

Beziehung zwischen den Verdichtungswerten AASHTO-Standard und AASHTO-Modified

Correlation entre les valeurs AASHTO-Standard et AASHTO-Modified

Correlation between the values of compaction AASHTO-Standard and AASHTO-Modified

IGT

Institut für Geotechnik

Carlo Rabaiotti, dipl. Ing.

Dr. Markus Caprez, dipl. Ing. ETH

IBH

Ingenieurbüro Heierli AG, Zürich

Fei-Loung Yang, dipl. Ing. ETH

Forschungsauftrag VSS1999/283 auf Antrag der Fachkommission 5
der Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS)

Zürich, Dezember 2004

Beziehung zwischen den Verdichtungswerten AASHTO-Standard und AASHTO-Modified

Abstract

A revision of the Norm “**SN 670 330b** Verdichtung nach AASHTO” has to be based on the choice of the AASHTO modified compaction parameters, since heavy compaction machinery is used.

An attempt has been made to correlate the degree of compaction of road materials following the standard and the modified AASHTO compaction parameters.

The correlation between the specific weights resulting from AASHTO Standard and Modified tests of five soils has been calculated. In addition to this research, possible correlations between the bearing capacities (CBR test) of the specimens within these two different kinds of compaction have been investigated.

The obtained results can be adopted in the future revision of the Norm.

Results of the tests

Type of soil	Ratio η
	$\frac{\text{Dry density according to AASHTO Standard}}{\text{Dry density according to AASHTO Modified}}$
1. Gravel sand without cohesion e.g. GP, GW	$\eta = 0.97$
2. Moraine with low plasticity e.g. SC	$\eta = 0.95$
3. Moraine with high plasticity e.g. SC-SM	$\eta = 0.93$

Keywords: soil, compaction, AASHTO, dry density, bearing capacity

Zusammenfassung

Eine Revision der Norm "SN 670 330b Verdichtung nach AASHTO" sieht die Verwendung von AASHTO modifizierten Parametern zur Kontrolle des Verdichtungszustandes im Strassen- und Pistenbau sowie in der allgemeinen Geotechnik vor.

Diese Arbeit stellt Grundlagen für die Verwendung des bekannten Bewertungshintergrundes bei der Einführung neuer Bezugsgrössen in der Verdichtungsprüfung zur Verfügung. Im Rahmen der anstehenden Normrevision wurde eine Untersuchung an fünf ausgewählten Bodenmaterialien durchgeführt, um eine mögliche Beziehung zwischen den durch die neuen modifizierten und die alten Standard-Versuchverfahren erhaltenen Bodeneigenschaften zu ermitteln.

An verschiedenen ausgewählten Materialien wurde die Trockenraumdichte von unterschiedlich verdichteten Proben ermittelt und untersucht.

Zusätzlich zu den Verdichtungsversuchen wurden auch Tragfähigkeitsversuche (CBR Test) durchgeführt und ähnliche Beziehungen hergestellt.

Die so erhaltenen Ergebnisse können in der zukünftigen Revision der Norm verwendet werden.

Versuchsergebnisse:

Bodenkategorien	Verhältniszahl η
	$\frac{\text{Trockendichte nach AASHTO Standard}}{\text{Trockendichte nach AASHTO Modified}}$
1. Kohäsionslose Kiessande z.B. GP, GW	$\eta = 0.97$
2. Moräne von niedriger Plastizität, z.B. SC	$\eta = 0.95$
3. Moräne von hoher Plastizität, z.B. SC-SM	$\eta = 0.93$

Schlüsselwörter: Boden, Verdichtung, AASHTO, Trockendichte, Tragfähigkeit

Inhalt

1.	Einleitung	1
1.1.	Auftrag	1
1.2.	Ziel der Forschungsarbeit.....	1
1.3.	Theoretischer Hintergrund	3
1.3.1.	Künstliche Verdichtung.....	3
1.3.2.	Optimaler Wassergehalt.....	4
1.3.3.	CBR Test im Labor	5
2.	Vorgehen	7
2.1.	Wahl der Materialien	7
2.2.	Wahl der Versuchsprotokolle.....	8
2.3.	Probenaufbereitung	8
2.4.	Verdichtungsversuche.....	9
2.5.	CBR Versuch	10
2.6.	Bezeichnung der Versuchsergebnisse.....	11
2.7.	Bodenmaterial und Versuchsergebnis.....	12
2.7.1.	Material A.....	12
2.7.1.1.	Materialbeschreibung	12
2.7.1.2.	Mechanische Eigenschaften	15
2.7.2.	Material B	17
2.7.2.1.	Materialbeschreibung	17
2.7.2.2.	Mechanische Eigenschaften	18
2.7.3.	Material C	20
2.7.3.1.	Materialbeschreibung	20
2.7.3.2.	Mechanische Eigenschaften	21
2.7.4.	Material D.....	22
2.7.4.1.	Materialbeschreibung	22
2.7.4.2.	Mechanische Eigenschaften	23
2.7.5.	Material E	26
2.7.5.1.	Materialeigenschaften.....	26
2.7.5.2.	Mechanische Eigenschaften.....	26
2.8.	Zusammenstellung der Ergebnisse und Empfehlung.....	27
3.	Schlussfolgerungen und Empfehlungen.....	31
4.	Literatur.....	35

Anhänge

Korngrößenverteilungen	Seiten 38 - 42
Tabellen zu den Versuchsergebnissen	Seiten 43 - 52
Verdichtungs- und CBR Kurven	Seiten 53 - 57

1. Einleitung

1.1. Auftrag

Im Rahmen der Schaffung der nationalen Elemente zu den europäischen Verdichtungsnormen (CEN) und einer anstehenden Revision der schweizerischen Regelwerke über Verdichtung bedarf es einiger Grundlagen über die Beziehung zwischen der AAHSTO-Standard und der AAHSTO-Modified Verdichtung. Ziel ist es, die vielfältigen Erfahrungen und Bewertungshintergründe, welche mit den heute gültigen Regelwerken und Parametern gemacht wurden, auch weiterhin nutzen zu können.

Der Auftrag lautet im Wortlaut: Die Forschungsstelle wird mit der Durchführung des Projektes „Beziehung zwischen den Verdichtungswerten AASHTO-Standard und AASHTO-Modified“ beauftragt. Als begleitende Kommission wird die FK 5 (EK 5.08) Bautechnik der VSS bezeichnet.

1.2. Ziel der Forschungsarbeit

Die Entwicklungen in der Technologie der neuen Verdichtungsgeräte sowie die Verwendung und der Einsatz von alternativen Recycling-Materialien haben die früheren und zum Teil heute noch gültigen Verdichtungsanforderungen in wesentlichen Teilen obsolet gemacht.

Damit der Bewertungshintergrund und die Erfahrungen welche auf den bestehenden Normen basieren weiter verwendet werden können, ist es notwendig eine empirische Beziehung zwischen den Standard und den Modified Verdichtungsverfahren herzustellen. Eine solche Datenbasis ist insbesondere notwendig solange noch nach alten Verdichtungsvorschriften gebaut und geprüft wird.

Die so erhaltenen Koeffizienten (Verhältniszahl Standard zu Modified) dürfen aber nur im Bereich von gleichen oder ähnlichen Böden benutzt werden, da ihre empirische Ableitung keine allgemeine Gültigkeit gewährleisten kann.

Als Folge der Verdichtung wird auch eine bestimmte Tragfähigkeit erreicht, die aber je nach Versuchsverfahren einen unterschiedlichen Zusammenhang zu dem erzielten Verdichtungsgrad hat. Der so genannte CBR Wert (California Bearing Ratio), ein grundlegender Parameter in der AASHTO Dimensionierungsmethode, wurde deswegen bei allen Proben auch untersucht.

Empirische Koeffizienten zwischen den je nach Verdichtungsarten unterschiedlichen erreichbaren Tragfähigkeitseigenschaften wurden damit abgeleitet. In den letzten Jahren haben verschiedene Forscher Modelle vorgestellt, mit welchen es angeblich möglich ist empirische [1], [2], oder theoretische [3] Voraussagen über die Verdichtbarkeit eines Bodens mittels einiger bekannter Bodenparameter (LL, LP, IP) zu treffen. Es ist aber zu beachten, dass das nicht mit allen Böden möglich ist und dass eine „Faust Formel“ ausser für im Labor ähnlich getestete Böden in diesem Gebiet fast unmöglich ist.

Die künstliche Verdichtung eines Bodens im Labor ist ferner von vielen subjektiven Parametern abhängig [4].

Der Boden, die Verdichtungsenergie, die Massangaben der Einrichtungen, der ausführende Arbeiter, die Wahl der Verdichtungskurve, die Bodenrepräsentativität führen zu einer ungewissen Subjektivität der Resultate. In der vorliegenden Forschungsarbeit wurde versucht diese Einflüsse zu minimieren.

Unter Verdichtungswerten werden die Trockendichte und der CBR₁-Wert mit den zugehörigen optimalen Wassergehalten verstanden. Die Werte werden gemäss den Normen SN 670 330b (Trockendichte) [6] und SN 670 320b (CBR₁-Wert) [7] ermittelt. Dabei werden zwei Verdichtungsverfahren nach der Grösse der anzubringenden Verdichtungsenergie „Standard“ und „Modified“ unterschieden. Die für den Standard anzubringende Verdichtungsenergie ist rund 5-mal kleiner als diejenige beim „Modified“-Verfahren. Deshalb sind die damit erzielten Verdichtungswerte (Trockendichte und CBR₁) nach Standard naturgemäss kleiner als diejenigen nach „Modified“. Die Frage ist, wie viel kleiner? Diese Frage zu beantworten ist Ziel der vorliegenden Grundlagenforschung.

Bei der bisherigen Praxis in der Schweiz wird der Verdichtungswert der Trockendichte mehr angewendet als der CBR-Wert. Das ist der Grund, dass ursprünglich beim Finanzierungsgesuch für die vorliegende Arbeit nur von der „Verhältniszahl AASHTO-Standard zu –Modified“ für Trockendichte die Rede war. Eine Untersuchung für die CBR-Werte war damals im Forschungsplan nicht vorgesehen.

Nach Erteilung des Forschungsauftrags durch das Bundesamt für Strassenbau wurde die Zielsetzung vom Forschungsteam nochmals revidiert und zusätzlich auf CBR-Untersuchungen erweitert. Die Erweiterung stützte sich auf der Überlegung, dass eine zusätzliche Bestimmung von CBR-Werten an einer Bodenprobe, welche für die Bestimmung der Trockendichte (Proctor Versuch) hergestellt wird, in einem Arbeitsgang erfolgen kann und daher einen nicht sehr grossen Mehraufwand erfordern würde.

Die CBR-Untersuchung im Labor wurde schliesslich vollständig durchgeführt und ihre Messwerte im Bericht dargestellt. Da sie aber in ursprünglichen Auftrag nicht enthalten ist, wird auf eine nähere und abschliessende Auswertung der CBR-Untersuchung aus finanziellen Gründen verzichtet. Der Verzicht schmälert den Wert der Forschungsarbeit nicht, weil der CBR-Wert, wie bereits erwähnt, in der Schweizer Baupraxis selten gebraucht wird. Zu einem späteren Zeitpunkt können weitergehende Auswertungen/Verwertungen der gewonnenen CBR-Laborwerte nach Bedarf fortgesetzt werden.

1.3. Theoretischer Hintergrund

1.3.1. Künstliche Verdichtung

Die künstliche Verdichtung stellt eine seit Jahrhunderten bekannte Massnahme dar, die den Boden tragfähiger macht. Es ist die effizienteste und kostengünstigste Art der Tragfähigkeitsverbesserung. Kurz zusammengefasst:

Eine Verdichtung hat zwei Effekte, nämlich Verminderung von Nachsetzungen und Erhöhung der Tragfähigkeit. Der erste lässt sich aus dem Wort „Verdichten“ ableiten: den Bodenkörper kompakt machen, damit er sich infolge Auflast bzw. Eigenlast weniger zusammendrücken / -setzen kann.

Als Mass hierfür steht die Trockendichte dar, wobei im Labor der optimale Wert des Wassergehalts bestimmt wird. Die optimale Trockendichte wird als Mass für die Kontrolle der Verdichtung im Feld gebraucht. Dabei nimmt man an, dass sich eine optimale Tragfähigkeit ergeben würde. Dies ist bodenmechanisch nicht ganz korrekt aber praktisch zulässig. Für die Bestimmung der Tragfähigkeit verwendet man eigentlich die CBR Methode. Die Tragfähigkeit im Feld wird mittels des CBR-Feldpenetrometer bestimmt, wenn der Boden aus bindigem Material besteht. Bei körnigem Boden ist der Versuch meistens schwierig durchzuführen, weil die Spitze auf Steinen stösst.

Die Normierung hat zum Ziel, die Anforderungen an eine möglichst effiziente, homogene und stabile Tragfähigkeit festzusetzen und zu gewährleisten.

Zur Normierung gehört deshalb auch das Standardisieren von geeigneten Versuchen und Versuchsparametern, welche den erreichbaren Verdichtungsgrad beschreiben. Die Umsetzung der Verdichtungsanforderungen vom Labormassstab in die Feldbedingungen ist eine weitere Aufgabe der Standardisierung.

Seit der Einführung der „Standard-Verdichtungsenergie“ durch Proctor haben sich im Laufe der letzten Jahrzehnte die Verdichtungsgeräte sowie die verwendeten Materialien stark verändert. Grundsätzlich sind die Verdichtungsleistungen der modernen Verdichtungsmaschinen gestiegen und die neuen und alternativen Materialien sind tendenziell schwieriger verdichtbar.

Die Abhängigkeit zwischen Trockendichte und Wassergehalt wird im Labor unter Einsatz definierter Verdichtungsarten und Verdichtungsenergien gemessen, um die entsprechenden Verdichtungskurven zu ermitteln. Die erreichbare grösste Trockendichte und der optimale Wassergehalt können auf diese Art bestimmt werden.

In den Laborversuchen für die Verdichtungseigenschaften nach Proctor [10], [11], [12] sind der Wassergehalt und die Trockendichte die Referenzeigenschaften.

Die Verdichtungsenergie und die Abmessungen der Verdichtungsgeräte sind je nach Standard unterschiedlich normiert. In den Schweizerischen Normen stehen verschiedene Kombinationen der Verdichtungsart und -energie und der Probenabmessungen zur Verfügung. Diese sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt. In der vorliegenden Arbeit wird der CBR Topf nicht angewendet.

**Tab. 1:
Geräte**

**Tab. 1:
Appareillage**

Daten der Verdichtungsgeräte		AASHTO-Topf Moule AASHTO		CBR-Topf MOULE CBR		Grosser Topf Grand moule		Caractéristiques des appareils	
		Standard	Modified	Standard	Modified	Standard	Modified		
Durchmesser des Topfes	mm	101,6	101,6	152	152	250	250	Diamètre du moule	mm
Höhe der Probe	mm	117	117	127	127	200	200	Hauteur de l'échantillon	mm
Volumen der Probe	cm ³	948	948	2305	2305	9817	9817	Volume de l'échantillon	cm ³
Durchmesser des Stempels	mm	51	51	51	51	125	125	Diamètre de la dame	mm
Stempelmasse	kg	2,49	4,54	4,54	4,54	15,00	15,00	Masse de la dame	kg
Fallhöhe	mm	305	457	457	457	600	600	Hauteur de chute	mm
Anzahl Schichten		3	5	5	5	3	5	Nombre de couches	
Schläge pro Schicht		25	25	12	55	22	60	Nombre de coups par couche	
Verdichtungsenergie	MJ · m ⁻³	0,6	2,7	0,5	2,5	0,6	2,7	Energie de compactage	MJ · m ⁻³
Mindestprobenmenge	kg	15,0	15,0	40,0	40,0	160,0	160,0	Masse min. échantillon	kg
Zulässiges Grösstkorn								Grain maximum	
Quadratloch	mm	8	8	16	16	45	45	Tamis à trou carré	mm
zulässig gemäss Ziff. 6	mm	16	16	31,5	31,5	45	45	tolérance selon chiffre 6	mm

Tabelle 1. SN 670330b Verdichtung-Standards (Geräte und Verdichtungsenergie)

1.3.2. Optimaler Wassergehalt

Für einen Boden mit einer konstanten Verdichtungsarbeit ergibt sich aus den Parameterpaaren Trockendichte – Wassergehalt eine Kurve, die so genannte Proctorkurve.

Bei einem bestimmten Wassergehalt, dem so genannten optimalen Wassergehalt, wird die maximale Trockendichte erreicht.

Das heisst, dass die optimale Packung der Einzelkörner mit einer konstanten Verdichtungsenergie nur in einem bestimmten Wassergehaltsbereich erreichbar ist. Die Körner werden links des Optimums der Proctorkurve („trockene Seite“) bis zu einem gewissen Wassergehalt mit steigendem Wassergehalt durch die kapillaren Kräfte und den Schmiereffekt der Flüssigkeit leichter verdichtbar.

Wenn aber die Hohlräume zum grössten Teil gesättigt sind (>75 - 85 %) wirkt das Wasser einer zusätzlichen Verdichtung entgegen.

1.3.3. CBR Test im Labor

Nicht immer stellt eine optimale Verdichtung (Trockendichte) einen maximalen Wert der Tragfähigkeit dar. Auf den im Labor mit den schweizerischen Standards verdichteten Proben kann man Tragfähigkeitsversuche durchführen, um diese Beziehung zu untersuchen. Ein aussagekräftiger Versuch ist der CBR Versuch, mit welchem die Tragfähigkeit einer verdichteten Probe empirisch beurteilt werden kann.

Der CBR-Koeffizient gilt als grundlegender Parameter für die Dimensionierung des Oberbaus von flexiblen Strassenaufbauten.

Der CBR-Wert (Tragfähigkeitskoeffizient) wird bezeichnet als Verhältnis [%] zwischen:

Der spezifischen Belastung p , die nötig ist, um einen zylindrischen Stempel von 19.6 cm^2 Querschnittfläche (Original CBR Topf mit $D=6 \text{ Inch}$) mit einer Geschwindigkeit von 1.27 mm/Min 2.54 mm tief in den untersuchenden Boden einzupressen und jener spezifischen Belastung p_s , die nötig ist, um denselben Stempel in gleicher Weise in ein Standardmaterial (mechanisch verdichteter Schlagschotter) einzudrücken.

Ein gleichartiger Versuch kann auch im AASHTO-Topf (Durchmesser = 10.16 cm) mit einem kleineren Stempel (Oberfläche 8.5 cm^2) durchgeführt werden.

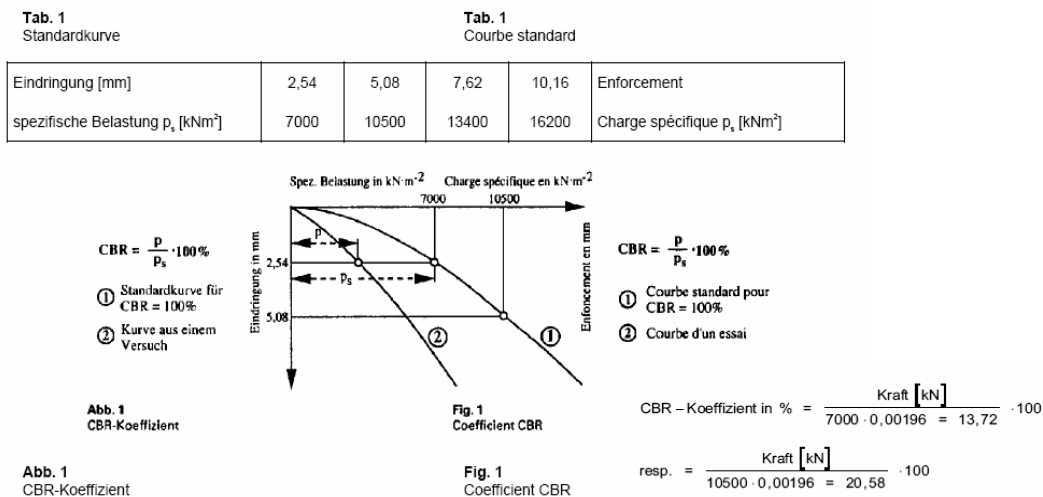


Bild 1. CBR (California Bearing Ratio) Versuch nach den Swiss Standards (SN 670320b)

2. Vorgehen

2.1. Wahl der Materialien

Die Wahl der Materialien entspricht einem Bereich von Baumaterialien, die in der Praxis häufig für die Foundationsschicht von Verkehrswegen verwendet wird.

