

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt

Lehrstuhl und Prüfam t für  
Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau

# Bodenverbesserung mit Recyclingmaterial aus Bauschutt

Christoph Henzinger

Vollständiger Abdruck der von der Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Roberto Cudmani

Prüfende der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Norbert Vogt
2. Prof. Dr.techn. Dietmar Adam
3. Prof. Dr.-Ing. Karl Josef Witt

Die Dissertation wurde am 13.09.2016 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt am 24.05.2017 angenommen.

## **Kurzzusammenfassung**

In Deutschland fallen jährlich große Mengen an mineralischen Abfällen aus Aushub-, Bau- oder Rückbaumaßnahmen an. Während aber das Recycling von nicht gefährlichen Bau- und Abbruchabfällen bereits weit fortgeschritten ist, wird immer noch ein großer Teil der anfallenden Bodenaushubmaterialien verfüllt oder deponiert. Typischerweise werden feinkörnige Böden zum Beispiel dann abgelagert, wenn sie aufgrund zu hoher Wassergehalte schlechte bautechnische Eigenschaften aufweisen. Die vorliegende Arbeit zeigt eine innovative Möglichkeit zur Verbesserung der Eigenschaften solcher Böden auf. Dabei wird der nasse Boden durch Einmischung eines mineralischen Reststoffes erdbautechnisch verarbeitbar gemacht. Da das Zugabe-Material als Nebenprodukt bei der Herstellung von groben RC-Körnungen für den Straßenoberbau anfällt (der feine Anteil des gebrochenen Materials, Vorabsiebmaterial genannt), ergibt sich aus der Verwendung zur Bodenverbesserung ein Synergieeffekt im Sinne einer effektiven Erhöhung der Recyclingquote beider Materialien. In dieser Arbeit werden dieses Verfahren zur Bodenverbesserung und das erdbautechnische Verhalten der daraus entstehenden Mischungen anhand von Ergebnissen umfangreicher Reihenuntersuchungen aus bodenmechanischer Sicht beschrieben. Die praktische Durchführbarkeit des Verfahrens wird anhand eines großmaßstäblichen Versuches verdeutlicht. Mit Hilfe eines mathematischen Modells zur Entwicklung der Verdichtungseigenschaften werden die aus den Versuchen ableitbaren Erkenntnisse analysiert und verständlich gemacht. Abschließend werden Überlegungen zur Wirtschaftlichkeit des Verfahrens im Vergleich zur Bodenverbesserung mit Bindemitteln vorgestellt.

## **Summary**

Large quantities of mineral waste from excavation, construction or demolition works are generated in Germany annually. While recycling of non-hazardous construction and demolition waste has already progressed to a certain point, a considerable amount of (natural) excavation materials is still being landfilled and deposited. Fine-grained soils with in situ water contents above the optimum compaction water content generally show poor engineering properties. Therefore, their properties need to be improved by soil treatment or they have to be discarded. This work illustrates the use of a by-product from the production of recycled aggregates from demolition waste (the fine fraction of the crushed material, named pre-screen material) for the improvement of soft, fine-grained soils, combining both types of residual materials. The use of this material for the improvement of soils generates a synergy effect by simultaneously and effectively increasing the recycling quota of both materials. The focus of this work lies on the improvement effect and the engineering behavior of the resulting mixtures from the standpoint of soil mechanics. Insights are gained by evaluating test results of a thorough laboratory study and by the use of a mathematical model concerning the development of the compaction characteristics. The technical viability of this improvement measure on site is illustrated by a field test. In a concluding step considerations dealing with the economical aspects of such improvement measures are presented.

---

<b>Inhalt</b>	<b>Seite</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Ressourcenschonung im Erdbau	1
1.2 Relevanz der relevanten Stoffströme	3
1.3 Rahmen dieser Arbeit	4
<b>2 Rahmenbedingungen und Stand der Technik</b>	<b>7</b>
2.1 Umwelttechnische Rahmenbedingungen	7
2.2 Stand der Technik	7
<b>3 Bautechnische Grundlagen</b>	<b>9</b>
3.1 Bodenverdichtung im Erdbau	9
3.2 Tragverhalten verdichteter Böden	12
3.3 Bodenbehandlungsmaßnahmen	17
3.4 Korndichte und Kornrohdichte	18
3.5 Beurteilung des Luftporenanteils	20
3.6 Anforderungen des Erdbaues	21
3.7 Bodenwasser und seine Bewegung	23
3.7.1 Allgemeines	23
3.7.2 Energiebetrachtungen am Bodenwasser	25
3.7.3 Messung von Saugspannungen	27
3.7.4 Wasserbewegung Boden	31
<b>4 Untersuchungen zur erdbautechnischen Eignung des Verfahrens</b>	<b>38</b>
4.1 Allgemeines	38
4.2 Versuchsmaterialien	40
4.2.1 Feinkörnige Böden	40
4.2.2 Zugabe-Material	41
4.3 Versuchsdurchführung	45
4.4 Untersuchungsprogramm	48
4.5 Zusammenfassende Auswertung	52
4.5.1 Ausmaß der Verbesserung bei feinkörnigen Böden (FF1)	52
4.5.2 Verdichtungseigenschaften der entstehenden Mischungen (FF2)	59

---

4.5.3	Tragfähigkeit der entstehenden Mischungen (FF3)	64
4.5.4	Einfluss der Maßnahme auf weitere bautechnische Kennwerte (FF4)	68
<b>5</b>	<b>Großmaßstäbliche Versuche</b>	<b>74</b>
5.1	Allgemeines	74
5.2	Untersuchungskonzept und Versuchsmaterialien	74
5.3	Untergrund	76
5.4	Versuche zur Einfräsung und Verdichtung	76
5.5	Zusammenfassende Beurteilung der großmaßstäblichen Versuche	83
<b>6</b>	<b>Modellbildung zum Verbesserungsverhalten</b>	<b>85</b>
6.1	Allgemeines	85
6.2	Wasserbilanz in der entstehenden Mischung	85
6.3	Beschreibung des Modells	86
6.4	Wassergehalt des Zugabe-Materials in der verdichteten Mischung	92
6.5	Trockendichte des Zugabe-Materials in der verdichteten Mischung	97
6.6	Darstellung anhand eines einfachen Beispiels	98
6.7	Möglichkeiten zur praktischen Anwendung des Modells	111
<b>7</b>	<b>Anwendung des Modells auf die eigenen Untersuchungen</b>	<b>114</b>
7.1	Allgemeines	114
7.2	Rückrechnende Analyse eigener Versuchswerte	114
7.2.1	Vorgehen und Datengrundlage	114
7.2.2	Grenzwerte für die Trockendichte des RC-Mix 0/4	114
7.2.3	Grenzwerte für den Wassergehalt des RC-Mix 0/4	115
7.2.4	Rückrechnung von Verdichtungskennwerten	120
7.3	Beispiele zur Anwendung des Modells zur Prognose	126
7.3.1	Allgemeines	126
7.3.2	Prognose des optimalen Wassergehaltes	127
7.3.3	Prognose der Trockendichte im Optimum	129
7.4	Prognosegenauigkeit	132
<b>8</b>	<b>Erdbaupraktische Folgerungen und Empfehlungen</b>	<b>137</b>
8.1	Abschätzung des Verbesserungserfolges bei feinkörnigen Böden	137
8.2	Empfehlungen zur Eignungsprüfung	138

---

8.3	Ablaufschema zur Anwendung des Modells	140
8.4	Anwendung bei feinkörnigen Böden mit Grobkornanteilen	141
8.5	Zur Wahl des Verdichtungsgerätes auf der Baustelle	141
<b>9</b>	<b>Kostenvergleichsrechnung</b>	<b>142</b>
9.1	Allgemeines	142
9.2	Vergleichskonzept	142
9.3	Kalkulationsgrundlagen	143
9.4	Ergebnisse der Vergleichsrechnung	144
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>148</b>
10.1	Zusammenfassung	148
10.2	Ausblick	149
<b>11</b>	<b>Referenzen</b>	<b>151</b>
11.1	Literatur	151
11.2	Gesetze und Vorgaben des Bundes und der Länder	154
11.3	Normen, Richtlinien	155
<b>12</b>	<b>Anhang</b>	<b>157</b>

### Bezeichnungen - Lateinische Buchstaben

Symbol	Einh./Dim.	Benennung										
a	[-]	Parameter für das Modell nach FREDLUND et al. (2011) und FREDLUND & XING (1994)										
$A_M$	[-] od. [%]	Masseanteil des Feinkorns am Boden (für $\rho_{S,Grobkorn} = \rho_{S,Feinkorn}$ )										
$A_{M^*}$	[-]	Masseanteil des Feinkorns am Boden (für $\rho_{S,Grobkorn} \neq \rho_{S,Feinkorn}$ )										
$A_V$	[-]	Kritischer volumetrischer Anteil des groben Kornanteils										
$C(H_m)$	[L <sup>-1</sup> ]	Kapillarkapazität										
CBR	[%]	Tragfähigkeit aus dem Stempeleindrigversuch <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td>CBR<sub>0</sub></td> <td>Tragfähigkeit aus dem Stempeleindrigversuch direkt nach Verdichtung (ohne Nachbehandlung)</td> </tr> <tr> <td>CBR<sub>w</sub></td> <td>Tragfähigkeit aus dem Stempeleindrigversuch nach Wasserlagerung (Nachbehandlung)</td> </tr> </table>	CBR <sub>0</sub>	Tragfähigkeit aus dem Stempeleindrigversuch direkt nach Verdichtung (ohne Nachbehandlung)	CBR <sub>w</sub>	Tragfähigkeit aus dem Stempeleindrigversuch nach Wasserlagerung (Nachbehandlung)						
CBR <sub>0</sub>	Tragfähigkeit aus dem Stempeleindrigversuch direkt nach Verdichtung (ohne Nachbehandlung)											
CBR <sub>w</sub>	Tragfähigkeit aus dem Stempeleindrigversuch nach Wasserlagerung (Nachbehandlung)											
d	[L]	Korndurchmesser										
$D(\theta)$	[L <sup>2</sup> ·T <sup>-1</sup> ]	Isothermischer Diffusionskoeffizient										
$e_0$	[-]	Porenzahl des grobkörnigen Anteils bei lockerster Lagerung										
$E_v$	[M·L <sup>-1</sup> ·T <sup>-2</sup> ]	Verformungsmodul, ermittelt mit dem Lastplattengerät <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td><math>E_{v1}</math></td> <td>Erstbelastungsmodul (statisches Lastplattengerät)</td> </tr> <tr> <td><math>E_{v2}</math></td> <td>Zweitbelastungsmodul (statisches Lastplattengerät)</td> </tr> <tr> <td><math>E_{vd}</math></td> <td>Dynamisches Verformungsmodul (kl. Fallgewichtsgerät)</td> </tr> </table>	$E_{v1}$	Erstbelastungsmodul (statisches Lastplattengerät)	$E_{v2}$	Zweitbelastungsmodul (statisches Lastplattengerät)	$E_{vd}$	Dynamisches Verformungsmodul (kl. Fallgewichtsgerät)				
$E_{v1}$	Erstbelastungsmodul (statisches Lastplattengerät)											
$E_{v2}$	Zweitbelastungsmodul (statisches Lastplattengerät)											
$E_{vd}$	Dynamisches Verformungsmodul (kl. Fallgewichtsgerät)											
H	[L]	Potential des Porenwassers als hydrostatische Druckhöhe <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td><math>H_t</math></td> <td>Gesamtpotential des Porenwassers</td> </tr> <tr> <td><math>H_m</math></td> <td>Matrixpotential des Porenwassers</td> </tr> <tr> <td><math>H_o</math></td> <td>Osmotisches Potential des Porenwassers</td> </tr> <tr> <td><math>H_p</math></td> <td>Druckpotential des Porenwassers</td> </tr> <tr> <td><math>H_g</math></td> <td>Gravitationspotential des Porenwassers</td> </tr> </table>	$H_t$	Gesamtpotential des Porenwassers	$H_m$	Matrixpotential des Porenwassers	$H_o$	Osmotisches Potential des Porenwassers	$H_p$	Druckpotential des Porenwassers	$H_g$	Gravitationspotential des Porenwassers
$H_t$	Gesamtpotential des Porenwassers											
$H_m$	Matrixpotential des Porenwassers											
$H_o$	Osmotisches Potential des Porenwassers											
$H_p$	Druckpotential des Porenwassers											
$H_g$	Gravitationspotential des Porenwassers											
$I_p$	[-] od. [%]	Plastizitätszahl										
$I_c$	[-] od. [%]	Konsistenzzahl <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td><math>\Delta I_c</math></td> <td>Erhöhung der optimal verarbeitbaren Konsistenz des Ausgangsbodens (Verbesserungserfolg)</td> </tr> </table>	$\Delta I_c$	Erhöhung der optimal verarbeitbaren Konsistenz des Ausgangsbodens (Verbesserungserfolg)								
$\Delta I_c$	Erhöhung der optimal verarbeitbaren Konsistenz des Ausgangsbodens (Verbesserungserfolg)											
$I_A$	[-]	Aktivitätszahl nach Skempton										
k	[L·T <sup>-1</sup> ]	Wasserdurchlässigkeitskoeffizient										
$k(\theta)$	[L·T <sup>-1</sup> ]	Koeffizient für die ungesättigte Wasserleitfähigkeit										
l	[L]	Durchströmte Länge										
m	[-]	Parameter für das Modell nach FREDLUND et al. (2011) und FREDLUND & XING (1994)										

$m_d$	[M]	Trockenmasse	<table border="1"> <tbody> <tr> <td><math>m_{d,Boden}</math></td> <td>Trockenmasse des Bodens</td> </tr> <tr> <td><math>m_{d,ZM}</math></td> <td>Trockenmasse des Zugabe-Materials</td> </tr> </tbody> </table>	$m_{d,Boden}$	Trockenmasse des Bodens	$m_{d,ZM}$	Trockenmasse des Zugabe-Materials						
$m_{d,Boden}$	Trockenmasse des Bodens												
$m_{d,ZM}$	Trockenmasse des Zugabe-Materials												
$m_w$	[M]	Feuchtmasse	<table border="1"> <tbody> <tr> <td><math>m_{w,Boden}</math></td> <td>Feuchtmasse des Bodens</td> </tr> <tr> <td><math>m_{w,ZM}</math></td> <td>Feuchtmasse des Zugabe-Materials</td> </tr> </tbody> </table>	$m_{w,Boden}$	Feuchtmasse des Bodens	$m_{w,ZM}$	Feuchtmasse des Zugabe-Materials						
$m_{w,Boden}$	Feuchtmasse des Bodens												
$m_{w,ZM}$	Feuchtmasse des Zugabe-Materials												
$m_W$	[M]	Masse Wasser	<table border="1"> <tbody> <tr> <td><math>m_{W,Boden}</math></td> <td>Masse Wassers im Bodenanteils</td> </tr> <tr> <td><math>m_{W,ZM}</math></td> <td>Masse Wassers im Zugabe-Material</td> </tr> </tbody> </table>	$m_{W,Boden}$	Masse Wassers im Bodenanteils	$m_{W,ZM}$	Masse Wassers im Zugabe-Material						
$m_{W,Boden}$	Masse Wassers im Bodenanteils												
$m_{W,ZM}$	Masse Wassers im Zugabe-Material												
MV	[-]	Mischungsverhältnis der Trockenmassen											
$MV_B$	[-]	Mischungsverhältnis als Basis für eine Prognose											
$n$	[-]	Parameter für das Modell nach FREDLUND et al. (2011) und FREDLUND & XING (1994)											
$n_a$	[-] od. [%]	Luftporenanteil	<table border="1"> <tbody> <tr> <td><math>n_a</math></td> <td>Luftporenanteil gesamt</td> </tr> <tr> <td><math>n_{a,intergranular}</math></td> <td>Intergranularer Luftporenanteil</td> </tr> </tbody> </table>	$n_a$	Luftporenanteil gesamt	$n_{a,intergranular}$	Intergranularer Luftporenanteil						
$n_a$	Luftporenanteil gesamt												
$n_{a,intergranular}$	Intergranularer Luftporenanteil												
$s_{max}$	[L]	Maximale Setzung (kleines Fallgewichtsgerät)											
$u$	[M·L <sup>-1</sup> ·T <sup>-2</sup> ]	Druck											
$v$	[L·T <sup>-1</sup> ]	Filtergeschwindigkeit											
$v_{max}$	[L·T <sup>-1</sup> ]	Maximale Beschleunigung (kleines Fallgewichtsgerät)											
$V_d$	[L <sup>3</sup> ]	Volumen des Anteils von Boden oder Zugabe-Material in der verdichteten Mischung	<table border="1"> <tbody> <tr> <td><math>V_{d,Boden}</math></td> <td>Volumen des Bodenanteils in der verdichteten Mischung</td> </tr> <tr> <td><math>V_{d,ZM}</math></td> <td>Volumen des Zugabe-Materials in der verdichteten Mischung</td> </tr> </tbody> </table>	$V_{d,Boden}$	Volumen des Bodenanteils in der verdichteten Mischung	$V_{d,ZM}$	Volumen des Zugabe-Materials in der verdichteten Mischung						
$V_{d,Boden}$	Volumen des Bodenanteils in der verdichteten Mischung												
$V_{d,ZM}$	Volumen des Zugabe-Materials in der verdichteten Mischung												
$V_P$	[L <sup>3</sup> ]	Porenvolumen	<table border="1"> <tbody> <tr> <td><math>V_{P,Boden}</math></td> <td>Porenvolumen des Bodenanteils</td> </tr> <tr> <td><math>V_{P,ZM}</math></td> <td>Porenvolumen des Zugabe-Materials</td> </tr> </tbody> </table>	$V_{P,Boden}$	Porenvolumen des Bodenanteils	$V_{P,ZM}$	Porenvolumen des Zugabe-Materials						
$V_{P,Boden}$	Porenvolumen des Bodenanteils												
$V_{P,ZM}$	Porenvolumen des Zugabe-Materials												
$V_S$	[L <sup>3</sup> ]	Feststoffvolumen (Feststoffanteil)	<table border="1"> <tbody> <tr> <td><math>V_{S,Feinkorn}</math></td> <td>Feststoffvolumen des Feinkornanteils</td> </tr> <tr> <td><math>V_{S,Grobkorn}</math></td> <td>Feststoffvolumen des Grobkornanteils</td> </tr> <tr> <td><math>V_{S,Boden}</math></td> <td>Feststoffvolumen des Bodenanteils</td> </tr> <tr> <td><math>V_{S,ZM}</math></td> <td>Feststoffvolumen des Zugabe-Materials</td> </tr> </tbody> </table>	$V_{S,Feinkorn}$	Feststoffvolumen des Feinkornanteils	$V_{S,Grobkorn}$	Feststoffvolumen des Grobkornanteils	$V_{S,Boden}$	Feststoffvolumen des Bodenanteils	$V_{S,ZM}$	Feststoffvolumen des Zugabe-Materials		
$V_{S,Feinkorn}$	Feststoffvolumen des Feinkornanteils												
$V_{S,Grobkorn}$	Feststoffvolumen des Grobkornanteils												
$V_{S,Boden}$	Feststoffvolumen des Bodenanteils												
$V_{S,ZM}$	Feststoffvolumen des Zugabe-Materials												
$w_{Boden}$	[-] od. [%]	Wassergehalt des Bodenanteils	<table border="1"> <tbody> <tr> <td><math>w_{Boden(Pr)}</math></td> <td>Optimaler Wassergehalt des unverbesserten Bodens</td> </tr> <tr> <td><math>w_{Boden,0}</math></td> <td>Ausgangswassergehalt des Bodens (vor Mischung)</td> </tr> <tr> <td><math>w_{Boden(Pr),0}</math></td> <td>Optimaler Ausgangswassergehalt des Bodenanteils der Mischung</td> </tr> <tr> <td><math>\Delta w_{Boden(Pr)}</math></td> <td>Erhöhung des optimal verarbeitbaren Wassergehaltes des Bodens</td> </tr> <tr> <td><math>\Delta w_{Boden(UG)}</math></td> <td>Wassergehaltsänderung im Bodenanteil durch Wasserabgabe (= <math>w_{Boden,\infty}</math>)</td> </tr> </tbody> </table>	$w_{Boden(Pr)}$	Optimaler Wassergehalt des unverbesserten Bodens	$w_{Boden,0}$	Ausgangswassergehalt des Bodens (vor Mischung)	$w_{Boden(Pr),0}$	Optimaler Ausgangswassergehalt des Bodenanteils der Mischung	$\Delta w_{Boden(Pr)}$	Erhöhung des optimal verarbeitbaren Wassergehaltes des Bodens	$\Delta w_{Boden(UG)}$	Wassergehaltsänderung im Bodenanteil durch Wasserabgabe (= $w_{Boden,\infty}$ )
$w_{Boden(Pr)}$	Optimaler Wassergehalt des unverbesserten Bodens												
$w_{Boden,0}$	Ausgangswassergehalt des Bodens (vor Mischung)												
$w_{Boden(Pr),0}$	Optimaler Ausgangswassergehalt des Bodenanteils der Mischung												
$\Delta w_{Boden(Pr)}$	Erhöhung des optimal verarbeitbaren Wassergehaltes des Bodens												
$\Delta w_{Boden(UG)}$	Wassergehaltsänderung im Bodenanteil durch Wasserabgabe (= $w_{Boden,\infty}$ )												

