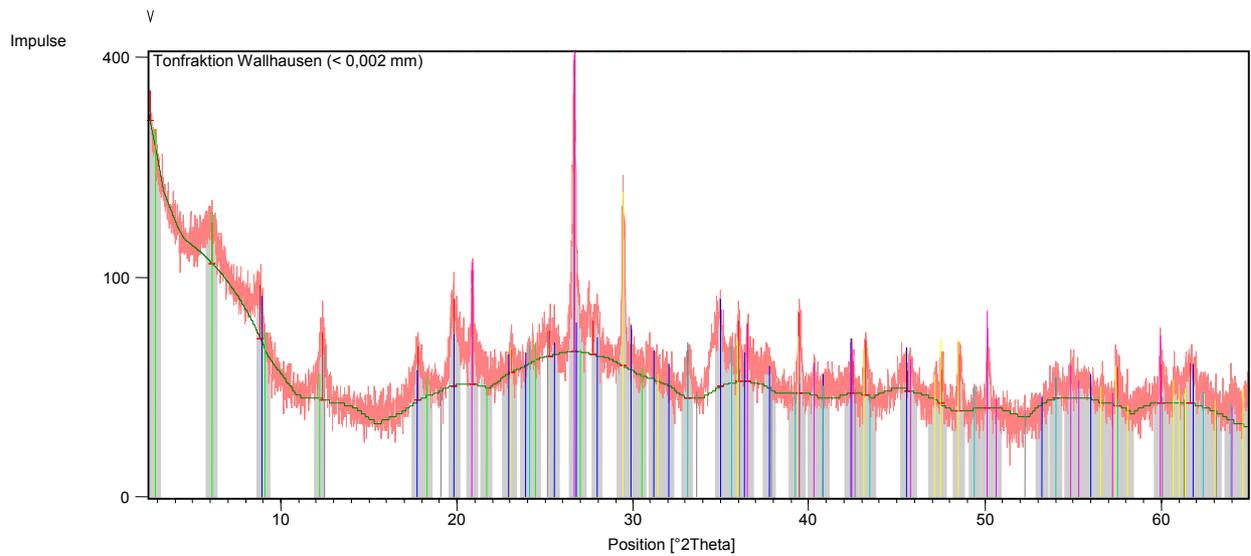


Unbehandelter Boden Stuttgart



Unbehandelter Boden Wallhausen

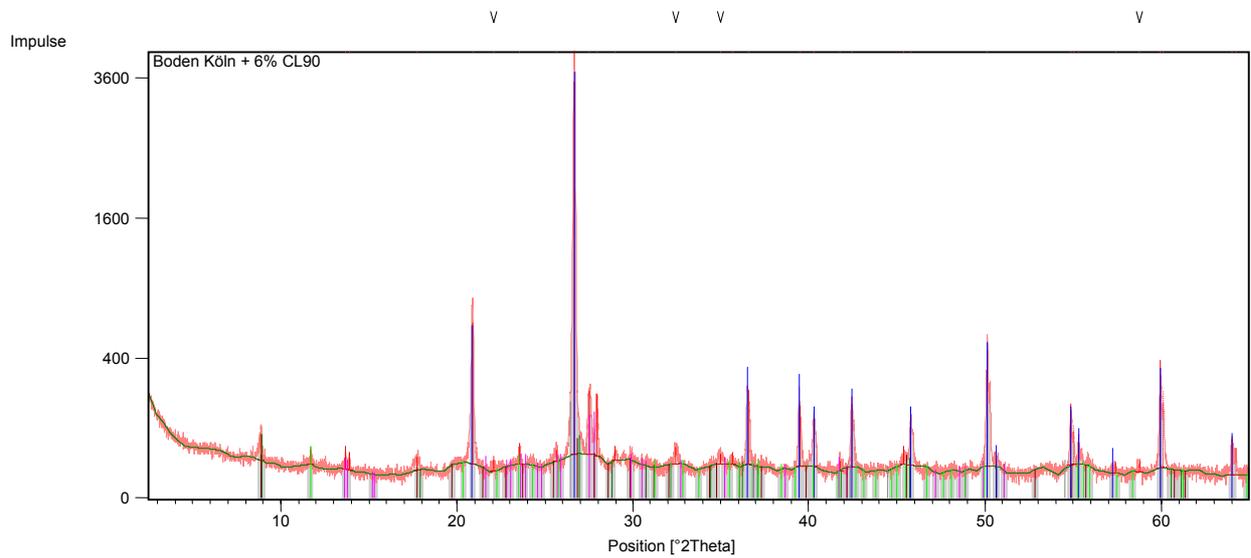




Reflexliste
01-1098; H <sub>2</sub> K Al <sub>3</sub> ( Si O <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ; Muscovite
07-0027; Na - Ca - Al - Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> - O; Montmorillonite-chlorite
24-0072; Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; Hematite
33-1161; Si O <sub>2</sub> ; silica
47-1743; Ca C O <sub>3</sub> ; Calcite