Es wurden fünf Bodenmaterialien ausgewählt und untersucht. Die Bezeichnung des Bodens und die Korngrößenverteilung sind im Bild 2 ersichtlich.

Die Materialien bestehen aus natürlichem Kiessand und Recycling-Material aus dem Abraum von Strassen- und Tunnelbauarbeiten.

Im Labor wurden von allen Materialien die Korngrößenverteilungen und die Plastizitätseigenschaften bestimmt. Die kleinsten Fraktionen wurden mit Nass-Siebung und mit der Aräometeranalyse untersucht. Das spezifische Gewicht des Feinanteils wurde mit Hilfe des Pyknometers bestimmt.

Eine mineralogische Analyse der Tonminerale des Feinanteils aus einem Tunnel-Abraummaterial (Material C) wurde auch durchgeführt.

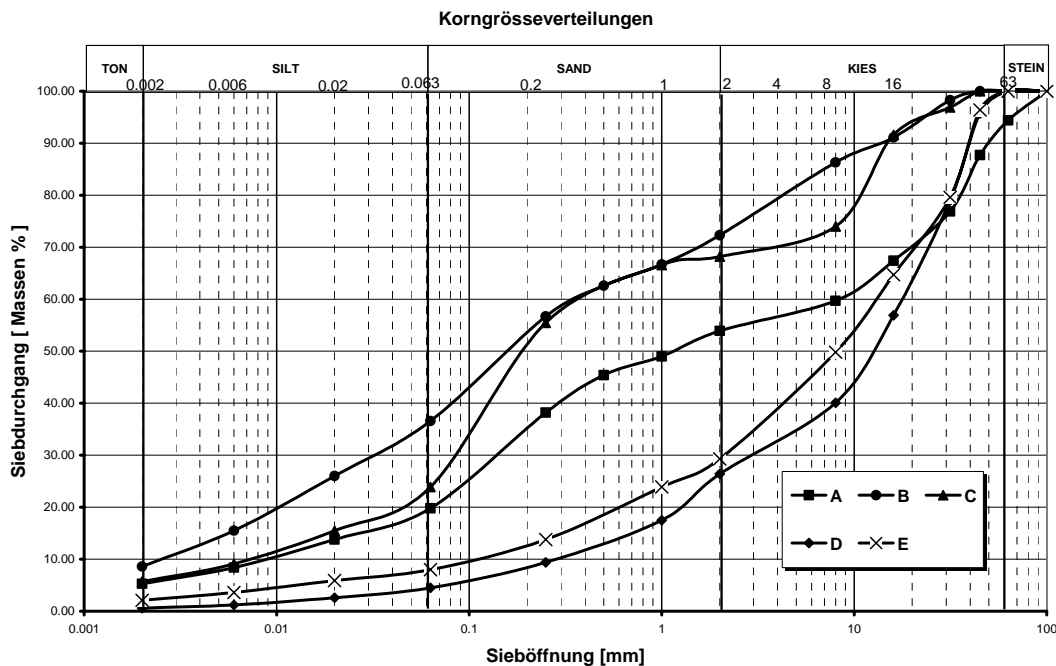


Bild 2. Korngrößenverteilungen der untersuchten Materialien

2.2. Wahl der Versuchsprotokolle

Die Versuche wurden nach den folgenden normierten Verfahren [6] und [7] durchgeführt:

AASHTO-Standard-Verdichtung im AASHTO Topf
AASHTO-Standard-Verdichtung im CBR Topf
AASHTO-Modified-Verdichtung im AASHTO Topf
AASHTO-Modified-Verdichtung im CBR Topf

Anschliessend an diese Verdichtungsversuche wurde die durch die Verdichtung erhaltene Tragfähigkeit der Proben mittels CBR Tests geprüft.

2.3. Probenaufbereitung

Für ein Bodenmaterial müssen viele Bodenproben hergestellt werden. Um dieselbe Korngrößenverteilung bei allen Proben zu gewährleisten, wurde das Material zuerst fraktioniert; das heisst in verschiedene Korngrößenfraktionen ausgesiebt.

Für die Durchführung der Versuche wurde anschliessend jede Probe mit den ausgewählten Fraktionen nach der originalen Korngrößenverteilung zusammengesetzt.



Bild 3. *Material Mischung und Vorbereitung der Probe nach der originalen Kornverteilung (AASHTO Topf)*

Der maximale Durchmesser der Korngrösse wurde nach Norm 670 330b zu 16 mm gewählt. Die grösseren Kornfraktionen wurden entfernt und nicht ersetzt.

2.4. Verdichtungsversuche

Die Verdichtungsversuche nach Proctor wurden gemäss der SN Norm 670 330b durchgeführt.

Nach der homogenen Mischung wurden die Proben mit den vorgesehenen Wassergehalten vorbereitet und jede einzelne Probe wurde nach der Mischung einen Tag in einem dichten Behälter gelagert, damit sich das Wasser gleichmässig im Boden verteilen konnte. Nach der Verdichtung wurde die Trockendichte bestimmt.

In den Bildern 4 und 5 sind einige typische Ergebnisse für die gewählten Böden dargestellt.

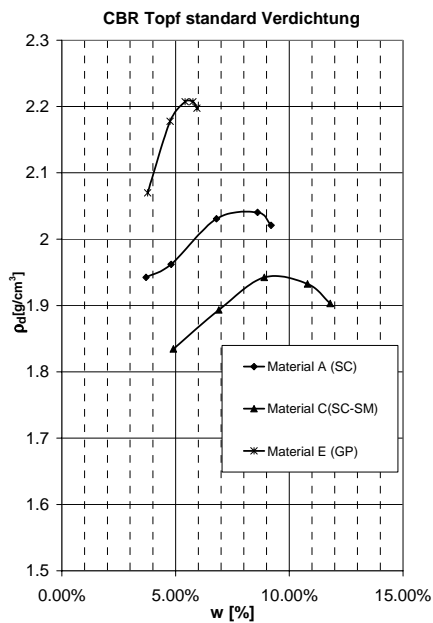


Bild 4. Zusammenfassung der Ergebnisse pro Material

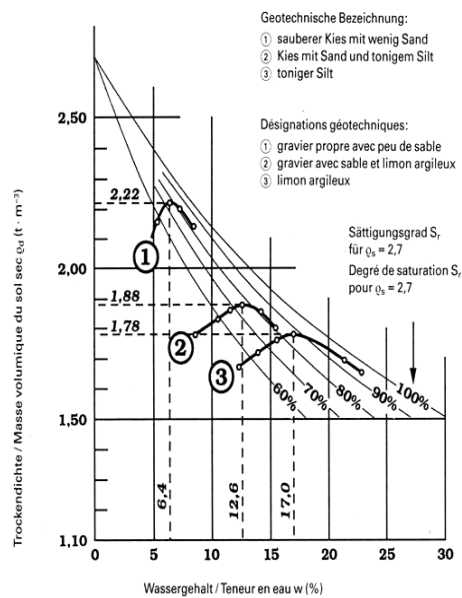


Bild 5. Typische Ergebnisse (Norm 670 330b)



Bild 6. *Verdichtung der Probe*



Bild 7. *Verdichtete Probe*

2.5. CBR Versuch

Der CBR Versuch wurde nach der SN Norm 670 320b durchgeführt. Die Proben wurden direkt nach der Verdichtung untersucht. Dies ergibt den CBR₁-Wert. Es wurden zwei Wassergehalte gemessen, einer vor dem Einbau der Probe, ein zweiter nach dem CBR Versuch.

Die Ergebnisse konnten damit an Hand des genauen Wassergehaltes während des Versuches ausgewertet werden. Die CBR₁-Werte die sich normgemäss auf den CBR Topf beziehen, wurden in einem zweiten Schritt auf den AASHTO Topf umgerechnet (für die kleinere Stempelgrösse von 8.5 cm²).



Bild 8. *Versuchsapparatur zur Messung des CBR-Wertes*

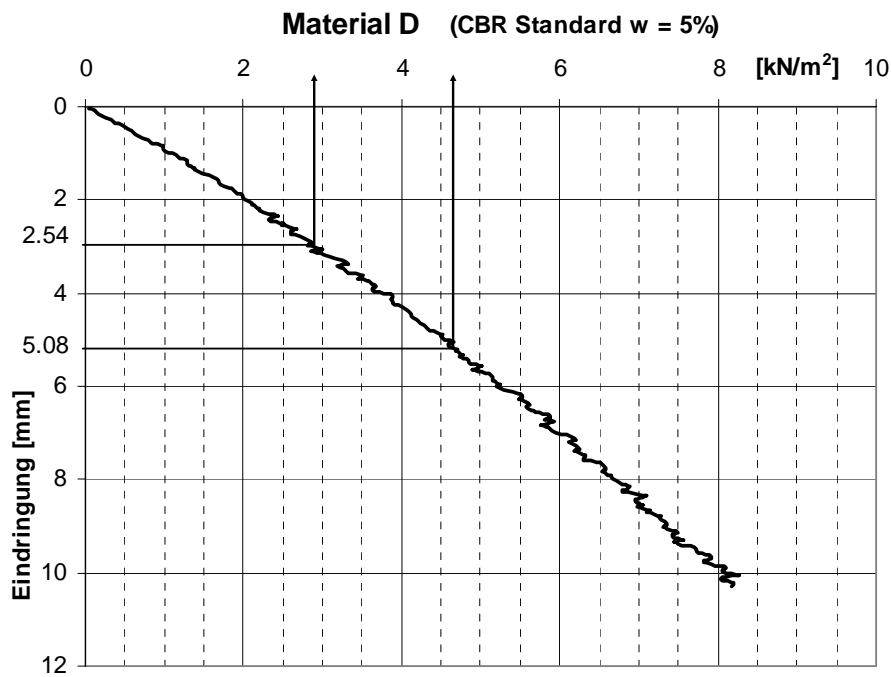


Bild 9. *Typischer Kurvenverlauf eines CBR Versuches und Referenzpunkte*

2.6. Bezeichnung der Versuchsergebnisse

Die Messserien wurden gemäss folgender Bezeichnungen und Kombinationen durchgeführt:

- A1 = AASHTO Verdichtung Standard mit AASHTO Topf
- A2 = AASHTO Verdichtung Modified mit AASHTO Topf
- A3 = AASHTO Verdichtung Standard mit CBR Topf
- A4 = AASHTO Verdichtung Modified mit CBR Topf

Die erhaltenen Bodeneigenschaften:

- $\rho_{1,2,3,4}$ = Bodendichte A1, A2, A3, A4
- $CBR_{1,2,3,4}$ = CBR Index A1, A2, A3, A4

2.7. Bodenmaterial und Versuchsergebnis

Materialbezeichnung, USCS-Klassifikation, Entnahmeort und die Labornummer der untersuchten Bodenmaterialien gehen aus der folgenden Tabelle 2 hervor.

Bezeichnung Material	USCS Klassifikation	Entnahmeort	Labornummer
A	SC	Filderen, Zürich-West	46723
B	SC	ETH-Hönggerberg	46724
C	SC-SM	Uetliberg Tunnel	46801
D	GP-GC	Recycling Material	46835
E	GP	Kiesgrube Bulach	46836

Tabelle 2. Materialbezeichnung, Klassifikation, Entnahmeort und Labornummer der untersuchten Bodenmaterialien

Die notwendigen Mengen an Versuchsmaterial für die vorgesehenen Versuchsserien wurden nach der entsprechenden SN Norm [670 320b] bestimmt. Die folgende Tabelle 3 zeigt welche verschiedenen Materialmengen benützt wurden.

Material für die Versuche ($\Phi < 16$ mm)			
Versuchs-Typ	Materialbedarf (Kg)	Reserve	Kg
Proctor Standard	15	20.00%	18
Proctor Modified	15	20.00%	18
CBR ₁ Standard	40	20.00%	48
CBR ₁ Modified	40	20.00%	48
			132Kg

Tabelle 3. Materialbedarf für eine Versuchsreihe

Im Folgenden werden die Beschreibung und die Versuchsergebnisse der fünf Bodenmaterialien angegeben. Die Auswertung der Messwerte befindet sich im Anhang.

Insgesamt wurde pro Material eine Menge von etwa 150 kg verwendet, ein Teil davon war für die Materialklassifikation und Identifikation bestimmt.

2.7.1. Material A

2.7.1.1. Materialbeschreibung

Das Material A ist ein Kiessand-Material aus Filderen (Birmensdorf), in der Umgebung der Stadt Zürich. An diesem Ort befindet sich zurzeit eine sehr wichtige Baustelle für die Ergänzung des Autobahnringes (West Umfahrung) der Stadt Zürich, wo dieser Kiessand häufig verwendet wird. Das Material stammt aus den ehemaligen Gletschermoränen, die sich sehr häufig am Rand des Alpengebiets befinden (wie z.B. beim Gardasee auf der Alpensüdseite).

Auf Grund der Herkunft des Materials sind die Körner durch die Erosion des damaligen Gletschers normalerweise rund oder gerundet, aus verschiedenen Herkünften und mit einer sehr hohen Festigkeit.

Dieses Material stellt ein klassisches und sehr wichtiges Material im Strassenbau dar, da dieser Kiessand sich für die Tragschicht von Verkehrswegen sehr gut eignet.

Die Materialmenge, mit den grösseren Fraktionen (>16 mm), die nachher ausgesiebt wurden, beträgt 150 Kg. Das Material wurde im Labor ofengetrocknet und in der Kugelmühle homogenisiert damit die Pseudosteine aus tonigem Material zerkleinert werden konnten. Die Korngrössenverteilung wurde mit einer Nass-Siebung untersucht. Mit dieser Art der Siebung konnte der Einfluss der Tonsteine minimiert werden.

Das gesamte Material wurde in die verschiedenen Fraktionen getrennt, und die groben Anteile gewaschen und die Pseudosteine entfernt.

Die Korngrössenverteilung ist im Anhang dargestellt.



Bild 10. *Autobahnbaustelle in Fildern (Birmensdorf)*



Bild 11. Typische Bildung einer Gletscher Moräne

Bodenmaterial:	A		
Entnahme Stelle:	Zürich - West, Filderen		
Klassifikation nach USCS: Gebrauchtes Material:	SC	In Feld: GC	
Plastizitätseigenschaften: Fließgrenze:	21.8	w%	
Ausrollgrenze:	14.44	w%	
Plastizitätsindex:	7.36	w%	
Feinanteil Klassifikation:	CL		
Spezifisches Gewicht ρ_s :	2.7 g/cm ³		

Tabelle 4. Bodeneigenschaften Material A

2.7.1.2. Mechanische Eigenschaften

Die Verdichtungsversuche ergeben den optimalen Wert des Wassergehaltes zwischen 75- 85 % des Sättigungsgrades, wie es von diesem Material zu erwarten ist. Die Resultate zeigen eine gute Verdichtbarkeit, und eine hohe erreichbare Tragfähigkeit.

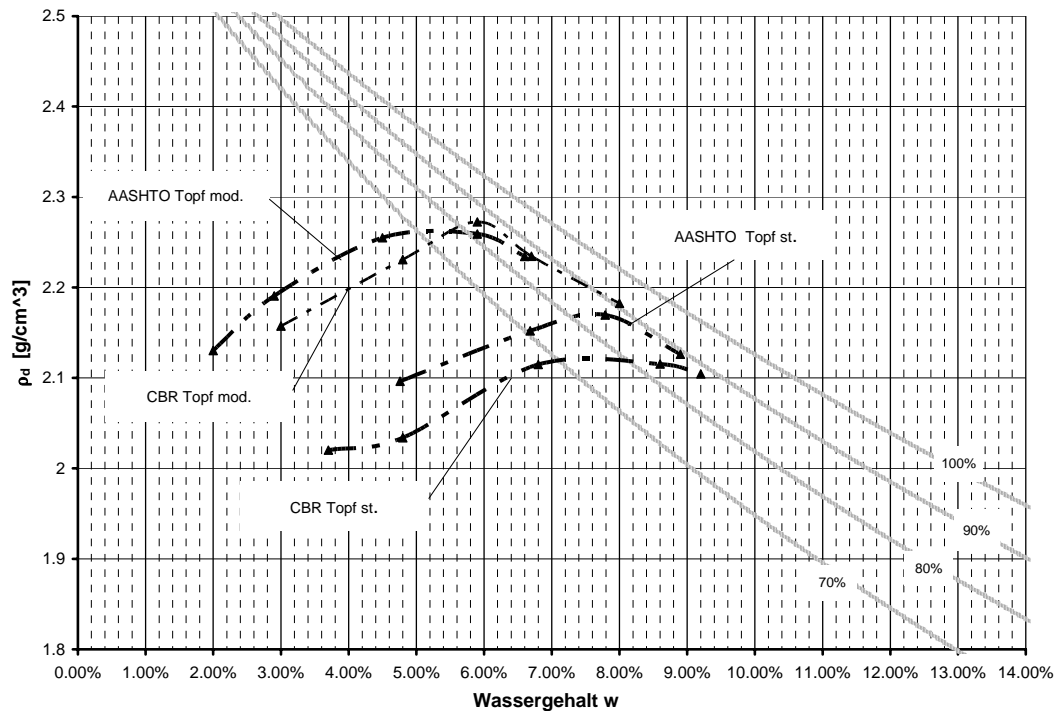


Bild 12. Proctorkurven Material A

Das Verdichtungsverfahren nach Proctor-Modified wird mit einer rund fünfmal grösseren Verdichtungsenergie durchgeführt und ergibt eine leicht grössere Trockendichte. Die Tragfähigkeit wird dabei wesentlich erhöht. Die Proben, die im AASHTO Topf verdichtet wurden, haben durch das Verdichtungsverfahren „Modified“ bessere Tragfähigkeitseigenschaften erhalten.

Je nach Wassergehalt ändern sich jedoch die Tragfähigkeitseigenschaften sehr stark im CBR Topf.

Optimale Trockendichte ρ_1	2.18	g/cm ³
Optimaler Wassergehalt	7.9	%
Optimaler CBR ₁	87	%
Optimaler Wassergehalt	4.5	%

Optimale Trockendichte ρ_2	2.26	g/cm ³
Optimaler Wassergehalt	5.4	%
Optimaler CBR ₂	340	%
Optimaler Wassergehalt	4	%

Optimale Trockendichte ρ_3	2.12	g/cm ³
Optimaler Wassergehalt	7.8	%
Optimaler CBR ₃	47	%
Optimaler Wassergehalt	5.6	%

Optimale Trockendichte ρ_4	2.27	g/cm ³
Optimaler Wassergehalt	6	%
Optimaler CBR ₄	200	%
Optimaler Wassergehalt	5.5	%

Tabelle 5. Zusammenfassung wichtigsten Ergebnisse von Material A

Die maximale Trockendichte wird im AASHTO Topf bei der „Modified“-Verdichtung in einem trockeneren Bereich erreicht und daher ist der Boden auch weniger gesättigt als im CBR Topf.

Es kann beobachtet werden, dass bei hohen Werten der Trockendichte kleine Wassergehaltsänderungen zu grossen Sättigungsgradänderungen führen.

Es ist auch zu beachten dass die maximale Tragfähigkeit nicht immer bei der grössten Trockendichte erreicht wird, und dass bei ähnlichen Verdichtungsgraden im AASHTO Topf eine grössere Tragfähigkeit als im CBR Topf gemessen wird.