$w_{\text{Mischung}}$	[-] od. [%]	Wassergehalt der Mischung / reduzierter Wassergehalt														
<table border="1"> <tr> <td><math>w_{\text{Mischung(Pr)}}</math></td> <td>Optimaler Wassergehalt der Mischung</td> </tr> <tr> <td><math>\Delta w_{\text{F-Mischung(Pr)}}</math></td> <td>Ablesefehler zum optimalen Wassergehalt der Mischung</td> </tr> </table>			$w_{\text{Mischung(Pr)}}$	Optimaler Wassergehalt der Mischung	$\Delta w_{\text{F-Mischung(Pr)}}$	Ablesefehler zum optimalen Wassergehalt der Mischung										
$w_{\text{Mischung(Pr)}}$	Optimaler Wassergehalt der Mischung															
$\Delta w_{\text{F-Mischung(Pr)}}$	Ablesefehler zum optimalen Wassergehalt der Mischung															
$w_{\text{ZM}}$	[-] od. [%]	Wassergehalt im Anteil des Zugabe-Materials														
<table border="1"> <tr> <td><math>w_{\text{ZM}}</math></td> <td>Wassergehalt des Zugabe-Materials in der verdichteten Mischung</td> </tr> <tr> <td><math>w_{\text{ZM,0}}</math></td> <td>Eigenwassergehalt des Zugabe-Materials</td> </tr> <tr> <td><math>w_{\text{ZM(OG-A)}}</math></td> <td>Obergrenze OG-A des Wassergehaltes des Zugabe-Materials</td> </tr> <tr> <td><math>w_{\text{ZM(OG-B)}}</math></td> <td>Obergrenze OG-B des Wassergehaltes des Zugabe-Materials</td> </tr> <tr> <td><math>\Delta w_{\text{ZM}}</math></td> <td>Wasseraufnahme des Zugabe-Materials aus dem Boden</td> </tr> <tr> <td><math>\Delta w_{\text{ZM(UG)}}</math></td> <td>Wassergehaltsänderung im Zugabe-Material durch Wasseraufnahme (= <math>w_{\text{ZM,\infty}}</math>)</td> </tr> <tr> <td><math>\Delta w_{\text{F-ZM}}</math></td> <td>Fehlbetrag des Wassergehaltes des Zugabe-Materials</td> </tr> </table>			$w_{\text{ZM}}$	Wassergehalt des Zugabe-Materials in der verdichteten Mischung	$w_{\text{ZM,0}}$	Eigenwassergehalt des Zugabe-Materials	$w_{\text{ZM(OG-A)}}$	Obergrenze OG-A des Wassergehaltes des Zugabe-Materials	$w_{\text{ZM(OG-B)}}$	Obergrenze OG-B des Wassergehaltes des Zugabe-Materials	$\Delta w_{\text{ZM}}$	Wasseraufnahme des Zugabe-Materials aus dem Boden	$\Delta w_{\text{ZM(UG)}}$	Wassergehaltsänderung im Zugabe-Material durch Wasseraufnahme (= $w_{\text{ZM,\infty}}$ )	$\Delta w_{\text{F-ZM}}$	Fehlbetrag des Wassergehaltes des Zugabe-Materials
$w_{\text{ZM}}$	Wassergehalt des Zugabe-Materials in der verdichteten Mischung															
$w_{\text{ZM,0}}$	Eigenwassergehalt des Zugabe-Materials															
$w_{\text{ZM(OG-A)}}$	Obergrenze OG-A des Wassergehaltes des Zugabe-Materials															
$w_{\text{ZM(OG-B)}}$	Obergrenze OG-B des Wassergehaltes des Zugabe-Materials															
$\Delta w_{\text{ZM}}$	Wasseraufnahme des Zugabe-Materials aus dem Boden															
$\Delta w_{\text{ZM(UG)}}$	Wassergehaltsänderung im Zugabe-Material durch Wasseraufnahme (= $w_{\text{ZM,\infty}}$ )															
$\Delta w_{\text{F-ZM}}$	Fehlbetrag des Wassergehaltes des Zugabe-Materials															
$w^*$	[-] od. [%]	Wassergehalt als Resultat einer Modellprognose														
<table border="1"> <tr> <td><math>w^*_{\text{Mischung(Pr)}}</math></td> <td>Prognostizierter Wert zum optimalen Wassergehalt der Mischung</td> </tr> <tr> <td><math>w^*_{\text{Boden(Pr),0}}</math></td> <td>Prognostizierter opt. Wassergehalt des Bodenanteils der Mischung (prognostizierter Verbesserungserfolg)</td> </tr> <tr> <td><math>\Delta w^*_{\text{F-Mischung(Pr)}}</math></td> <td>Prognosefehler zum optimalen Wassergehalt der Mischung</td> </tr> </table>			$w^*_{\text{Mischung(Pr)}}$	Prognostizierter Wert zum optimalen Wassergehalt der Mischung	$w^*_{\text{Boden(Pr),0}}$	Prognostizierter opt. Wassergehalt des Bodenanteils der Mischung (prognostizierter Verbesserungserfolg)	$\Delta w^*_{\text{F-Mischung(Pr)}}$	Prognosefehler zum optimalen Wassergehalt der Mischung								
$w^*_{\text{Mischung(Pr)}}$	Prognostizierter Wert zum optimalen Wassergehalt der Mischung															
$w^*_{\text{Boden(Pr),0}}$	Prognostizierter opt. Wassergehalt des Bodenanteils der Mischung (prognostizierter Verbesserungserfolg)															
$\Delta w^*_{\text{F-Mischung(Pr)}}$	Prognosefehler zum optimalen Wassergehalt der Mischung															
$w_{\text{L}}$	[-] od. [%]	Wassergehalt an der Fließgrenze														
$w_{\text{P}}$	[-] od. [%]	Wassergehalt an der Ausrollgrenze														
$w_{\text{s}}$	[-]	Parameter für das Modell nach FREDLUND et al. (2011) und FREDLUND & XING (1994)														
$W$	[M·L <sup>2</sup> ·T <sup>-2</sup> ]	Verdichtungsarbeit														
$X$	[-]	Verhältnis der Kornvolumina von Feinkornanteil und Grobkornanteil														

## Bezeichnungen - Griechische Buchstaben

Symbol	Einh./Dim.	Benennung																
$\delta$	[1/%]	Faktor zur Abnahme der Trockendichte des Zugabe-Materials mit steigendem Mischungsverhältnis																
$\theta$	[-]	Volumetrischer Wassergehalt																
$\mu$	[L <sup>2</sup> ·T <sup>-2</sup> ]	Potential des Porenwassers <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td><math>\Delta\mu_c</math></td> <td>Potential aus kapillaren Effekten</td> </tr> <tr> <td><math>\Delta\mu_e</math></td> <td>Potential aus elektrostatischer Anziehung</td> </tr> <tr> <td><math>\Delta\mu_f</math></td> <td>Potential aus Van der Waals'scher Anziehung</td> </tr> <tr> <td><math>\Delta\mu_g</math></td> <td>Gravitationspotential</td> </tr> <tr> <td><math>\Delta\mu_m</math></td> <td>Matrixpotential des Porenwassers</td> </tr> <tr> <td><math>\Delta\mu_o</math></td> <td>Potential aus osmotischen Effekten</td> </tr> <tr> <td><math>\Delta\mu_p</math></td> <td>Druckpotential</td> </tr> <tr> <td><math>\Delta\mu_t</math></td> <td>Gesamtpotential des Porenwassers</td> </tr> </table>	$\Delta\mu_c$	Potential aus kapillaren Effekten	$\Delta\mu_e$	Potential aus elektrostatischer Anziehung	$\Delta\mu_f$	Potential aus Van der Waals'scher Anziehung	$\Delta\mu_g$	Gravitationspotential	$\Delta\mu_m$	Matrixpotential des Porenwassers	$\Delta\mu_o$	Potential aus osmotischen Effekten	$\Delta\mu_p$	Druckpotential	$\Delta\mu_t$	Gesamtpotential des Porenwassers
$\Delta\mu_c$	Potential aus kapillaren Effekten																	
$\Delta\mu_e$	Potential aus elektrostatischer Anziehung																	
$\Delta\mu_f$	Potential aus Van der Waals'scher Anziehung																	
$\Delta\mu_g$	Gravitationspotential																	
$\Delta\mu_m$	Matrixpotential des Porenwassers																	
$\Delta\mu_o$	Potential aus osmotischen Effekten																	
$\Delta\mu_p$	Druckpotential																	
$\Delta\mu_t$	Gesamtpotential des Porenwassers																	
$\rho_a$	[M·L <sup>-3</sup> ]	Scheinbare Kornrohddichte (nach DIN EN 1097-6:2013) <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td><math>\rho_{a,ZM}</math></td> <td>Scheinbare Kornrohddichte des Zugabe-Materials</td> </tr> </table>	$\rho_{a,ZM}$	Scheinbare Kornrohddichte des Zugabe-Materials														
$\rho_{a,ZM}$	Scheinbare Kornrohddichte des Zugabe-Materials																	
$\rho_d$	[M·L <sup>-3</sup> ]	Trockendichte des verdichteten Materials <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td><math>\rho_{d,Mischung}</math></td> <td>Trockendichte der Mischung</td> </tr> <tr> <td><math>\rho_{d,Mischung(Pr)}</math></td> <td>Trockendichte der Mischung im Verdichtungsoptimum</td> </tr> <tr> <td><math>\rho_{d,Boden(Pr)}</math></td> <td>Trockendichte des unverbesserten Bodens im Optimum</td> </tr> <tr> <td><math>\rho_{d,ZM}</math></td> <td>Trockendichte des Zugabe-Materials</td> </tr> <tr> <td><math>\Delta\rho_{d,ZM}</math></td> <td>Änderung der Trockendichte des Zugabe-Materials innerhalb des Intervalls <math>\Delta MV</math></td> </tr> </table>	$\rho_{d,Mischung}$	Trockendichte der Mischung	$\rho_{d,Mischung(Pr)}$	Trockendichte der Mischung im Verdichtungsoptimum	$\rho_{d,Boden(Pr)}$	Trockendichte des unverbesserten Bodens im Optimum	$\rho_{d,ZM}$	Trockendichte des Zugabe-Materials	$\Delta\rho_{d,ZM}$	Änderung der Trockendichte des Zugabe-Materials innerhalb des Intervalls $\Delta MV$						
$\rho_{d,Mischung}$	Trockendichte der Mischung																	
$\rho_{d,Mischung(Pr)}$	Trockendichte der Mischung im Verdichtungsoptimum																	
$\rho_{d,Boden(Pr)}$	Trockendichte des unverbesserten Bodens im Optimum																	
$\rho_{d,ZM}$	Trockendichte des Zugabe-Materials																	
$\Delta\rho_{d,ZM}$	Änderung der Trockendichte des Zugabe-Materials innerhalb des Intervalls $\Delta MV$																	
$\rho_{rd,ZM}$	[M·L <sup>-3</sup> ]	Korndrohddichte (nach DIN EN 1097-6:2013) <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td><math>\rho_{rd,ZM}</math></td> <td>Korndrohddichte des Zugabe-Materials</td> </tr> </table>	$\rho_{rd,ZM}$	Korndrohddichte des Zugabe-Materials														
$\rho_{rd,ZM}$	Korndrohddichte des Zugabe-Materials																	
$\rho_s$	[M·L <sup>-3</sup> ]	Korndichte (nach DIN 18124:2011) <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td><math>\rho_{s,Feinkorn}</math></td> <td>Korndichte des Feinkornanteils</td> </tr> <tr> <td><math>\rho_{s,Grobkorn}</math></td> <td>Korndichte des Grobkornanteils</td> </tr> </table>	$\rho_{s,Feinkorn}$	Korndichte des Feinkornanteils	$\rho_{s,Grobkorn}$	Korndichte des Grobkornanteils												
$\rho_{s,Feinkorn}$	Korndichte des Feinkornanteils																	
$\rho_{s,Grobkorn}$	Korndichte des Grobkornanteils																	
$\rho_w$	[M·L <sup>-3</sup> ]	Dichte des Bodenwassers																
$\rho_{d,Mischung(Pr)}^*$	[M·L <sup>-3</sup> ]	Prognostizierter Wert zur Trockendichte der Mischung																
$\psi$	[M·L <sup>-1</sup> ·T <sup>-2</sup> ]	Saugspannung <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td><math>\psi_m</math></td> <td>Matrixsaugspannung</td> </tr> <tr> <td><math>\psi_o</math></td> <td>Osmotische Saugspannung</td> </tr> <tr> <td><math>\psi_t</math></td> <td>Totale Saugspannung</td> </tr> </table>	$\psi_m$	Matrixsaugspannung	$\psi_o$	Osmotische Saugspannung	$\psi_t$	Totale Saugspannung										
$\psi_m$	Matrixsaugspannung																	
$\psi_o$	Osmotische Saugspannung																	
$\psi_t$	Totale Saugspannung																	
$\psi_{Boden}$	[M·L <sup>-1</sup> ·T <sup>-2</sup> ]	Saugspannung im Bodenanteil <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td><math>\psi_{Boden,0}</math></td> <td>Trockendichte der Mischung</td> </tr> <tr> <td><math>\psi_{Boden,\infty}</math></td> <td>Trockendichte der Mischung im Verdichtungsoptimum</td> </tr> <tr> <td><math>\psi_{Boden(Pr)}</math></td> <td>Trockendichte des unverbesserten Bodens im Optimum</td> </tr> </table>	$\psi_{Boden,0}$	Trockendichte der Mischung	$\psi_{Boden,\infty}$	Trockendichte der Mischung im Verdichtungsoptimum	$\psi_{Boden(Pr)}$	Trockendichte des unverbesserten Bodens im Optimum										
$\psi_{Boden,0}$	Trockendichte der Mischung																	
$\psi_{Boden,\infty}$	Trockendichte der Mischung im Verdichtungsoptimum																	
$\psi_{Boden(Pr)}$	Trockendichte des unverbesserten Bodens im Optimum																	
$\psi_{Mischung}$	[M·L <sup>-1</sup> ·T <sup>-2</sup> ]	Saugspannung in der Mischung <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td><math>\psi_{Mischung(UG),\infty}</math></td> <td>Ausgleichssaugspannung unverdichtet</td> </tr> <tr> <td><math>\psi_{Mischung(V),\infty}</math></td> <td>Ausgleichssaugspannung verdichtet</td> </tr> </table>	$\psi_{Mischung(UG),\infty}$	Ausgleichssaugspannung unverdichtet	$\psi_{Mischung(V),\infty}$	Ausgleichssaugspannung verdichtet												
$\psi_{Mischung(UG),\infty}$	Ausgleichssaugspannung unverdichtet																	
$\psi_{Mischung(V),\infty}$	Ausgleichssaugspannung verdichtet																	

$\psi_r$   $[M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}]$  Residuale Saugspannung, Parameter für das Modell nach FREDLUND et al. (2011) und FREDLUND & XING (1994)

$\psi_{ZM}$   $[M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}]$  Saugspannung im Zugabe-Material

$\psi_{ZM,0}$	Ausgangs-Saugspannung im Zugabe-Material
$\psi_{ZM,\infty}$	Ausgleichs-Saugspannung im Zugabe-Material nach Mischung
$\psi_{ZM}$	Ausgleichs-Saugspannung im Zugabe-Material nach Verdichtung

## 1 Einleitung

### 1.1 Ressourcenschonung im Erdbau<sup>1</sup>

**Allgemeines.** Seit mehreren Jahrzehnten gewinnt das Bestreben zur nachhaltigen Bewirtschaftung des Planeten Erde immer weiter an Dynamik. Nicht zuletzt mit Großereignissen wie der UN-Klimakonferenz im Jahr 2015 in Paris wird versucht dieses abstrakte Ziel für Teilbereiche der „Nachhaltigkeit“ zu konkretisieren und verbindliche Rahmenvorgaben für die Mitgliedsstaaten zu entwickeln. Ein wichtiger Schlüsselfaktor für diese Nachhaltigkeit ist ohne Frage auch der Umgang mit den begrenzten Ressourcen, die uns als Gesellschaft zur Verfügung stehen. Bereits im Jahr 1994 wurde daher in Deutschland das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) als nationale Umsetzung europäischer Richtlinien beschlossen. Darin wurden allgemeine Pflichten und Verantwortlichkeiten für Erzeuger und Besitzer von Abfällen gesetzlich geregelt. Das Gesetz liegt seit dem Jahr 2012 in einer Neufassung vor und wird nun unter dem Kurztitel Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) geführt. Es führt unter §1 folgenden Absatz:

*„Zweck des Gesetzes ist es, die Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen zu fördern und den Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen sicherzustellen.“*

Begleitend dazu hat das Bundeskabinett 2012 das Deutsche Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess) beschlossen. Darin werden die Chancen und Herausforderungen im breiteren Kontext für abiotische Rohstoffe (exklusive fossiler Energieträger) und biotische Rohstoffe (nur bei stofflicher Nutzung) erörtert, Leitideen entwickelt und Handlungsansätze sowie Beispiele dargelegt. Das Programm soll insgesamt einen Orientierungsrahmen für die gesamtgesellschaftliche Anstrengung zur Entwicklung geschlossener Kreisläufe bieten.

**Identifikation von Ressourcenschonungspotentialen im Erdbau.** Deutschlandweit fallen jährlich große Mengen an mineralischen Reststoffen unterschiedlicher Herkunft an, wovon nur ein Teil einer hochwertigen Wiederverwendung und Verwertung zugeführt wird. Das Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (KrWG) regelt in Deutschland unter anderem die Abfallhierarchie und ordnet gemäß §6 Abs. (1) die sonstige Verwertung, Verfüllung und Beseitigung der Rezyklierung nach. Das Gesetz schreibt sehr konkret in §14 Abs. (3) eine Recyclingquote von nicht gefährlichen Bau- und Abbruchabfällen von 70 % bis zum Jahr 2020 vor, nimmt gleichzeitig aber Boden und Steine ohne gefährliche Stoffe, also Bodenaushubmaterial mit dem Abfallschlüssel 17 05 04 nach Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV), davon aus. Des Weiteren unterliegt ein als Ersatz für ein anderes Material zur Verfüllung verwendeter mineralischer Abfall aus Bau- und Abbruchabfällen nicht den Vorgaben für die Recyclingquote. In der Praxis bedeutet dies, dass bei Bauarbeiten anfallendes Bodenmaterial sowie Recyclingmaterial aus

---

<sup>1</sup> Das Kapitel wurde abschnittsweise aus HENZINGER & HEYER (2015) übernommen. Die übernommenen Abschnitte wurden vom Autor verfasst.

Abbrucharbeiten weitgehend verfüllt werden kann, ohne der genannten Quote zu unterliegen.

Dementsprechend stellt sich die Situation bei der Kategorie Boden und Steine auch dar, die einen Großteil des anfallenden mineralischen Abfalles ausmacht und wo immer noch der Hauptanteil zur Verfüllung von Abgrabungen im Tagebau verwendet oder in Deponien beseitigt wird (vgl. DEHOUST et al. 2008 oder KREISLAUFWIRTSCHAFT BAU C/O BUNDESVERBAND BAUSTOFFE – STEINE UND ERDEN e.V. 2011, 2013, 2015)<sup>2</sup>. Es kann dabei davon ausgegangen werden, dass dieses zur Verfüllung und Ablagerung verwendete Boden- und Aushubmaterial häufig geotechnische Eigenschaften aufweist, welche eine direkte Verwertung im Erdbau nicht unmittelbar zulassen. Dazu gehören unter anderem fein- und gemischtkörnige Böden mit einem zu hohen Wassergehalt. Im Vergleich dazu bereits deutlich besser stellt sich die Situation für mineralische Reststoffe der Kategorie der Bau- und Abbruchabfälle dar. Tatsächlich wird ein Großteil des anfallenden Materials dieser Kategorie (ohne gefährliche Stoffe) bereits im Straßen- und Erdbau eingesetzt und damit einer hochwertigen Wiederverwertung zugeführt (vgl. DEHOUST et al. 2008 oder KREISLAUFWIRTSCHAFT BAU C/O BUNDESVERBAND BAUSTOFFE – STEINE UND ERDEN e.V. 2011, 2013, 2015)<sup>3</sup>. Ohne hochwertigen Verwertungsweg verbleibt allerdings nach wie vor der als Vorsiebmaterial bei der Herstellung von Körnungen für den Straßenbau anfallende Anteil < 4 mm (zum Beispiel MÜLLER et al. 2011)<sup>4</sup>.

**Ansatz dieser Arbeit.** Bei der Bewertung einer Maßnahme zur Abfallbewirtschaftung nach KrWG ist nach § 8 Abs. (1) eine im Sinne des Gesetzes möglichst hochwertige Maßnahme vorzuziehen, wobei laut § 6 Abs. (2) auch Aspekte der technischen Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit bewertungsrelevant sind. Nun sind technische Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit grundsätzlich keine unveränderlichen Festgrößen und es ergibt sich die Frage, ob nicht eine weitere Erhöhung der Quote der hochwertigen Wiederverwendung und Verwertung beziehungsweise des Recyclings, nicht nur von Bau- und Abbruchabfällen, sondern auch von Bodenmaterial möglich ist.

Eine Möglichkeit zur ressourceneffizienten Verwendung der beiden beschriebenen mineralischen Reststoffe, die typischerweise im Rahmen von Bautätigkeiten anfallen, wird in dieser Arbeit beschrieben. Es handelt sich dabei um ein Verfahren, das im Erdbau als „Bodenverbesserung“ bezeichnet und zur Verbesserung der Eigenschaften von Böden angewendet wird. Typischerweise ist dies bei zu nassen Böden eine Option, da diese aufgrund ihrer schlechten bautechnischen Eigenschaften sonst deponiert oder abgelagert werden müssten. Die Verbesserung der Eigenschaften wird in solchen Fällen zum Beispiel durch die Einmischung von gebranntem Kalk oder von grobkörnigen Böden erzielt. Im vorgestellten Verfahren wird unter Ausnutzung eines Synergieeffektes der weiche feinkörnige Boden durch Einmischung eines mineralischen Reststoffes aus Bauschutt erdbautechnisch verarbeitbar gemacht: Als Zugabe-Material zur Bodenverbesserung wird der - bei der Herstellung von groben RC-Körnungen für den Straßenoberbau anfallende - Anteil < 4 mm (das sogenannte

---

<sup>2</sup> DEHOUST et al. (2008): S. 32 bis 36; KREISLAUFWIRTSCHAFT BAU C/O BUNDESVERBAND BAUSTOFFE – STEINE UND ERDEN e.V. (2011, 2013, 2015): jeweils S. 7.

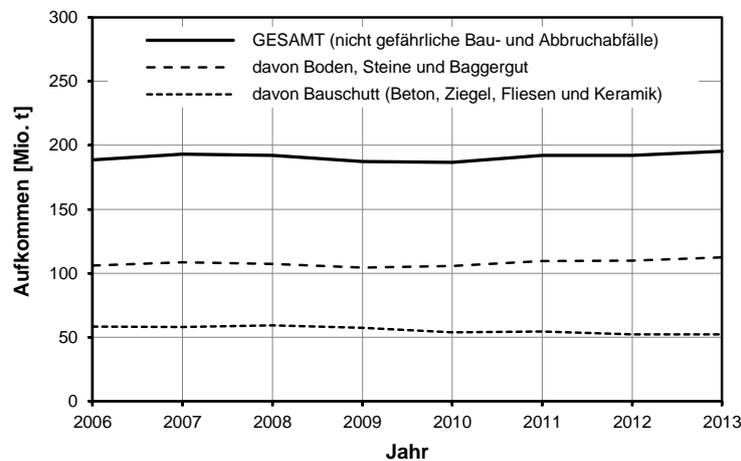
<sup>3</sup> DEHOUST et al. (2008): S. 26 bis 32; KREISLAUFWIRTSCHAFT BAU C/O BUNDESVERBAND BAUSTOFFE – STEINE UND ERDEN e.V. (2011, 2013, 2015): S. jeweils S. 7 und 8.

<sup>4</sup> MÜLLER et al. (2011): S. 30 und 31.

Vorsiebmaterial) verwendet. So kann durch Mischung von zwei Materialien, die anderernfalls als mineralische Abfälle anfallen würden, ein qualifizierter Erdbaustoff hergestellt werden.

## 1.2 Relevanz der relevanten Stoffströme

**Allgemeines.** Wie bereits beschrieben sind für die vorliegende Arbeit vor allem zwei mineralische Reststoffe von Bedeutung: natürliches Material der Kategorie Boden und Steine sowie Bauschutt. Die Stoffströme beider Materialkategorien werden in Deutschland seit längerer Zeit dokumentiert und diese Statistiken sind der Öffentlichkeit zugänglich. So stellt das statistische Bundesamt seit 2006 detaillierte Angaben zum Aufkommen und Verbleib dieser Abfälle zur Verfügung. Aus den Daten geht hervor, dass jährlich fast 200 Mio t. an nicht gefährlichen Bau- und Abbruchabfällen anfallen. Wie in Abb. 1.1 dargestellt, nehmen die Kategorien Boden und Steine (etwa 100 Mio. t) und Bauschutt (etwa 50 Mio. t) davon jeweils die Hauptanteile ein.



**Abb. 1.1: Anfall mineralischer Bauabfälle im Zeitraum 2006-2013 nach Daten des Statistischen Bundesamtes<sup>5</sup>**

**Boden und Steine ohne gefährliche Stoffe.** Im Jahr 2010 fiel in Deutschland eine Menge von ungefähr 105,7 Mio. t nicht gefährlichen mineralischen Abfalls der Kategorie „Boden, Steine und Baggergut“ an (STATISTISCHES BUNDESAMT 2015)<sup>6</sup>. Davon wurde nach dem Monitoring-Bericht des KREISLAUFWIRTSCHAFT BAU C/O BUNDESVERBAND BAUSTOFFE – STEINE UND ERDEN E.V. (2013)<sup>7</sup> für das Jahr 2010 ein Anteil von 82 % (86,7 Mio. t) zur Verfüllung von Abgrabungen verwendet oder deponiert. Nur 18 % des Materials fand eine hochwertige Verwendung im Dammbau, Straßenbau und Deponiebau oder wurde als Recyclingbaustoff eingesetzt. Der aktuelle Bericht für das Jahr 2012 weist für die Kategorie der hochwertigen Verwertung sogar noch niedrigere Werte um etwa 10 % aus (KREISLAUFWIRTSCHAFT BAU C/O BUNDESVERBAND BAUSTOFFE – STEINE UND ERDEN E.V. 2015)<sup>8</sup>.