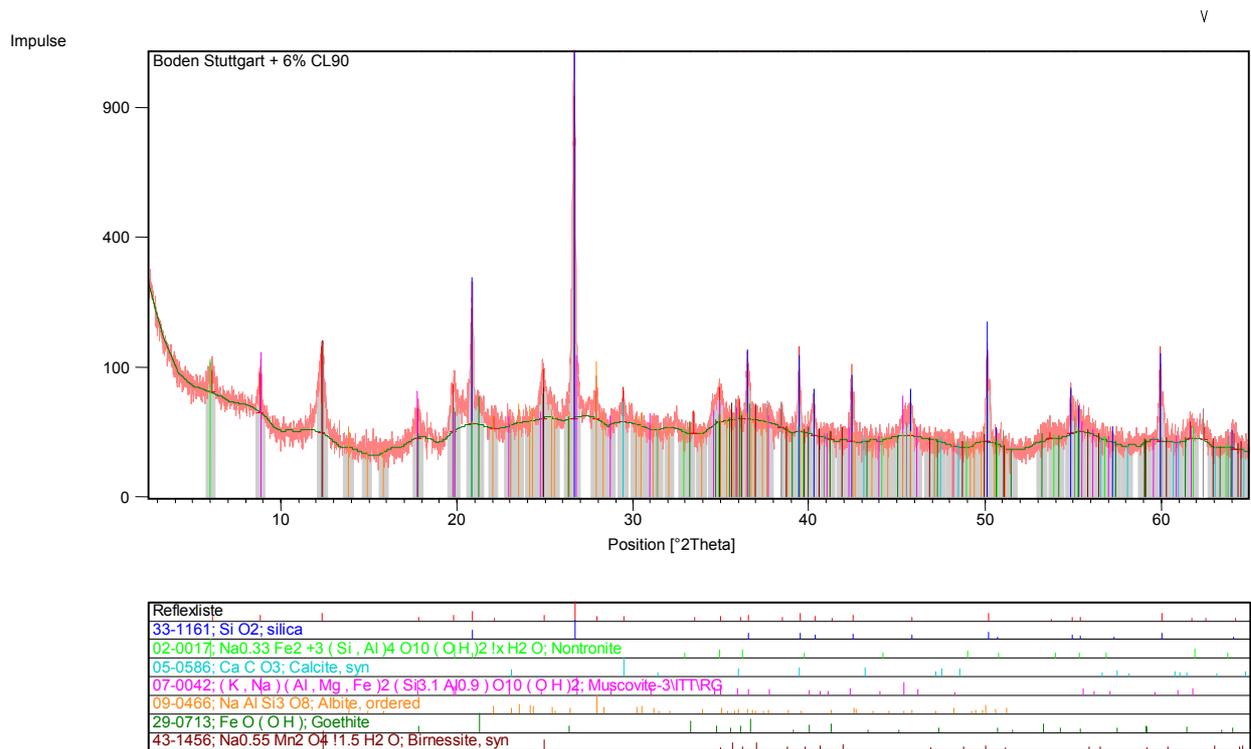
Tonfraktion Boden Wallhausen

### B.2.3 Boden-Kalk-Gemische

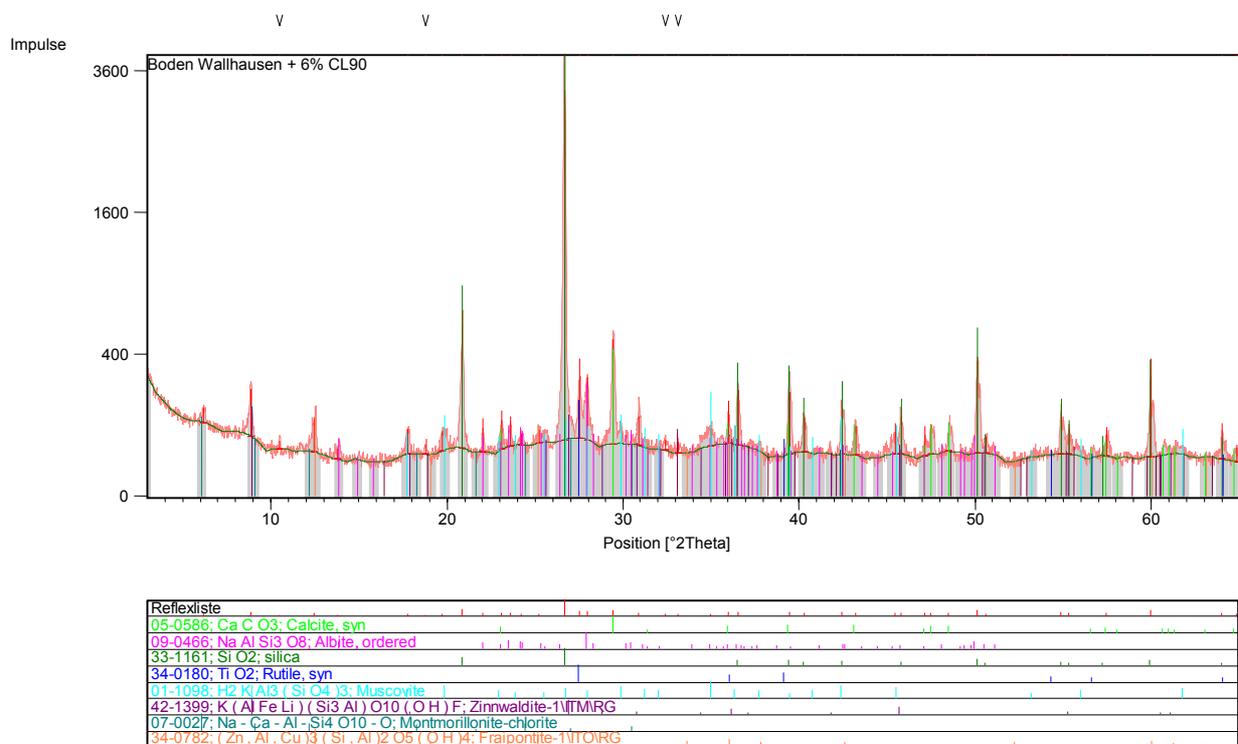


Reflexliste
09-0478; ( Na , K ) ( Si <sub>3</sub> Al ) <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ; Anorthoclase, disordered
42-1399; K ( Al Fe Li ) ( Si <sub>3</sub> Al ) O <sub>10</sub> ( OH ) F; Zinnwaldite-1\TMRG
46-1045; Si O <sub>2</sub> ; Quartz, syn
46-1409; ( K , Ba , Na ) <sub>0.75</sub> ( Al , Mg , Cr , V ) <sub>2</sub> ( Si , Al , V ) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ( OH , O ) <sub>2</sub> ; Muscovite, vanadian barian
14-0083; Ca <sub>4</sub> Al <sub>2</sub> C O <sub>9</sub> 11 H <sub>2</sub> O; Calcium Aluminum Oxide Carbonate Hydrate