Ähnliche Werte in der Lagerungsdichte können verschiedene Tragfähigkeitseigenschaften hervorrufen.

Im AASHTO Topf ist die gemessene Tragfähigkeit gemäss CBR grösser als im CBR Topf. Diese Tatsache lässt sich mit den grösseren Randeinflüssen erklären.

2.7.2. Material B

2.7.2.1. Materialbeschreibung

Das Material B ist ebenfalls ein Kiessand, aber im Vergleich zu dem Material A hat es leicht unterschiedliche Eigenschaften. Es wurde vom IGT in dem ETH Areal auf dem Höggerberg entnommen (Bild 13). Die Materialmenge, mit den grösseren Fraktionen (>16 mm) die nachher ausgesiebt wurde, beträgt 150 Kg.

Der Baugrund des Höggerbergs kann in drei Gesteinstypen unterteilt werden: Deckschicht (rund 2m stark), Moräne (min. ca. 30m stark), Molasse-Fels. Die Deckschicht besteht aus der Humusdecke und aufgelockertem, organisch verunreinigtem Moränenanteil. Die Moräne ist der massgebende Baugrund. Sie ist sehr mächtig und über das ganze ETH Areal von geotechnisch ähnlicher Ausbildung. In einer siltig bis sandig-toniger Grundmasse sind gröbere Komponenten von Kies- bis Blockgrösse in zufälliger Verteilung eingestreut. Die Moräne ist gesund, kompakt gelagert und als sehr guter Baugrund zu bezeichnen. (Studienauftrag Neubau Forschungs-, Lehr- und Dienstleistungsgebäude HIT Projektpflichtenheft / Unterlagen für Architekten).



Bild 13. ETH Hönggerberg (Bau der neuen Chemiegebäude)

Die Materialaufbereitung wurde nach dem gleichen Verfahren durchgeführt wie bei Material A. Ebenfalls wurde für jede einzelne Probe fraktionsweise die entsprechend notwendige Materialmenge zusammengemischt.

Zur Klassifizierung und Identifizierung des Materials wurden verschiedene Laborversuche durchgeführt. Die gemessenen Werte der Bodeneigenschaften sind in Tabelle 6 dargestellt.

Bodenmaterial:	B	
Entnahmestelle:	ETH Hönnggerberg	
Klassifikation nach USCS: Gebrauchtes Material:	SC	Im Feld: SC
Plastizitätseigenschaften: Fließgrenze:	21.2	w%
Ausrollgrenze:	12.71	w%
Plastizitätsindex:	8.49	w%
Feinanteil Klassifikation:	CL	
Spezifisches Gewicht ρ_s :	2.73 g/cm ³	

Tabelle 6. Bodeneigenschaften Material B

2.7.2.2. Mechanische Eigenschaften

Die optimalen Werte des Wassergehaltes liegen beim Material B mit dem "Standard"-Verdichtungsverfahren im CBR Topf in einem trockeneren Bereich als mit dem AASHTO Topf.

Der Boden ist im Vergleich zum Material A plastischer, und die grösseren Verdichtungswerte werden bei höheren Sättigungsgraden ermittelt (85-90%).

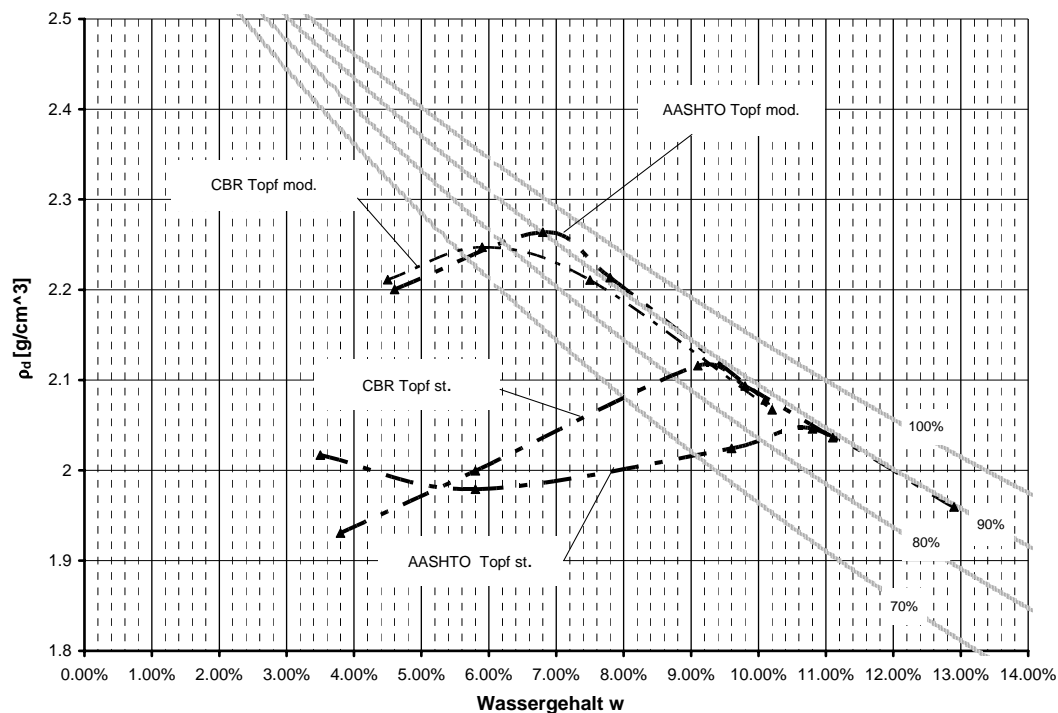


Bild 14. Proctorkurven Material B

Das Material B ist mit dem „Standard“-Verdichtungsverfahren im CBR Topf besser verdichtbar als im AASHTO Topf. Mit dem „Modified“ Verdichtungsverfahren werden in beiden Töpfen ähnliche Verdichtungsgrade erhalten.

Der Unterschied liegt auch in diesem Fall in der Tragfähigkeit. Die Verdichtung in dem AASHTO Topf ergibt höhere Tragfähigkeitswerte als die in dem CBR Topf.

Material A und B zeigen durch die verschiedenen Verdichtungsverfahren eine ähnliche Erhöhung der Tragfähigkeit, 290% mit dem CBR Topf und 330% mit dem AASHTO Topf.

Es muss erwähnt werden dass die Tragfähigkeit im Allgemeinen nicht nur von der Trockendichte oder vom Wassergehalt bzw. Sättigungsgrad, sondern auch von den Topfabmessungen (beim gleichen Stempel und Verdichtungsenergie) beeinflusst wird.

Man sollte vielleicht einige Mikroskopanalyse durchführen, um die Struktureigenschaften der in der AASHTO und CBR verdichteten Probe nachzuvollziehen.

Die wichtigsten Eigenschaften dieser Messserie sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Optimale Trockendichte ρ_1	2.05	g/cm ³
Optimaler Wassergehalt	10.6	%
Optimaler CBR ₁	63	%
Optimaler Wassergehalt	4.5	%

Optimale Trockendichte ρ_2	2.26	g/cm ³
Optimaler Wassergehalt	6.8	%
Optimaler CBR ₂	250	%
Optimaler Wassergehalt	4.5	%

Optimale Trockendichte ρ_3	2.12	g/cm ³
Optimaler Wassergehalt	9	%
Optimaler CBR ₃	41	%
Optimaler Wassergehalt	5	%

Optimale Trockendichte ρ_4	2.24	g/cm ³
Optimaler Wassergehalt	6	%
Optimaler CBR ₄	180	%
Optimaler Wassergehalt	5.25	%

Tabelle 7. Zusammenfassung wichtigsten Ergebnissen Material B

2.7.3. Material C

2.7.3.1. Materialbeschreibung

Das Material C ist ein Recycling Material aus dem Abraum des Uetliberg Tunnels (Bild 15). Stahlpartikel und Reste vom Spritzbeton sind im Material enthalten, sowie Körner die künstlich durch den Ausbruch produziert wurden. Deshalb ist die Festigkeit auch begrenzt.

Das Material wurde vom Ingenieurbüro Heierli AG in einer Menge von 180 Kg geliefert. Nach einer ersten Sichtprüfung enthält das Material vor allem Sandsteine und toniges Material. Das Feinmaterial wurde zum mineralogischen Labor des IGT weitergeleitet und untersucht. Die Analysen haben gezeigt, dass eine Gefahr durch Aufquellen des Materials nicht besteht. Der Ton vom Uetliberg setzt sich zum grössten Teil aus den Karbonaten Calcit und Dolomit zusammen.

Der Tonanteil beträgt nach der Messung mit Laserlichtstreuung 25 %. Bei den Tonmineralen dominiert Illit und Chlorit. Die Wasseraufnahme nach Enslin-Neff von 20 ml/g (Wassergehalt = 20%) entspricht der Fließgrenze. (Dr. G. Kahr IGT Technischer Bericht).

Ton von Uetliberg Tunnel	Quarz	18%
	Calcit	24%
	Dolomit	33%
	Feldspäte (Microclin)	4%
	Illit	15%
	Chlorit	6%

Tabelle 8. Mineralogische Analyse des Uetliberges Ton

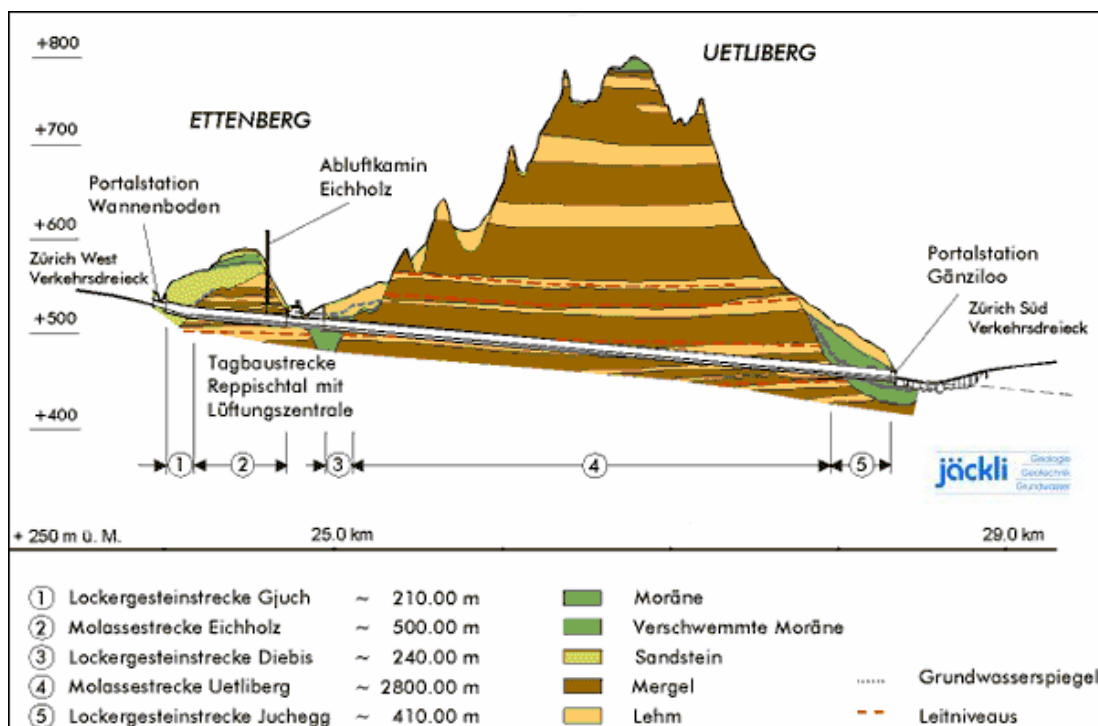


Bild 15. Geologie des Uetliberges (www.Uetlibergtunnel.ch)

Es ist zu beachten, dass die Geologie eines Abraummaterials sehr unterschiedlich sein kann. Von Westen nach Osten unterfährt der Uetlibergtunnel die zwei parallel laufenden Hügelläufe Ettenberg und Uetliberg. Der Kern beider Hügelläufe besteht aus flach gelagerten Schichten der oberen Süßwassermolasse, einer Wechsellagerung von harten Sandsteinbänken und weichen Mergelschichten. Die maximale Überlagerung des Tunnels unter dem Uetliberg beträgt ca. 320 m. Zum Erreichen der beiden Molassestrecken sind die drei Lockergesteinsabschnitte Gjuch, Diebis und Juchegg aufzufahren. Sie liegen alle hauptsächlich in heterogenem Moränenmaterial. Auf den ersten ca. 70 m der Lockergesteinsstrecke Juchegg liegt das Tunnelprofil zusätzlich im Uetliberglehm. Alle Lockergesteinsstrecken liegen teilweise oder ganz im Grundwasser. (www.Uetlibergtunnel.ch) Die wichtigsten Eigenschaften werden in der nächsten Tabelle zusammengefasst.

Bodenmaterial:	C		
Entnahme Stelle:	Uetliberg Tunnel		
Klassifikation nach USCS:	Gebrauchtes Material:	SC - SM	In Feld: SC - SM
Plastizitätseigenschaften:	Fließgrenze:	20.5	w%
	Ausrollgrenze:	14.97	w%
	Plastizitätsindex:	5.53	w%
Feinanteil Klassifikation:	CL - ML		
Spezifisches Gewicht ρ_s :	2.74 g/cm ³		

Tabelle 9. Bodeneigenschaften Material C

2.7.3.2. Mechanische Eigenschaften

Die Optimalen Wassergehalte sind in allgemein sehr nah beieinander, zwischen 8 und 9%. Die optimalen Werte der Trockendichte liegen bei geringeren Sättigungsgraden, da der Boden wenig plastisch ist.

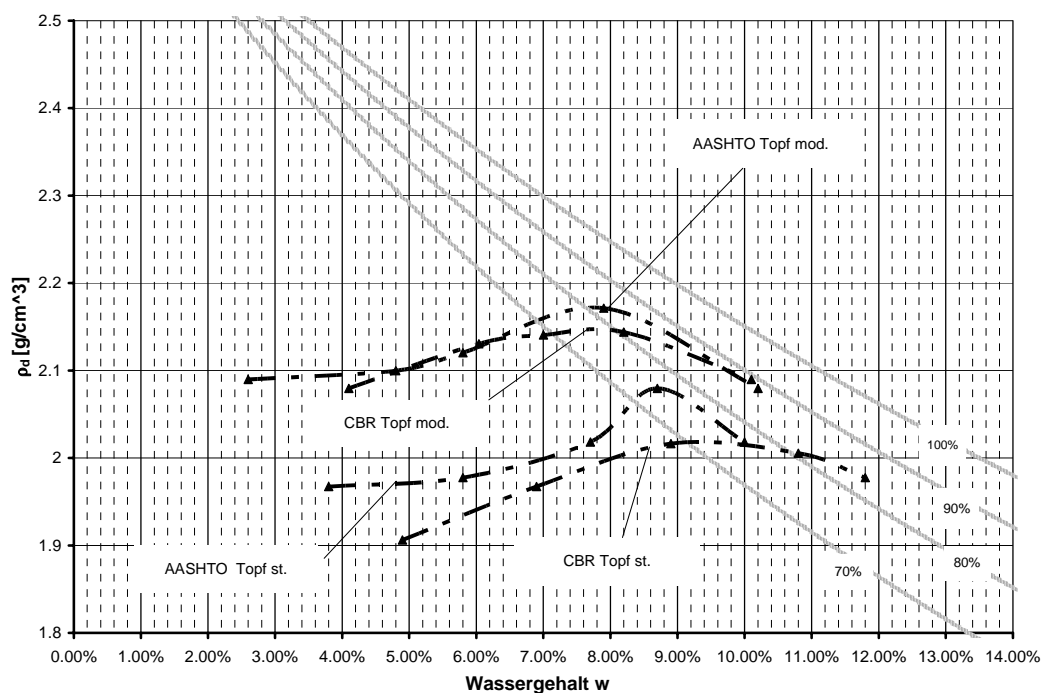


Bild 16. Proctorkurven Material C

Mit dem AASHTO Topf werden höhere Tragfähigkeitswerte als mit dem CBR Topf erhalten.

Die Vergrößerung der Tragfähigkeit beträgt 280% mit dem CBR Topf, 180 % mit dem AASHTO Topf. Obwohl die CBR Werte mit dem AASHTO Topf höher sind, ist zu beachten, dass die geringere Steigerung in der Tragfähigkeit wahrscheinlich durch die mit der Verdichtung erfolgte Erweichung der Körner zu erklären ist.

Der Boden ist mit einem natürlichen Kiessand vergleichbar, und bildet ein gutes Fundamentalschichtmaterial.

Optimale Trockendichte ρ_1	2.08	g/cm ³
Optimaler Wassergehalt	8.8	%
Optimaler CBR ₁	78	%
Optimaler Wassergehalt	6	%

Optimale Trockendichte ρ_2	2.17	g/cm ³
Optimaler Wassergehalt	8	%
Optimaler CBR ₂	220	%
Optimaler Wassergehalt	2.5	%

Optimale Trockendichte ρ_3	2.02	g/cm ³
Optimaler Wassergehalt	9.3	%
Optimaler CBR ₃	40	%
Optimaler Wassergehalt	7	%

Optimale Trockendichte ρ_4	2.14	g/cm ³
Optimaler Wassergehalt	8	%
Optimaler CBR ₄	152	%
Optimaler Wassergehalt	5.9	%

Tabelle 10. Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse Material C

2.7.4. Material D

2.7.4.1. Materialbeschreibung

Das Material D ist eine Mischung von natürlichem Boden und Recycling Asphalt Granulat. Die Asphaltkörner bilden einen bedeutenden Anteil des Materials, vor allem gelten sie als Verbesserung der Ursprünglichen Korngrößenverteilung.

Es wurde in einer Menge von 150 Kg von der Kiesgrube Eberhard bei Bülach geliefert. Auf Grund der künstlichen Herkunft des Materials D empfahl es sich eine Pycnometeranalyse sowohl für den Feinanteil, als auch für die gemahlene Gesamtfraktion durchzuführen.

Das Material wurde in Trocknungs-Ofen bei 80° Grad getrocknet, so dass die Asphalt-Teile nicht durch Erhitzen schmelzen können. Die Asphalt-Körner wurden auch nicht in der Kugelmühle behandelt, da diese sonst zerstört würden.

Die Ergebnisse zeigen, dass die groben Körner der Asphaltgranulate einen grossen Einfluss auf das mittlere spezifische Gewicht haben. Das spezifische Gewicht des Feinanteils ohne den Zusatz der gemahlene Körner des Asphaltgranulates ist ein wenig grösser. Diese Tatsache hat anfänglich zu falschen Ergebnissen geführt.

Die mechanischen und Verdichtungseigenschaften zeigen einige Besonderheiten. Die klassischen Bodeneigenschaften werden in der folgenden Tabelle dargestellt.

Bodenmaterial:	D		
Entnahme Stelle:	Kiesgrube Eberhard		
Klassifikation nach USCS:	Gebrauchtes Material:	GP - GC	Im Feld: GP - GC
Plastizitätseigenschaften:	Flie遡grenze:	17.9	w%
	Ausrollgrenze:	14.1	w%
	Plastizitätsindex:	3.8	w%
Feinanteil Klassifikation:	ML		
Spezifisches Gewicht ρ_s :	2.58 g/cm ³		

Tabelle 11. Bodeneigenschaften Material D

2.7.4.2. Mechanische Eigenschaften

Das Material ist beim Standard-Verdichtungsverfahren nicht gut verdichtbar. Beim Modified-Verdichtungsverfahren ist eine bessere Verdichtbarkeit festzustellen, obwohl die Proctorkurve einen ungewöhnlichen Verlauf zeigt.