Es ist eine berechtigte Annahme, dass das so abgelagerte Material entsprechend schlechte erdbautechnische Eigenschaften aufweist, die eine direkte Weiterverwendung oder Vorhal-

<sup>5</sup> STATISTISCHES BUNDESAMT (2015): S 28.

<sup>6</sup> STATISTISCHES BUNDESAMT (2015): S 23.

<sup>7</sup> KREISLAUFWIRTSCHAFT BAU C/O BUNDESVERB. BAUSTOFFE - STEINE UND ERDEN E.V. (2013): S. 7.

<sup>8</sup> KREISLAUFWIRTSCHAFT BAU C/O BUNDESVERB. BAUSTOFFE - STEINE UND ERDEN E.V. (2015): S. 7.

tung bis zur Wiederverwendung technisch und/oder wirtschaftlich nicht sinnvoll erscheinen lassen. Hierzu zählen typischerweise feinkörnige Böden mit zu hohem Wassergehalt.

Diesen Daten zum Aufkommen stehen die Prognosen zur zukünftigen Produktion an hochwertigen Sanden und Kiesen für das Bauwesen gegenüber. Ausgehend vom Jahr 2010, in dem für den Bereich Tiefbau etwa 69,2 Mio. t (30,2 % der Gesamtmenge von 229 Mio. t) dieses Materials hergestellt wurden, weisen Schätzungen für die nächsten Jahrzehnte ungefähr gleichbleibende bis leicht steigende zu produzierende Mengen aus (SCHWARZKOPP et al. 2013)<sup>9</sup>. Wenn also die Nachfrage in absehbarer Zeit nicht deutlich nachlassen wird, dann sollte im Sinne der Schonung von Primärrohstoffen und einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft versucht werden, diese so weit wie möglich durch Material zu decken das in großer Menge als mineralischer Reststoff bereits heute zur Verfügung steht und gegebenenfalls nur durch eine Bodenverbesserungsmaßnahme erdbautechnisch verarbeitbar gemacht werden muss.

**Bauschutt.** Die Menge an produzierbarem Recyclingmaterial aus Bauschutt kann nicht beliebig gesteuert werden und orientiert sich an der Abbruchaktivität (SCHWARZKOPP et al. 2013)<sup>10</sup>. Gemäß den Angaben des Monitoring-Berichtes des KREISLAUFWIRTSCHAFT BAU C/O BUNDESVERBAND BAUSTOFFE – STEINE UND ERDEN E.V. (2013)<sup>11</sup> wurden von der im Jahr 2010 in Deutschland produzierten Menge an Bauschutt (53,1 Mio. t) etwa 78,4 % recycelt. Die restlichen 21,6 % wurden in Verfüllungen und auf Deponien „verwertet“. Die derzeit aktuellsten Daten für das Jahr 2012 zeigen für die Verwertung der Kategorie Recycling einen Wert von 78,3 % (KREISLAUFWIRTSCHAFT BAU C/O BUNDESVERBAND BAUSTOFFE – STEINE UND ERDEN E.V. 2015)<sup>12</sup>. Obwohl also bereits sehr große Mengen des anfallenden Materials einer hochwertigen Verwendung zugeführt werden, besteht auch hier noch weiteres Potential zur Erhöhung der Recyclingquote. Nach MÜLLER et al. (2011)<sup>13</sup> ist vor allem die Sandfraktion (herstellungsbedingt etwa 37 – 53 % des gesamten aufbereiteten Materials) von Bauschuttmaterial für das Stagnieren der Recyclingquote in diesem Bereich verantwortlich. Auch dieses Material wird weiterhin relevant bleiben, wenn man den Angaben von SCHWARZKOPP et al. (2013)<sup>14</sup> folgt, die für die nächsten Jahrzehnte eine gleichbleibende bis leicht steigende Produktion von Recyclingbaustoffen (umfasst auch Recyclingmaterial aus Bauschutt und Mauerwerksbruch) prognostizieren. In der Forschung in Deutschland beginnt gerade die Suche nach Möglichkeiten, auch dieses Vorsiebmaterial einer hochwertigen Verwertung zuzuführen (zum Beispiel MÜLLER et al. 2011).

### 1.3 Rahmen dieser Arbeit

**Beschreibung des Verfahrens.** Die vorliegende Arbeit beschreibt ein innovatives Verfahren zur Verbesserung der bautechnischen Eigenschaften weicher, feinkörniger Böden. Dabei ist es Ziel, die Verarbeitbarkeit eines solchen Bodens durch die Zugabe von trockenem und porösem RC-Sand aus Bauschutt (RC-Mix 0/4 mm) soweit zu verbessern, dass in Summe

---

<sup>9</sup> SCHWARZKOPP et al. (2013): S. 21 und 22.

<sup>10</sup> SCHWARZKOPP et al. (2013): S. 31.

<sup>11</sup> KREISLAUFWIRTSCHAFT BAU C/O BUNDESVERB. BAUSTOFFE - STEINE UND ERDEN E.V. (2013): S. 8.

<sup>12</sup> KREISLAUFWIRTSCHAFT BAU C/O BUNDESVERB. BAUSTOFFE - STEINE UND ERDEN E.V. (2015): S. 8.

<sup>13</sup> MÜLLER et al. (2011): S. 30 und 31.

<sup>14</sup> SCHWARZKOPP et al. (2013): S. 31.

ein qualifizierter Erdbaustoff entsteht, der mit üblichen erdbautechnischen Methoden verdichtet werden kann. Die für die Anwendung des Verfahrens erforderliche Technik (Bodenfräse, Bodenaufbereitungsanlage) entspricht jener üblicherweise zur Bodenbehandlung im Erdbau verwendeten Technik. Beispielhaft ist ein typischer Ausgangsboden und das Mischungsergebnis einer Verbesserung mit RC-Mix 0/4 in Abb. 1.2 in Form des unverdichteten Haufwerks dargestellt. Der leicht plastische Ton im Bild links weist wie dargestellt eine breiige Konsistenz auf. Die Verdichtung eines solchen Bodens ist mit erdbautechnischen Methoden nicht möglich. Durch die Einmischung des trockenen und porösen RC-Sandes können die Eigenschaften soweit verändert werden, dass die Mischung wieder mit herkömmlichen Methoden gehandhabt und verdichtet werden kann. Die augenscheinliche Verbesserung der Konsistenz des Materials ist in Abb. 1.2 (rechte Seite) ersichtlich.



**Abb. 1.2:** Feinkörniger Boden vor und nach Mischung mit RC-Sand aus Bauschutt (RC-Mix 0/4)

Das vorgestellte Verfahren basiert auf den Erkenntnissen von MIFKA & THELEN (2008) sowie BAUMGÄRTEL et al. (2009), die den positiven Einfluss der wassersaugenden Eigenschaften auf Erdbaustoffe erkannten. Eben diese Eigenschaft des RC-Sandes ist auch aus der Verwendung solcher RC-Materialien in der Betontechnik bekannt, wo sie allerdings eher negativ bewertet wird (zum Beispiel NEROTH & VOLLENSCHAAR 2011)<sup>15</sup>.

**Abgrenzung der Thematik.** Die vorliegende Arbeit beschränkt sich ausschließlich auf bautechnische Fragestellungen im Zusammenhang mit diesem Verfahren zur Bodenverbesserung. Der Schwerpunkt liegt auf der Verbesserungswirkung des RC-Materials auf feinkörnige Böden und auf den erdbautechnischen Eigenschaften der entstehenden Mischungen. Die Eignung der untersuchten Materialien (Boden und RC-Material) aus umwelttechnischer Sicht wird dabei vorausgesetzt. Die diesbezüglich relevanten Regelungen sind in den Bundesländern ohnehin unterschiedlich. Viele Bundesländer in Deutschland orientieren sich an der Mitteilung 20 der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA M20), andere haben eigene Regelwerke entwickelt. Erst in Zukunft soll durch die Ersatzbaustoffverordnung eine bundeseinheitliche Regelung erfolgen, diese Verordnung befindet sich allerdings noch in der Entwurfsphase. Aktuell liegt die Mantelverordnung, die unter anderem die Ersatzbaustoffverordnung umfasst, im 3. Arbeitsentwurf vor (MANTELVERORDNUNG 2015). Bereits im 2. Entwurf der Mantelverordnung zur Ersatzbaustoffverordnung aus dem Jahr 2012 wurde jedoch angegeben, dass Schätzungen zufolge der gesamte Anteil am derzeit produzierten RC-Material in

<sup>15</sup> NEROTH & VOLLENSCHAAR (2011): S.170.

einer der darin vorgesehenen Bauweisen verwendet werden kann (MANTELVERORDNUNG 2012)<sup>16</sup>.

**Ziel dieser Arbeit.** Während es der übergeordnete Zweck dieser Arbeit sein mag, einen Beitrag zur Schließung einzelner Stoffkreisläufe im Sinne der Kreislaufwirtschaft zu leisten, so lassen sich die konkreten Ziele folgendermaßen zusammenfassen. Die Arbeit sollte für das beschriebene Verfahren zur Bodenverbesserung klären:

- Unter welchen Bedingungen es angewendet werden kann. Dies umfasst die Klärung von Einschränkungen seitens der zu verbessernden Böden und auch Beeinflussungen, die sich aus den Eigenschaften des Zugabe-Materials selbst ergeben;
- Des Weiteren sollten die zur Beurteilung der erdbautechnischen Eignung relevanten Eigenschaften der verdichteten Mischungen untersucht werden;
- Falls erforderlich, sollten erdbautechnische Anwendungsempfehlungen gegeben werden;
- Erste Überlegungen zur Wirtschaftlichkeit des Verfahrens sollten angestellt werden.

Zusätzlich zu diesen mittels empirischer Verfahren gewinnbaren Erkenntnissen wurde im letzten Schritt ein bestehendes Modell zum Verdichtungsverhalten von Mischböden auf die durch die Bodenverbesserung mit RC-Material entstehenden Mischungen adaptiert. Anhand dieses Modells wurden einerseits die Versuchsergebnisse analysiert. Andererseits wurde das Modell anhand der Ergebnisse aus den Verdichtungsversuchen auf Anwendbarkeit und Prognosegenauigkeit hin überprüft.

---

<sup>16</sup> MANTELVERORDNUNG (2. Entwurf 2012): S. 194.

## 2 Rahmenbedingungen und Stand der Technik<sup>17</sup>

### 2.1 Umwelttechnische Rahmenbedingungen

Die mechanische Bodenverbesserung „zur Erleichterung der Ausführbarkeit von Bauarbeiten“ für Erdarbeiten im Straßenbau ist in ZTV-E StB 09 geregelt. Darin zugelassen ist die Verbesserung durch Einmischung von geeigneten Böden oder Baustoffen, wie „Sand, Kies, Steine, industriell hergestellte Gesteinskörnungen und rezyklierte Baustoffe“. Anforderungen an die bautechnische Eignung (stoffliche Zusammensetzung) des verwendeten Baustoffes sind in TL BuB E-StB 09 formuliert. Eine weitere Anforderung ergibt sich in TL BuB E-StB 09 bezüglich der umweltrelevanten Merkmale. Angaben zu den geforderten Untersuchungen und den sich daraus ergebenden Kategorien sind in TL Gestein-StB 04/07 in Pkt. 2.4 beziehungsweise im zugehörigen Anhang D festgelegt. Je nach Feststoff- und Eluatwerten erfolgt hier eine Einteilung in die Kategorien RC-1 bis RC-3. Diese Kategorien sind vergleichbar den Zuordnungswerten Z 1.1, Z 1.2 und Z 2 der LAGA M 20. Die entsprechenden Anwendungsmöglichkeiten und Verwendungseinschränkungen und Vorgaben sind in der LAGA M 20 selbst gegeben. Das Merkblatt über Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau (M TS E) zeigt Möglichkeiten für technischen Sicherungsmaßnahmen bei hohen Belastungswerten des RC-Materials (z.B. Kategorie RC-3). In Deutschland können länderspezifisch die gesetzlichen Regelungen hierzu abweichen. So existiert in Bayern für die Verwendung von RC-Baustoffen in technischen Bauwerken ein Leitfaden auf Grundlage der TL Gestein-StB 04/07 und den Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für die einzuhaltenen wasserwirtschaftlichen Gütemerkmale beim Einbau von Recyclingbaustoffen im Straßenbau in Bayern (ZTVwwG By 05). Der Leitfaden wurde vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz herausgegeben und regelt derzeit die gültigen Richtwerte (Kategorien RW1 und RW2) und zugehörigen Einbauvorschriften.

Der Vollständigkeit halber ist zu erwähnen, dass für den Sonderfall einer mechanischen Bodenverbesserung mit RC-Baustoffen jeweils die ungünstigere umweltbezogene Kategorie des Bodens oder des beigemischten Materials die Verwertungsmöglichkeit definiert. Eine Vermischung von Materialien unterschiedlicher Kategorien, mit dem Ziel eine höherwertige Verwertungsmöglichkeit herbeizuführen, ist nicht zulässig (vgl. LAGA M 20). In der Regel bestimmt also die Kategorie des RC-Baustoffes die umweltrelevanten Randbedingungen der Verwendung.

### 2.2 Stand der Technik

Ist die Verwendung von RC-Baustoffen im Straßenoberbau noch Gegenstand zahlreicher Veröffentlichungen, so ist im deutschsprachigen Raum über deren Verwendung bei der Bo-

---

<sup>17</sup> Das Kapitel wurde größtenteils aus HENZINGER & HEYER (2015) übernommen. Die übernommenen Abschnitte wurden vom Autor verfasst.

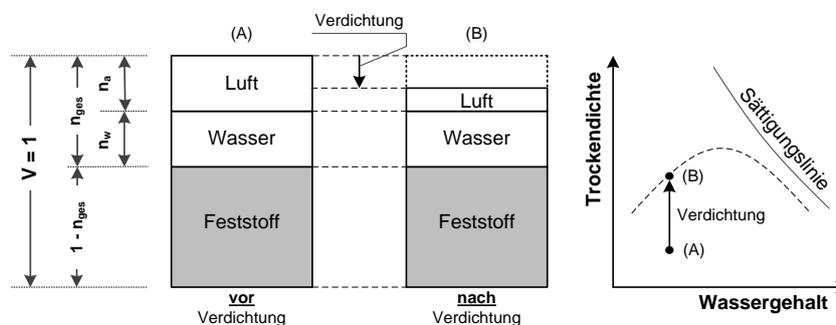
denverbesserung im Erdbau nur wenig bekannt. Auch international fand dieses Thema bis heute keine Beachtung.

So waren ein am Zentrum Geotechnik der TU München durchgeführtes Forschungsprojekt zum Verhalten von Böden mit Fremdbestandteilen (vgl. BAUMGÄRTEL et al. 2009) und ein Bericht von MIFKA & THELEN (2008) bezüglich einer Baumaßnahme bei Koblenz Anstoß und Basis für die durchgeführten Untersuchungen. Im Bericht von MIFKA & THELEN (2008) wird über die Verbesserung eines Sand-Schluff-Gemisches mittels Zugabe von RC-Beton (16/32) berichtet. Ziel der Maßnahme war eigentlich die herkömmliche mechanische Bodenverbesserung im Sinne einer Optimierung der Körnungsverteilung durch Einmischung von grobkörnigen Materialien in den Boden (zur Erzielung einer Änderung des Tragverhaltens hin zum tragenden Grobkorngerüst). Bei den Voruntersuchungen wurde zusätzlich dazu allerdings eine Veränderung der Verdichtungskurve in Bezug auf die Trockendichte und den optimalen Wassergehalt des zu verbessernden Sand-Schluff-Gemisches beobachtet. Die Zumischung des porösen Recycling-Baustoffes bewirkte, dass der zu verbessernde Boden auch bei höheren Wassergehalten, allerdings bei sinkender Trockendichte, verdichtet werden konnte.

### 3 Bautechnische Grundlagen

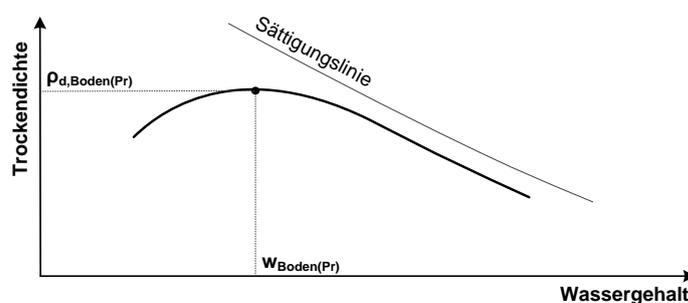
#### 3.1 Bodenverdichtung im Erdbau

**Allgemeines zur Bodenverdichtung.** Da Böden in der Natur in der Regel weder trocken noch in vollständig gesättigter Form vorliegen, darf vereinfachend davon ausgegangen werden, dass sie immer ein Drei-Phasensystem aus Feststoff, Wasser und Luft bilden. Bei der Bodenverdichtung erfolgt die mechanisch erzwungene Umlagerung der Feststoffpartikel in eine dichtere Lagerung, dabei wird das Verhältnis von Feststoff zu Wasser nicht beeinflusst. Das bedeutet, dass allein der Luftporenanteil durch den Verdichtungsprozess deutlich reduziert wird. Der Vorgang ist schematisch in Abb. 3.1 dargestellt.



**Abb. 3.1:** Schematische Darstellung der Bodenverdichtung

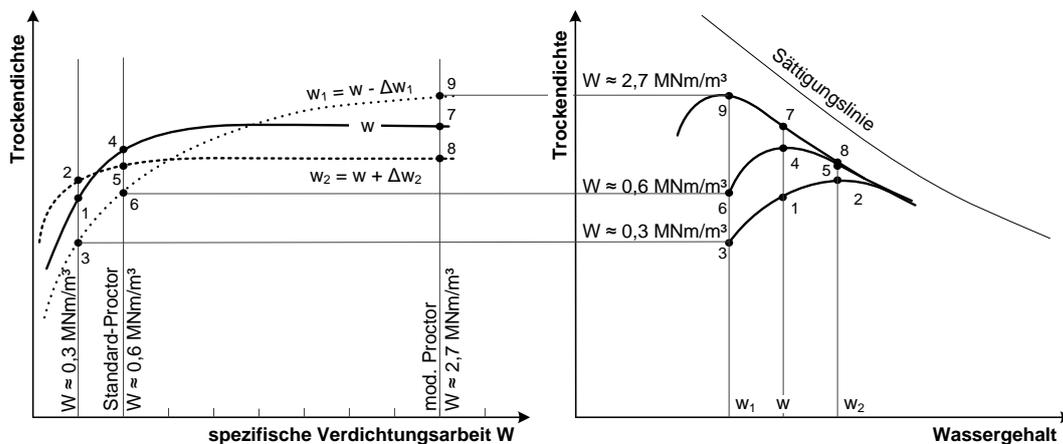
Bei hinsichtlich der Kornverteilung gut abgestuften Böden ergibt sich unter Variation des Verdichtungswassergehaltes eine Kurve mit ausgeprägtem Maximum. Es ist aber praktisch nicht möglich, durch Verdichtung die ganze Luft aus einem Boden zu entfernen, da die Luftdurchlässigkeit nahe der Sättigungskurve stark abfällt. Deshalb verläuft die Verdichtungskurve auf der nassen Seite des Optimums etwa parallel zur Sättigungslinie (der Luftporenanteil bleibt mit steigendem Wassergehalt dabei nahezu konstant). Vor allem eng gestufte grobkörnige Böden ( $U < 5$ ) weisen nur bedingt eine Abhängigkeit der durch Verdichtung erreichbaren Trockendichte vom Wassergehalt auf. Bodenwasser liegt dort hauptsächlich als Hülle um die Körner vor. Die in den vergleichsweise großen Poren nicht haltbare Wassermenge wird durch Schwerkraftentwässerung von selbst abgegeben. (vgl. VOß et al. 1986)<sup>18</sup>



**Abb. 3.2:** Typische Verdichtungskurve eines gut abgestuften Bodens

<sup>18</sup> VOß et al. (1986): S. 17 und 21.

Die einzelnen Feststoffpartikel setzen ihrer Umlagerung je nach Situation (Wassergehalt, Lagerungsdichte, Kornform, etc.) Kräfte entgegen und so muss die zur Verdichtung aufgebrauchte Kraft die entsprechende Widerstandskraft des Bodens überschreiten, um eine Umlagerung zu erreichen. Wie zum Beispiel aus [Abb. 3.3](#) (linke Seite) ersichtlich, nimmt die durch Verdichtung erreichbare Trockendichte mit der eingebrachten spezifischen Verdichtungsarbeit (hier mit „ $W$ “ bezeichnet) nicht linear zu. Der Boden ist mit fortschreitender Verdichtung zunehmend dichter gelagert und setzt der Umlagerung der Einzelkörner einen immer größeren Widerstand entgegen. Die pro Inkrement an eingebrachter Verdichtungsarbeit erreichte weitere Verdichtung des Bodens nimmt (im Zuge der Verdichtung) demnach ab. Für die Verdichtung eines Bodens lassen sich daraus unterschiedliche Kurven jeweils gleicher Verdichtungsenergie darstellen. Siehe dazu [Abb. 3.3](#) (rechte Seite).



**Abb. 3.3: Zusammenhänge bei der Verdichtung (nach LANG et al. 2011, adaptiert)<sup>19</sup>**

Die Verdichtungskurve von Erdbaustoffen wird im Labor üblicherweise mit einer spezifischen Verdichtungsarbeit von  $W \approx 0,6 \text{ MNm/m}^3$  ermittelt (Standard-Proctor). Die so ermittelbare Trockendichte entspricht in etwa jener Trockendichte, die auf der Baustelle mit gängigen Verdichtungsgeräten erreicht werden kann (zum Beispiel VOß et al. 1986)<sup>20</sup>. [Abb. 3.3](#) verdeutlicht dabei ein bestimmendes Merkmal des Verdichtungsprozesses: die Erhöhung der eingebrachten Verdichtungsarbeit führt nur auf der trockenen Seite der Verdichtungskurven zu einem deutlichen Anstieg der Trockendichte. Der Vergleich des „Pfades“ der Punkte 3-6-9 in [Abb. 3.3](#) auf der rechten Seite mit jenem der Punkte 2-5-8 macht dies deutlich. Auf der nassen Seite der Verdichtungskurve liegt die Trockendichte schnell nahe der Sättigungslinie. Dort liegen die vorhandenen Luftporen zunehmend nicht mehr in zusammenhängender Form vor und das weitere Auspressen von Luft durch die Verdichtung wird verhindert (vgl. HILF 1991)<sup>21</sup>.