Boden Köln + 6% CL90

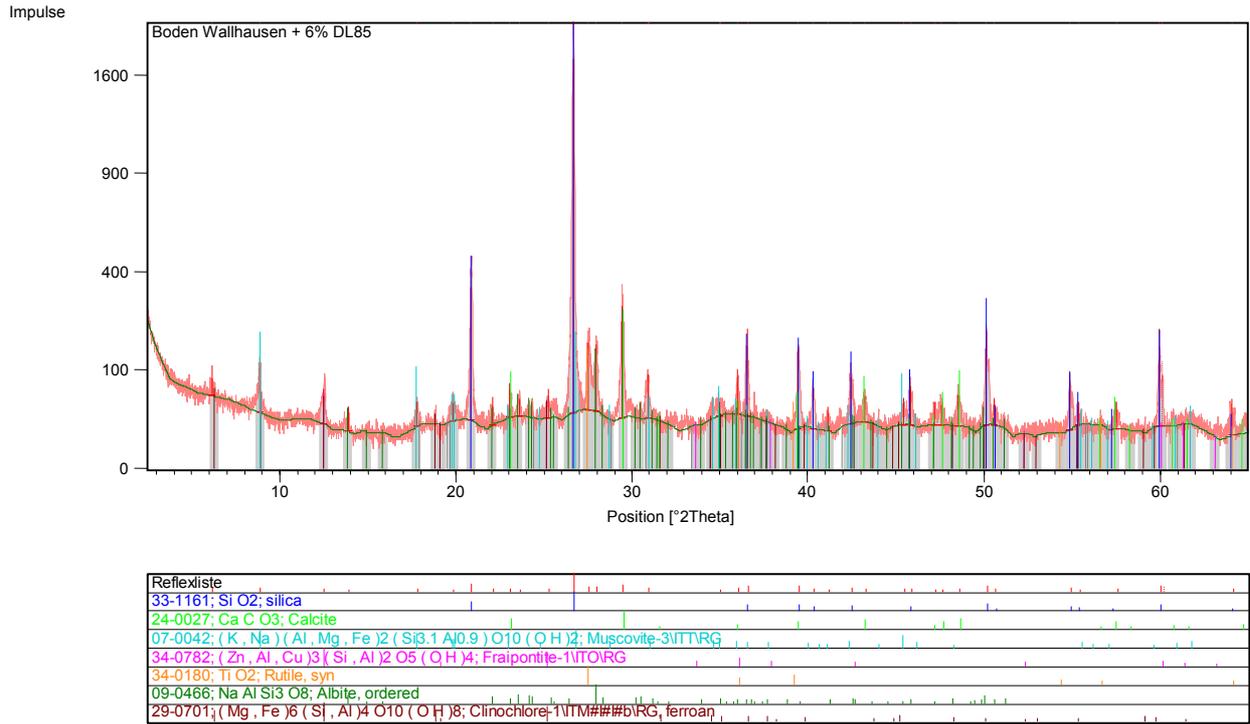


Boden Stuttgart + 6% CL90



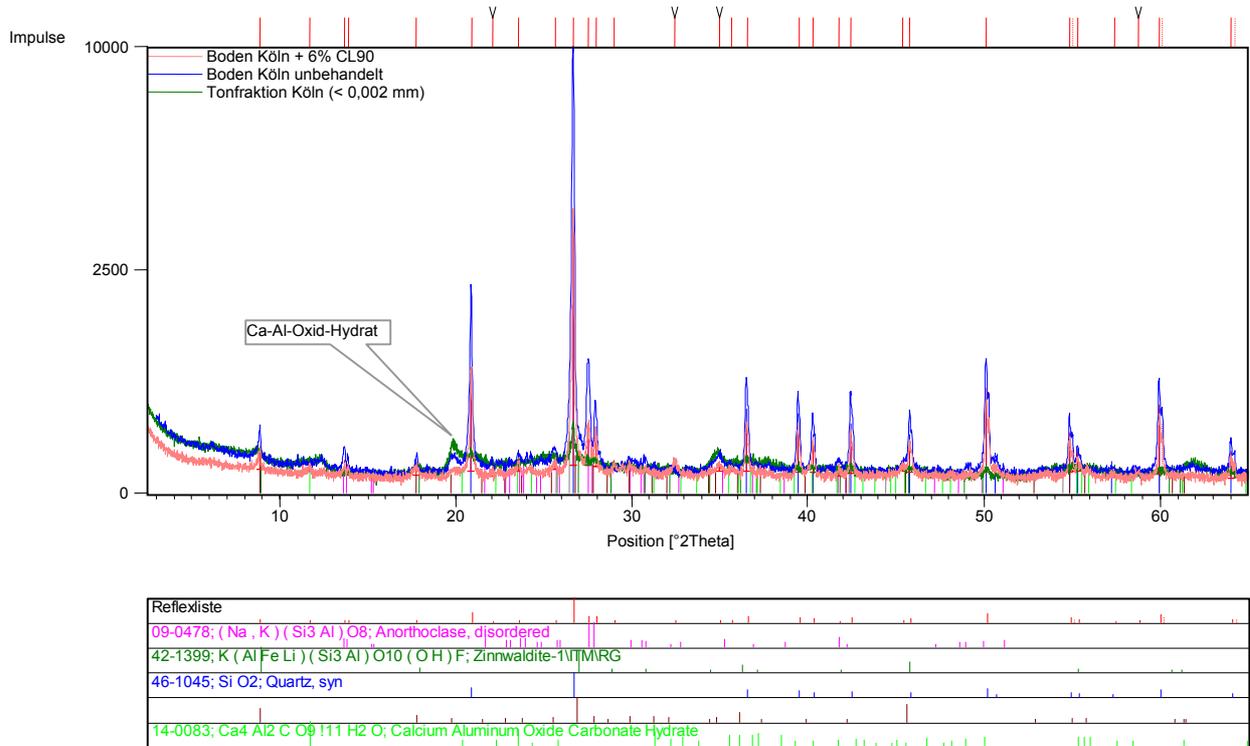
Boden Wallhausen + 6% CL90