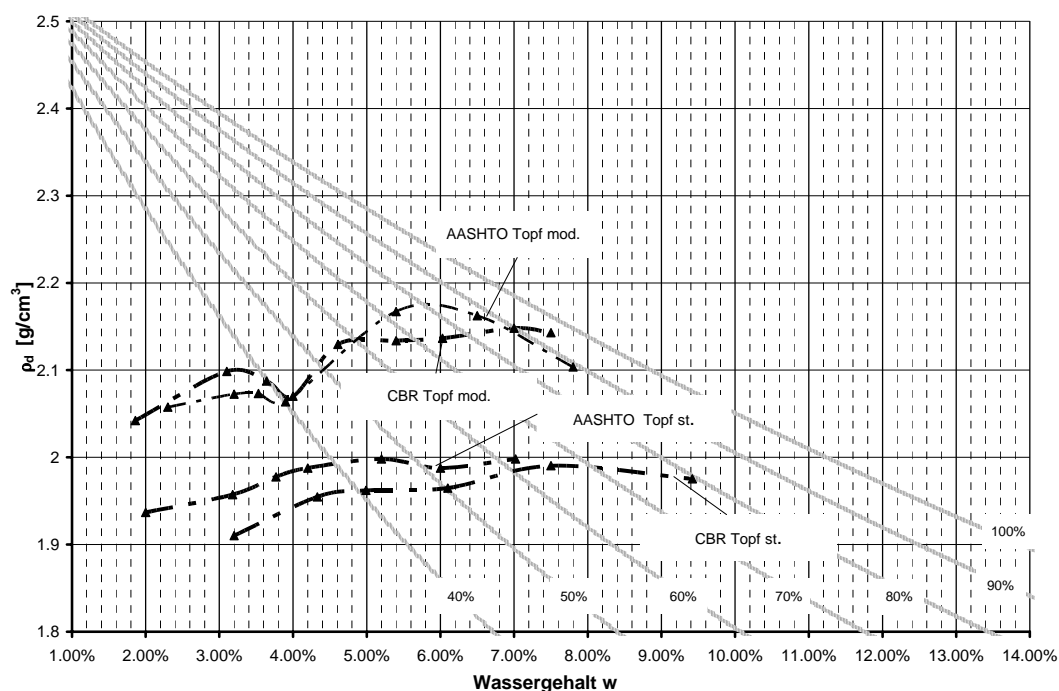


Bild 17. Proctorkurven Material D

Es wurde nachgewiesen, dass bei geringeren Wassergehalten eine markante Kornzertrümmerung stattfand. Deswegen wurde in diesem Bereich die Korngrössenverteilung leicht verändert.

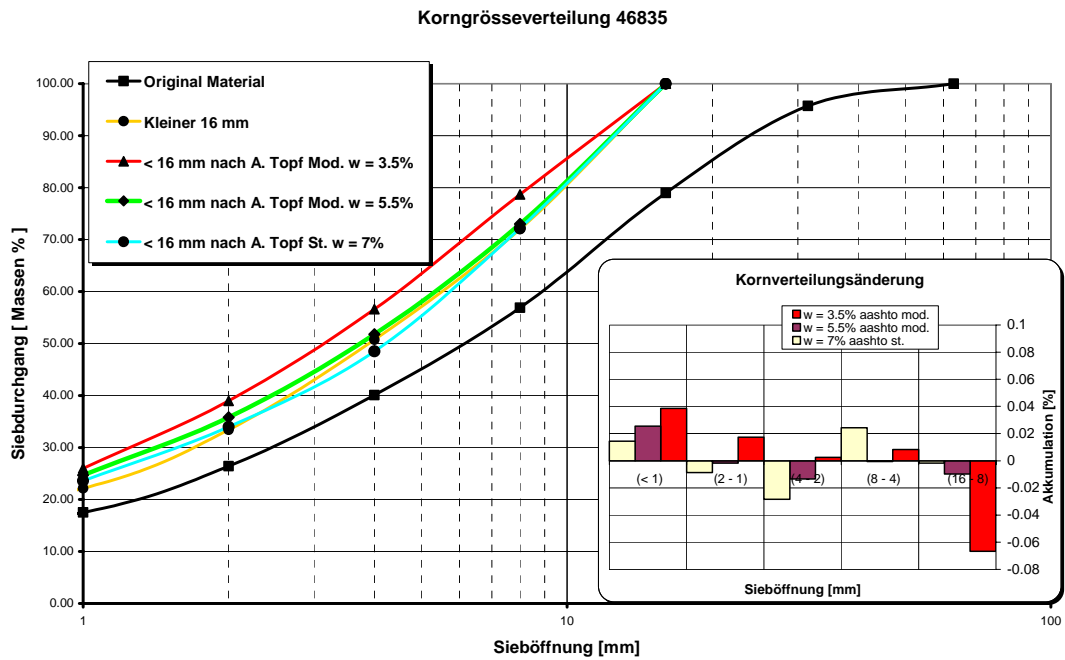


Bild 18. Korngrößenverteilungsänderung im AASHTO Topf, Material D

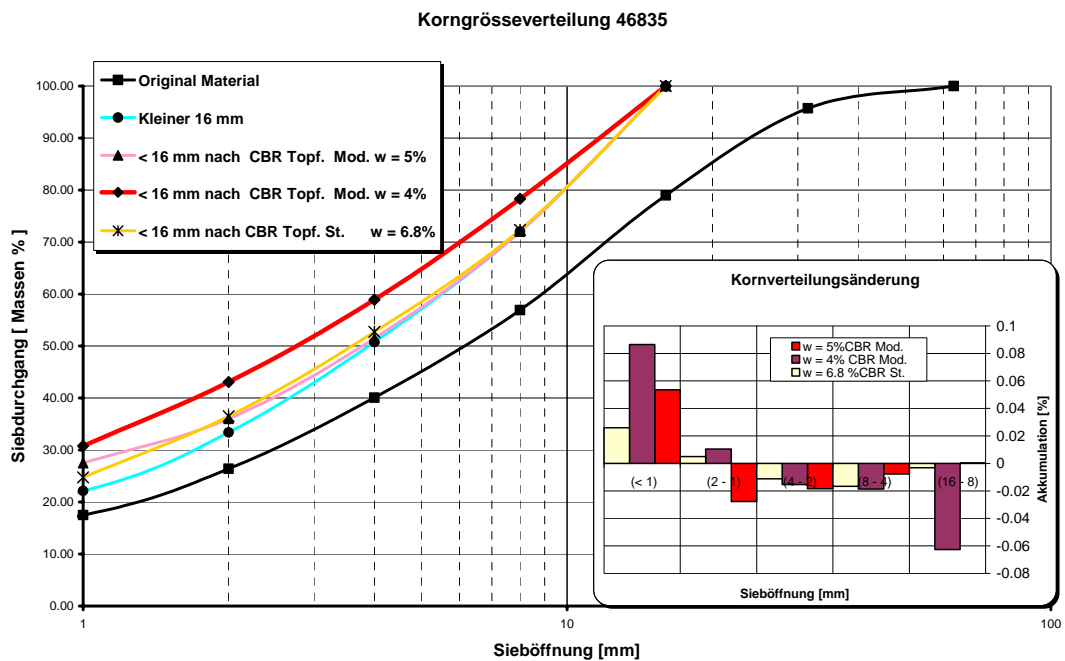


Bild 19. Korngrößenverteilungsänderung im CBR Topf, Material D

Es gibt eine ziemlich bedeutende Erhöhung des Feinanteils aus den gröberen Fraktionen, in denen die Asphaltgranulat-Körner während der Verdichtung zerbrochen werden. Der Feinanteil wird deswegen einen höheren Anteil an Asphalt-Partikeln haben.



Bild 20. Der Unterschied in der Änderung der Kornverteilung, durch die zwei verschiedenen Verdichtungsverfahren erzeugt, ist auch optisch auffällig

Das „Standard“-Verdichtungsverfahren war bei Material D im CBR Topf fast nicht einsetzbar. Dennoch wurde mit dem AASHTO-Topf eine gute Tragfähigkeit erzielt.

Die kleinere Stempelfläche im AASHTO Topf erzeugt bei gleicher Masse und Fallhöhe eine grössere Energie als im CBR Topf.

Der Boden wurde im AASHTO Topf homogener als in dem CBR Topf verdichtet.

Optimale Trockendichte ρ_1	2	g/cm^3
Optimaler Wassergehalt	7	%
Optimaler CBR_{1_1}	98	%
Optimaler Wassergehalt	5.2	%

Optimale Trockendichte ρ_2	2.15	g/cm^3
Optimaler Wassergehalt	7	%
Optimaler CBR_{1_2}	160	%
Optimaler Wassergehalt	4	%

Optimale Trockendichte ρ_3	1.99	g/cm^3
Optimaler Wassergehalt	7.5	%
Optimaler CBR_{1_3}	24	%
Optimaler Wassergehalt	3.9	%

Optimale Trockendichte ρ_4	2.18	g/cm^3
Optimaler Wassergehalt	5.6	%
Optimaler CBR_{1_4}	100	%
Optimaler Wassergehalt	5	%

Tabelle 12. Zusammenfassung wichtigsten Ergebnissen Material D

2.7.5. Material E

2.7.5.1. Materialeigenschaften

Material E ist ein natürlicher Kiessand, mit ausgezeichneten Verdichtungs- und Tragfähigkeitseigenschaften. Das Material wurde von der Kiesgrube Eberhard in Bülach in einer Menge von 150 Kg geliefert. Das Material wurde im Ofen getrocknet aber nicht in die Kugelmühle behandelt, da es schon im optimalen Zustand war (keine Pseudosteine aus krümeligem Feinmaterial).

Das Material kann als Musterbeispiel für einen gut verdichtbaren Boden gelten. Die Bodeneigenschaften sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Bodenmaterial:	E		
Entnahme Stelle:	Bülach		
Klassifikation nach USCS:	Gebrauchtes Material:	GP	Im Feld: GP
Plastizitätseigenschaften:	Flie遡grenze:	15.2	w%
	Ausrollgrenze:	10.46	w%
	Plastizitätsindex:	4.74	w%
Feinanteil Klassifikation:	CL – ML		
Spezifisches Gewicht ρ_s :	2.73 g/cm ³		

Tabelle 13. Bodeneigenschaften Material E

2.7.5.2. Mechanische Eigenschaften

Die Feinanteilfraktion ist wenig plastisch, aus diesem Grund findet die Verdichtung eher im trockenen Bereich der Proctorkurve statt.

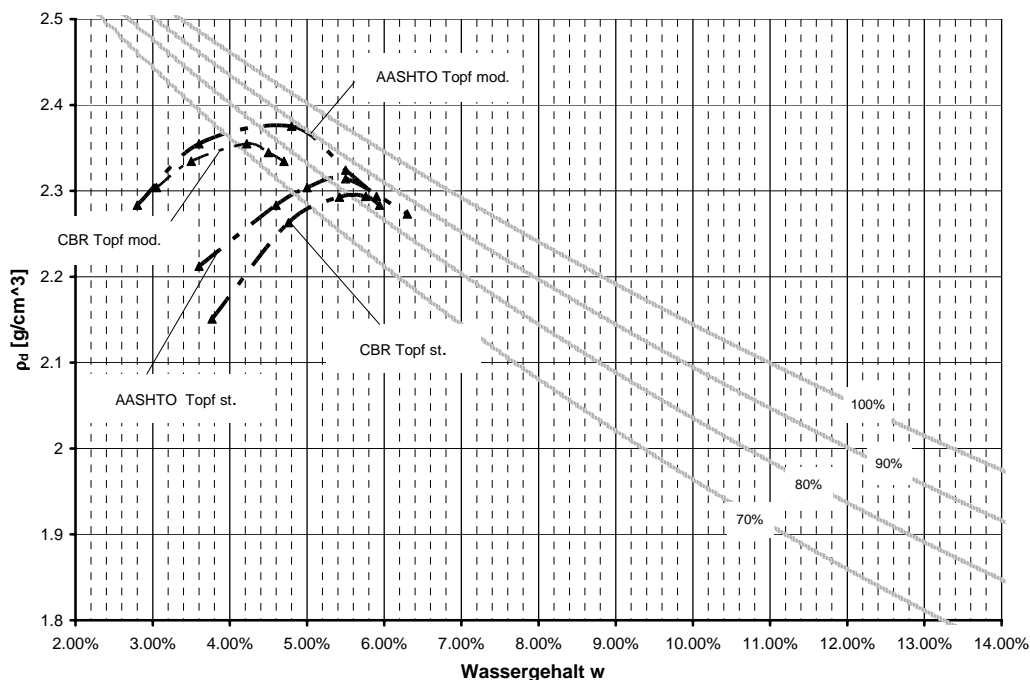


Bild 21. Proctorkurven Material E

Der optimale Wassergehalt liegt bei einem Sättigungsgrad zwischen 80%-90%.

Der Boden zeigt hervorragende Tragfähigkeitseigenschaften (bis 600% mit dem Modified-Verdichtungsverfahren), so dass das Standard Proctor Verdichtungsverfahren in diesem Fall schon hervorragende Tragfähigkeitswerte zeigte.

Die Erhöhung der Trockendichte durch das Modified-Verdichtungsverfahren betrug in beiden Fällen (AASHTO und CBR Topf) 3%, während die Tragfähigkeit mit dem AASHTO Topf auf 170% und mit dem CBR auf 230% erhöht wurde.

Optimale Trockendichte ρ_1	2.31	g/cm^3
Optimaler Wassergehalt	5.5	%
Optimaler CBR_{1_1}	225	%
Optimaler Wassergehalt	3.6	%

Optimale Trockendichte ρ_2	2.38	g/cm^3
Optimaler Wassergehalt	4.7	%
Optimaler CBR_{1_2}	600	%
Optimaler Wassergehalt	3.4	%

Optimale Trockendichte ρ_3	2.29	g/cm^3
Optimaler Wassergehalt	5.6	%
Optimaler CBR_{1_3}	91	%
Optimaler Wassergehalt	5.2	%

Optimale Trockendichte ρ_4	2.35	g/cm^3
Optimaler Wassergehalt	4.2	%
Optimaler CBR_{1_4}	290	%
Optimaler Wassergehalt	2.8	%

Tabelle 14. Zusammenfassung wichtigsten Ergebnissen Material E

2.8. Zusammenstellung der Ergebnisse und Empfehlung

Die Verhältniszahlen der Dichte aus den Wertepaaren beim optimalen Wassergehalt werden nachstehend zusammengestellt, wobei die erste Zahl η_1 als normkonform und die zweite η_3 als nicht normkonform gilt. Der Mittelwert $\eta = (\eta_1 + \eta_3)/2$ wird für die weitere Untersuchung angenommen.

Boden-Material	Verhältniszahlen η		Mittelwert	Kehrwert von η
	η_1	η_3	$\eta = (\eta_1 + \eta_3)/2$	$\xi = 1/\eta$
A	0.96	0.93	0.95	1.05
B	0.91	0.95	0.93	1.08
C	0.96	0.94	0.95	1.05
D	0.93	0.91	0.92	1.09
E	0.97	0.97	0.97	1.03

Tabelle 15. Versuchsergebnis: Verhältniszahlen

Für die praktische Anwendung wurde nun versucht aus den gewonnenen Mittelwerten η eine Beziehung zwischen der Verhältniszahl η und der Korngrößenverteilung zu finden. Das Ergebnis ist im Bild 22 dargestellt. Material D stammt aus der Kiesgrube bei Bülach. Es handelt sich dabei um ein mit Asphaltgranulat vermishtes Material und nicht um natürlichen Boden. Daher weicht die Verhältniszahl ($\eta = 0.92$) des Materials D stark von den Materialien mit einer ähnlichen Korngrößenverteilung ab (Material E), deren Verhältniszahl $\eta = 0.97$ ist. Material D wird daher ignoriert. Dieses Material (D) enthält Asphaltgranulat und ist bei einer Verwendung als Fundamentalschicht mit Zement zu stabilisieren.

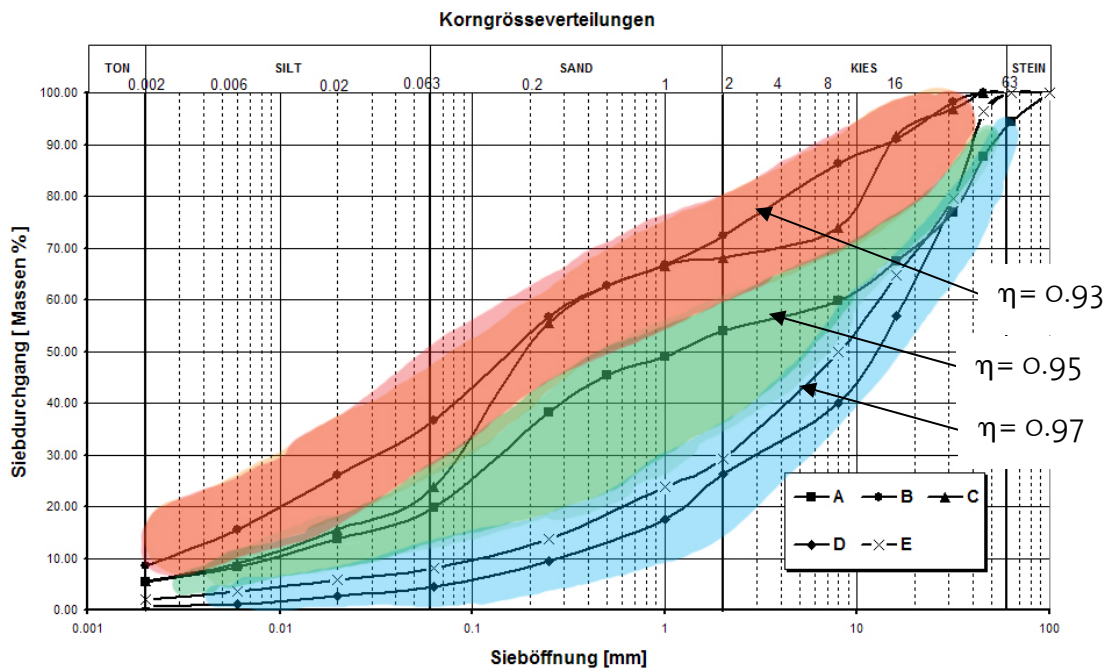


Bild 22. Empfehlung: Verhältniszahl η als Funktion der Korngrößenverteilung

Die in Tabelle 15 angegebenen Verhältniszahlen basieren ausschliesslich auf den optimalen Werten (Trockendichte) aus den Verdichtungsversuchen. Um festzustellen wie zuverlässig die Werte sein können, werden im Folgenden pro Material noch zwei weitere Wertepaare, Wassergehalt und Trockendichte ausgewertet. Dabei werden die Wassergehalte der zwei anderen Wertepaare willkürlich so gewählt dass ihre Differenz zum zugehörigen optimalen Wassergehalt $\pm 1\%$ betragen.

Die Werte der paare werden aus den Proctor Kurven vom Anhang abgelesen und in den folgenden 5 Tabellen (16 bis 20) angegeben. Daraus werden die entsprechenden Verhältniszahlen $\eta_1 = \rho_1/\rho_2$ berechnet. Aus den 5 Tabellen geht hervor, dass die Abweichungen der Verhältniszahlen der zwei anderen Wertepaare zu derjenigen des optimalen Wertepaars gering sind.

Die Auswertung zeigt, dass die Verhältniszahl des optimalen Wertepaars von Abweichungen des Wassergehaltes recht unempfindlich ist und somit als zuverlässig beurteilt werden kann.