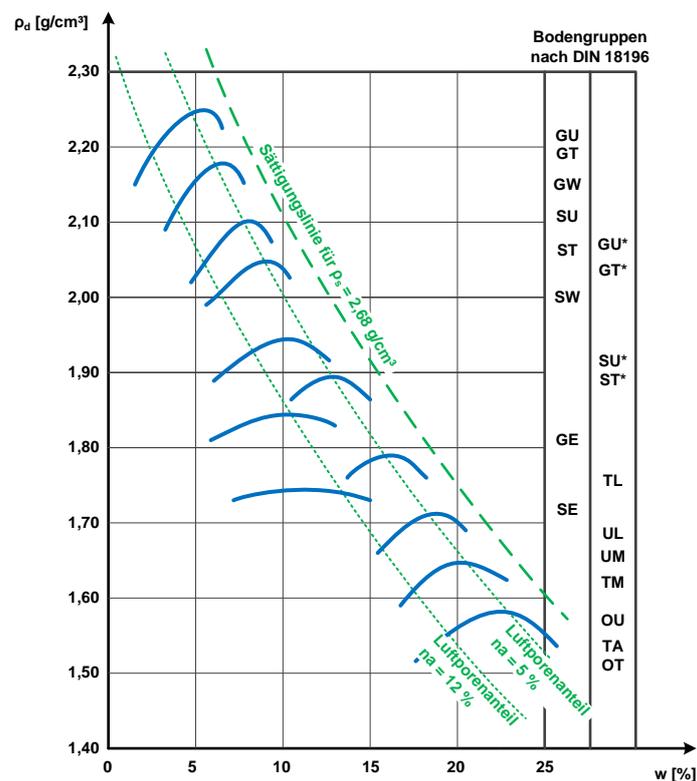
Das Verdichtungsverhalten eines Bodens spielt auch eine wesentliche Rolle bei der Bodenklassifizierung für bautechnische Zwecke nach DIN 18196:2011. Dabei werden Böden grob in feinkörnige, gemischtkörnige und grobkörnige Böden eingeteilt. Die Einteilung erfolgt in der obersten Klassifikationsebene anhand der anteiligen Menge von Feinkorn im Boden. Hintergrund dieser Einteilung ist die Abklärung der Frage, ob das Grobkorn im verdichteten Boden

<sup>19</sup> LANG et al. (2011): S. 38 und 39.

<sup>20</sup> VOß et al. (1986): S. 5.

<sup>21</sup> HILF (1991): S. 254.

ein tragendes Korngerüst ausbilden kann oder ob das Grobkorn eben in einer feinkörnigen Matrix schwimmt (tragendes Grobkorngerüst / tragende Feinkornmatrix). Diese Eigenschaft eines Bodens ist einerseits für das Verdichtungsverhalten und andererseits auch für sein Tragverhalten im verdichteten Zustand von entscheidender Bedeutung. Schwimmt der Grobkornanteil in der feinkörnigen Matrix, so wird die Konsistenz des Feinkornanteils bestimmend sein für das Gesamtverhalten des Bodens. Ist ein tragendes Grobkorngerüst vorhanden und füllt das feine Material nur den Porenraum zwischen den groben Körnern aus, so ist die Trockendichte des Materials der bestimmende Faktor für das Gesamtverhalten. Typische Verdichtungseigenschaften unterschiedlicher Bodengruppen nach DIN 18196:2011 sind für die Verdichtung mit Standard-Proctorenergie in Abb. 3.4 dargestellt.

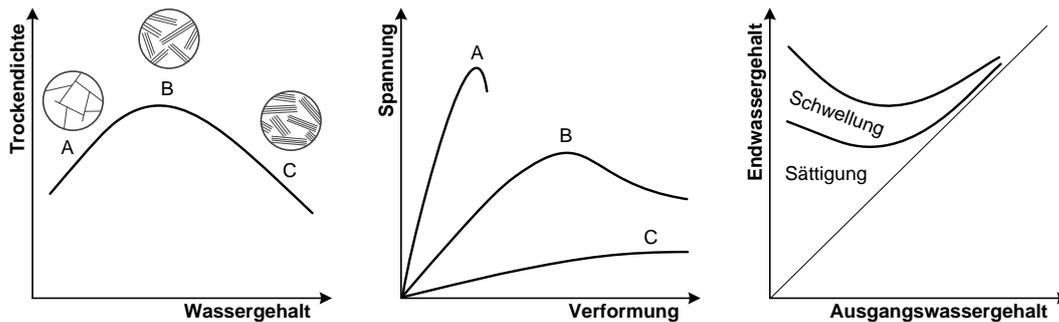


**Abb. 3.4:** Typische Proctorkurven unterschiedlicher Böden nach Soos sowie Voß & Floss (Darstellung nach BAUMGÄRTEL et al. 2009, adaptiert)<sup>22</sup>

**Auswirkung der Verdichtung auf die Bodeneigenschaften feinkörniger Böden.** Ziel einer Bodenverdichtungsmaßnahme im Erdbau ist in der Regel die Erhöhung der Scherfestigkeit und Tragfähigkeit sowie die Reduzierung der Kompressibilität und der Fähigkeit zur Wasseraufnahme (zum Beispiel ROAD RESEARCH LABORATORY 1952)<sup>23</sup>. Dabei macht es vor allem bei feinkörnigen Böden einen deutlichen Unterschied, ob der Boden hinsichtlich des Wassergehalts im Verdichtungsoptimum oder außerhalb des Verdichtungsoptimums verdichtet wird (siehe Abb. 3.5).

<sup>22</sup> BAUMGÄRTEL et al. (2009): S. 51.

<sup>23</sup> ROAD RESEARCH LABORATORY (1952): S. 169.



**Abb. 3.5: Eigenschaften verdichteter Tone (nach INGLES & METCALF 1972, übersetzt)<sup>24</sup>**

In der Regel befindet sich der Maximalwert der undrÄnirten Scherfestigkeit von verdichteten BÖden leicht auf der trockenen Seite des Optimums. Dort bedingt die im Vergleich zum Optimum leicht niedrigere Dichte zwar kleinere übertragbare Reibungskräfte zwischen den Partikeln. Gleichzeitig steigen mit fallendem Sättigungsgrad (also steigendem Abstand von der Sättigungslinie) aber die kapillaren Saugspannungen im Korngerüst an und führen so zur Lage dieses Maximalwertes der Scherfestigkeit (HILF 1991)<sup>25</sup>. Diese Saugspannungen bewirken allerdings auch, dass der Boden Wasser aufnimmt, wenn er die Möglichkeit dazu hat. Das kann nachträglich dazu führen, dass die Tragfähigkeit sinkt und dass verdichtete BÖden mit Anteilen an quellfähigen Tonmineralen je nach Spannungszustand schwellen (vgl. ROAD RESEARCH LABORATORY 1952; VOß et al. 1986 und HILF 1991)<sup>26</sup>. Wird ein Boden zu weit auf der trockenen Seite des Optimums verdichtet, so kann es bei nachträglicher Aufsättigung und entsprechendem Überlagerungsdruck nicht nur zu Schwellungen, sondern auch zu Sackungserscheinungen kommen (zum Beispiel HILF 1991 und SOOS & ENGEL 2008)<sup>27</sup>

### 3.2 Tragverhalten verdichteter BÖden

**Zwischen Feinkornmatrix und Grobkorngerüst.** Der Feinkornanteil hat auf die bautechnischen Eigenschaften eines Bodens einen entscheidenden Einfluss und die Relevanz einer ausgewogenen Mischung aus Fein- und Grobkorn für die Verdichtung und Tragfähigkeit solcher Gemische ist allgemein bekannt. Bei grobkörnigen und manchen gemischtkörnigen BÖden füllt das Feinkorn den Bereich zwischen den groben Körnern aus und bewirkt so eine zusätzliche seitliche Stützung des tragenden Grobkorngerüsts. Überschreitet die Menge an Feinkorn einen bestimmten Anteil im Gemisch, so sind die groben Körner nicht mehr in der Lage, über Berührungspunkte ein tragendes Korngerüst auszubilden und beginnen, im feinkörnigen Boden zu „schwimmen“. Das Bodenverhalten wird in der Folge maßgeblich durch den Feinkornanteil bestimmt. (vgl. KÉZDI 1973)<sup>28</sup>

Die von VOß et al. (1986)<sup>29</sup> vorgestellten Ergebnisse aus Untersuchungen an unterschiedlichen Mischungen aus Fein- und Grobkorn (siehe dazu auch Tab. 3.1) zeigen nicht nur eine

<sup>24</sup> INGLES & METCALF (1972): S. 63 bis 65.

<sup>25</sup> HILF (1991): S. 256.

<sup>26</sup> ROAD RESEARCH LABORATORY (1952): S. 169 und 170; VOß et al. (1986): S. 21 und 22; HILF (1991) S. 309 bis 311.

<sup>27</sup> HILF (1991): S. 258 bis 261; SOOS & ENGEL (2008): S. 147.

<sup>28</sup> KÉZDI (1973): S. 41, 82, 98 und 102.

<sup>29</sup> VOß et al. (1986): S. 23 bis 26.

Abhängigkeit des Verformungsverhaltens von der Zusammensetzung, sondern auch von der Konsistenz des Feinkorns. Bei Feinkornanteilen über 60 M.-% wurde in den vorgestellten Versuchen das Verformungsverhalten hauptsächlich vom Feinkorn bestimmt. Bei Feinkornanteilen unter 15 M.-% war das Bodenverhalten jedenfalls vom Grobkorn bestimmt und somit auch unabhängig von der Konsistenz des Feinkorns. OSTERMAYER (1976)<sup>30</sup> fasst unterschiedliche Quellen zusammen und gibt vereinfachend an, dass bei Gemischen mit Feinkornanteilen ( $< 0,063$  mm) bis zwischen 15 und 25 M.-% ein tragendes Grobkorngerüst für die Lastabtragung sorgt. Darüber steigt die Zusammendrückbarkeit des Gemisches bis zum Feinkornanteil von 30 bis 40 M.-% an, ab dem das Grobkorn im feinkörnigen Anteil zu schwimmen beginnt und nicht mehr in der Lage ist, ein tragendes Korngerüst auszubilden. Die vorgestellten Werte von VOß et al. (1986) und OSTERMAYER (1976) spiegeln sich auch grob in DIN 18196:2011 wieder, in der die Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke geregelt ist.

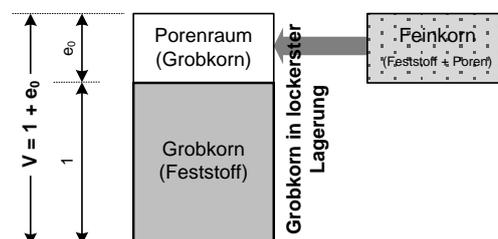
**Tab. 3.1: Verformungsverhalten unterschiedlicher Gemische (nach VOß 1986)<sup>31</sup>**

Gruppe	Kornanteil $A_M$ [M.-%]		Konsistenz $I_c$ des Feinkornanteils (Schluff, Ton)		
	$d < 0,06$ mm	$d > 2$ mm	$I_c \geq 1$	$0,75 \leq I_c < 1$	$I_c \leq 0,75$
1	$A_M < 15$	$A_M \geq 0$	○	○	○
2	$A_M > 15$	$A_M < 30$	□ <sup>1)</sup>	◇	◇
3	$15 < A_M < 40$	$A_M > 30$	○ <sup>1)</sup>	□	◇
4	$40 < A_M < 60$	$A_M > 30$	□ <sup>1)</sup>	◇	◇
5	$A_M > 60$	-	◇ <sup>1)</sup>	◇	◇

Verformungsverhalten bei Plattendruckversuchen:

- wie bei nichtbindigen, grobkörnigen Böden (Sand, Kies, Steine)
- ◇ wie bei bindigen, feinkörnigen Böden (Schluff, Ton)
- Tragfähigkeit im gutverdichteten Zustand zwischen ○ und ◇
- <sup>1)</sup> Zusätzliche Forderung: Luftgehalt  $n_a < 12$  %

**Tragverhalten von Mischungen aus RC-Material und Boden.** KÉZDI (1973)<sup>32</sup> wählte zur Beantwortung der Frage nach dem Tragverhalten eine elegante Herangehensweise. Er definiert am Einheitswürfel über die Porenzahl des grobkörnigen Anteils (der Mischkörnung) bei lockerster Lagerung den kritischen volumetrischen Anteil ( $A_V$ ), bis zu dem das Grobkorn ein Gerüst ausbilden kann (siehe Gleichung (3-1)). Der restliche Porenraum wird gedanklich durch wassergesättigte Feinanteile ausgefüllt (Abb. 3.6).



**Abb. 3.6: Umschlag des Tragverhaltens nach KÉZDI**

Eben dieses Mischungsverhältnis, bei dem die Poren zwischen den groben Körner gänzlich mit Feinkorn gefüllt sind, beschreibt nach diesem Modell die Grenze zwischen dem tragenden Grobkorngerüst und einer tragenden Feinkornmatrix. Liegt der tatsächliche Grobkornan-

<sup>30</sup> OSTERMAYER (1976): S. 2, 4 und 5.

<sup>31</sup> VOß et al. (1986): S. 25.

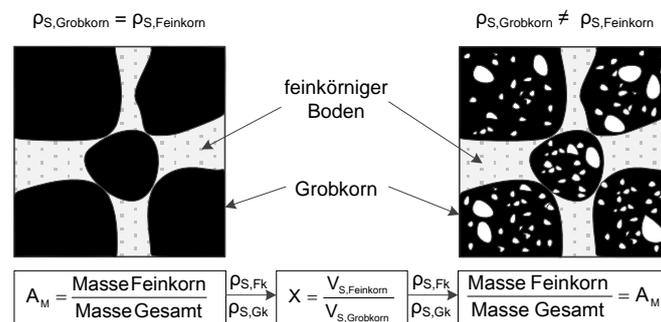
<sup>32</sup> KÉZDI (1973): S. 41.

teil dann unter dem kritischen volumetrischen Anteil ( $A_v$ ), weisen die groben Körner zunehmend weniger Berührungspunkte untereinander auf und es kann sich kein tragendes Korngerüst mehr ausbilden.

$$A_v = \frac{1}{1 + e_0} \quad (3-1)$$

$A_v$	Kritischer volumetrischer Anteil des groben Kornanteils [-]
$e_0$	Porenzahl des grobkörnigen Anteils bei lockerster Lagerung [-]

Obwohl in der Praxis die Einstufung gemäß DIN 18196:2011 oder nach den Angaben von OSTERMAYER (1976)<sup>33</sup> als ausreichend zu erachten ist, führen die Überlegungen von KÉZDI (1973) doch zum Kern der Fragestellung zurück: bei der Beantwortung der Frage, ob sich die groben Körner im verdichteten Boden berühren können und ein tragendes Grobkorngerüst bilden, handelt es sich allgemein um ein geometrisches Problem. Zur Beschreibung der Verhältnisse ist daher das jeweilige Kornvolumen ausschlaggebend. Die für natürliche Böden entwickelten und oben vorgestellten Angaben zur Einordnung des Tragverhaltens basieren auf der grundlegenden Annahme, dass zwischen den volumetrischen und massebezogenen Anteilen von jeweils Grobkorn und Feinkorn der gleiche Zusammenhang besteht. Davon kann wohl vereinfachend ausgegangen werden, wenn Grob- und Feinkorn nahezu dieselbe Korndichte aufweisen. Nun hat die Praxis die näherungsweise Zulässigkeit dieser Annahme für natürliche Böden vielfach bestätigt. Was aber, wenn sich die Korndichten beider Kornklassen deutlich voneinander unterscheiden? Da angenommen werden kann, dass sich die volumetrische Bedingung zur Ausbildung eines tragenden Korngerüsts nicht ändert, können in einem solchen Fall die bekannten Angaben (bezogen auf das Masseverhältnis) umgerechnet werden. Grafisch ist die zu Grunde liegende Logik der Überführung in Abb. 3.7 dargestellt, wobei  $A_M$  den Feinkorn-Masseanteil eines Gemisches darstellt, bei dem die Korndichten von Grob- und Feinkorn identisch sind ( $\rho_{S,Grobkorn} = \rho_{S,Feinkorn}$ ).  $A_{M^*}$  bezeichnet den Feinkorn-Masseanteil eines Gemisches mit unterschiedlichen Korndichten für beide Kornanteile (für  $\rho_{S,Grobkorn} \neq \rho_{S,Feinkorn}$ ). Beiden Werten gleich sind in Abb. 3.7 die volumetrischen Verhältnisse zwischen Grob- und Feinkorn ( $X = V_{S,Feinkorn} / V_{S,Grobkorn}$ ).



**Abb. 3.7:** Überführung des Feinkornanteils  $A_M$  nach  $A_{M^*}$

Formuliert man also die zu einem bestimmten Massenverhältnis  $A_M$  gehörende Bilanz als Produkt der jeweiligen Korndichten und Kornvolumina der jeweiligen Feststoffanteile, erhält man folgende Gleichung (3-2):

<sup>33</sup> OSTERMAYER (1976): S. 2, 4 und 5.

$$A_M = \frac{\rho_{S,Feinkorn} \cdot V_{S,Feinkorn}}{\rho_{S,Feinkorn} \cdot V_{S,Feinkorn} + \rho_{S,Grobkorn} \cdot V_{S,Grobkorn}} \quad (3-2)$$

$A_M$	Masseanteil des Feinkorns am Boden (für $\rho_{S,Grobkorn} = \rho_{S,Feinkorn}$ ) [-]
$\rho_{S,Feinkorn}$	Korndichte des Feinkornanteils [ $M \cdot L^{-3}$ ]
$V_{S,Feinkorn}$	Feststoffvolumen des Feinkornanteils [ $L^3$ ]
$\rho_{S,Grobkorn}$	Korndichte des Grobkornanteils [ $M \cdot L^{-3}$ ]
$V_{S,Grobkorn}$	Feststoffvolumen des Grobkornanteils [ $L^3$ ]

Dass es sich dabei nicht um eine volumetrische Bilanz am Bodenelement im Sinne von KÉZDI (1973) handelt (der Feinkornanteil wird hier ohne den intergranularen Porenanteil bilanziert), ist in dieser Formulierung nicht von Bedeutung. Ohne Kenntnis weiterer Zustandsgrößen des Grobkornanteils und Feinkornanteils ist Gleichung (3-2) lediglich eine mathematische Umformulierung des gegebenen Massenverhältnisses  $A_M$ .

Nach Vereinfachung und Umformung ergibt sich aus Gleichung (3-2) die Gleichung (3-3) zur Überführung von Angaben im Masseverhältnis ( $A_M$ ) in ein Volumenverhältnis  $X$ . Dabei wurde die für natürliche Böden in einer ersten Näherung sinnvolle Annahme berücksichtigt, dass die Korndichte des Grobkornanteils jener des Feinkornanteils entspricht ( $\rho_{S,Grobkorn} = \rho_{S,Feinkorn}$ ). In der allgemeinen Verwendung des Verhältniswertes  $A_M$  (pauschale, vereinfachte Angabe von Masseverhältnissen zur Entscheidung über das Verdichtungs- und Tragverhalten, zum Beispiel nach DIN 18196:2011) eines Bodens wird diese Annahme ohnehin stillschweigend hingenommen.

$$\frac{V_{S,Feinkorn}}{V_{S,Grobkorn}} = X = \frac{A_M}{(1 - A_M)} \quad (3-3)$$

$X$	Verhältnis der Kornvolumina von Feinkornanteil und Grobkornanteil [-]
$A_M$	Masseanteil des Feinkorns am Boden (für $\rho_{S,Grobkorn} = \rho_{S,Feinkorn}$ ) [-]
$V_{S,Feinkorn}$	Kornvolumen des Feinkornanteils [ $L^3$ ]
$V_{S,Grobkorn}$	Kornvolumen des Grobkornanteils [ $L^3$ ]

Somit ist die Angabe zum bekannten Feinkornanteil eines Materials mit gleichen Korndichten von Feinkorn und Grobkorn  $A_M$  in ein Volumenverhältnis  $X$  übersetzt. Ein ansonsten identisches Material mit unterschiedlichen Korndichten von Grob- und Feinkorn wird den Umschlag im Tragverhalten beim selben volumetrischen Verhältnis zeigen (zum Beispiel von Feinkornmatrix auf tragendes Korngerüst) und nicht beim selben Masse-Verhältnis. Siehe dazu auch [Abb. 3.7](#). Leitet man nun die allgemeine Form der Gleichung (3-3) aus Gleichung (3-2) für eine solche Mischung ab, erhält man:

$$\frac{V_{S,Feinkorn}}{V_{S,Grobkorn}} = X = \frac{A_{M^*} \cdot \rho_{S,Grobkorn}}{(1 - A_{M^*}) \cdot \rho_{S,Feinkorn}} \quad (3-4)$$

$X$	Verhältnis der Kornvolumina von Feinkornanteil und Grobkornanteil [-]
$A_{M^*}$	Masseanteil des Feinkorns am Boden (für $\rho_{S,Grobkorn} \neq \rho_{S,Feinkorn}$ ) [-]
$V_{S,Feinkorn}$	Kornvolumen des Feinkornanteils [ $L^3$ ]
$V_{S,Grobkorn}$	Kornvolumen des Grobkornanteils [ $L^3$ ]

Durch Gleichsetzung von Gleichung (3-3) und Gleichung (3-4) ergibt sich die Gleichung zur Umrechnung zwischen  $A_M$  und  $A_{M^*}$  zu:

$$A_{M^*} = \frac{A_M \cdot \rho_{S, \text{Feinkorn}}}{A_M \cdot (\rho_{S, \text{Feinkorn}} - \rho_{S, \text{Grobkorn}}) + \rho_{S, \text{Grobkorn}}} \quad (3-5)$$

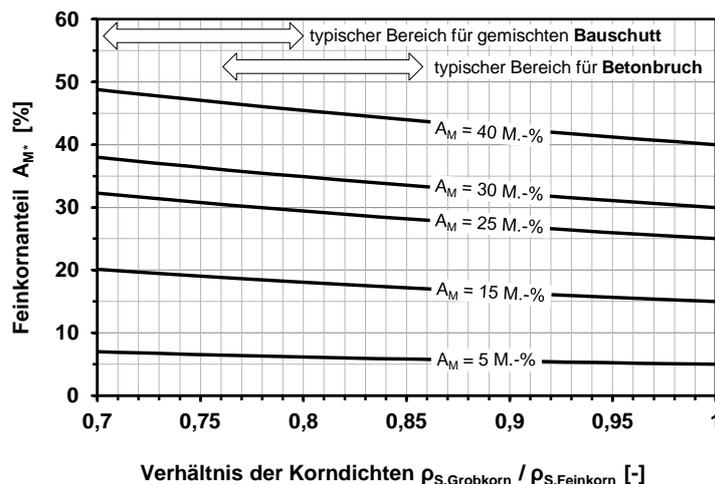
$A_{M^*}$	Masseanteil des Feinkorns am Boden (für $\rho_{S, \text{Grobkorn}} \neq \rho_{S, \text{Feinkorn}}$ ) [-]
$A_M$	Masseanteil des Feinkorns am Boden (für $\rho_{S, \text{Grobkorn}} = \rho_{S, \text{Feinkorn}}$ ) [-]
$\rho_{S, \text{Feinkorn}}$	Korndichte des Feinkornanteils [ $M \cdot L^{-3}$ ]
$\rho_{S, \text{Grobkorn}}$	Korndichte des Grobkornanteils [ $M \cdot L^{-3}$ ]

Beispielhaft werden nachfolgend die Angaben nach OSTERMAYER (1976)<sup>34</sup> und DIN 18196:2011 umgerechnet. Die dazu verwendeten Werte zu den Feinkornanteilen ( $A_M$ ) sind in Tab. 3.2 zusammengefasst.