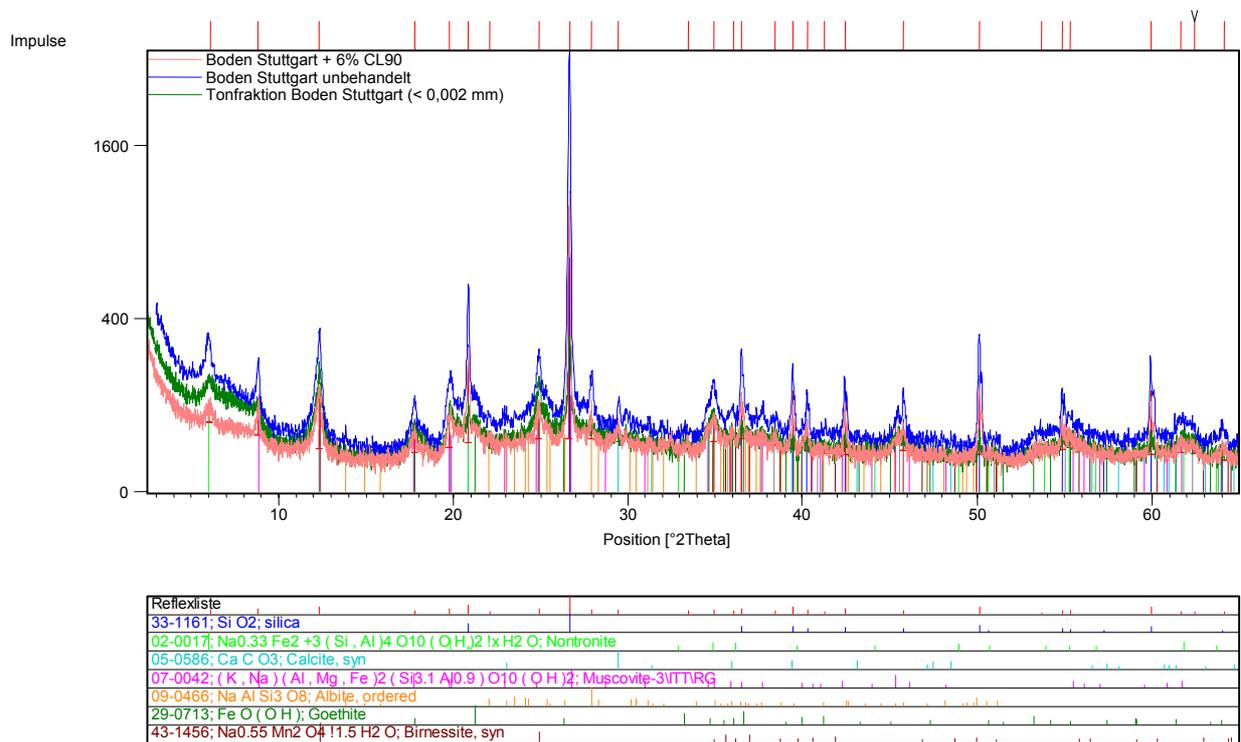


Boden Wallhausen + 6% DL85

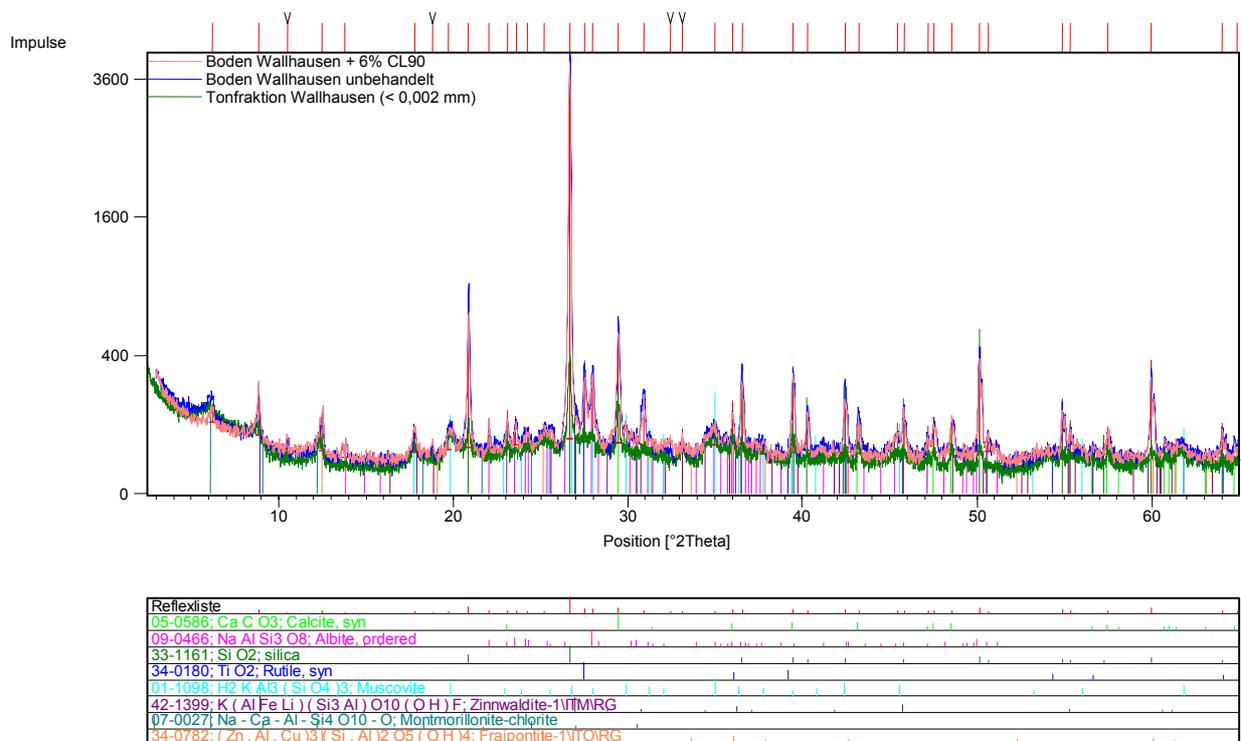
### B.2.4 Vergleiche Boden-Kalk-Gemische - unbehandelte Böden - Tonfraktionen



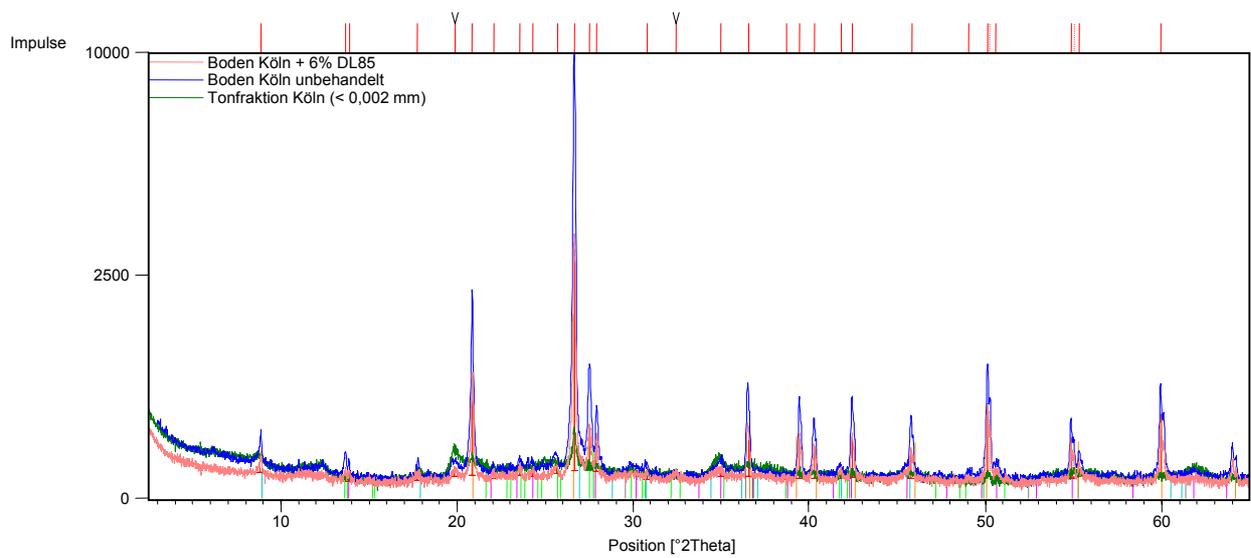
Vergleich: Boden Köln + 6% CL90 - Unbehandelter Boden Köln - Tonfraktion Boden Köln