Material A	Optimales Wertepaar	Zwei andere Wertepaare	
AASHTO Standard Wassergehalt w [%] Trockendichte ρ_1 [g/cm ³]	7.9 2.18	6.9 2.16	8.9 2.12
AASHTO Modified Wassergehalt w [%] Trockendichte ρ_2 [g/cm ³]	5.5 2.26	4.5 2.25	6.5 2.23
Verhältniszahl $\eta_1 = \rho_1/\rho_2$	0.96	0.96	0.95

Tabelle 16. Auswertung von drei Verhältniszahlen Material A

Material B	Optimales Wertepaar	Zwei andere Wertepaare	
AASHTO Standard Wassergehalt w [%] Trockendichte ρ_1 [g/cm ³]	10.6 2.05	9.6 2.02	11.6 2.02
AASHTO Modified Wassergehalt w [%] Trockendichte ρ_2 [g/cm ³]	6.8 2.26	5.8 2.24	7.8 2.21
Verhältniszahl $\eta_1 = \rho_1/\rho_2$	0.91	0.90	0.91

Tabelle 17. Auswertung von drei Verhältniszahlen Material B

Material C	Optimales Wertepaar	Zwei andere Wertepaare	
AASHTO Standard Wassergehalt w [%] Trockendichte ρ_1 [g/cm ³]	8.8 2.08	7.8 2.03	9.8 2.03
AASHTO Modified Wassergehalt w [%] Trockendichte ρ_2 [g/cm ³]	8.0 2.17	7.0 2.16	9.0 2.14
Verhältniszahl $\eta_1 = \rho_1/\rho_2$	0.96	0.94	0.95

Tabelle 18. Auswertung von drei Verhältniszahlen Material C

Material D	Optimales Wertepaar	Zwei andere Wertepaare	
AASHTO Standard Wassergehalt w [%] Trockendichte ρ_1 [g/cm ³]	7.0 2.0	6.0 2.0	8.0 1.99
AASHTO Modified Wassergehalt w [%] Trockendichte ρ_2 [g/cm ³]	7.0 2.15	6.0 2.14	8.0 2.14
Verhältniszahl $\eta_1 = \rho_1/\rho_2$	0.93	0.94	0.92

Tabelle 19. Auswertung von drei Verhältniszahlen Material D

Material E	Optimales Wertepaar	Zwei andere Wertepaare	
AASHTO Standard Wassergehalt w [%] Trockendichte ρ_1 [g/cm ³]	5.5 2.31	4.5 2.28	6.5 2.27
AASHTO Modified Wassergehalt w [%] Trockendichte ρ_2 [g/cm ³]	4.7 2.38	3.7 2.35	5.7 2.31
Verhältniszahl $\eta_1 = \rho_1/\rho_2$	0.97	0.97	0.98

Tabelle 20. Auswertung von drei Verhältniszahlen Material E

3. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass die Tragfähigkeitseigenschaften massgebend von den Versuchseinrichtungen (Geometrie des Verdichtungstopfes, Verdichtungsenergie) beeinflusst werden.

Mit dem AASHTO Topf (Durchmesser 101.6 mm) wird in der Regel die grösste Tragfähigkeit des Bodens gemessen. Im CBR Topf (Durchmesser 152 mm) ist der Boden bei Bereichen mit ungünstigen Wassergehalten (zu trocken oder zu feucht) auf Grund der kleineren Stempelfläche des Verdichtungshammers (Durchmesser 51 mm) (im Bezug zu der Oberfläche) schwer verdichtbar.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass gleiche Werte der Trockendichte eines Bodens auch bei beinahe gleichen Wassergehalten verschiedene Tragfähigkeitseigenschaften aufweisen können.

Einige für die Foundationsschicht wenig geeignete Böden wie Recycling Materialien erreichen durch die „Modified“-Verdichtung eine gute Tragfähigkeit, obwohl die Kornzertrümmerung ein Problem sein kann.

Es ist ein günstiger Verdichtungsbereich zu wählen, so dass möglichst geringe Kornzertrümmerung resultiert und eine möglichst hohe Tragfähigkeit erreicht werden kann.

Die Abhängigkeit der Tragfähigkeit von der Trockendichte lässt sich nicht durch einen mathematischen Zusammenhang oder Funktion beschreiben: Aber das Maximum befindet sich immer auf der trockenen Seite der Proctorkurve, vor dem Optimum.

Die wichtigsten Ergebnisse nach den verschiedenen Versuchsprotokollen (optimale Trockendichte und maximale CBR-Werte) wurden zusammengestellt und die Verhältniszahlen ermittelt. Mit diesen Daten stehen nützliche Informationen für einen bestimmten Boden bereit.

Die Ergebnisse der Auswertung sind in Tabelle 16 zusammengestellt.

Boden Material	A	B	C	D ^(*)	E
Klassifikation	SC	SC	SC-SM	GP-GC	GP
$\rho_1/\rho_2 = \eta_1$ (Normkonform)	0.96	0.91	0.96	0.93	0.97
$CBR_{1_3}/CBR_{1_4} = \eta_2$ (Normkonform)	0.24	0.23	0.26	0.24	0.31
$\rho_3/\rho_4 = \eta_3$ (nicht Normkonform)	0.93	0.95	0.94	0.91	0.97
$CBR_{1_1}/CBR_{1_2} = \eta_4$ (nicht Normkonform)	0.26	0.25	0.35	0.61	0.38

Tabelle 21. Umrechnungstabelle AASHTO-Standard zu AASHTO-Modified
($\rho_1, \rho_3, CBR_{1_1}, CBR_{1_3}$, für Standard-Verdichtung, $\rho_2, \rho_4, CBR_{1_2}, CBR_{1_4}$,
bei Modified-Verdichtung)

(*) D = Recyclingmaterial mit Beimengung von Asphaltgranulat

Die in Tabelle 21 dargestellten Koeffizienten wurden so indexiert, dass die Nummer 1 die Messserie 1 betrifft.

Die Ergebnisse wurden in Funktion der unterschiedlichen Verdichtungsenergien zusammengestellt. Dabei wurden auch die nicht normkonformen Verdichtungs-werte im CBR Topf, und die CBR Werte im AASHTO Topf berücksichtigt.

Die so erhaltenen Verdichtungswerte liefern, für die untersuchten oder ähnlichen Materialien, einige wichtige Erkenntnisse (Verhältniszahlen). Mit deren Hilfe kann man nun in der Praxis von einem AASHTO Standard Protokoll direkt in ein AASH-TO Modified-Protokoll oder umgekehrt „springen“.

Insgesamt wurden 5 Korngrößenverteilungen, 5 Plastizitätsindices, eine minera-logische Analyse, 100 Proctor Versuche, und 100 CBR Versuche durchgeführt.

Die folgende Tabelle zeigt die Erhöhung der Tragfähigkeit (CBR_1) und der Trocken-raumdichte durch die „Modified“-Verdichtung im Labor.

Die Trockendichte kann durch die grössere Verdichtung um 3% bis 10% erhöht werden, während die Tragfähigkeit um 60% bis 340% steigt (AASHTO Topf).

Es kann nachvollzogen werden, dass Baumaterialien für eine Fundationsschicht, aus praktischen Gründen nicht die edelsten und teuersten sein können. Die Untersuchung ergab, dass eine höhere Verdichtung eine ziemlich grosse Erhöhung der Tragfähigkeit brachte.

	A	B	C	D	E
$\rho_1-\rho_2$	3.54%	9.29%	4.15%	6.98%	2.94%
CBR ₁₃ -CBR ₁₄	325.53%	339.02%	279.75%	316.67%	218.12%
$\rho_3-\rho_4$	7.08%	5.66%	5.94%	9.55%	2.62%
CBR ₁₁ -CBR ₁₂	290.80%	296.98%	182.05%	63.60%	166.67%

Tabelle 22. Erhöhung der Trockendichte und der Tragfähigkeit infolge Modified-Verdichtung

In der vorliegenden Forschungsarbeit wurden fünf Bodenmaterialien untersucht, während beim Forschungsgesuch nur deren vier vorgesehen waren. Zusätzlich zum ursprünglich geplanten Forschungsprojekt wurden auch CBR-Versuche durchgeführt. Die CBR-Messwerte können für den praktischen Gebrauch zu einem späteren Zeitpunkt noch weitgehend ausgewertet werden. In der Baupraxis wird bis heute ausschliesslich die AASHTO Standard (Proctorverdichtung, Trockendichte) angewendet, um Kriterien für die Verdichtungskontrolle zu erarbeiten. Dabei wird die aus dem AASHTO-Standard ermittelte optimale Trockendichte als Mass verwendet, um die Qualität der Verdichtung im Feld zu beurteilen. So wird heute von den meisten kantonalen Tiefbauämtern verlangt 95% des optimalen Verdichtungsgrades aus dem AASHTO-Standard-Test einzuhalten.

Will man in Zukunft basierend auf dem AASHTO-Modified-Test arbeiten und das heutige Kriterium des Verdichtungsgrades von 95% beibehalten, so muss man einen umgerechneten Verdichtungsgrad von $\eta_i \times 95\%$ für die verschiedenen Bodenmaterialien empfehlen ($\eta_i = \text{AASHTO Standard/AASHTO Modified}$).

Eine Verdichtung mit modernen schweren Geräten sollte aus der Sicht der Bodenmechanik prinzipiell auf Grundlage des AASHTO Modified Tests beurteilt werden und nicht wie bisher nach den AASHTO Standard Test.

An dieser Stelle sei ein Beispiel aufgeführt:

Auf einer Baustelle wird ein Verdichtungsgrad von 95% gemäss AASHTO-Standard knapp als erfüllt beurteilt. Die im Feld aufgewendete Verdichtungsenergie sei gross gewesen (mehrfache Walzen-Durchgänge) und entspricht demnach eindeutig einer AASHTO-Modified-Verdichtung. Würde die Feldverdichtung statt an Hand des AASHTO-Standards nach dem AASHTO-Modified beurteilt, so wäre das Prüfungskriterium nicht erfüllt worden, weil der Verdichtungsgrad unter 95% sinken würde. In diesem Fall ist die Kenntnis der Verhältniszahl „Standard“ zu „Modified“ von grundlegender Bedeutung, um die Feldverdichtung korrekt beurteilen zu können. Die Verhältniszahlen von fünf Bodenmaterialien wurden im Rahmen der vorliegenden Forschung im Labor zur Ermittlung von Grundlagen untersucht.

Als Schlussfolgerung werden folgende Empfehlungen für die Baupraxis zur Diskussion gestellt:

1. In einer zukünftigen Revision der Verdichtungsnorm SN 670 330b ist ausdrücklich vorzuschreiben, dass statt AASHTO-Standard das AASHTO-Modified Verfahren angewendet wird. Damit kann den wirklichen Baustellenverhältnissen (Verdichtung vermehrt mit modernen und schweren Geräten) Rechnung getragen werden.
2. Für diesen Fall können die in Tabelle 23 angegebenen Verdichtungsgrade (letzte Kolonne) für die Abnahme im Feld empfohlen werden.

Damit ist das Forschungsziel erreicht und die Forschungsarbeit kann abgeschlossen werden.

Boden-Kategorien	Verhältniszahl η = Standard/Modified Aus dem Ergebnis der vorliegenden Arbeit	Verdichtungsgrad bisherige Anforderung basierend auf AASHTO Standard [%]	Verdichtungsgrad Zukünftige Anforderung basierend auf AASHTO Modified [%]
Kohäsionslose Kiessande, z.B. GW,GP	0.97	95	$0.97 \times 95 = 92$
Moräne von niedriger Plastizität, z.B. SC	0.95	95	$0.95 \times 95 = 90$
Moräne von hoher Plastizität, z.B. SC-SM	0.93	95	$0.93 \times 95 = 88$

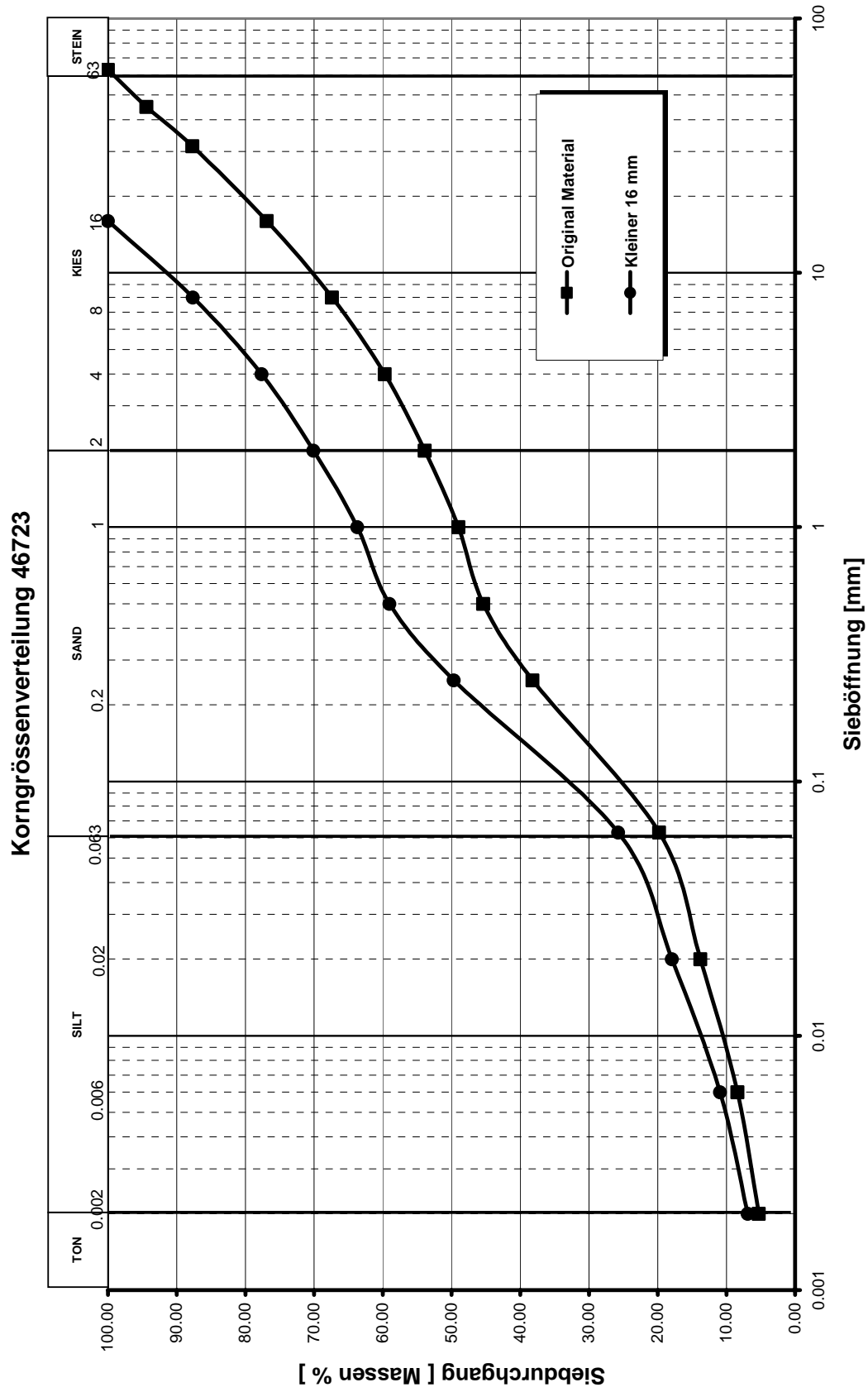
Tabelle 23. Empfohlene Verdichtungsgrade für die Verdichtungskontrolle im Feld

4. Literatur

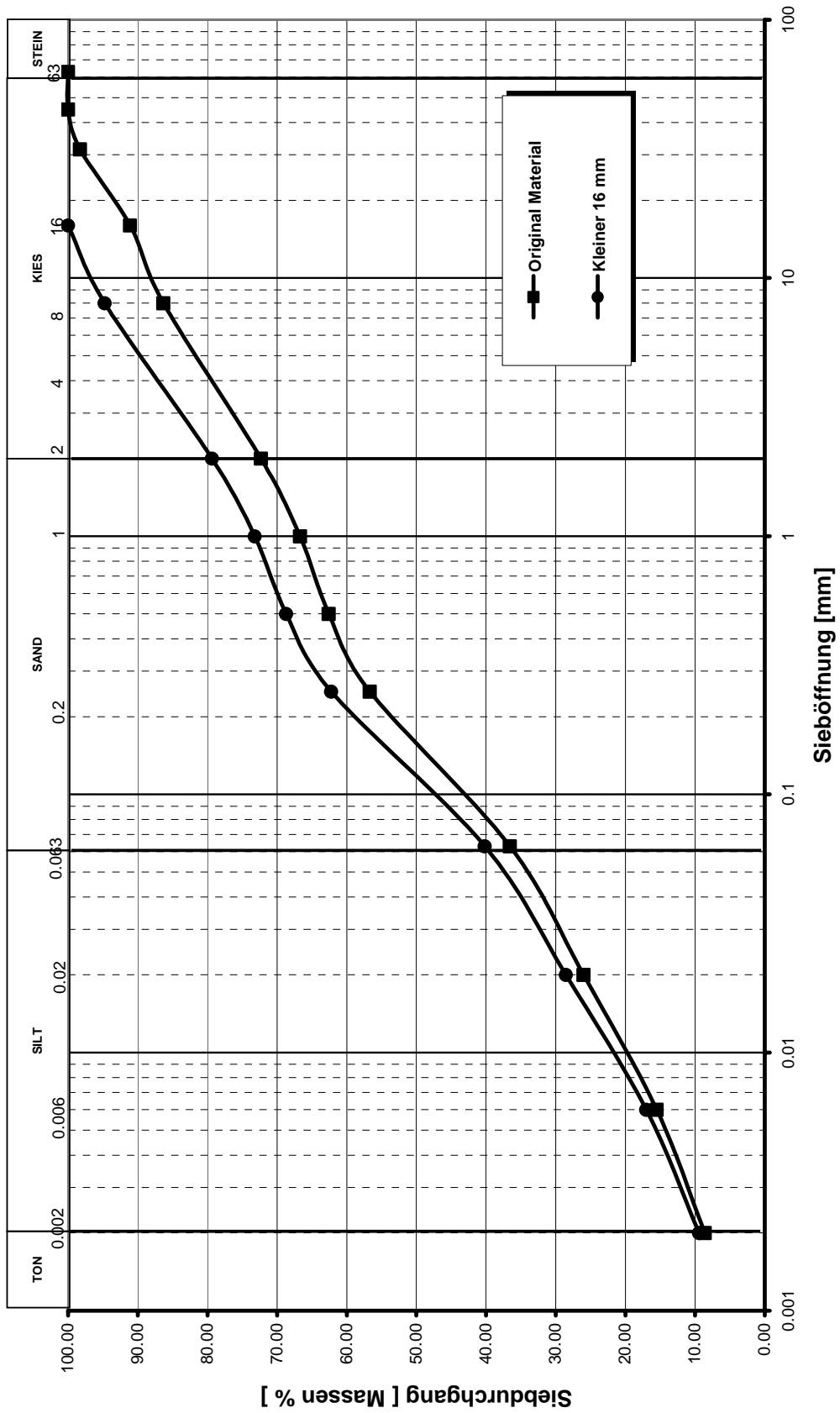
- [1] **I.A.Basheer** (2001). „Empirical Modeling of the Compaction Curve of Cohesive Soils“. Can. Geotech.J.,38,29-45.
- [2] **L.R.Blotz, C.H. Benson, and G.P. Boutwell** (Sept 1998). “Estimating Optimum Water Content and Maximum Dry Unit Weight for Compacted Clays.” J.of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 907-912.
- [3] **H.D. Harris** (1995).”An alternative Soil Compaction Model for Cylindrical Stress States”. J.agric.Engng-Res., 62, 1-8.
- [4] **K.D. Walsh, W.N. Houston, and S.L.Houson** (Dec 1997). “Field Implications of Current Compaction Practices”. J. of Construction engineering and Management, 363-370.
- [5] **SN 670 008a** Identifikation der Lockergesteine
- [6] **SN 670 330b** Versuche: Verdichtung nach AASHTO (prEN 13286 – 2)
- [7] **SN 670 320b** Versuche an Böden, CBR – Versuche im Laboratorium
- [8] **SN 670 010b** Bodenkennziffern
- [9] **Several Authors** (2002). „Annual Book of ASTM Standards“. Volume 04.08 Soil and Rock.
- [10] **Markus Caprez**, Geotechnik der Verkehrswege, Vorlesungsunterlagen zur Lehrveranstaltung 20 – 366, ETH Zürich, März 2003
- [11] **Lang, H. J., Huder, J. & Amann, P.** Bodenmechanik und Grundbau 7. Auflage, Springer Verlag, Berlin. 2003
- [12] **Lambe T.W., and Withman R.V.** Soil Mechanics, John Wiley & Sons, MIT 1969
- [13] **Dr. G. Kahr** ETH-IGT Technischer Bericht Ton Uetliberg
- [14] www.Uetlibergtunnel.ch