**Tab. 3.2:** Literaturangaben zu eigenschaftsbestimmenden Feinkornanteilen von Böden

Quelle	Angabe Feinkornanteil - $A_M$				
OSTERMAYER (1976)	-	15 M.-%	25 M.-%	30 M.-%	40 M.-%
DIN 18196:2011	5 M.-%	15 M.-%	-	-	40 M.-%

Für unterschiedliche Kombinationen der Korndichten von Grob- und Feinkorn ist die Umrechnung der Angaben nach Tab. 3.2 in Abb. 3.8 grafisch dargestellt. Typische Bereiche für Korndichten von Bauschutt und Betonbruch als Grobkornanteil sind in der Darstellung gekennzeichnet (Basis:  $\rho_{S, \text{Feinkorn}} = 2,75 \text{ g/cm}^3$ ). Entsprechen die Korndichten von Fein- und Grobkorn einander ( $\rho_{S, \text{Grobkorn}} / \rho_{S, \text{Feinkorn}} = 1$ ), so gibt Abb. 3.8 die Werte für  $A_M$  aus Tab. 3.2 wieder. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die entsprechend umgerechneten Feinkornanteile  $A_{M^*}$  mit sinkender Korndichte des grobkörnigen Anteils hin zu höheren Werten entwickeln.



**Abb. 3.8:** Überführung der Angaben zum Feinkornanteil  $A_M$  in die allgemeinere Form  $A_{M^*}$

Für Mischungen aus Böden mit maßgeblichen Anteilen von porösen Materialien (wie Bauschutt oder Betonbruch) im Grobkornanteil ermöglicht Abb. 3.8 die Modifikation der bautech-

<sup>34</sup> OSTERMAYER (1976): S. 2, 4 und 5.

nischen Klassifizierung nach DIN 18196:2011. Da poröse RC-Materialien durch mechanische Zerkleinerung entstehen, weisen diese in der Regel auch nur begrenzte Anteile an Feinkorn ( $< 0,063$  mm) auf. Die Angaben nach OSTERMAYER (1976)<sup>35</sup> und DIN 18196:2011 stellen die Grenzen von Übergangsbereichen dar (eine allgemeingültige Angabe ist grundsätzlich nicht möglich) und so können die Ergebnisse der Umrechnung nach Abb. 3.8 als Hinweis dafür gewertet werden, dass die bautechnische Klassifikation solcher Materialien mit den Grenzwerten nach DIN 18196:2011 in einer ersten Näherung möglich ist. Enthält der grobe Anteil poröses Material, so kann im Gegensatz zu natürlichen Böden tendenziell auch bei höheren Feinkornanteilen noch ein tragendes Grobkorngerüst ausgebildet werden.

### 3.3 Bodenbehandlungsmaßnahmen

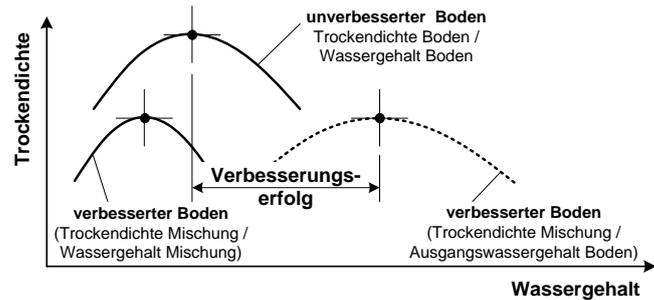
**Möglichkeiten zur Bodenbehandlung.** Wird ein Boden oder bodenähnliches Material als Baustoff für Erdbauwerke verwendet, so bestimmen auch die Anforderungen aus dem Bauwerk die erforderlichen Eigenschaften des Baustoffes. Sollte dieser Boden die Anforderungen im vorliegenden Zustand nicht erfüllen können, so kann er vor dem Einbau einer Bodenbehandlung unterzogen werden. Der Begriff Bodenbehandlung umfasst nach dem straßenbautechnischen Regelwerk der FGSV, namentlich den ZTV E-StB (Pkt. 1.2), Verfahren „[...] bei denen Böden so verändert werden, dass die geforderten Eigenschaften erreicht werden. [...]“. Der Überbegriff ist diesem Regelwerk zufolge je nach Ziel einer Bodenbehandlungsmaßnahme weiter zu untergliedern in:

- **Bodenverfestigung:** Bei der Bodenverfestigung wird die Tragfähigkeit und Frostsicherheit durch Zugabe von Bindemitteln positiv beeinflussen.
- **Bodenverbesserung:** Bodenverbesserungsmaßnahmen dienen der Verbesserung der erdbautechnischen Verarbeitbarkeit (Handhabung, Einbau, Verdichtung) von Böden.
- **Qualifizierte Bodenverbesserungen:** Wird zusätzlich zur Verbesserung der erdbautechnischen Verarbeitbarkeit bei einer Bodenverbesserung mit Bindemitteln auch die Modifikation bestimmter Eigenschaften (zur Erfüllung höherer Anforderungen wie zum Beispiel in Bezug auf das Verhalten bei Befrostung) angestrebt, dann bezeichnet man eine solche Maßnahme als Qualifizierte Bodenverbesserung.

Kann ein Boden auf der Baustelle aufgrund eines zu hohen Wassergehaltes nicht ausreichend gut verdichtet werden (nasser Ast der Verdichtungskurve), so ist es möglich diesen über eine Bodenverbesserungsmaßnahme (zum Beispiel durch Zugabe von Weißfeinkalk) verarbeitbar zu machen. Dabei ändern sich allerdings die Verdichtungsmerkmale des Bodens in Abhängigkeit von den Eigenschaften des zugemischten Materials (näheres unter Pkt. 6.3). Die relative Lage der Verdichtungskurve der entstehenden Mischung im Vergleich zur Kurve des unverbesserten Bodens lässt dabei aber noch kein Urteil über den Verdichtungserfolg zu. Dieser ist anhand der zur Mischung zugehörigen Sättigungslinie zu beurteilen, die aufgrund des zugemischten Materials auch mehr oder weniger weit von der Sättigungslinie des unverbesserten Bodens abweichen kann. Außerdem kann jene Wassergehaltsdifferenz, die durch die Anwendung der Verbesserungsmaßnahme überbrückt werden kann, als der „Betrag der Verbesserung“ oder als „Verbesserungserfolg“ bezeichnet werden (siehe [Abb. 3.9](#)).

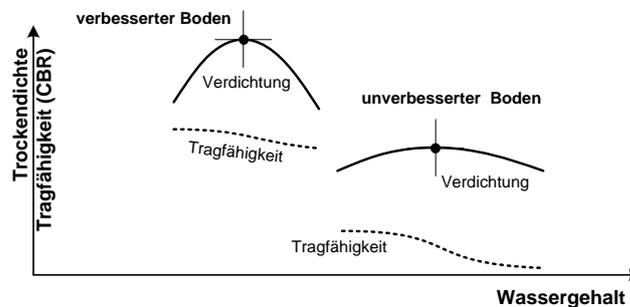
---

<sup>35</sup> OSTERMAYER (1976): S. 2, 4 und 5.



**Abb. 3.9: Mechanische Bodenverbesserung eines feinkörnigen Bodens**

**Mechanische Bodenverbesserung.** Eine andere Möglichkeit zur Verbesserung der Eigenschaften von Böden ergibt sich aus der Anwendung einer mechanischen Bodenverbesserung. Diese dient nach den ZTV E-StB (Pkt. 13.2) „[...] der Einbaufähigkeit und Verdichtbarkeit von Böden und zur Erleichterung der Ausführbarkeit von Bauarbeiten [...]“. Sie erfolgt allgemein zur Optimierung der Kornverteilung eines Materials durch die Zugabe von grobkörnigen Böden oder rezyklierten Baustoffen zu feinkörnigen Böden oder die Zugabe von geeigneten Körnungen zu enggestuften grobkörnigen Böden (siehe ZTV E-StB - Pkt. 13.2 – Abs. (2) und (3)). Durch die Mischung von zwei unterschiedlichen Materialien ergeben sich dann jedenfalls Eigenschaften, die von den Verichtungseigenschaften des Ausgangsbodens abweichen. Eine typische Entwicklung der Verdichtungseigenschaften bei der mechanischen Verbesserung eines vom Feinkorn bestimmten Bodens durch die Zugabe von zusätzlichem Grobkorn (unter Erreichung eines tragenden Grobkorngerüsts) ist beispielhaft in [Abb. 3.10](#) dargestellt.



**Abb. 3.10: Mechanische Bodenverbesserung eines feinkörnigen Bodens**

### 3.4 Korndichte und Kornrohndichte<sup>36</sup>

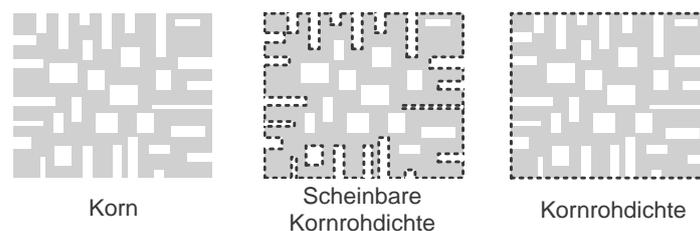
Im Erdbau wird allgemein der Begriff „Korndichte“ zur Beschreibung des Quotienten aus der Masse eines Kornes zu dessen Volumen verwendet. Nach DIN 18124:2011 bezeichnet dieser Begriff jene Dichte, die sich auf „[...] das Volumen der festen Einzelbestandteile einschließlich ihrer von der Messflüssigkeit bzw. vom Messgas nicht berührten Hohlräume (Feststoff) [...]“ bezieht. Diese allgemeine Definition bereitet allerdings bei der Handhabung von porö-

<sup>36</sup> Das Kapitel stammt in großen Teilen aus dem Forschungsbericht zu FE 05.0183/2013/CGB (im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen; siehe HENZINGER et al. 2015a). Das entsprechende Kapitel wurde in HENZINGER et al. 2015a vom Autor dieser Arbeit verfasst.

sen Recyclingkörnungen aus Bauschutt, nachfolgend auch allgemein als RC-Material bezeichnet, Probleme. Die im Erdbaulabor üblicherweise verwendeten Messfluide und Messgase können unterschiedlich tief in die offenporigen Körner eindringen und liefern Werte, die maßgeblich von den Eigenschaften des Prüfmittels und der Prüfdauer abhängen. Eine genauere Definition des Bezugsvolumens ist im Umgang mit solchen Materialien also erforderlich. Zwei jener in DIN EN 1097-6:2013 (Normenausschuss Materialprüfung im DIN) definierten Begriffe bieten sich an:

- **Scheinbare Rohdichte ( $\rho_a$ ):** „Verhältnis, ermittelt durch Dividieren der ofengetrockneten Masse einer Gesteinsprobe durch das Volumen, das sie in Wasser einnimmt, einschließlich des Volumens innerer geschlossener Hohlräume, aber ausschließlich des Volumens wasserzugänglicher Hohlräume“.
- **Rohdichte auf ofentrockener Basis ( $\rho_{rd}$ ):** „Verhältnis, ermittelt durch Dividieren der ofengetrockneten Masse einer Gesteinskörnungsprobe durch das Volumen, das sie in Wasser einnimmt, einschließlich des Volumens innerer geschlossener Hohlräume und des Volumens wasserzugänglicher Hohlräume“.

Die beiden Bezugsvolumina sind in nachfolgender [Abb. 3.11](#) veranschaulicht. In Anlehnung an die Definition nach DIN 18124:2011 bietet sich an, je nach Bezugsvolumen von „scheinbarer Kornrohddichte“ ( $\rho_a$ ) und „Kornrohddichte“ ( $\rho_{rd}$ ) zu sprechen.



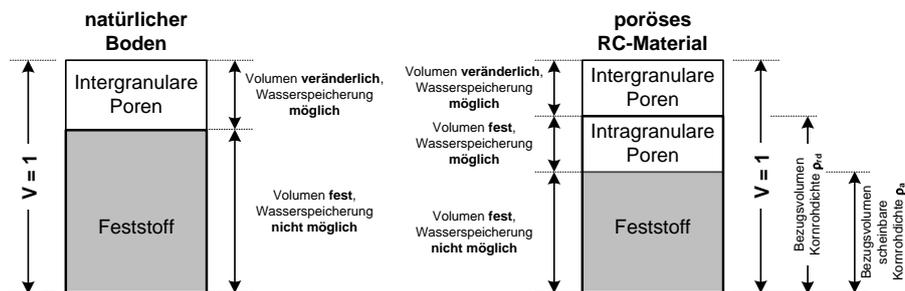
**Abb. 3.11: Bezugsvolumen zur scheinbaren Kornrohddichte und zur Kornrohddichte (Darstellung übernommen aus HENZINGER et al. 2015a)**

Bei den in der Laborpraxis des Erdbaus ermittelten Korndichten nach DIN 18124:2011 handelt es sich also, der Definition nach DIN EN 1097-6:2013 entsprechend, um scheinbare Rohdichten (scheinbare Kornrohddichten). Dabei beeinflusst das Eindringen der Prüfflüssigkeit in die dafür zugänglichen Poren der Einzelkörner den Betrag des aus den Versuchen ermittelbaren Bezugsvolumens. Während dies bei natürlichen nicht porösen Gesteinskörnungen aufgrund ihrer (in den allermeisten Fällen) geschlossenen Oberfläche in der Regel keinen Unterschied macht (Scheinbare Kornrohddichte = Kornrohddichte), ist diese Unterscheidung bei den offenporigen Recyclingkörnern bei der Angabe der Dichte der Einzelkörner von besonderer Bedeutung.

Um diese Unterschiede zu verdeutlichen, wird die Materialeigenschaft der Korndichte für poröse RC-Materialien in den eigenen Versuchen mit „scheinbare Kornrohddichte“ ( $\rho_a$ ) und „Kornrohddichte“ ( $\rho_{rd}$ ) bezeichnet, die Eigenschaft natürlicher Böden wie üblich durch den Begriff „Korndichte“ ( $\rho_s$ ). Die anhand von DIN 18124:2011 ermittelte „Korndichte“ ( $\rho_s$ ) bezieht sich dabei auf das gleiche Bezugsvolumen wie die nach DIN EN 1097-6:2013 ermittelte „scheinbare Kornrohddichte“ ( $\rho_a$ ). Die beiden Begriffe sind in diesem Kontext also gleichbedeutend.

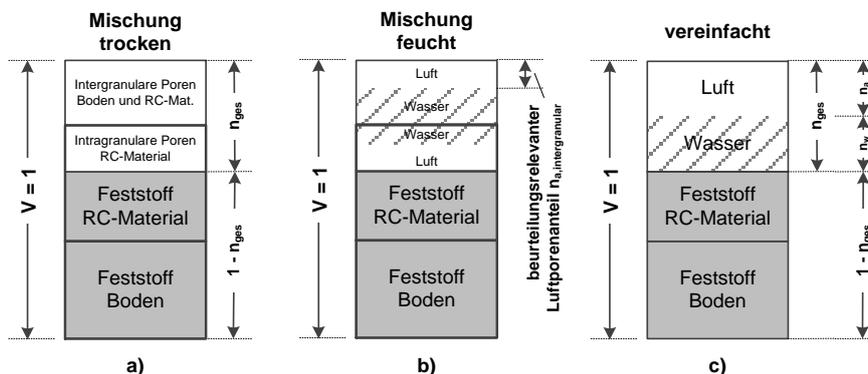
### 3.5 Beurteilung des Luftporenanteils

Der Luftporenanteil ( $n_a$ ) ist bei fein- und gemischtkörnigen Böden ein wesentlicher Bestandteil für die Beurteilung des Verdichtungserfolges. In den ZTV E-StB sind die Anforderungen für den Erdbau des Straßenbaus festgelegt (siehe Pkt. 3.6). Der Wert lässt sich bei bekannter Trockendichte, bei bekanntem Wassergehalt und bekannter Korndichte an natürlichen Böden sehr einfach ermitteln. In Mischungen aus natürlichen Böden mit porösen RC-Materialien ist die Ermittlung des Luftporenanteils um einen Gesichtspunkt zu erweitern: den intragranularen Porenraum der RC-Körner. Dieser kann zwar teilweise oder ganz mit Wasser gefüllt sein, sein Volumen ist allerdings unveränderlich. Die Situation kann am Einheitswürfel für beide Materialien getrennt im jeweils verdichteten Zustand verdeutlicht werden (Abb. 3.12):



**Abb. 3.12: Einheitswürfel für natürliche Böden und poröses RC-Material**

Der Einheitswürfel für eine Mischung aus Boden und RC-Material ist in Abb. 3.13 abgebildet. Dabei ist zu beachten, dass die Volumina des Feststoffes des Bodens und des Feststoffes des RC-Materials über das Mischungsverhältnis ihrer Massen verbunden sind. In der trockenen Mischung, dargestellt in Abb. 3.13 a), lässt sich der Porenraum also einteilen in einen intergranularen Anteil zwischen den Bodenkörnern und RC-Körnern und einen intragranularen Anteil des RC-Materials. Sofern Kornbruch ausgeschlossen wird, kann nur das Volumen des intergranularen Porenraums verändert werden, zum Beispiel durch Verdichtung.



**Abb. 3.13: Einheitswürfel für Mischungen aus natürlichen Böden und porösem RC-Material**

In einer feuchten Mischung, angedeutet in Abb. 3.13 b), wird ein Teil des gesamten Porenraums mit Wasser gefüllt sein, ein anderer mit Luft. Der intergranulare und intragranulare Porenraum ist jeweils teilgesättigt. Die Anforderungen der ZTV E-StB in Bezug auf den Luftporenanteil (siehe Pkt. 3.6) beziehen sich aber nur auf den intergranularen Porenraum, da

sich Schwell- und Sackungserscheinungen nur in diesem ausbilden können (siehe Pkt. 3.1). Dieser Anteil ist in Abb. 3.13 b) als „beurteilungsrelevanter Luftporenanteil  $n_{a,intergranular}$ “ eingetragen.

Eine vereinfachte - auf der sicheren Seite liegende - Überprüfung des Luftporenanteils kann nach Abb. 3.13 c) also erfolgen, wenn jener Luftporenanteil ( $n_a$ ) beurteilt wird, der sich als Teil des gesamten Porenraums ( $n_{ges}$ ) ergibt. Dafür wird nach Abb. 3.12 (rechte Seite) für den Anteil des RC-Materials das Bezugsvolumen die scheinbare Korndichte ( $\rho_a$ ) herangezogen. So wird auf der sicheren Seite liegend auch der eigentlich setzungs- und schwellneutrale, intragranulare Porenraum der RC-Körner dem Gesamtporenraum zugeordnet. Für die Ermittlung des Luftporenanteils einer solchen Mischung lässt sich folgende Gleichung ableiten:

$$n_a = 1 - \frac{\frac{1}{\rho_{S,Boden}} + \frac{MV}{\rho_{a,ZM}} + \frac{(1+MV) \cdot w_{Mischung}}{\rho_w}}{1 + MV} \cdot \rho_{d,Mischung} \quad (3-6)$$

$n_a$	Luftporenanteil (gesamt) [-]
$\rho_{S,Boden}$	Korndichte des Bodenanteils [ $M \cdot L^{-3}$ ]
$\rho_{a,ZM}$	Scheinbare Kornrohndichte des Zugabe-Materials [ $M \cdot L^{-3}$ ]
$\rho_w$	Dichte des Bodenwassers [ $M \cdot L^{-3}$ ]
$\rho_{d,Mischung}$	Trockendichte der Mischung [ $M \cdot L^{-3}$ ]
$w_{Mischung}$	Wassergehalt der Mischung [-]
MV	Mischungsverhältnis der Trockenmassen [(Zugabemenge in %) / 100]

Die Gleichung zur Ermittlung der Sättigungslinie ergibt sich daraus für  $n_a = 0\%$  nach Umstellung zu:

$$\rho_{d,Mischung} = \frac{1 + MV}{\frac{1}{\rho_{S,Boden}} + \frac{MV}{\rho_{a,ZM}} + \frac{(1+MV) \cdot w_{Mischung}}{\rho_w}} \quad (3-7)$$

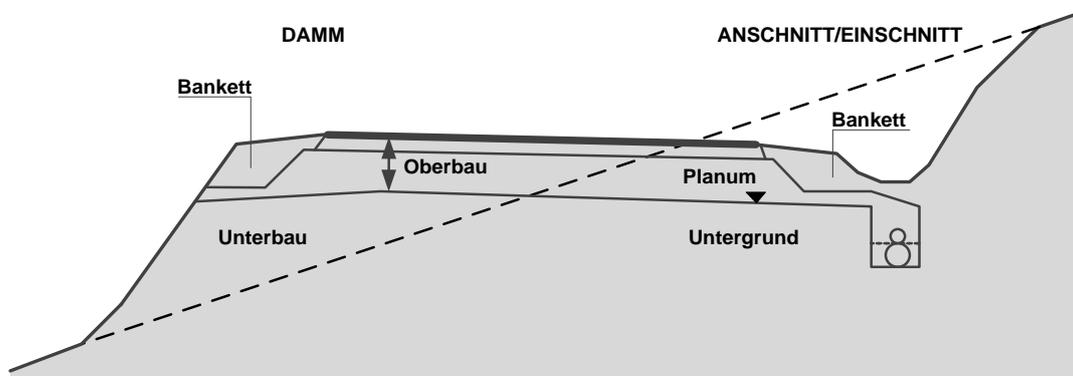
Die beschriebene vereinfachte Ermittlung des Luftporenanteils nach Gleichung (3-6) hat sich im Zuge der Auswertung der Versuchsergebnisse als ausreichend herausgestellt (siehe Pkt. 4.5.4).

### 3.6 Anforderungen des Erdbaues<sup>37</sup>

Die grundlegendsten Anforderungen des qualifizierten Erdbaues an ein Material ergeben sich aus der Notwendigkeit der gerätetechnischen Handhabung. Neben dem Lösen und Laden ist das Material zu transportieren und letztlich einzubauen sowie zu verdichten. Die höchste Anforderung an einen feinkörnigen Boden stellt dabei der letztgenannte Bearbeitungsschritt, der Einbau mit Verdichtung.

<sup>37</sup> Das Kapitel stammt abschnittsweise aus dem Forschungsbericht zu FE 05.0166/2011/ERB (im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen; siehe HENZINGER et al. 2015b). Das entsprechende Kapitel wurde in HENZINGER et al. 2015b vom Autor dieser Arbeit verfasst.

Die Anforderungen für Erdarbeiten im Straßenbau sind in den Regelwerken der Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen (FGSV) durch die Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau, kurz ZTV E-StB, geregelt. Darin werden abhängig von der Bodenart für die unterschiedlichen Elemente eines Straßendamms oder Einschnitts, dargestellt in [Abb. 3.14](#), Anforderungen an den Verdichtungsgrad ( $D_{Pr}$  als prozentuelle Angabe bezogen auf das Verdichtungsoptimum, bestimmt im Labor bei Verdichtung mit Proctorenergie), den Luftporenanteil und den Verformungsmodul des verarbeiteten Baustoffes und Untergrundes formuliert. Für bestimmte fein- und gemischtkörnige Böden ist zwischen Planum und Dammsohle ein Verdichtungsgrad  $D_{Pr} \geq 97\%$  und ein zulässiger Luftporenanteil von  $n_a \leq 12\%$  einzuhalten. Ohne Verfestigungsmaßnahme oder qualifizierte Verbesserung wird die Einhaltung eines zulässigen Luftporenanteils von  $n_a \leq 8\%$  empfohlen. Zusätzlich wird für frostempfindliche Böden ein Verformungsmodul im Unterbau von  $E_{v2} \geq 45 \text{ MN/m}^2$  gefordert. Bei vom Straßendamm baulich abgekoppelten Schutzwällen gelten die Anforderungen  $D_{Pr} \geq 95\%$  und  $n_a \leq 12\%$ .