Vergleich: Boden Stuttgart + 6% CL90 - Unbehandelter Boden Stuttgart - Tonfraktion Boden Stuttgart



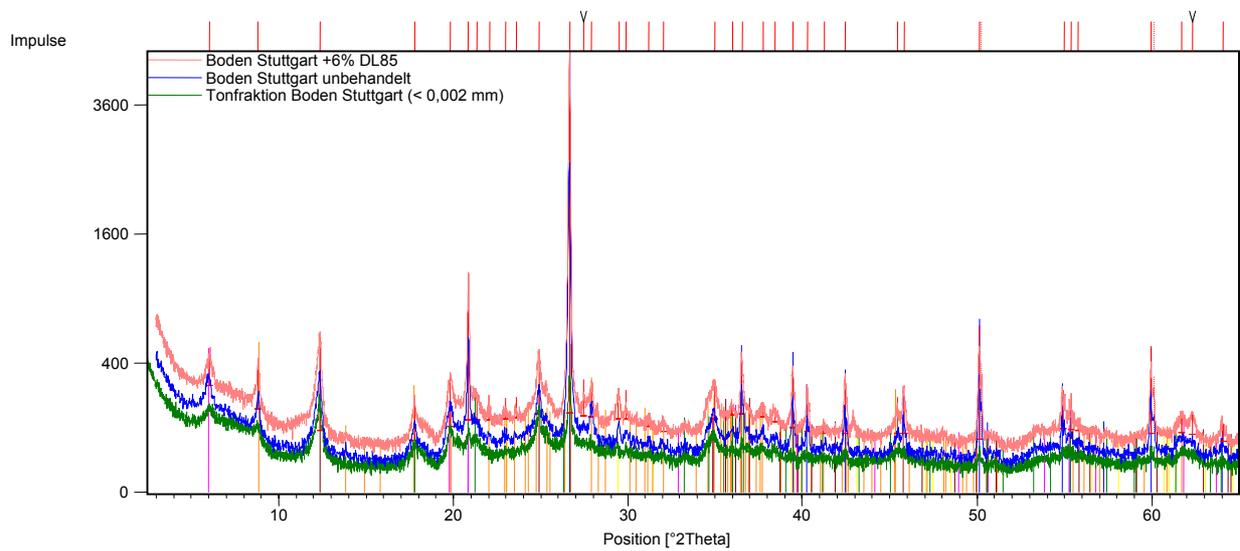
Vergleich: Boden Wallhausen + 6% CL90 – Unbehandelter Boden Wallhausen - Tonfraktion Wallhausen



Reflexliste

09-0478; (Na, K)(Si3Al)O8; Anorthoclase, disordered
42-1399; K(AlFeLi)(Si3Al)O10(OH)F; Zinnwaldite-1\VTMARG
01-0739; NaAlSi3O8; Albite
01-0649; SiO2; Quartz

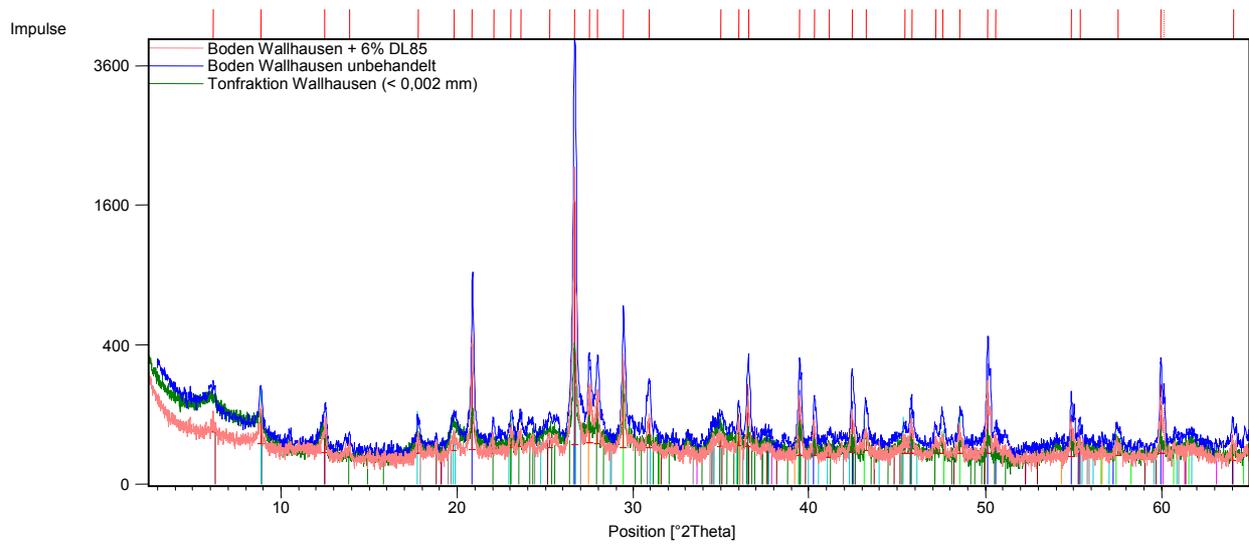
Vergleich: Boden Köln + 6% DL85 - Unbehandelter Boden Köln - Tonfraktion Boden Köln