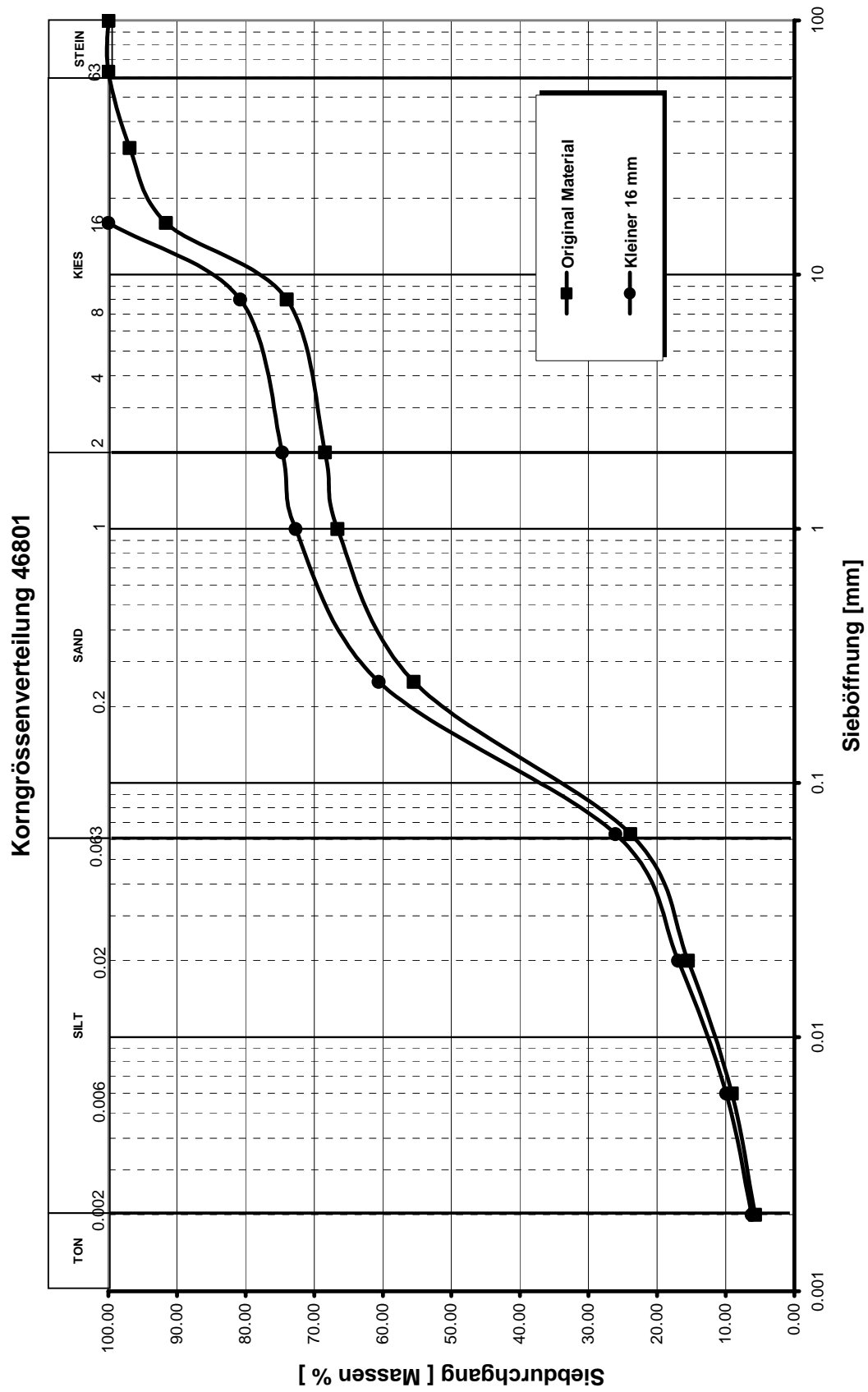
Anhänge

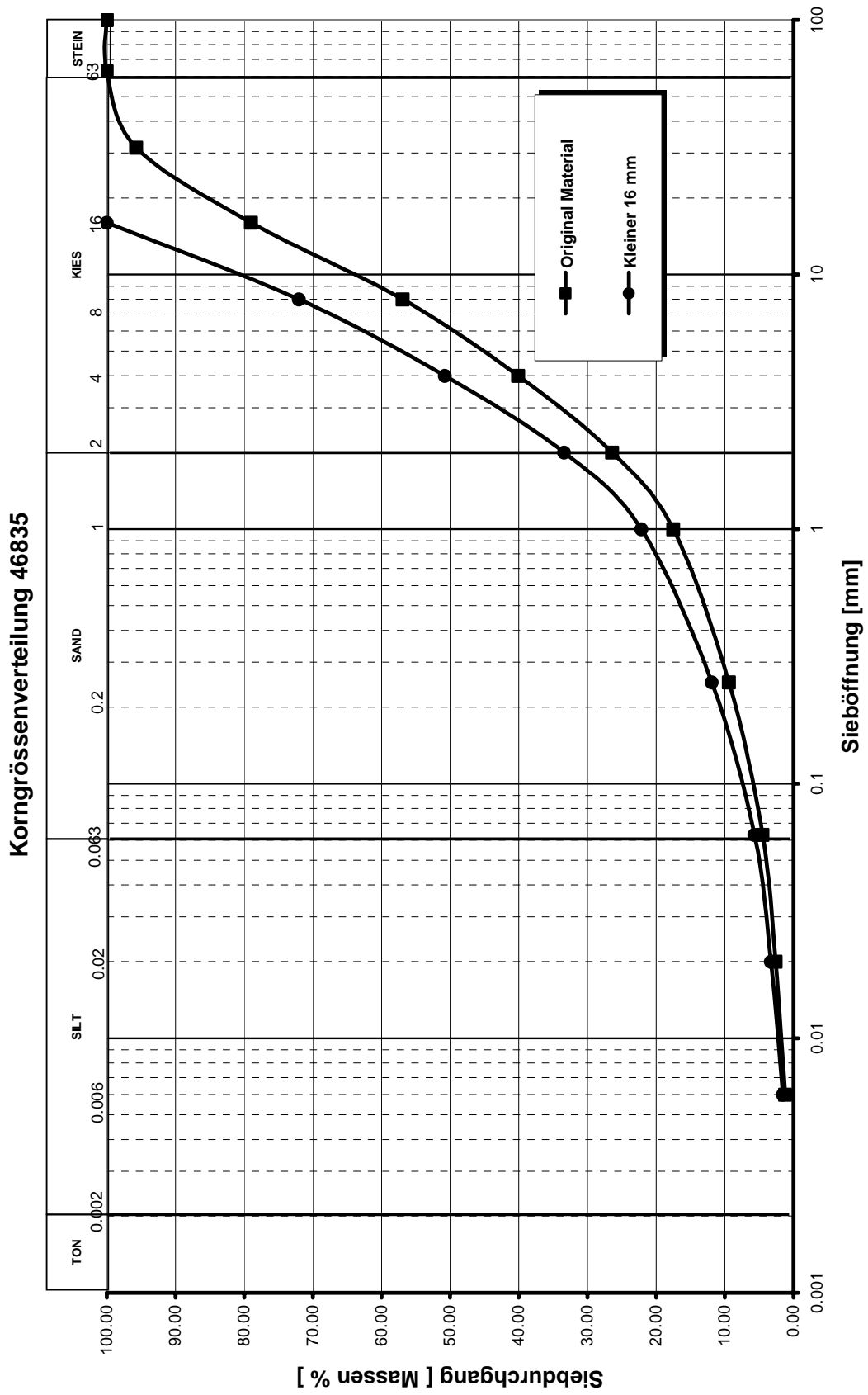
Korngrößenverteilungen	Seiten 38 - 42
Tabellen zu den Versuchsergebnissen	Seiten 43 - 52
Verdichtungs- und CBR Kurven	Seiten 53 - 57



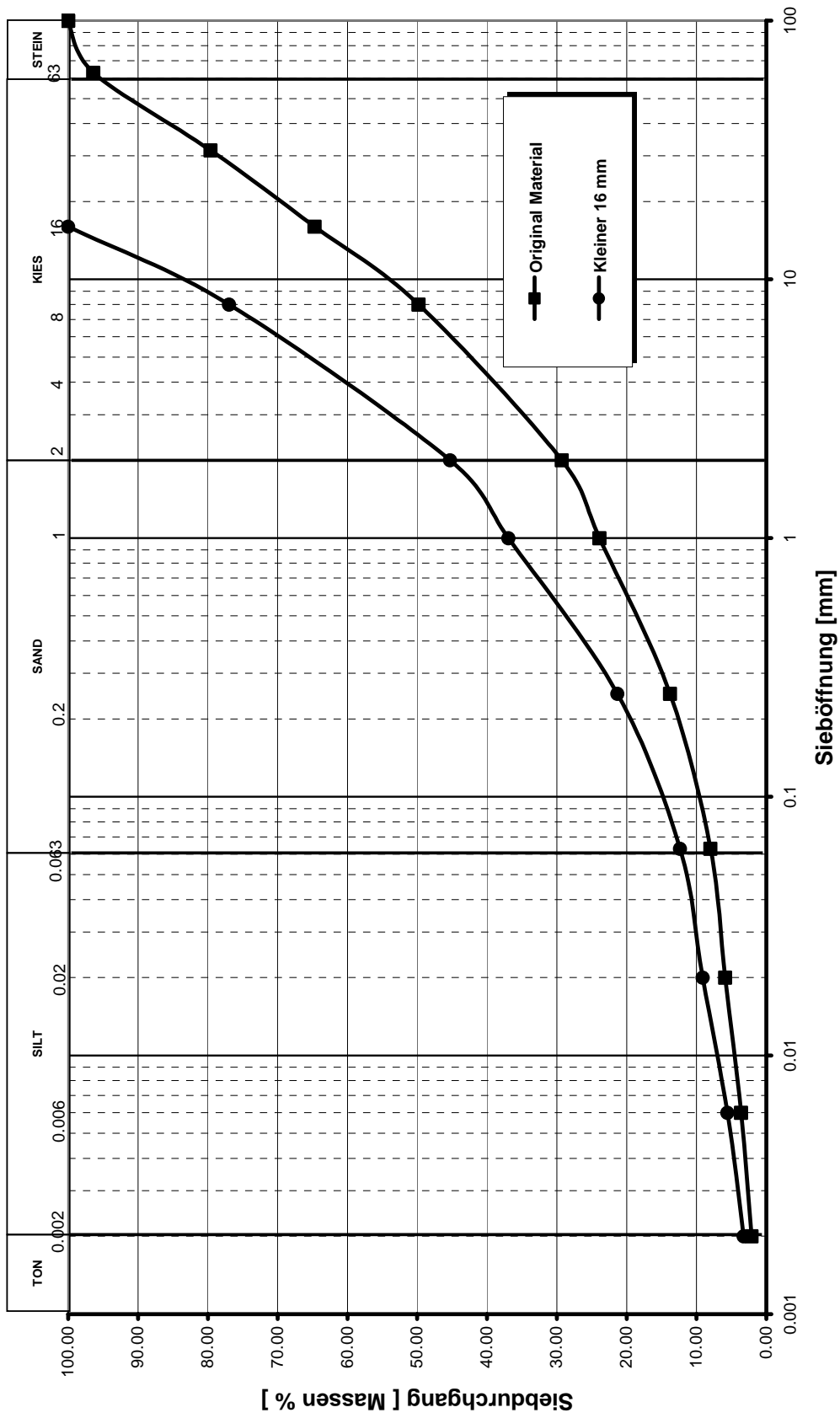
Korngrößenverteilung 46724







Korngrößenverteilung 46836



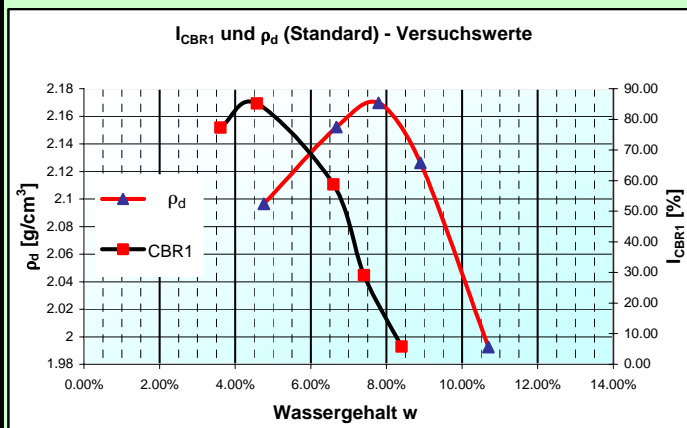
ETH Zürich
 Institut für
 Geotechnik

VSS - Forschung: Verdichtung

Obj.: Beziehung zwischen den Verdichtungswerten AASHTO standard und modified

Bodenmaterial: **A**
 Entnahme Stelle: Zürich - West, Filderen
 Klassifikation nach USCS: **SC** Im Feld: **GC**
 Plastizitätseigenschaften: Fließgrenze: 21.8 W%
 Ausrollgrenze: 14.44 W%
 Plastizitätsindex: 7.36 W%
 Feinanteil Klassifikation: **CL**
 Spezifisches Gewicht ρ_s : 2.7 g/cm³

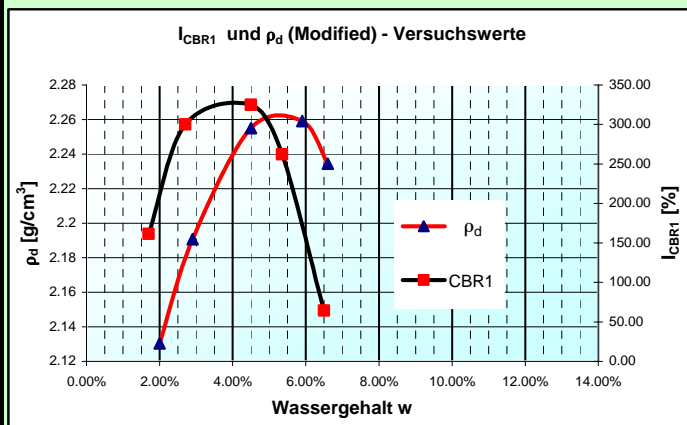
1. Messserie A1 (AASHTO - Standard)



w_a CBR1	w_a ρ_d	I_{CBR1} [%]	ρ_d	
3.61%		77.31		g/cm ³
4.58%	4.76%	85.15	2.1	g/cm ³
6.60%	6.68%	58.76	2.15	g/cm ³
7.41%	7.79%	29.13	2.17	g/cm ³
8.40%	8.90%	5.83	2.13	g/cm ³
10.40%	10.70%		1.99	g/cm ³

Optimale Trockendichte ρ_1	2.18	g/cm ³
Optimaler Wassergehalt	7.9	%
Optimaler I_{CBR11}	87	%
Optimaler Wassergehalt	4.5	%

2. Messserie A2 (AASHTO - Modified)



w_a CBR1	w_a ρ_d	I_{CBR1} [%]	ρ_d	
1.70%	2.00%	161.34	2.13	g/cm ³
2.70%	2.90%	300.28	2.19	g/cm ³
4.50%	4.50%	324.93	2.26	g/cm ³
5.35%	5.90%	262.18	2.26	g/cm ³
6.50%	6.60%	64.26	2.23	g/cm ³

Optimale Trockendichte ρ_2	2.26	g/cm ³
Optimaler Wassergehalt	5.5	%
Optimaler I_{CBR12}	340	%
Optimaler Wassergehalt	4	%

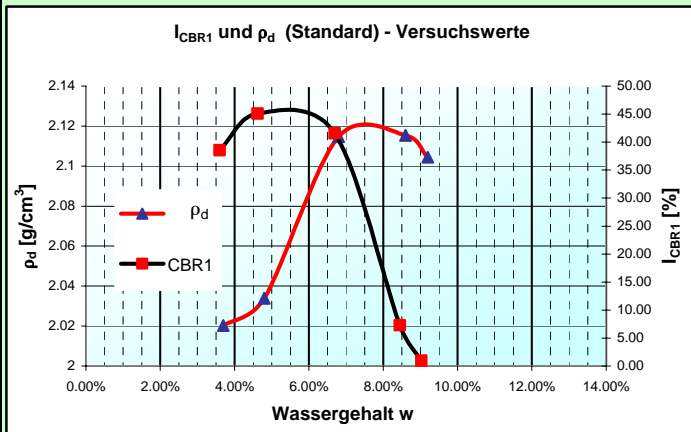
ETH Zürich
 Institut für
 Geotechnik

VSS - Forschung: Verdichtung

Obj.: Beziehung zwischen den Verdichtungswerten AASHTO standard und modified

Bodenmaterial: **A**
 Entnahme Stelle: Zürich - West, Filderen
 Klassifikation nach USCS: **SC** In Feld: **GC**
 Plastizitätseigenschaften: Fließgrenze: 21.8 W%
 Ausrollgrenze: 14.44 W%
 Plastizitätsindex: 7.36 W%
 Feinanteil Klassifikation: **CL**
 Spezifisches Gewicht ρ_s : 2.7 g/cm³

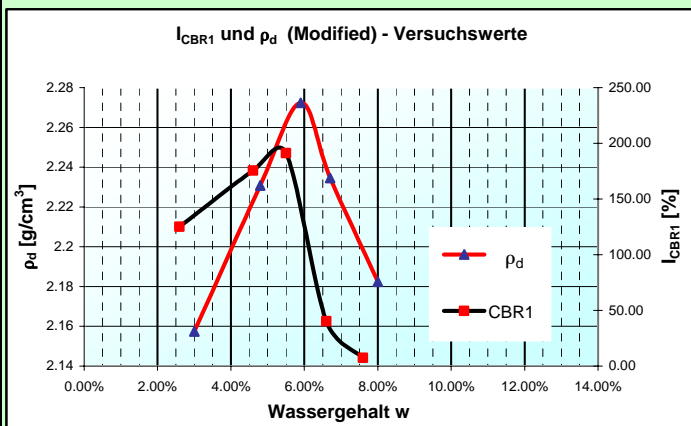
3. Messserie A3 (CBR - Standard)



w_a CBR1	w_a ρ_d	I_{CBR1} [%]	ρ_d	
3.60%	3.70%	38.53	2.02	g/cm ³
4.62%	4.80%	45.09	2.03	g/cm ³
6.70%	6.80%	41.55	2.11	g/cm ³
8.45%	8.60%	7.29	2.12	g/cm ³
9.03%	9.20%	0.97	2.1	g/cm ³

Optimale Trockendichte ρ_3	2.12	g/cm ³
Optimaler Wassergehalt	7.8	%
Optimaler I_{CBR13}	47	%
Optimaler Wassergehalt	5.6	%

4. Messserie A4 (CBR - Modified)



w_a CBR1	w_a ρ_d	I_{CBR1} [%]	ρ_d	
2.60%	3.00%	125.11	2.16	g/cm ³
4.60%	4.80%	175.55	2.23	g/cm ³
5.50%	5.90%	191.14	2.27	g/cm ³
6.60%	6.70%	40.37	2.23	g/cm ³
7.60%	8.00%	7.43	2.18	g/cm ³

Optimale Trockendichte ρ_4	2.27	g/cm ³
Optimaler Wassergehalt	6	%
Optimaler I_{CBR14}	200	%
Optimaler Wassergehalt	5.5	%