**Abb. 3.14: Bezeichnung der Querschnittselemente (nach ZTV E-StB, adaptiert)<sup>38</sup>**

Die Anforderungen nach ZTV E-StB können in der Regel auch von feinkörnigen Böden erfüllt werden, wenn ihr Wassergehalt etwa im Bereich des Verdichtungsoptimums liegt. Es ist bekannt, dass dieser optimale Wassergehalt bei feinkörnigen Böden näherungsweise in der Nähe der Ausrollgrenze, also im Bereich um die Konsistenzzahl  $I_c = 1$ , liegt. Mit steigendem Wassergehalt (sinkender Konsistenzzahl) nimmt die Scherfestigkeit des feinkörnigen Bodens soweit ab, dass sich das Material mit Erreichen des Wassergehalts an der Fließgrenze wie eine viskose Flüssigkeit verhält. Gleichzeitig sinken über und unter dem optimalen Wassergehalt auch die durch Verdichtung erreichbaren Trockendichten, sodass die Verdichtungsanforderung an den Verdichtungsgrad bei Wassergehalten zu weit unter- und oberhalb des optimalen Verdichtungswassergehaltes nicht mehr eingehalten werden kann.

Können die Verdichtungsanforderungen aufgrund eines zu hohen Wassergehaltes nicht erfüllt werden, so darf ein Material nach ZTV E-StB (Pkt. 4.3.1.6) weder eingebaut noch überschüttet werden. Es muss dann vor seiner weiteren Verarbeitung mit geeigneten Maßnahmen derart verbessert werden, dass die genannten Verdichtungsanforderungen bei seiner Verarbeitung erfüllt werden können. In den ZTV E-StB werden verschiedene Möglichkeiten hierzu beschrieben. Neben mechanischen Bodenverbesserungen (siehe Pkt. 3.3) können zum Beispiel auch Bindemittel zur Bodenverbesserung eingesetzt werden.

<sup>38</sup> ZTV E-StB 09: S. 10.

## 3.7 Bodenwasser und seine Bewegung

### 3.7.1 Allgemeines

Böden enthalten unter natürlichen Verhältnissen stets Wasser, das teils über unterschiedliche Kräfte an die Bodenmatrix gebunden und teils frei beweglich ist. Nicht an die Bodenmatrix gebundenes Wasser lässt sich einfach entfernen, es fließt allein unter Einfluss der Schwerkraft zum Beispiel in Form von Sickerwasser ab, während das an die Bodenmatrix gebundene Wasser, Haftwasser genannt, im Boden verbleibt. (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002)<sup>39</sup>

Mit sinkendem Wassergehalt wird zuerst der Teil des frei beweglichen und nicht an die Bodenpartikel gebundenen Wassers kleiner. Die Trocknung verläuft danach abhängig von der Bindungsstärke, mit der die Wassermoleküle in unterschiedlichen Ebenen an die Feststoffoberflächen gebunden sind. Vor allem bei feinkörnigen Böden wird als letzter Teil des Bodenwassers das sogenannte Kristallwasser, von KÉZDI (1969)<sup>40</sup> auch Strukturwasser genannt, aus dem Boden entfernt. Dabei handelt es sich nicht um Wasser im eigentlichen Sinne, sondern um Hydroxidgruppen (OH), die in die Kristallstruktur der Tonminerale eingebunden sind und sich erst bei sehr hohen Temperaturen (bis mehrere hundert Grad Celsius) daraus lösen lassen (siehe zum Beispiel GRIM 1953 oder JASMUND & LAGALY 1993). So ist der gängige Begriff „trocken“ nur eine unter bestimmten Randbedingungen gültige Definition.

Vereinfachend kann den wirkenden Kräften entsprechend das an die Bodenmatrix gebundene Haftwasser in zwei Arten unterschieden werden: Adsorptionswasser und Kapillarwasser (vgl. SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002)<sup>41</sup>. Das nicht an die Bodenmatrix gebundene Wasser wird als Grund- oder Stauwasser bezeichnet.

**Adsorptionswasser.** Dieser Teil des Wassers umfasst vor allem jene Wassermoleküle, die durch intermolekulare Bindungskräfte an die Feststoffpartikel gebunden sind. Es umgibt die Bodenteilchen und umfasst nicht Anteile an Wasser, die in Menisken zwischen den Bodenpartikeln angelagert sind (vgl. SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002)<sup>42</sup>. Dementsprechend ist in DIN 4047-3:2002 (Landwirtschaftlicher Wasserbau, Begriffe, Teil: Bodenkunde, Bodensystematik und Bodenuntersuchung) der Begriff Adsorptionswasser folgendermaßen definiert:

*„Teil des Haftwassers, der an der Oberfläche der festen Bodenteilchen gegen den Einfluss der Schwerkraft durch Adsorptions- und osmotische Kräfte angelagert ist, ohne Menisken zu bilden“*

Dabei bewirken unterschiedliche intermolekulare Kräfte die Bindung der Wassermoleküle an die Feststoffoberfläche. Einerseits sind Van der Waal'sche Bindungen und Wasserstoffbrückenbindungen zwischen Wassermolekülen und der Feststoffoberfläche möglich. Andererseits binden auch elektrostatische Kräfte der Mineraloberfläche und vor allem die im Adsorptionskomplex, zum Ausgleich von Ladungsdefiziten der Struktur, angelagerten Gegenionen Wassermoleküle an sich. (vgl. SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002)<sup>43</sup>

<sup>39</sup> SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (2002): S. 209.

<sup>40</sup> KÉZDI (1969): S. 95.

<sup>41</sup> SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (2002): S. 210.

<sup>42</sup> SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (2002): S. 210.

<sup>43</sup> SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (2002): S. 210.

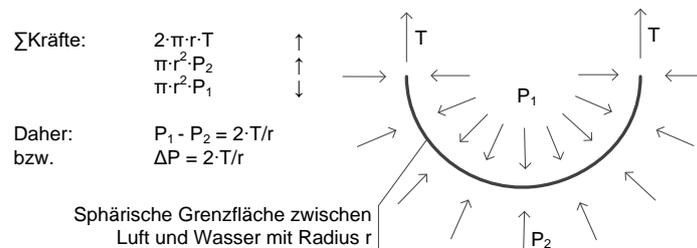
Da all diese Kräfte letztlich von der Oberfläche der Feststoffteilchen ausgehen, kann darauf geschlossen werden, dass die Menge an adsorptiv gespeichertem Wasser mit steigender spezifischer Oberfläche größer wird.

**Kapillarwasser.** Der Begriff Kapillarwasser umfasst jenen Anteil des Bodenwassers, der aufgrund der Oberflächenspannung des Wassers zur Luftphase und der dadurch bedingten Meniskenbildung an den Berührungspunkten im Korngerüst festgehalten wird. Die Definition nach DIN 4047-3:2002 lautet:

*„Bodenwasser, das als Teil des Haftwassers durch Überwiegen der Kapillarkräfte (Menisken) gegen die Schwerkraft gehoben oder gehalten wird“*

Die Oberflächenspannung des Wassers an der Grenzfläche zur Luft entsteht, weil die auf die Wassermoleküle wirkenden intermolekularen Kräfte in der Nähe dieser Phasengrenze nicht in alle Richtungen gleich stark ausgebildet werden können. In Richtung der Phasengrenze fehlen hierzu die Bindungspartner. So entsteht eine resultierende Kraft in Richtung der Flüssigkeit, die dann zur Erhaltung des mechanischen Gleichgewichtes durch die Oberflächenspannung an der Phasengrenze ausgeglichen wird. (LU & LIKOS 2004)<sup>44</sup>

Die Oberflächenspannung des Wassers ist im Zusammenhang mit dem Benetzungswinkel im Kontaktpunkt zur festen Oberfläche (genauer: der adsorbierten Wasserschicht, siehe YONG & WARKENTIN 1975)<sup>45</sup> also dazu in der Lage, Druckdifferenzen zwischen dem Wasser und der Luft auszugleichen. Das Gleichgewicht der Kräfte an einer gekrümmten Oberfläche (Meniskus) zwischen Bodenwasser und Bodenluft in Abb. 3.15 verdeutlicht einen in diesem Kontext wichtigen Punkt: die durch die Oberflächenspannung aufnehmbare Druckdifferenz zwischen Luft- und Wasserdruck ist stark abhängig vom Radius dieser gekrümmten Wasseroberfläche.



**Abb. 3.15:** Gleichgewicht an der gekrümmten Oberfläche zwischen Wasserphase und Luft (nach YONG & WARKENTIN 1975, übersetzt und adaptiert)<sup>46</sup>

Im Korngerüst liegt dieses Kapillarwasser mit seiner gekrümmten Oberfläche vor allem um die Berührungspunkte der einzelnen Körner vor und umschließt diese ringförmig. Mit steigendem Wassergehalt im Boden wachsen diese Ringe an und auch der Radius der Menisken an der Oberfläche zur Porenluft wird größer. Berühren sich dann mehrere solcher gewachsenen Ringe, so bilden sie zusammenhängende Wasserkeile aus. (vgl. YONG & WARKENTIN 1975)<sup>47</sup>

<sup>44</sup> LU & LIKOS (2004): S. 73 und 74.

<sup>45</sup> YONG & WARKENTIN (1975): S. 115.

<sup>46</sup> YONG & WARKENTIN (1975): S. 113.

<sup>47</sup> YONG & WARKENTIN (1975): S. 115.

**Grund- und Stauwasser.** Die beiden Begriffe umfassen jenen Teil des Bodenwassers, der nicht adsorptiv oder über Menisken an das Korngerüst gebunden ist. Nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (2002)<sup>48</sup> wird dieses Wasser auch als freies Wasser bezeichnet.

Die Definition des Begriffes „Grundwasser“ nach DIN 4047-3:2002 lautet:

*„unterirdisches Wasser, das Hohlräume der Erdrinde zusammenhängend ausfüllt, allein der Schwerkraft unterworfen ist und sich durch Gefälle bzw. unterirdische Druckpotenziale bewegen kann“*

Die Definition des Begriffes „Stauwasser“ nach DIN 4047-3:2002 lautet:

*„zeitweilig auftretendes bewegliches Bodenwasser über einer hochanstehenden Stauwassersohle, meist oberhalb 13 dm unter Geländeoberfläche“*

### 3.7.2 Energiebetrachtungen am Bodenwasser

Bereits eingangs des 20. Jahrhunderts wurde in der Bodenkunde versucht, die Bindung von Wasser im ungesättigten Boden wissenschaftlich zu beschreiben. Da Kräfte in einem derart heterogenen System wie Boden schwer definier- und addierbar sind, wurde als Instrument dazu die Arbeitsfähigkeit des Bodenwassers, dessen Potenzial bzw. potenzielle Energie, gewählt (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002)<sup>49</sup>. SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (2002)<sup>50</sup> präzisieren den Potenzialbegriff folgendermaßen:

*„Das Potential ist hierbei definiert als die Arbeit, die notwendig ist, um eine Einheitsmenge (Volumen, Masse oder Gewicht) Wasser von einem gegebenen Punkt eines Kraftfeldes zu einem Bezugspunkt zu transportieren. Diese Arbeit entspricht derjenigen, die notwendig ist, um die Mengeneinheit Wasser von einer freien Wasserfläche auf eine bestimmte Höhe in einer Pore (Kapillare) zu heben oder in dieser der Bodenmatrix zu entziehen.“*

Es ergibt sich, dass Wasserbewegung im Boden von Bereichen, in denen das Wasser ein höheres Potential (hohes Maß an freier Energie) aufweist, hin zu Bereichen niedrigeren Potentials solange stattfindet, bis sich die Gesamtpotentiale überall im Gleichgewicht befinden (vgl. TAN 1998, SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002, LU & LIKOS 2004)<sup>51</sup>.

**Allgemeine Formulierung des Gesamtpotentials.** Die Formulierung des Gesamtpotentials erfolgt in der Literatur oft als Differenz, um anzuzeigen, dass es sich um Relativwerte in Bezug auf einen gewählten Nullpunkt handelt. Als Nullpunkt für das Potential von Bodenwasser (Referenzkonfiguration) wird in der Regel freies Wasser bei atmosphärischem Druck auf gleicher geodätischer Höhe des betrachteten Bodens und bei gleicher Temperatur gewählt. (vgl. YONG & WARKENTIN 1975 und SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002)<sup>52</sup>

Das Gesamtpotenzial des Bodenwassers setzt sich aus unterschiedlichen Komponenten zusammen. Die Aufteilung in Teilpotenziale erfolgt in der Literatur aufgrund unterschiedlicher

<sup>48</sup> SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (2002): S. 209.

<sup>49</sup> SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (2002): S. 212.

<sup>50</sup> SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (2002): S. 212.

<sup>51</sup> TAN (1998): S. 63; SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (2002): S. 212; LU & LIKOS (2004): S. 35.

<sup>52</sup> YONG & WARKENTIN (1975): S. 108; SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (2002): S. 212.

Zuordnungen aber oft in unterschiedliche Anteile (vgl. YONG & WARKENTIN 1975, IWATA et al. 1988, SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002, LU & LIKOS 2004)<sup>53</sup>. In der Formulierung nach LU & LIKOS (2004)<sup>54</sup> ergibt sich in Differenzschreibweise:

$\Delta\mu_t = \Delta\mu_c + \Delta\mu_o + \Delta\mu_e + \Delta\mu_f$		<b>(3-8)</b>
$\Delta\mu_t$	Gesamtpotential des Porenwassers	
$\Delta\mu_c$	Potential aus kapillaren Effekten	
$\Delta\mu_o$	Potential aus osmotischen Effekten	
$\Delta\mu_e$	Potential aus elektrostatischer Anziehung	
$\Delta\mu_f$	Potential aus Van der Waals'scher Anziehung	

Gemäß der Formulierung der Referenzkonfiguration treten Anteile aus Druck, Gravitation und Temperatur in Gleichung (3-8) nicht auf. Eine derartige Formulierung hat gegenüber Formulierungen unter Berücksichtigung eines Matrixpotentials außerdem den entscheidenden Vorteil, dass kapillare und osmotische Effekte darin getrennt angeführt sind. Eine alternative Aufteilung der Teilpotentiale wird zum Beispiel von YONG & WARKENTIN (1975)<sup>55</sup> vorgestellt. Sie ordnen dabei die kapillaren Effekte und jene osmotischen Effekte, die im Zusammenhang mit den an der Oberfläche der Teilchen adsorbierten Ionen (im Zusammenspiel mit der freien Porenlösung) bestehen, dem Matrixpotential zu. Eine solche Einteilung trägt pragmatisch dem Umstand Rechnung, dass diese Anteile messtechnisch über Saugspannungsmessungen nicht einfach voneinander getrennt werden können.

Das **Potential aus kapillaren Effekten** ( $\Delta\mu_c$ ) ist eine Eigenschaft der Geometrie der Kapillaren. Die Oberflächenspannung des Wassers und die Krümmung der Wasseroberfläche in den Kapillaren ist Ausdruck eines negativen Potentialbetrags. (LU & LIKOS 2004)<sup>56</sup>

Bodenwasser ist in der Regel nicht frei von gelösten Stoffen. Unterschiede in der Konzentration von gelösten Ionen zwischen Bodenwasser und Referenzkonfiguration ergeben das **osmotische Potential** ( $\Delta\mu_o$ ). Es entspricht im Betrag der Arbeit, die aufgewendet werden muss, um dem Boden eine Einheitsmenge an Wasser durch eine semipermeable Membran zu entziehen. Je mehr Ionen im Bodenwasser gelöst sind, desto negativer wird das Potential (vgl. LU & LIKOS 2004 und SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002)<sup>57</sup>

Das **Potential aus elektrostatischer Anziehung** ( $\Delta\mu_e$ ) resultiert aus der dipolaren Struktur der Wassermoleküle, die durch die strukturbedingte Oberflächenladung der Bodenpartikel angezogen werden. Je näher sich ein Wassermolekül zu dieser Oberfläche befindet, desto negativer wird das Potential. (LU & LIKOS 2004)<sup>58</sup>

Das **Potential aus Van der Waals'scher Anziehung** ( $\Delta\mu_f$ ) bezieht sich auf den Effekt der Polarisierung, der durch die kurzzeitige Verschiebung von Ladungen in Atomen und Molekü-

<sup>53</sup> YONG & WARKENTIN (1975): S. 108; IWATA et al. (1988): S. 7; SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (2002): S. 212; LU & LIKOS (2004): S. 35.

<sup>54</sup> LU & LIKOS (2004): S. 35.

<sup>55</sup> YONG & WARKENTIN (1975): S. 109.

<sup>56</sup> LU & LIKOS (2004): S. 35 und 36.

<sup>57</sup> LU & LIKOS (2004): S. 35 36; SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (2002): S. 213.

<sup>58</sup> LU & LIKOS (2004): S. 36 und 37.

len dann entsteht, wenn sie sich sehr nahe kommen (vgl. KICKELBICK 2008)<sup>59</sup>. Der Herkunft dieser Anziehung entsprechend ist die Negativität des Potentials vom Abstand eines betrachteten Wassermoleküls von der Partikeloberfläche abhängig (LU & LIKOS 2004)<sup>60</sup>.

Alle genannten Potentialdifferenzen sind negativ, sie bezeichnen Effekte, die dem Bodenwasser einen niedrigeren Energiezustand zuschreiben als dem Wasser der Referenzkonfiguration. Doch die oben beschriebenen Potentiale sind nicht gleichmäßig im Bodenwasser verteilt. Die Ionenkonzentration ist in der Nähe der Mineraloberflächen (Doppelschicht) sehr viel höher als im freien Porenwasser. Auch die Potentiale aus elektrostatischer Anziehung und Van der Waals'scher Anziehung nehmen mit zunehmendem Abstand zur Mineraloberfläche ab. Dass im thermodynamischen Gleichgewichtszustand das Gesamtpotential im Bodenwasser aber an allen Stellen gleich groß sein muss, weist auf eine weitere Potentialkomponente hin: jene des Drucks. Dieser mit der Nähe zur Partikeloberfläche ansteigende „innere Wasserdruck“ kann als Druckpotential bezeichnet werden und gleicht als positiver Potentialbetrag (Erhöhung der Arbeitsfähigkeit des Porenwassers) die anderen Potentiale lokal aus. (vgl. LU & LIKOS 2004)<sup>61</sup>

**Umrechnung zwischen Potentialen und Saugspannungen.** In der praktischen Anwendung wird in der Regel der Begriff Saugspannung (angegeben in Druckeinheiten) oder Druckhöhe (angegeben in Längeneinheiten einer Wassersäule) verwendet, um den energetischen Zustand des Bodenwassers zu beschreiben. Das Potential kann dazu in Druckeinheiten und Saugspannungen umgerechnet werden (zum Beispiel MIYAZAKI 2006)<sup>62</sup>:

$u = -\psi = \Delta\mu \cdot \rho_w \quad [\text{Joule/kg}] \cdot [\text{kg/m}^3] = [\text{N/m}^2] = [\text{Pa}]$		<b>(3-9)</b>
u	Druck [Pa]	
$\psi$	Saugspannung [Pa]	
$\Delta\mu$	Potential [Joule/kg]	
$\rho_w$	Dichte von Wasser [kg/m <sup>3</sup> ]	

Da das Potential im ungesättigten Boden negative Werte aufweist (siehe oben) ergibt die Umrechnung von Potentialen in Druckeinheiten negative Werte. Durch den Begriff Saugspannung wird dieser Tatsache Rechnung getragen, sie ist per Definition der negative Druck ( $\psi = -u$ ), im ungesättigten Boden also positiv.

### 3.7.3 Messung von Saugspannungen

Praktisch lassen sich die Teilpotentiale aus Gleichung (3-8) bei der Saugspannungsmessung nicht einfach zuordnen. Dies auch weil, wie bereits angedeutet, die Teilpotentiale innerhalb des Bodenwassers nicht gleichmäßig verteilt sind (lediglich ihre Summe bleibt im Saugspannungsgleichgewicht konstant). Werden im ungesättigten Boden also Saugspannungen gemessen, dann immer in Form unterschiedlicher Kombinationen aus Teilpotentialen (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002)<sup>63</sup>. Allgemein wird die Saugspannung in Anlehnung an die

<sup>59</sup> KICKELBICK (2008): S. 98.

<sup>60</sup> LU & LIKOS (2004): S. 37.

<sup>61</sup> LU & LIKOS (2004): S. 37 und 38.

<sup>62</sup> MIYAZAKI (2006): S. 9.

<sup>63</sup> SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (2002): S. 212.

unter Pkt. 3.7.2 beschriebene Referenzkonfiguration als Summe der wichtigsten zwei Teilsaugspannungen, der Matrix- und der osmotischen Saugspannung, formuliert (zum Beispiel LU & LIKOS 2004)<sup>64</sup>.

$\Psi_t = \Psi_m + \Psi_o$		<b>(3-10)</b>
$\Psi_t$	Totale Saugspannung	
$\Psi_m$	Matrixsaugspannung	
$\Psi_o$	Osmotische Saugspannung	

Die **Matrixsaugspannung** ( $\Psi_m$ ) resultiert aus allen durch die Bodenmatrix auf das Wasser ausgeübten Einwirkungen (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002)<sup>65</sup>. Streng genommen werden der Matrixsaugspannung das Potential aus kapillaren Effekten ( $\Delta\mu_c$ ), das Potential aus elektrostatischer Anziehung ( $\Delta\mu_e$ ) und das Potential aus Van der Waals'scher Anziehung ( $\Delta\mu_f$ ) zugeordnet (LU & LIKOS, 2004)<sup>66</sup>.

Die **osmotische Saugspannung** ( $\Psi_o$ ) resultiert aus den osmotischen Effekten, die sich aus dem Unterschied in der Ionenkonzentration im Porenwasser im Vergleich zur Referenzkonfiguration ergeben. Ihr ist also nur das osmotischen Potential ( $\Delta\mu_o$ ) zugeordnet. (vgl. LU & LIKOS 2004)<sup>67</sup>

Wie bereits angedeutet, bestehen durchaus auch andere Ansätze der Zuordnung von Teilpotentialen und Teilsaugspannungen. So ordnen zum Beispiel YONG & WARKENTIN (1975)<sup>68</sup> jene Anteile des osmotischen Potentials und der Saugspannung, die aus Konzentrationsunterschieden zwischen den gelösten Ionen der freien Porenlösung und jenen Ionen im Adsorptionskomplex der Tonminerale resultieren, dem Matrixpotential und konsequenterweise der Matrixsaugspannung zu. Vor allem bei (schwellfähigen) Tonmineralen umfasst die Messung von Matrixsaugspannungen zwangsweise auch solche osmotischen Effekte. Wird für quellfähige Tonminerale das Potential also über Saugspannungsmessungen ermittelt, so sollte nach YONG (1999)<sup>69</sup> die Bezeichnung des Matrixpotentials um ein Subskript präzisiert werden ( $\Delta\mu_{ms}$ ) um zu verdeutlichen, dass der Matrixanteil des Potentials auch diese osmotischen Effekte umfasst. Dementsprechend kann auch die Bezeichnung der Saugspannung angepasst werden ( $\Psi_{ms}$ ).

**Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen.** Unter dem Begriff Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung wird allgemein der Zusammenhang zwischen Saugspannung eines Bodens und dessen Wassergehalt verstanden. In Abhängigkeit vom Wassergehalt kommt denen für die Teilsaugspannungen (also Teilpotentiale) verantwortlichen physiochemischen Mechanismen unterschiedlich starke Bedeutung zu. LU & LIKOS (2004)<sup>70</sup> stellen dazu ein anschauliches Modell nach *McQueen & Miller*, dargestellt in Abb. 3.16, vor.

<sup>64</sup> LU & LIKOS (2004): 35.

<sup>65</sup> SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (2002): S. 213.