Reflexliste

33-1161; SiO2; silica
47-1743; CaCO3; Calcite
07-0042; (K, Na)(Al, Mg, Fe)2(Si3.1Al0.9)O10(OH)2; Muscovite-3\VTTRG
02-0017; Na0.33Fe2+3(Si, Al)4O10(OH)2IxH2O; Nontronite
09-0466; NaAlSi3O8; Albite, ordered
29-0713; FeO(OH); Goethite
43-1456; Na0.55Mn2O41.5H2O; Birnessite, syn

Vergleich: Boden Stuttgart + 6% DL85 - Unbehandelter Boden Stuttgart - Tonfraktion Boden Stuttgart



Reflexliste
33-1161; Si O <sub>2</sub> ; silica
24-0027; Ca C O <sub>3</sub> ; Calcite
07-0042; ( K , Na ) ( Al , Mg , Fe ) <sub>2</sub> ( Si <sub>3.1</sub> Al <sub>0.9</sub> ) O <sub>10</sub> ( OH ) <sub>2</sub> ; Muscovite-3VT1RG
34-0782; ( Zn , Al , Cu ) <sub>3</sub> ( Si , Al ) <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ( OH ) <sub>4</sub> ; Fraipontite-1VTO1RG
34-0180; Ti O <sub>2</sub> ; Rutile, syn
09-0466; Na Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ; Albite, ordered
29-0701; ( Mg , Fe ) <sub>6</sub> ( Si , Al ) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ( OH ) <sub>8</sub> ; Clinoclone-1VTM###b1RG, ferroan

Vergleich: Boden Wallhausen + 6% DL85 – Unbehandelter Boden Wallhausen - Tonfraktion Wallhausen

## Anhang C

### Normen und Regelwerke

- [1] **DIN 18123** Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Korngrößenverteilung: 1996-11
- [2] **DIN 18122-1** Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen) - Teil 1: Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze: 1997-07
- [3] **DIN 18127** Baugrund - Untersuchung von Bodenproben – Proctorversuch: 1997-11
- [4] **DIN 18128** Baugrund - Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung des Glühverlustes: 2002-12
- [5] **DIN 18137** Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Scherfestigkeit – Teil 3: Direkter Scherversuch: 2002-09
- [6] Technische Prüfvorschriften für Böden und Fels im Straßenbau **TP BF-StB, Teil B 7.1**: CBR-Versuch, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Ausgabe 1988)
- [7] **DIN EN 459-1** Baukalk – Teil 1: Definitionen, Anforderungen und Konformitätskriterien: 2002-02
- [8] **ARS 7/2002** Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 7/2002 : Anforderungen an Kalke für Bodenverfestigung und –verbesserung, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen: 2002-04
- [9] Technische Prüfvorschriften für Böden und Fels im Straßenbau **TP BF-StB, Teil B 11.5**: Eignungsprüfung bei Bodenverbesserung und Bodenverfestigung mit Feinkalk und Kalkhydrat, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Ausgabe 1991)
- [10] **ZTV E-StB** - Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Ausgabe 1994/1997)
- [11] **VDLUFA Methodenbuch, A 5.1.1**: Bestimmung des pH-Wertes, Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten
- [12] **DIN EN 459-2** Baukalk – Teil 2: Prüfverfahren: 2002-02

### Literatur

- [Lit.1] Eignung frostempfindlicher Böden für die Behandlung mit Kalk  
Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (Heft S 43)