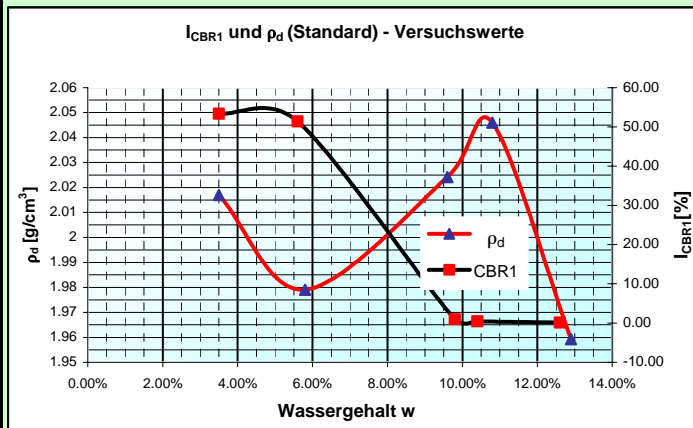
ETH Zürich
 Institut für
 Geotechnik

VSS - Forschung: Verdichtung

Obj.: Beziehung zwischen den Verdichtungswerten AASHTO standard und modified

Bodenmaterial: **B**
 Entnahme Stelle: ETH Moräne
 Klassifikation nach USCS: Gebrauchtes Material: **SC** Im Feld: **SC**
 Plastizitätseigenschaften: Fließgrenze: 21.2 W%
 Ausrollgrenze: 12.71 W%
 Plastizitätsindex: 8.49 W%
 Feinanteil Klassifikation: **CL**
 Spezifisches Gewicht ρ_s : 2.73 g/cm³

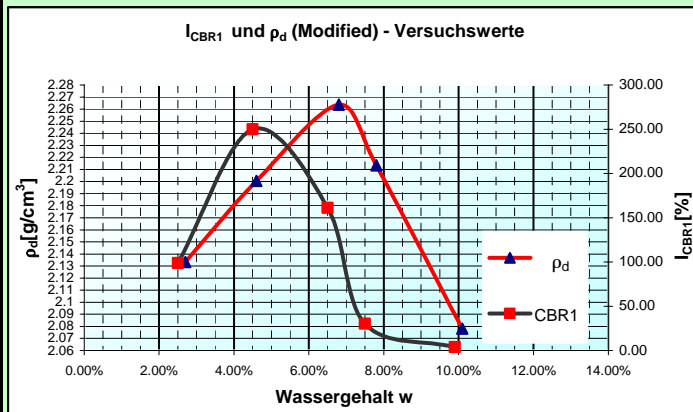
1. Messserie A1 (AASHTO - Standard)



W _a CBR1	W _a ρ_d	I _{CBR1} [%]	ρ_d	
3.50%	3.50%	53.36	2.02	g/cm ³
5.60%	5.80%	51.41	1.98	g/cm ³
9.80%	9.60%	0.96	2.02	g/cm ³
10.40%	10.80%	0.43	2.05	g/cm ³
12.60%	12.90%	0.15	1.96	g/cm ³

Optimale Trockendichte ρ_1	2.05	g/cm ³
Optimaler Wassergehalt	10.6	%
Optimaler I _{CBR11}	63	%
Optimaler Wassergehalt	4.5	%

2. Messserie A2 (AASHTO - Modified)



W _a CBR1	W _a ρ_d	I _{CBR1} [%]	ρ_d	
2.50%	2.70%	98.98	2.13	g/cm ³
4.50%	4.60%	250.09	2.2	g/cm ³
6.50%	6.80%	161.28	2.26	g/cm ³
7.50%	7.80%	30.47	2.21	g/cm ³
9.90%	10.10%	4.04	2.08	g/cm ³

Optimale Trockendichte ρ_2	2.26	g/cm ³
Optimaler Wassergehalt	6.8	%
Optimaler I _{CBR12}	250	%
Optimaler Wassergehalt	4.5	%

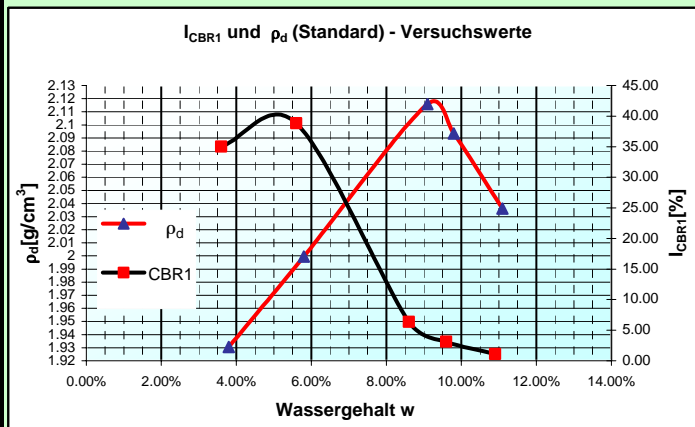
ETH Zürich
 Institut für
 Geotechnik

VSS - Forschung: Verdichtung

Obj.: Beziehung zwischen den Verdichtungswerten AASHTO standard und modified

Bodenmaterial: **B**
 Entnahme Stelle: ETH Moräne
 Klassifikation nach USCS: **SC** Im Feld: **SC**
 Plastizitätseigenschaften: Fließgrenze: 21.2 W%
 Ausrollgrenze: 12.71 W%
 Plastizitätsindex: 8.49 W%
 Feinanteil Klassifikation: **CL**
 Spezifisches Gewicht ρ_s : 2.73 g/cm³

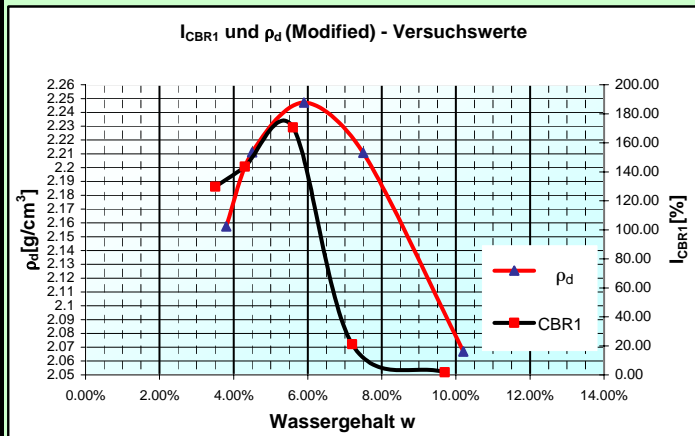
3. Messserie A3 (CBR - Standard)



W _a CBR1	W _a ρ_d	I _{CBR1} [%]	ρ_d	
3.60%	3.80%	35.01	1.93	g/cm ³
5.60%	5.80%	38.83	2	g/cm ³
8.60%	9.10%	6.35	2.12	g/cm ³
9.60%	9.80%	3.13	2.09	g/cm ³
10.90%	11.10%	1.10	2.04	g/cm ³

Optimale Trockendichte ρ_3	2.12	g/cm ³
Optimaler Wassergehalt	9	%
Optimaler I _{CBR13}	41	%
Optimaler Wassergehalt	5	%

4. Messserie A4 (CBR - Modified)



W _a CBR1	W _a ρ_d	I _{CBR1} [%]	ρ_d	
3.50%	3.80%	129.64	2.16	g/cm ³
4.30%	4.50%	143.54	2.21	g/cm ³
5.60%	5.90%	170.51	2.25	g/cm ³
7.20%	7.50%	21.09	2.21	g/cm ³
9.70%	10.20%	1.76	2.07	g/cm ³

Optimale Trockendichte ρ_4	2.24	g/cm ³
Optimaler Wassergehalt	6	%
Optimaler I _{CBR14}	180	%
Optimaler Wassergehalt	5.25	%

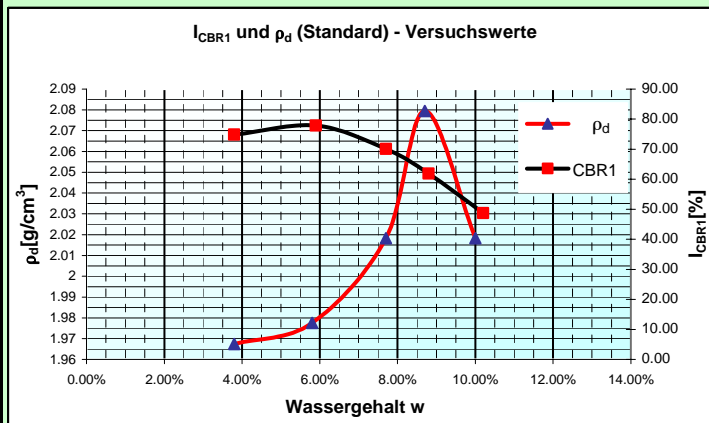
ETH Zürich
 Institut für
 Geotechnik

VSS - Forschung: Verdichtung

Obj.: Beziehung zwischen den Verdichtungswerten AASHTO standard und modified

Bodenmaterial: **C**
 Entnahme Stelle: Uetliberg Tunnel
 Klassifikation nach USCS: **SC - SM** Im Feld: **SC - SM**
 Plastizitätseigenschaften: Fließgrenze: 20.5 W%
 Ausrollgrenze: 14.97 W%
 Plastizitätsindex: 5.53 W%
 Feinanteil Klassifikation: **CL - ML**
 Spezifisches Gewicht ρ_s : 2.74 g/cm³

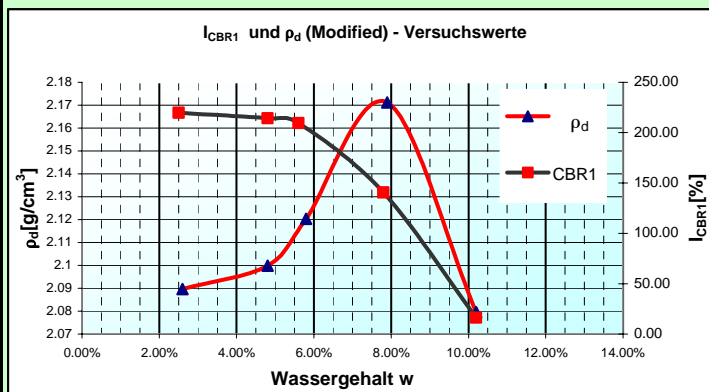
1. Messserie A1 (AASHTO - Standard)



w_a CBR1	w_a ρ_d	I_{CBR1} [%]	ρ_d	
3.80%	3.80%	74.86	1.97	g/cm ³
5.90%	5.80%	77.88	1.98	g/cm ³
7.70%	7.70%	70.04	2.02	g/cm ³
8.80%	8.70%	61.90	2.08	g/cm ³
10.20%	10.00%	48.70	2.02	g/cm ³

Optimale Trockendichte ρ_1	2.08	g/cm ³
Optimaler Wassergehalt	8.8	%
Optimaler I_{CBR11}	78	%
Optimaler Wassergehalt	6	%

2. Messserie A2 (AASHTO - Modified)



w_a CBR1	w_a ρ_d	I_{CBR1} [%]	ρ_d	
2.50%	2.60%	219.73	2.09	g/cm ³
4.80%	4.80%	214.17	2.1	g/cm ³
5.60%	5.80%	209.60	2.12	g/cm ³
7.80%	7.90%	140.49	2.17	g/cm ³
10.20%	10.20%	16.34	2.08	g/cm ³

Optimale Trockendichte ρ_2	2.17	g/cm ³
Optimaler Wassergehalt	8	%
Optimaler I_{CBR12}	220	%
Optimaler Wassergehalt	2.5	%

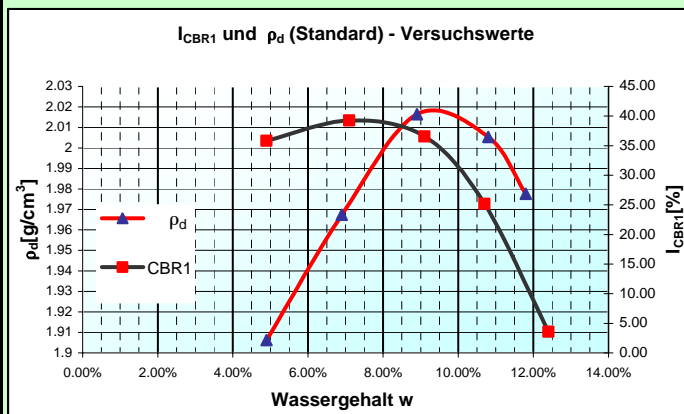
ETH Zürich
 Institut für
 Geotechnik

VSS - Forschung: Verdichtung

Obj.: Beziehung zwischen den Verdichtungswerten AASHTO standard und modified

Bodenmaterial: **C**
 Entnahme Stelle: Uetliberg Tunnel
 Klassifikation nach USCS: **SC - SM** In Feld: **SC - SM**
 Plastizitätseigenschaften: Fließgrenze: 20.5 W%
 Ausrollgrenze: 14.97 W%
 Plastizitätsindex: 5.53 W%
 Feinanteil Klassifikation: **CL - ML**
 Spezifisches Gewicht ρ_s : 2.74 g/cm³

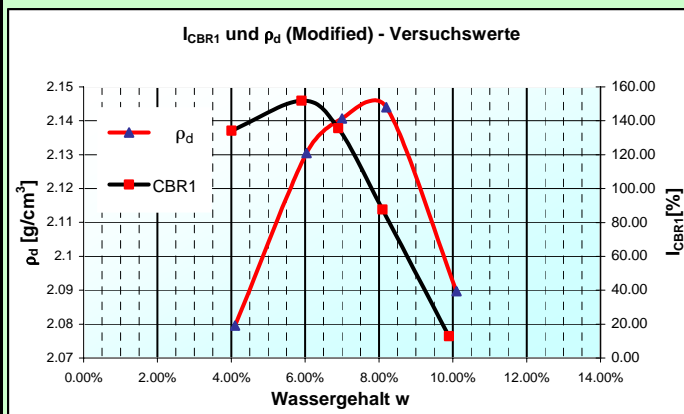
3. Messserie A3 (CBR - Standard)



W _a CBR1	W _a ρ_d	I _{CBR1} [%]	ρ_d	
4.90%	4.90%	35.81	1.91	g/cm ³
7.10%	6.90%	39.26	1.97	g/cm ³
9.10%	8.90%	36.54	2.02	g/cm ³
10.70%	10.80%	25.18	2.01	g/cm ³
12.40%	11.80%	3.61	1.98	g/cm ³

Optimale Trockendichte ρ_s	2.02	g/cm ³
Optimaler Wassergehalt	9.3	%
Optimaler I _{CBR13}	40	%
Optimaler Wassergehalt	7	%

4. Messserie A4 (CBR - Modified)



W _a CBR1	W _a ρ_d	I _{CBR1} [%]	ρ_d	
4.01%	4.10%	134.15	2.08	g/cm ³
5.90%	6.04%	151.90	2.13	g/cm ³
6.90%	7.00%	135.55	2.14	g/cm ³
8.10%	8.20%	87.58	2.14	g/cm ³
9.90%	10.10%	12.81	2.09	g/cm ³

Optimale Trockendichte ρ_s	2.14	g/cm ³
Optimaler Wassergehalt	8	%
Optimaler I _{CBR14}	152	%
Optimaler Wassergehalt	5.9	%

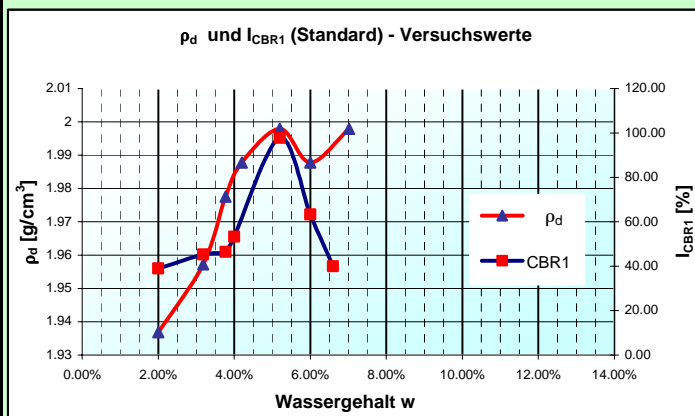
ETH Zürich
 Institut für
 Geotechnik

VSS - Forschung: Verdichtung

Obj.: Beziehung zwischen den Verdichtungswerten AASHTO standard und modified

Bodenmaterial: **D**
 Entnahme Stelle: Recycling Material
 Klassifikation nach USCS: Gebrauchtes Material: **GP - GC** Im Feld: **GP - GC**
 Plastizitätseigenschaften: Fließgrenze: 17.9 W%
 Ausrollgrenze: 14.1 W%
 Plastizitätsindex: 3.8 W%
 Feinanteil Klassifikation: **ML**
 Spezifisches Gewicht ρ_s : 2.58 g/cm³

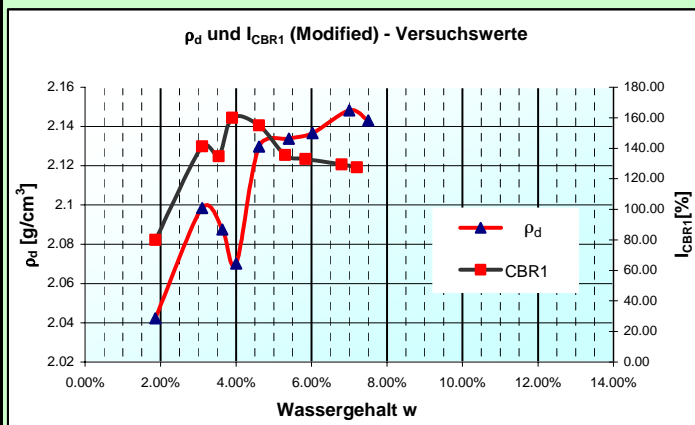
1. Messserie A1 (AASHTO - Standard)



w_a CBR1	w_a ρ_d	I_{CBR1} [%]	ρ_d	
2.00%	2.00%	39.00	1.94	g/cm ³
3.18%	3.18%	45.30	1.96	g/cm ³
3.77%	3.77%	46.44	1.98	g/cm ³
4.00%	4.20%	53.37	1.99	g/cm ³
5.20%	5.20%	97.77	2	g/cm ³
6.00%	6.00%	63.36	1.99	g/cm ³
6.60%	7.02%	40.03	2	g/cm ³

Optimale Trockendichte ρ_1	2	g/cm ³
Optimaler Wassergehalt	7	%
Optimaler I_{CBR11}	97.8	%
Optimaler Wassergehalt	5.2	%

2. Messserie A2 (AASHTO - Modified)



w_a CBR1	w_a ρ_d	I_{CBR1} [%]	ρ_d	
1.86%	1.86%	80.00	2.04	g/cm ³
3.10%	3.10%	141.18	2.1	g/cm ³
3.54%	3.64%	134.75	2.09	g/cm ³
3.90%	4.00%	159.93	2.07	g/cm ³
4.61%	4.61%	155.00	2.13	g/cm ³
5.30%	5.40%	135.50	2.13	g/cm ³
5.84%	6.03%	132.9	2.14	g/cm ³
6.80%	7.00%	129.45	2.15	g/cm ³
7.20%	7.50%	127.50	2.14	g/cm ⁴

Optimale Trockendichte ρ_2	2.15	g/cm ³
Optimaler Wassergehalt	7	%
Optimaler I_{CBR12}	160	%
Optimaler Wassergehalt	4	%