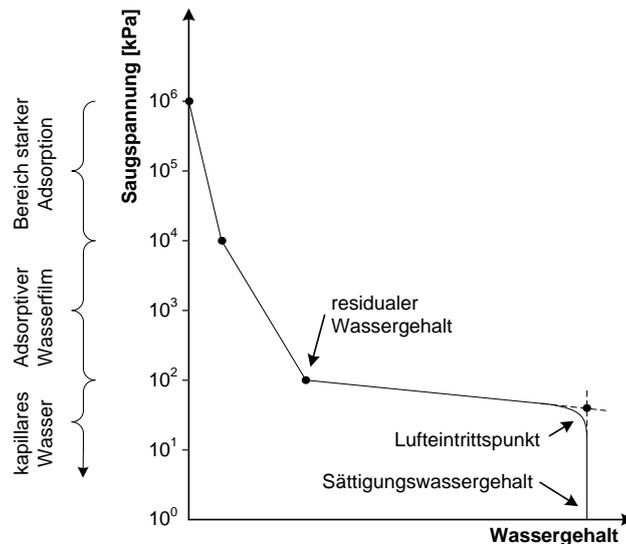
<sup>66</sup> LU & LIKOS (2004): S. 34.

<sup>67</sup> LU & LIKOS (2004): S. 34 und 35.

<sup>68</sup> YONG & WARKENTIN (1975): S. 109 und 319.

<sup>69</sup> YONG (1999): S. 5, 6, 13.

<sup>70</sup> LU & LIKOS (2004): 39 bis 42.



**Abb. 3.16:** Einteilung einer Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung nach *McQueen & Miller* (nach LU & LIKOS 2004, übersetzt und adaptiert)<sup>71</sup>

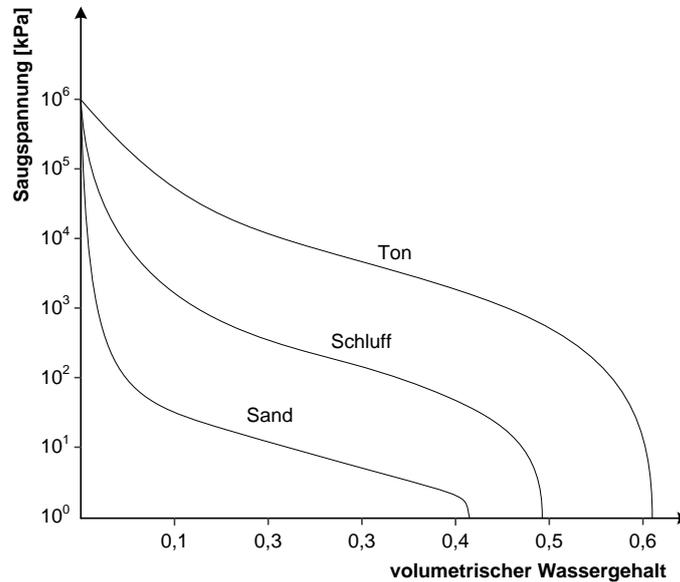
Im Bereich niedriger Wassergehalte wird die Saugspannung von den an den Mineraloberflächen wirkenden elektrostatischen Kräften dominiert. Wasser wird hier hauptsächlich über Wasserstoffbrückenbindung an der Gitteroberfläche der Minerale gebunden, die Bindung ist dabei sehr fest. In [Abb. 3.16](#) wird dieser Bereich als „Bereich starker Adsorption“ bezeichnet. Bei steigendem Wassergehalt und daran anschließend befindet sich ein Bereich, der in [Abb. 3.16](#) als „Adsorptiver Wasserfilm“ ausgewiesen ist. Er bezeichnet Wasser, das unter anderem durch elektrostatische Kräfte der Oberflächen und durch Hydratation der Ionen im Adsorptionskomplex gebunden ist. Für beide vorgenannten Bereiche sind die spezifische Oberfläche des Materials und der Adsorptionskomplex (Menge, Art und Valenz der im Adsorptionskomplex befindlichen Ionen) von herausragender Bedeutung. Es leuchtet ein, dass feinkörnige Böden mit ihrer hohen spezifischen Oberfläche in diesem Wassergehaltsbereich höhere Saugspannungen aufweisen als grobkörnige Böden. Aus der Neigung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen kann in diesem Bereich auch geschlossen werden, dass zur Entfernung einer bestimmten Wassermenge aus dem Boden vergleichsweise viel Energie (Arbeit) aufgewendet werden muss. Der dritte Bereich in [Abb. 3.16](#), der den Einflussbereich des „kapillaren Wassers“ der Saugspannungen im ungesättigten Boden markiert, ist maßgeblich von der Porengeometrie beeinflusst. Wie anhand von [Abb. 3.15](#) veranschaulicht, sinken die kapillar durch die Oberflächenspannung des Wassers aufnehmbaren Kräfte mit größer werdendem Porenradius. Wasser wird in den kleineren Poren also stärker kapillar gebunden als in größeren. Es leuchtet daher ein, dass die Saugspannungen und der Lufttrittspunkt für feinkörnige Böden in diesem Bereich ebenfalls höher liegen als bei grobkörnigeren Böden.

Obwohl dieses Modell nach *McQueen & Miller* für Anschauungszwecke sehr nützlich erscheint, ist doch darauf hinzuweisen, dass eine strikte Trennung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung in unterschiedliche Anteile letztlich nur eine Vereinfachung der

<sup>71</sup> LU & LIKOS (2004): 41.

Realität darstellen kann, in Wirklichkeit greifen die Saugspannungsanteile bei den verschiedenen Wassergehalten durchaus ineinander (YONG & WARKENTIN 1975)<sup>72</sup>.

In Abb. 3.17 sind zur Veranschaulichung dieser Ausführungen typische Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen für Sand-, sowie Schluff- und Tonböden dargestellt.



**Abb. 3.17:** Typische Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen für Sand, Schluff und Ton (nach LU & LIKOS 2004, übersetzt und adaptiert)<sup>73</sup>

**Messverfahren für Saugspannungen.** Die Messung von Saugspannungen kann nach unterschiedlichen Methoden erfolgen. Maßgebliche Unterschiede ergeben sich dabei aus dem jeweiligen Saugspannungs-Messbereich eines Verfahrens und den dabei gemessenen Teilpotentialen. Es sollte allerdings vermieden werden, ohne weiteres aus den gemessenen Saugspannungen direkt auf einzelne Potentialanteile zu schließen. Die Messung gibt in der Regel keinen Aufschluss über die Aufteilung der Teilpotentialen, die in ihrer Summe die messbare Saugspannung ergeben und die innerhalb der unterschiedlichen Struktureinheiten von feinkörnigen Böden auch unterschiedlich verteilt sein können (YONG 1999)<sup>74</sup>. YONG & WARKENTIN (1975)<sup>75</sup> bezeichnen Saugspannungsmessungen daher nicht ohne Grund als „black-box“ Messungen.

Eine Zusammenstellung der derzeit üblichen Verfahren, die mit den jeweiligen Verfahren messbaren Saugspannungsanteile sowie die jeweiligen Bereiche, die gemessen werden, sind zum Beispiel in LU & LIKOS (2004)<sup>76</sup> dargestellt. Auch die Grundlagen für die jeweiligen Messverfahren sind in der Standardliteratur ausführlich beschrieben.

<sup>72</sup> YONG & WARKENTIN (1975): S. 136.

<sup>73</sup> LU & LIKOS (2004): 42.

<sup>74</sup> YONG (1999): S. 10.

<sup>75</sup> YONG & WARKENTIN (1975): S. 115.

<sup>76</sup> LU & LIKOS (2004): 419.

### 3.7.4 Wasserbewegung Boden

Wasser bewegt sich im Boden aufgrund von Potentialunterschieden, es strebt stets einem Potential entgegen, dass im Gleichgewicht mit seiner Umgebung ist. Grundsätzlich werden bei der Wasserbewegung zwei Fälle unterschieden: A) Die **gesättigte Wasserbewegung**, bei der sich nur Wasser in den Poren des Bodens befindet und B) **ungesättigte Wasserbewegung**, bei der die Poren des Bodens mit Luft und Wasser gefüllt sind (YONG & WARKENTIN 1975)<sup>77</sup>. In beiden Fällen bestimmen einerseits das Potentialgefälle (als die treibende Kraft) und andererseits die gesättigte oder ungesättigte Wasserleitfähigkeit des Bodens das Ausmaß der Wasserbewegung (vgl. SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002 und YONG & WARKENTIN 1975)<sup>78</sup>.

Unter Pkt. 3.7.2 wurden die Teilpotentiale des Bodenwassers in einem bestimmten Punkt des Bodens bilanziert. Als Referenzkonfiguration wurde dazu freies Wasser bei atmosphärischem Druck auf gleicher geodätischer Höhe des betrachteten Bodens und bei gleicher Temperatur gewählt. Für die Untersuchung von Wasserbewegung im Boden ist dieser Ansatz nicht ausreichend. Verallgemeinert man nun die Referenzkonfiguration auf freies Wasser bei gleicher Temperatur, so ist die Potentialbilanz in Gleichung (3-8) um einen Druckanteil und einen Schwerkräftenanteil zu erweitern. Verwendet man außerdem die unter Pkt. 3.7.3 beschriebene Zuordnung von Teilpotentialen zu Teilsaugspannungen, so ergibt sich das Gesamtpotential zur Beschreibung von Wasserbewegung unter isothermen Verhältnissen zu:

$$\Delta\mu_t = \Delta\mu_m + \Delta\mu_o + \Delta\mu_p + \Delta\mu_g \quad (3-11)$$

$\Delta\mu_t$	Gesamtpotential des Porenwassers
$\Delta\mu_m$	Matrixpotential des Porenwassers
$\Delta\mu_o$	Osmotisches Potential des Porenwassers
$\Delta\mu_p$	Druckpotential
$\Delta\mu_g$	Gravitationspotential

Gemäß den Ausführungen unter Pkt. 3.7.3 kann das **Matrixpotential** aus der Summe der Teilpotentiale  $\Delta\mu_m = \Delta\mu_c + \Delta\mu_e + \Delta\mu_f$  zusammengesetzt werden. Für das **osmotische Potential** ( $\Delta\mu_o$ ) gilt die Beschreibung nach Pkt. 3.7.2. Das **Druckpotential** ( $\Delta\mu_p$ ) bezieht sich auf einen möglichen Druckunterschied zwischen freiem Wasser der Referenzkonfiguration und dem nicht dem Matrixpotential unterliegenden (freien) Wassers im betrachteten Punkt des Bodens (vgl. SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002 und YONG & WARKENTIN 1975)<sup>79</sup>. Das **Gravitationspotential** ( $\Delta\mu_g$ ) hingegen ergibt sich aus der Lage des betrachteten Bodenelements im Gravitationsfeld der Erde im Vergleich zu freiem Wasser in der Referenzkonfiguration (zum Beispiel YONG & WARKENTIN 1975)<sup>80</sup>. Es errechnet sich bei nach oben gerichteter z-Achse zu  $\Delta\mu_g = \rho_w \cdot g \cdot z$  (vgl. LU & LIKOS 2004, MIYAZAKI 2006)<sup>81</sup>.

<sup>77</sup> YONG & WARKENTIN (1975): S. 141.

<sup>78</sup> SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (2002): S. 218; YONG & WARKENTIN (1975): S. 141.

<sup>79</sup> SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (2002): S. 213; YONG & WARKENTIN (1975): S. 109.

<sup>80</sup> YONG & WARKENTIN (1975): S. 109.

<sup>81</sup> LU & LIKOS (2004): S. 326; MIYAZAKI (2006): S. 22 und 23.

Umgerechnet in eine hydrostatische Druckhöhe ( $H = \Delta\mu / g$ ; siehe zum Beispiel MIYAZAKI 2006)<sup>82</sup> ergibt sich das sogenannte hydraulische Potential ( $H_t$ ) in einem Punkt des Bodens entsprechend aus der Summe der zu Druckhöhen umgerechneten Teilpotentiale aus Gleichung (3-11) zu:

$$H_t = H_m + H_o + H_p + H_g \quad (3-12)$$

**Wasserbewegung im gesättigten Boden.** Diese Art der Wasserbewegung ist beschränkt auf jenen Fall, bei dem die Poren des Bodens vollständig mit Wasser gefüllt sind. Da der Boden gesättigt ist, kann vor allem die Matrixsaugspannung, aber auch die osmotische Saugspannung in Gleichung (3-12) in einer Näherung vernachlässigt werden. So gibt MIYAZAKI (2006)<sup>83</sup> zur Beschreibung der Druckhöhe in gesättigten Böden die gesamte Druckhöhe als Summe der Druckhöhen aus dem Druckpotential (also  $H_p$ ) und den Gravitationspotential (also  $H_g$ ) an:

$$H_t = H_p + H_g \quad (3-13)$$

Die Filtergeschwindigkeit, mit der sich Wasser durch den gesättigten Boden bewegt, ist aber nicht nur abhängig vom antreibenden Potentialgradienten, sondern auch von der Durchlässigkeit des Bodens und kann durch die *Darcy-Gleichung* beschrieben werden:

$$v = -k \cdot \frac{\Delta H}{\Delta l} \quad (3-14)$$

v	Filtergeschwindigkeit [ $L \cdot T^{-1}$ ]
k	Materialspezifischer Proportionalitätskoeffizient [ $L \cdot T^{-1}$ ]
$\Delta H$	Antreibende Potentialdifferenz, hier z.B. in Druckhöhe [L]
$\Delta l$	Fließstrecke [L]

Das Minuszeichen weist dabei darauf hin, dass die Bewegung des Wassers von hohen Potentialen hin zu niedrigen verläuft (zum Beispiel LU & LIKOS 2004)<sup>84</sup>. Der Ausdruck für  $\Delta H / \Delta l$  (oder grad H) gibt an, wie sich das Potential auf der Fließstrecke ändert und ist in der Geotechnik allgemein als der hydraulische Gradient bekannt. Der verwendete konstante Proportionalitätsfaktor (k) wird auch als Wasserdurchlässigkeitskoeffizient bezeichnet.

Die gesättigte Durchströmung eines Bodens wird insgesamt von unterschiedlichen, teils auch untereinander abhängigen Faktoren, beeinflusst. Neben den Eigenschaften der strömenden Flüssigkeit (Viskosität, Druck, Dichte) nehmen auch Bodeneigenschaften (Tortuosität, Porenzahl, Porenwasserpotential, Porengrößenverteilung, Bodenstruktur) und unterschiedliche andere Faktoren einen Einfluss, die aus der Interaktion von Boden und Bodenwasser resultieren (Benetzungswärme, Ionenkonzentration, Dicke der Doppelschicht). (YONG & WARKENTIN 1975)<sup>85</sup>

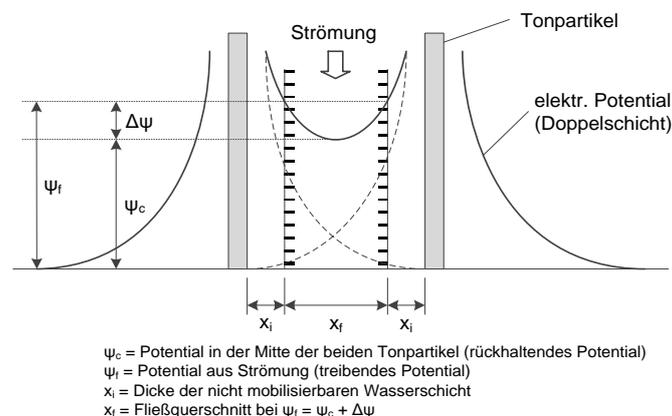
<sup>82</sup> MIYAZAKI (2006): S. 9.

<sup>83</sup> MIYAZAKI (2006): S. 21.

<sup>84</sup> LU & LIKOS (2004): 328.

<sup>85</sup> YONG & WARKENTIN (1975): S. 149.

Vor allem bei der Durchströmung von Tonen stößt die Anwendbarkeit der *Darcy-Gleichung* an ihre Grenzen. Die an den Tonmineralen zum Ausgleich von negativen Oberflächenladungen angelagerten Gegenionen binden Wassermoleküle in der sogenannten Doppelschicht. Die Gegenionen und die daran angelagerten Wassermoleküle sind dabei elektrostatisch an die Mineraloberflächen gebunden und können sich nicht frei mit dem Porenwasser bewegen. Auch das Wasser in der Doppelschicht ist über diese Ionen an die Mineraloberfläche gebunden. Wie stark die Bindung der Wassermoleküle in dieser Schicht über die Gegenionen an die Mineraloberfläche ist, kann durch den Potentialansatz beschrieben werden (siehe Pkt. 3.7.2). Dieses Potential nimmt mit steigendem Abstand von der Oberfläche stark ab. Für nähere Ausführungen zur Doppelschichttheorie und zur Abhängigkeit der Dicke dieser Doppelschicht von unterschiedlichen Faktoren wird auf TAN (1998)<sup>86</sup> oder MITCHELL & SOGA (2005)<sup>87</sup> verwiesen. Der Einfluss solcher Doppelschichten auf die Durchströmung lässt sich am besten anhand der Ausführungen von YONG & WARKENTIN (1975)<sup>88</sup> erläutern (siehe dazu auch Abb. 3.18): Zwischen zwei sich naheliegenden Tonpartikeln kann es vorkommen, dass die Doppelschichten sich überschneiden. Durch den Ionenüberschuss im Überschneidungsbereich ist das Potentialniveau dort angehoben (und Grundlage abstoßender Kräfte). Um Wasser in diesem Bereich bewegen zu können, muss ein treibendes Potential erst jenes rückhaltende Potential übersteigen, das die Wassermoleküle an den Ionen und damit der Mineraloberfläche festhält. Dies wird als erstes am Punkt des niedrigsten rückhaltenden Potentials, in der Mitte zwischen den Mineralschichten stattfinden. Mit wachsendem treibendem Potential wird der Fließquerschnitt dann aufgeweitet.



**Abb. 3.18: Einfluss der Doppelschicht von Tonpartikeln auf die bewegten Wasserschichten (nach YONG & WARKENTIN 1975, übersetzt und adaptiert)<sup>89</sup>**

Diese Eigenschaften führen dazu, dass der in Gleichung (3-14) dargestellte Zusammenhang bei kleinen Gradienten nicht linear ist und Wasserbewegung außerdem erst ab einem kritischen Gradienten auftritt. Als Konsequenz daraus verläuft die durch Gleichung (3-14) abgebildete Funktion unter Anwendung des linearen Proportionalitätsfaktors ( $k$ ) nicht durch den Nullpunkt. Siehe dazu zum Beispiel auch YONG & WARKENTIN (1975)<sup>90</sup>.

<sup>86</sup> TAN (1998): ab S. 248.

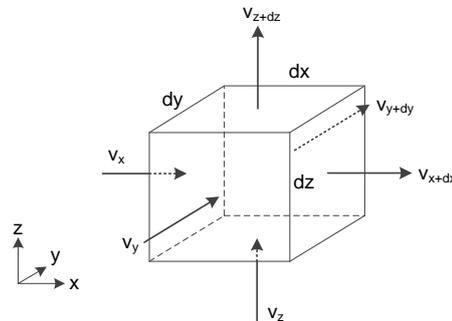
<sup>87</sup> MITCHELL & SOGA (2005): ab S. 153.

<sup>88</sup> YONG & WARKENTIN (1975): S. 96, 97, 153 und 154.

<sup>89</sup> YONG & WARKENTIN (1975): S. 154.

<sup>90</sup> YONG & WARKENTIN (1975): S. 150.

Die mathematische Beschreibung der Wasserbewegung im gesättigten Boden wird allgemein anhand der Durchströmung eines Bodenelementes (siehe [Abb. 3.19](#)) hergeleitet. Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich hauptsächlich auf die von MIYAZAKI (2006)<sup>91</sup> dargestellte Herleitung.



**Abb. 3.19:** Durchströmung eines Bodenelementes (nach MIYAZAKI 2006, adaptiert)<sup>92</sup>

[Abb. 3.19](#) zeigt jene Filtergeschwindigkeiten, mit denen Bodenwasser in das Bodenelement einströmt und daraus wieder ausströmt. Die Filtergeschwindigkeiten an den ausströmenden Seiten des Bodenelements sind dabei:

$$v_{x+dx} = v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} dx \quad (3-15)$$

$$v_{y+dy} = v_y + \frac{\partial v_y}{\partial y} dy \quad (3-16)$$

$$v_{z+dz} = v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} dz \quad (3-17)$$

Mit Hilfe dieser Filtergeschwindigkeiten und der Kontinuitätsgleichung lässt sich die ein- und ausströmende Wassermenge über den Zeitraum  $dt$  bilanzieren. In diesem Zeitraum ändert sich der volumetrische Wassergehalt ( $\theta$ ) des Bodenelements um  $d\theta$ . Das entspricht einer Wassermenge von  $d\theta \cdot dx \cdot dy \cdot dz$ . Zusammengesetzt ergibt sich:

$$d\theta \, dx \, dy \, dz = \left( -\frac{\partial v_x}{\partial x} dx \, dy \, dz - \frac{\partial v_y}{\partial y} dx \, dy \, dz - \frac{\partial v_z}{\partial z} dx \, dy \, dz \right) dt \quad (3-18)$$

Und daraus wird wiederum:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \quad (3-19)$$

<sup>91</sup> MIYAZAKI (2006): S. 21, 24 bis 26.

<sup>92</sup> MIYAZAKI (2006): S. 24.

Dabei bezeichnet der Term  $\partial\theta / \partial t$  die zeitabhängige Änderung des volumetrischen Wassergehaltes. Die Filtergeschwindigkeiten nach Gleichung (3-14) können in den drei Achsrichtungen unter Berücksichtigung von Gleichung (3-13) folgendermaßen formuliert werden:

$$v_x = -k_x \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \quad (3-20)$$

$$v_y = -k_y \cdot \frac{\partial H}{\partial y} \quad (3-21)$$

$$v_z = -k_z \cdot \frac{\partial H}{\partial z} \quad (3-22)$$

Durch Einsetzen der Gleichungen (3-20), (3-21) und (3-22) in Gleichung (3-19) ergibt sich:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \cdot \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \cdot \frac{\partial H}{\partial z} \right) \quad (3-23)$$

Nimmt man für gesättigte Durchströmungsverhältnisse an, dass die Durchlässigkeit konstant ( $k = \text{konst.}$ ) sowie in alle Richtungen gleich ( $k_x = k_y = k_z = k$ ) ist und sich der volumetrische Wassergehalt nicht ändert ( $\partial\theta / \partial t = 0$ ), so lässt sich Gleichung (3-23) in die *Laplace-Gleichung* umformen:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 0 \quad (3-24)$$

Die *Laplace-Gleichung* beschreibt die Potentialverteilung im Strömungsfeld bei gesättigter Strömung (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002)<sup>93</sup>. Gleichung (3-24) bedeutet im Prinzip, dass die Änderung des Potentialgradienten (Druckhöhengradienten) in Summe über alle Richtungen gleich Null ist (LAMBE & WHITMAN 1969)<sup>94</sup>. Das Potential wird entlang der Strömungspfad (jeweils Richtung des lokalen Geschwindigkeitsvektors) dem Gradienten entsprechend abgebaut. Eine anschauliche Erläuterung, welche Bedeutung die *Laplace-Gleichung* für die Konstruktion von Strömungsnetzen hat, findet sich zum Beispiel in BOWLES (1984)<sup>95</sup>.

**Wasserbewegung im ungesättigten Boden.** Die ungesättigte Wasserbewegung findet im teilgesättigten Boden statt und ist aufzuteilen in einen Anteil, der durch Bewegung in der Dampfphase stattfindet und bei hohen Temperaturen begünstigt ist. Ein weiterer Anteil findet durch Bewegungen der flüssigen Phase statt. Welche dieser beiden Wasserbewegungen jeweils überwiegt, wird auch maßgeblich vom Wassergehalt bestimmt. Während bei niedrigen Wassergehalten der Anteil aus dem Wassertransport in der Dampfphase überwiegt, wird die Wasserbewegung bei höheren Wassergehalten durch den Transport in der Flüssigphase bestimmt. (YONG & WARKENTIN 1975)<sup>96</sup>

<sup>93</sup> SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (2002): S. 220.