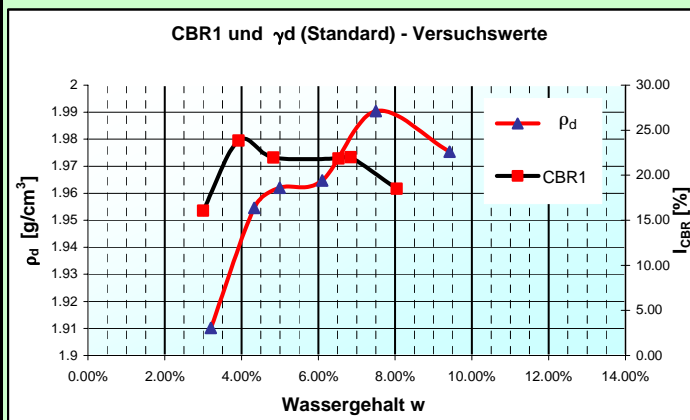
ETH Zürich
 Institut für
 Geotechnik

VSS - Forschung: Verdichtung

Obj.: Beziehung zwischen den Verdichtungswerten AASHTO standard und modified

Bodenmaterial: **D**
 Entnahme Stelle: **Recycling Material**
 Klassifikation nach USCS: **GP - GC** Im Feld: **GP - GC**
 Plastizitätseigenschaften: **Gebrauchtes Material:** Fließgrenze: 17.9 W%
 Ausrollgrenze: 14.1 W%
 Plastizitätsindex: 3.8 W%
 Feinanteil Klassifikation: **ML**
 Spezifisches Gewicht ρ_s : 2.58 g/cm³

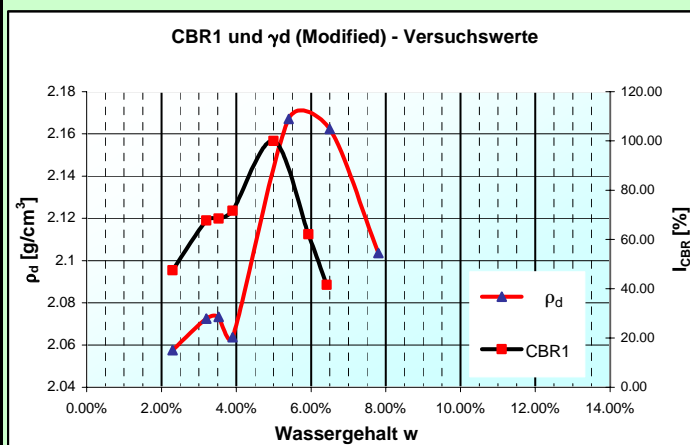
3. Messserie A3 (CBR - Standard)



W _a CBR1	W _a ρ_d	I _{CBR1} (%)	ρ_d	
3.00%	3.20%	16.05	1.91	g/cm ³
3.92%	4.33%	23.85	1.95	g/cm ³
4.83%	4.99%	21.98	1.96	g/cm ³
6.53%	6.10%	21.86	1.96	g/cm ³
6.84%	7.50%	22.00	1.99	g/cm ³
8.04%	9.42%	18.51	1.98	g/cm ³

Optimale Trockendichte ρ_3	1.99	g/cm ³
Optimaler Wassergehalt	7.5	%
Optimaler I _{CBR13}	24	%
Optimaler Wassergehalt	3.9	%

4. Messserie A4 (CBR - Modified)



W _a CBR1	W _a ρ_d	I _{CBR1} (%)	ρ_d	
2.30%	2.30%	47.46	2.06	g/cm ³
3.20%	3.20%	67.64	2.07	g/cm ³
3.53%	3.53%	68.53	2.07	g/cm ³
3.90%	3.90%	71.66	2.06	g/cm ³
5.00%	5.40%	100.06	2.17	g/cm ³
5.93%	6.50%	62.12	2.16	g/cm ³
6.42%	7.80%	41.52	2.1	g/cm ³

Optimale Trockendichte ρ_4	2.18	g/cm ³
Optimaler Wassergehalt	5.6	%
Optimaler I _{CBR14}	100	%
Optimaler Wassergehalt	5	%

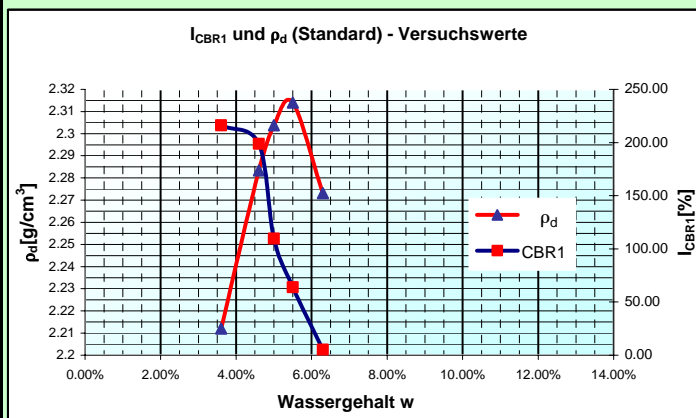
ETH Zürich
 Institut für
 Geotechnik

VSS - Forschung: Verdichtung

Obj.: Beziehung zwischen den Verdichtungswerten AASHTO standard und modified

Bodenmaterial: **E**
 Entnahme Stelle: Kiesgrube Bülach
 Klassifikation nach USCS: **GP** Im Feld: **GP**
 Plastizitätseigenschaften: Fließgrenze: 15.2 W%
 Ausrollgrenze: 10.46 W%
 Plastizitätsindex: 4.74 W%
 Feinanteil Klassifikation: **CL - ML**
 Spezifisches Gewicht ρ_s : 2.73 g/cm³

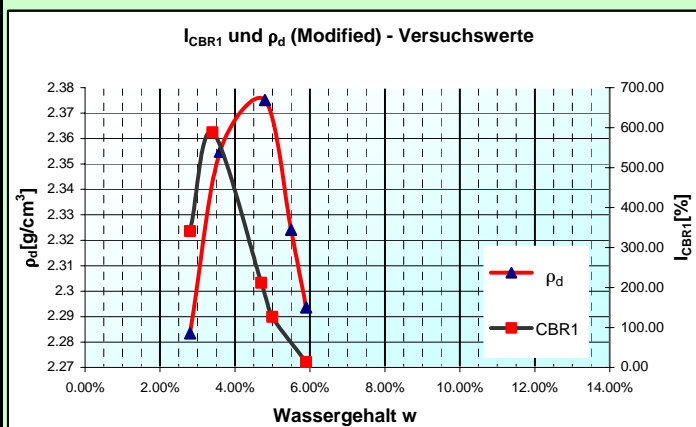
1. Messserie A1 (AASHTO - Standard)



W _a CBR1	W _a ρ _d	I _{CBR1} [%]	ρ _d	
3.60%	3.60%	216.23	2.21	g/cm ³
4.60%	4.60%	198.68	2.28	g/cm ³
5.00%	5.00%	109.74	2.3	g/cm ³
5.50%	5.50%	63.93	2.31	g/cm ³
6.30%	6.30%	5.38	2.27	g/cm ³

Optimale Trockendichte ρ ₁	2.31	g/cm ³
Optimaler Wassergehalt	5.5	%
Optimaler I _{CBR11}	225	%
Optimaler Wassergehalt	3.6	%

2. Messserie A2 (AASHTO - Modified)



W _a CBR1	W _a ρ _d	I _{CBR1} [%]	ρ _d	
2.80%	2.80%	341.32	2.28	g/cm ³
3.40%	3.60%	588.10	2.35	g/cm ³
4.70%	4.80%	212.00	2.38	g/cm ³
5.00%	5.50%	126.80	2.32	g/cm ³
5.90%	5.90%	13.44	2.29	g/cm ³

Optimale Trockendichte ρ ₂	2.38	g/cm ³
Optimaler Wassergehalt	4.7	%
Optimaler I _{CBR12}	600	%
Optimaler Wassergehalt	3.4	%

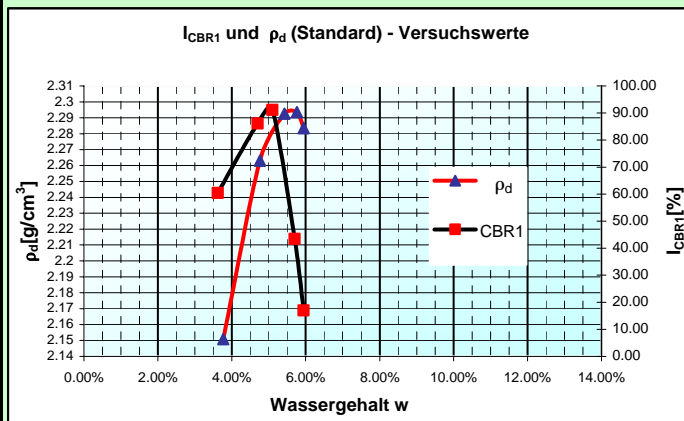
ETH Zürich
 Institut für
 Geotechnik

VSS - Forschung: Verdichtung

Obj.: Beziehung zwischen den Verdichtungswerten AASHTO standard und modified

Bodenmaterial: **E**
 Entnahme Stelle: Kiesgrube Bülach
 Klassifikation nach USCS: **GP** Im Feld: **GP**
 Plastizitätseigenschaften: Fließgrenze: 15.2 W%
 Ausrollgrenze: 10.46 W%
 Plastizitätsindex: 4.74 W%
 Feinanteil Klassifikation: **CL - ML**
 Spezifisches Gewicht ρ_s : 2.73 g/cm³

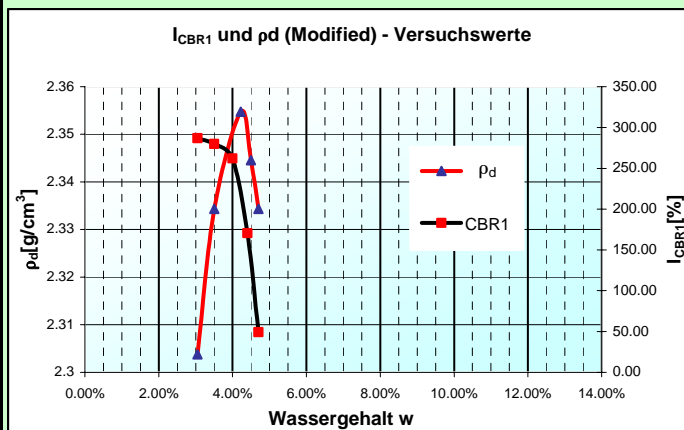
3. Messserie A3 (CBR - Standard)



W _a CBR1	W _a ρ_d	I _{CBR1} [%]	ρ_d	
3.62%	3.77%	60.48	2.15	g/cm ³
4.70%	4.76%	86.13	2.26	g/cm ³
5.10%	5.42%	91.16	2.29	g/cm ³
5.70%	5.76%	43.41	2.29	g/cm ³
5.94%	5.94%	16.96	2.28	g/cm ³

Optimale Trockendichte ρ_3	2.29	g/cm ³
Optimaler Wassergehalt	5.6	%
Optimaler I _{CBR13}	91.2	%
Optimaler Wassergehalt	5.2	%

4. Messserie A4 (CBR - Modified)



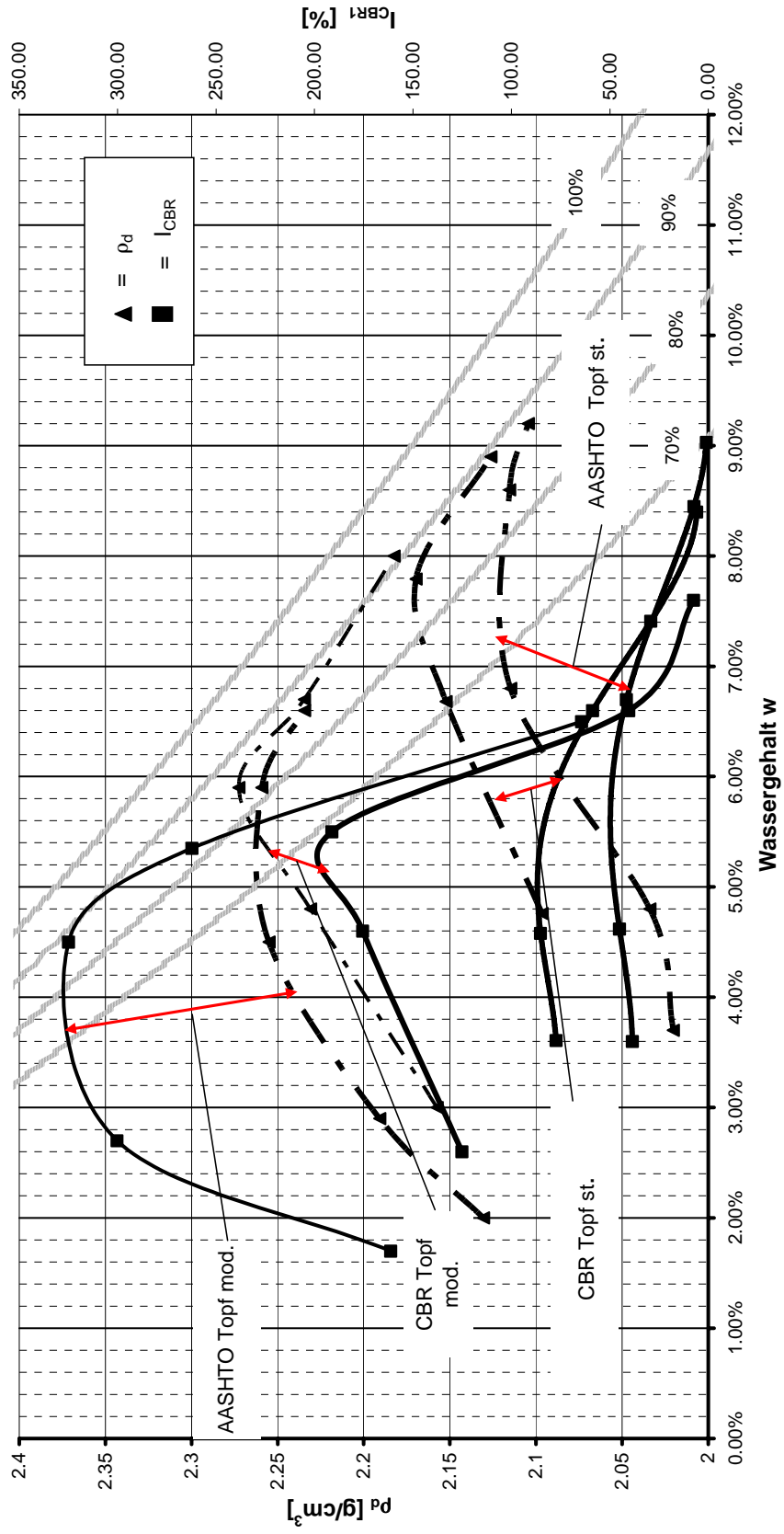
W _a CBR1	W _a ρ_d	I _{CBR1} [%]	ρ_d	
3.05%	3.05%	286.90	2.3	g/cm ³
3.50%	3.50%	280.00	2.33	g/cm ³
4.00%	4.22%	262.05	2.35	g/cm ³
4.40%	4.50%	170.45	2.34	g/cm ³
4.70%	4.70%	49.17	2.33	g/cm ³

Optimale Trockendichte ρ_4	2.35	g/cm ³
Optimaler Wassergehalt	4.2	%
Optimaler I _{CBR14}	290	%
Optimaler Wassergehalt	2.8	%

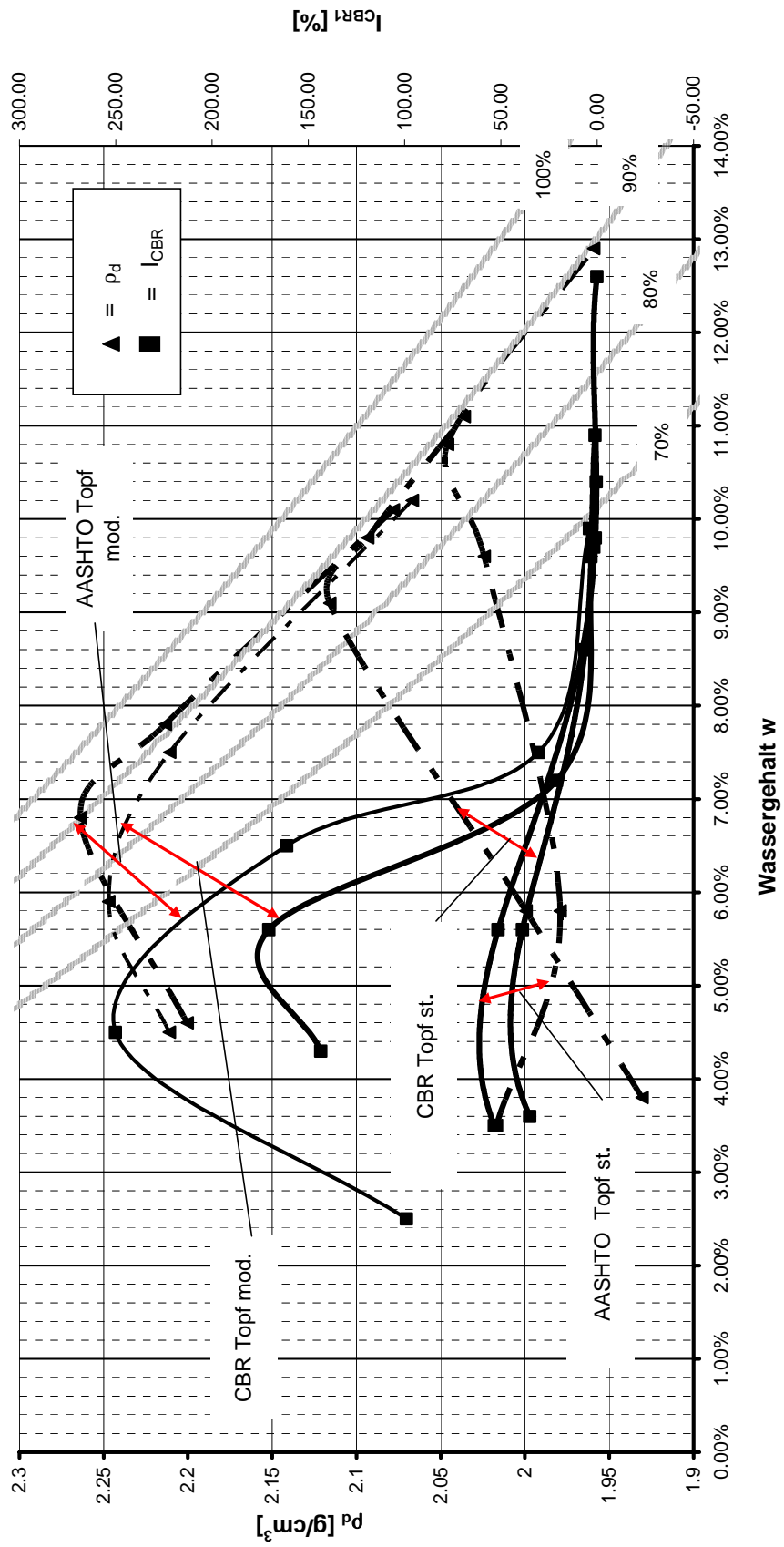
A
 Zürich - West, Filderen
 Im Feld: **GC**

Gebrauchtes Material: **SC**
 Fließgrenze: 21.8 w%
 Ausrollgrenze: 14.44 w%
 Plastizitätsindex: 7.36 w%

Feinanteil Klassifikation: **CL**
 Spezifisches Gewicht ρ_s : 2.7 g/cm³



B
 Bodenmaterial: ETH Moräne
 Entnahme Stelle: **SC**
 Klassifikation nach USCS: Im Feld: **SC**
 Plastizitätseigenschaften: **SC**
 Fließgrenze: 21.2 w%
 Ausrollgrenze: 12.71 w%
 Plastizitätsindex: 8.49 w%
CL
 Feinanteil Klassifikation:
 Spezifisches Gewicht ρ_s : 2.73 g/cm³



C
 Uetliberg Tunnel
 Gebrauchtes Material: **SC - SM**
 Im Feld: **SC - SM**
 Entnahme Stelle: **SC - SM**
 Klassifikation nach USCS: **SC - SM**
 Fließgrenze: 20.5 w%
 Ausrollgrenze: 14.97 w%
 Plastizitätsindex: 5.53 w%
 Feinanteil Klassifikation: **CL - ML**
 Spezifisches Gewicht ρ_s : 2.74 g/cm³