<sup>94</sup> LAMBE & WHITMAN (1969): S. 275.

<sup>95</sup> BOWLES (1984): S. 279 und 280.

<sup>96</sup> YONG & WARKENTIN (1975): S. 141.

Wie auch im gesättigten Boden ergibt sich die Geschwindigkeit der Wasserbewegung einerseits aus dem antreibenden Potentialgradienten und andererseits aus der ungesättigten Wasserleitfähigkeit des Bodens. Im ungesättigten Boden kann auf das Druckpotential in Gleichung (3-12) verzichtet werden. Auch auf das osmotische Potential wird in der Regel verzichtet (vgl. LU & LIKOS 2004)<sup>97</sup>. So ergibt sich das zu berücksichtigende Potential in Form einer Druckhöhe als Summe aus einer dem Matrixpotential zuordenbaren Druckhöhe (also  $H_m$ ) und der hydrostatischen Druckhöhe aus dem Gravitationspotential (also  $H_g$ ). Nach LU & LIKOS (2004)<sup>98</sup> oder MIYAZAKI (2006)<sup>99</sup>:

$$H_t = H_m + H_g \quad (3-25)$$

Die Filtergeschwindigkeit, mit der sich Wasser durch den Boden bewegt, kann allgemein ebenfalls mit Gleichung (3-14) beschrieben werden. Für den gesättigten Boden wurde bereits beschrieben, dass die Eigenschaften des Bodens und der Flüssigkeit sowie Faktoren, die sich aus deren Interaktion ergeben, die Durchströmung beeinflussen. Im ungesättigten Boden kommt noch ein maßgeblicher Faktor hinzu: der zur Verfügung stehende Fließquerschnitt für Wasserbewegung wird durch die Entleerung der Poren zunehmend eingeengt. So lässt sich Gleichung (3-14) für den ungesättigten Fall folgendermaßen präzisieren:

$$v = -k(\theta) \cdot \frac{\Delta H}{\Delta l} \quad (3-26)$$

$v$	Filtergeschwindigkeit [ $L \cdot T^{-1}$ ]
$k(\theta)$	Materialspez., wassergehaltsabh. Proportionalitätskoeffizient [ $L \cdot T^{-1}$ ]
$\Delta H$	Antreibende Potentialdifferenz, hier z.B. in Druckhöhe [L]
$\Delta l$	Fließstrecke [L]

Der materialspezifische und wassergehaltsabhängige Proportionalitätskoeffizient  $k(\theta)$  wird als ungesättigte Leitfähigkeit bezeichnet. Unterhalb des gesättigten Zustandes nimmt die hydraulische Leitfähigkeit eines Bodens sehr rasch ab, da vor allem die großen Poren (mit großem Fließquerschnitt) als erstes entwässern (YONG & WARKENTIN 1975)<sup>100</sup>.

Die Bewegungsgleichung lässt sich auch für den ungesättigten Fall aus der Massenbilanz am Bodenelement in Abb. 3.19 ermitteln. Setzt man die Teilpotentiale aus Gleichung (3-25) in die Gleichung (3-23), so ergibt sich unter Berücksichtigung einer isotropen ungesättigten Wasserleitfähigkeit ( $k(\theta)_x = k(\theta)_y = k(\theta)_z = k(\theta)$ ) und der Tatsache, dass die Ableitungen des Gravitationspotentials in die Richtungen  $x$  und  $y$  wegfallen ( $\partial H_g / \partial x = 0$  und  $\partial H_g / \partial y = 0$ ):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k(\theta) \cdot \frac{\partial H_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k(\theta) \cdot \frac{\partial H_m}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k(\theta) \cdot \left( \frac{\partial H_m}{\partial z} + \frac{\partial H_g}{\partial z} \right) \right) \quad (3-27)$$

<sup>97</sup> LU & LIKOS (2004): 329.

<sup>98</sup> LU & LIKOS (2004): 329.

<sup>99</sup> MIYAZAKI (2006): S. 21.

<sup>100</sup> YONG & WARKENTIN (1975): S. 157.

Das Gravitationspotential lässt sich über die Höhe  $\partial z$  zu  $H_g = \Delta\mu_g / g = \rho_w \cdot \partial z$  ermitteln. Vereinfacht man die Dichte des Wassers ( $\rho_w = 1 \text{ [M/L}^3\text{]}$ ) und erweitert die Gleichung um die Kapillarkapazität  $C(H_m)$  ( $C(H_m) = \partial\theta / \partial H_m$ ), so kann Gleichung (3-27) umgeformt werden zur *Richards-Gleichung*:

$$C(H_m) \cdot \frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k(\theta) \cdot \frac{\partial H_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k(\theta) \cdot \frac{\partial H_m}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k(\theta) \cdot \frac{\partial H_m}{\partial z} \right) + \frac{\partial k(\theta)}{\partial z} \quad (3-28)$$

Gleichung (3-28) beschreibt bei der Auswahl richtiger Ausgangs- und Randbedingungen im ungesättigten Boden die räumliche Verteilung des Potentials in Form der Druckhöhe in Abhängigkeit von der Zeit (vgl. LU & LIKOS 2004)<sup>101</sup>. Bei der Herleitung wurde davon ausgegangen, dass die Änderung im volumetrischen Wassergehalt des Bodenelementes der Differenz von ein- und auströmendem Wasservolumen entspricht. Sie ist nur für jene Fälle gültig, in denen sich das Volumen des Bodenelements nicht ändert. Die darin verwendete Kapillarkapazität ( $C(H_m)$ ) ergibt sich aus dem Zusammenhang von volumetrischem Wassergehalt ( $\theta$ ) und jeweils jener der kapillaren Saugspannung zuordenbaren Druckhöhe ( $H_m$ ) und entspricht letztlich der Neigung der Druckhöhe-Wassergehalts-Funktion (vgl. LU & LIKOS 2004)<sup>102</sup>. Die Kapillarkapazität ( $C(H_m)$ ) ist für alle Böden unterschiedlich und kann aufgrund der Hysterese (Unterschiede zwischen Be- und Entwässerungskurve der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung) bereits bei einem einzelnen Boden variieren (vgl. MIYAZAKI 2006)<sup>103</sup>.

Wird in Gleichung (3-28) der wassergehaltsabhängige Diffusionskoeffizient ( $D(\theta)$ ) eingeführt ( $D(\theta) = k(\theta) / C(H_m) = k(\theta) \cdot \partial H_m / \partial\theta$ ), so erhält man:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D(\theta) \cdot \frac{\partial\theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D(\theta) \cdot \frac{\partial\theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D(\theta) \cdot \frac{\partial\theta}{\partial z} \right) + \frac{\partial k(\theta)}{\partial z} \quad (3-29)$$

Die Verwendung des Diffusionskoeffizienten ( $D(\theta)$ ) hat den Vorteil, dass dieser wassergehaltsabhängige Wert vergleichsweise einfach über Versuche bestimmbar ist (YONG & WARKENTIN 1975)<sup>104</sup>. Zur Lösung horizontaler Probleme kann dann mit dem Diffusionskoeffizienten gerechnet werden, da der in z-Richtung formulierte Teil von Gleichung (3-29) wegfällt. Für dreidimensionale Probleme ist aber auch weiterhin die Kenntnis der wassergehaltsabhängigen Leitfähigkeit ( $k(\theta)$ ) erforderlich. Wird der Diffusionskoeffizient ( $D(\theta)$ ) eines Bodens experimentell ermittelt und ist die zugehörige Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung (anders: Druckhöhe-Wassergehalts-Beziehung) des Bodens bekannt, so lässt sich  $D(\theta) = k(\theta) \cdot \partial H_m / \partial\theta$  nach der ungesättigten Leitfähigkeit auflösen und sich diese so indirekt ermitteln (LU & LIKOS 2004)<sup>105</sup>.

<sup>101</sup> LU & LIKOS (2004): 373.

<sup>102</sup> LU & LIKOS (2004): 372.

<sup>103</sup> MIYAZAKI (2006): S. 27.

<sup>104</sup> YONG & WARKENTIN (1975): S. 158.

<sup>105</sup> LU & LIKOS (2004): 477.

## 4 Untersuchungen zur erdbautechnischen Eignung des Verfahrens

### 4.1 Allgemeines

Bodenverbesserungsmaßnahmen werden vorrangig zur Verbesserung der Verdichtbarkeit und Tragfähigkeit von Erdbaustoffen durchgeführt. So auch das in dieser Arbeit beschriebene Verfahren zur Bodenverbesserung mit RC-Materialien. In den Untersuchungen wurden daher vor allem Verdichtungsversuche und Versuche zur Tragfähigkeit (CBR) an unterschiedlichen Mischungen aus feinkörnigen Böden und Recyclingmaterialien durchgeführt. Die nachfolgenden Auswertungen stützen sich insgesamt auf etwa 75 Proctorkurven, die anhand von ungefähr 550 Proctor-Einzelversuchen (im Proctortopf  $\varnothing$  15 cm) ermittelt wurden. An etwa 330 der Probekörper wurde im Anschluss an den Verdichtungsversuch ein CBR-Versuch zur Abklärung des Tragverhaltens durchgeführt. Versuche zum Schwellverhalten bei Wasserlagerung, zu Tragfähigkeitsänderungen durch Wasserlagerung sowie zur Änderung der Durchlässigkeit durch die Verbesserungsmaßnahme erfolgten an ausgewählten Mischungen.

Zu Beginn der Untersuchungen lagen zum Verfahren „Bodenverbesserung mit RC-Materialien“ nahezu keine Erfahrungen vor. Siehe dazu auch Pkt. 2.2. Das Untersuchungsprogramm wurde aus diesem Grund erst mit dem wachsendem Erkenntnisstand entwickelt. Die durchgeführten und nachfolgend zusammengefassten Versuchsreihen spiegeln dies in den unterschiedlichen Fragestellungen wieder, die ihnen zugrunde liegen. Während in **Versuchsreihe 1 (VR 1)** die Verbesserung unterschiedlicher Böden mit einem möglichst homogenen RC-Material der Körnung 0/4 mm (RC-Mix 0/4) im Fokus der Untersuchungen stand, wurde **Versuchsreihe 2 (VR 2)** zur Untersuchung des Einflusses typischer Schwankungen in der Körnung und Zusammensetzung des RC-Materials innerhalb der Materialklasse RC-Mix 0/4 durchgeführt. Die **Versuchsreihe 3 (VR 3)** und **Versuchsreihe 4 (VR 4)** dienten jeweils der Klärung von Fragen zur Beeinflussung des Verbesserungserfolges durch den Eigenwassergehalt des Zugabe-Materials sowie zur Beeinflussung der Verbesserungswirkung durch Änderungen der Körnung und der stofflichen Zusammensetzung des Recyclingmaterials außerhalb der Materialklasse RC-Mix 0/4 (Untersuchung auch von reinem RC-Beton und RC-Ziegel der Körnung 0/4 mm sowie von RC-Mix in der Körnung 0/32 mm als Zugabe-Material). Alle vier Versuchsreihen umfassten hauptsächlich Versuche zur Verdichtung und Tragfähigkeit. In **Versuchsreihe 5 (VR 5)** wurde dann, in Anlehnung an die in Versuchsreihe 4 untersuchten Mischungen, der Einfluss der Verbesserungsmaßnahmen auf das Schwellverhalten, die Änderung der Tragfähigkeit durch Wasserlagerung und die Durchlässigkeit von etwa im Optimum verdichteten Proben verbesserter Böden untersucht. Der genaue Untersuchungsumfang einzelner Versuchsreihen ist im Detail unter Pkt. 4.4 beschrieben.

Die durch die Versuchsreihen zu beantwortenden Fragestellungen zum Verfahren „Bodenverbesserung mit Recyclingbaustoffen aus Bauschutt“ können folgendermaßen zusammengefasst werden:

**FF1 Ausmaß der Verbesserung bei feinkörnigen Böden**

- FF1-A Wie gut lassen sich feinkörnige Böden mit trockenem RC-Material aus Bauschutt (RC-Mix 0/4) bei Zugabemengen bis 50 M.-% verbessern? Gibt es Böden, die mit diesem Verfahren nicht verbessert werden können?
- FF1-B Welchen Einfluss haben Schwankungen der stofflichen Zusammensetzung und Kornverteilung des Zugabe-Materials **innerhalb** der Materialklasse RC-Mix 0/4 auf den Verbesserungserfolg?
- FF1-C Welchen Einfluss haben Änderungen in der stofflichen Zusammensetzung und der Kornverteilung des Zugabe-Materials **außerhalb** der Materialklasse RC-Mix 0/4 auf den Verbesserungserfolg?
- FF1-D Welchen Einfluss haben Änderungen des Eigenwassergehaltes des Zugabe-Materials der Materialklasse RC-Mix 0/4 auf die Verbesserungswirkung?

**FF2 Verdichtungseigenschaften der entstehenden Mischungen**

- FF2-A Wie ändern sich die Verdichtungseigenschaften feinkörniger Böden durch die Verbesserung mit RC-Material aus Bauschutt (RC-Mix 0/4)?
- FF2-B Welchen Einfluss haben Änderungen in der stofflichen Zusammensetzung und der Kornverteilung des Zugabe-Materials **außerhalb** der Materialklasse RC-Mix 0/4 auf die Entwicklung der Verdichtungseigenschaften der entstehenden Mischungen?
- FF2-C Welchen Einfluss haben Änderungen des Eigenwassergehaltes des Zugabe-Materials der Materialklasse RC-Mix 0/4 auf die Entwicklung die Verdichtungseigenschaften der entstehenden Mischungen?

**FF 3 Tragfähigkeit der entstehenden Mischungen**

- FF3-A Wie sind Tragfähigkeiten der entstehenden Mischungen aus feinkörnigen Böden mit gemischtem RC-Material aus Bauschutt (RC-Mix) der Körnung 0/4 mm im Vergleich zum jeweils unverbesserten Boden zu beurteilen?
- FF3-B Welchen Einfluss haben Änderungen der stofflichen Zusammensetzung und der Kornverteilung des Zugabe-Materials **außerhalb** der Materialklasse RC-Mix 0/4 auf die Tragfähigkeit der Mischungen?
- FF3-C Wie ist das Verfahren „Bodenverbesserung mit RC-Materialien“ insgesamt im Vergleich zur herkömmlichen mechanischen Bodenverbesserung zu beurteilen?

**FF 4 Einfluss der Maßnahme auf weitere bautechnische Kennwerte**

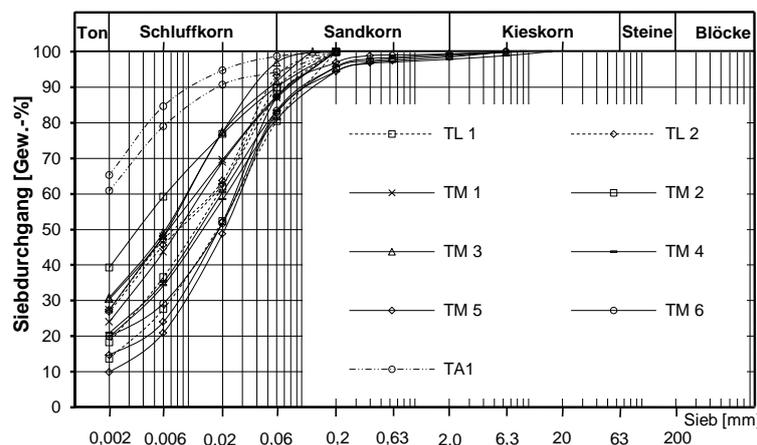
- FF4-A Können die Vorgaben für den maximal zulässigen Luftporenanteil nach ZTV-E StB mit diesem Verfahren grundsätzlich eingehalten werden?
- FF4-B Welche Entwicklungen ergeben sich aus der Verbesserung feinkörniger Böden mit RC-Materialien in Bezug auf die Schwellhebung bei Wasserlagerung und die Tragfähigkeit nach Wasserlagerung?
- FF4-C Wie ändert sich die Durchlässigkeit eines feinkörnigen Bodens durch die Verbesserung mit RC-Materialien?

## 4.2 Versuchsmaterialien<sup>106</sup>

### 4.2.1 Feinkörnige Böden

Für die Untersuchungen wurden insgesamt 9 feinkörnige Böden mit leicht bis ausgeprägt plastischen Eigenschaften verwendet. Neben natürlichen Böden wurden auch aufbereitete feinkörnige Böden einbezogen, die kommerziell vertrieben werden (Tonindustrie). Alle diese Böden wurden bautechnisch klassifiziert und ihre Verdichtungs- und Tragfähigkeitseigenschaften (CBR) wurden untersucht. Die Ergebnisse aus diesen Versuchen dienten jeweils als Grundlage zum Vergleich mit den Verdichtungs- und Tragfähigkeitseigenschaften nach Anwendung der Verbesserungsmaßnahmen. Eine ausführliche Beschreibung der Böden mit Angaben zu den klassifizierenden Merkmalen und bautechnischen Eigenschaften ist für die Böden einzeln jeweils in Anhang A.1 dieser Arbeit beigefügt.

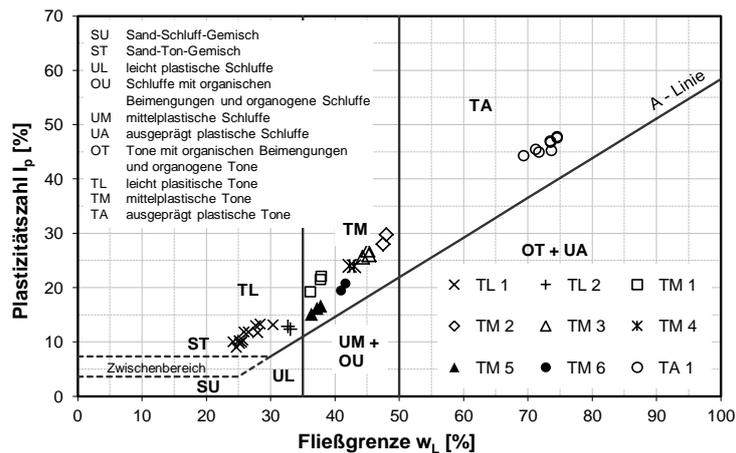
Abb. 4.1 zeigt die Kornverteilungslinien und Kornverteilungsbänder (bei Mehrfachbestimmung jeweils obere und untere Grenze) der 9 Ausgangsböden, diese wiesen einen Sandkornanteil zwischen 0 M.-% und maximal 20 M.-% auf.



**Abb. 4.1:** Darstellung der feinkörnigen Ausgangsböden im Plastizitätsdiagramm

Abb. 4.2 zeigt die Böden im Plastizitätsdiagramm nach DIN 18196:2011. Mehrere Datenpunkte für einen Boden weisen dabei auf eine Mehrfachbestimmung der plastischen Eigenschaften hin. Wurde Material aus mehreren Lieferungen für die Versuche verwendet, so wurde der Boden zumindest einmal je Lieferung klassifiziert. Alle Böden liegen im Plastizitätsdiagramm oberhalb der A-Linie und sind als leicht-, mittel- und ausgeprägt plastische Tone zu klassifizieren.

<sup>106</sup> Die Datengrundlage zum Kapitel wurde im Rahmen von FE 05.0166/2011/ERB und FE 05.0183/2013/CGB (jeweils im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen; siehe HENZINGER et al. 2015a und HENZINGER et al. 2015b) und im Rahmen von Studentarbeiten am Zentrum Geotechnik der TU München erarbeitet (KARAS 2013 sowie RUHLAND 2014 und KRÜGER 2015).



**Abb. 4.2:** Darstellung der feinkörnigen Ausgangsböden im Plastizitätsdiagramm

Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche zur Klassifizierung und zu den bautechnischen Eigenschaften der Ausgangsböden sind zusammenfassend in Tab. 4.1 eingetragen.

**Tab. 4.1:** Zusammenfassung der Eigenschaften der feinkörnigen Böden

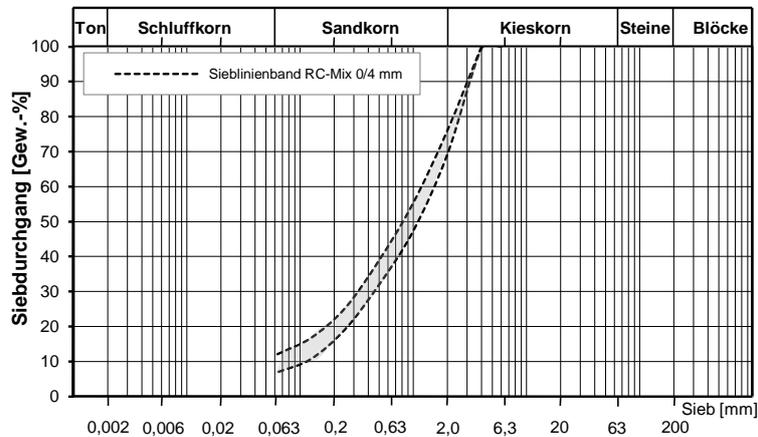
Boden	TL1	TL2	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TA1
Gruppe	TL	TL	TM	TM	TM	TM	TM	TM	TA
w <sub>L</sub> [%] <sup>2)</sup>	26,5	32,9	37,3	47,8	44,9	42,7	37,1	41,4	72,8
w <sub>P</sub> [%] <sup>2)</sup>	15,3	20,4	16,5	18,9	18,7	18,7	21,3	21,3	26,8
I <sub>p</sub> [%]	11,2	12,5	20,8	28,9	26,2	24,0	15,8	20,1	46,1
≤ 2 μm [%]	14-18	27	24-27	39	30-31	20-21	10-15	20	61-65
≤ 0,06 mm [%]	81-90	88-93	87-88	90	92-97	81-83	83-87	83	79-85
≤ 2 mm [%]	100	100	100	100	100	98-99	98-99	99	100
I <sub>A</sub> [-]	≈ 0,7	≈ 0,5	≈ 0,8	≈ 0,7	≈ 0,8	≈ 1,2	≈ 1,3	≈ 1,0	≈ 0,7
ρ <sub>s</sub> [g/cm <sup>3</sup> ]	2,75 <sup>2)</sup>	2,63 <sup>2)</sup>	2,69	2,63	2,70 <sup>2)</sup>	2,66 <sup>2)</sup>	2,61	2,61	2,59 <sup>2)</sup>
w <sub>Boden(Pr)</sub> [%] <sup>1)</sup>	13,5	18,2	16,6	19,1	19,3	18,7	17,9	20,1	24,4
ρ <sub>d,Boden(Pr)</sub> [g/cm <sup>3</sup> ] <sup>1)</sup>	1,905	1,714	1,796	1,695	1,716	1,730	1,715	1,658	1,486
CBR <sub>0</sub> [%] <sup>1)</sup>	11,3	15,0	14,7	17,0	13,9	-	13,2	10,8	18,1
n <sub>a</sub> [%] <sup>1)</sup>	5,0	3,8	3,4	3,2	3,2	2,6	6,2	3,1	6,3
Anmerkung:									
1) ...Werte im Proctoroptimum									
2) ...Mittelwert									
Gruppe ...Bodengruppe nach DIN 18196:2011									
w <sub>L</sub> , w <sub>P</sub> ...Bestimmung nach DIN 18122-1:1997									
I <sub>A</sub> ...Bestimmung als Quotient: Plastizitätszahl in % / Tonanteil in %; unter Verwendung gemittelter Werte									
≤ 2 μm ...Bestimmung nach DIN 18123:2011 (Tonanteil)									
≤ 06 mm ...Bestimmung nach DIN 18123:2011									
≤ 2 μm ...Bestimmung nach DIN 18123:2011									
ρ <sub>s</sub> ...Bestimmung nach DIN 18124:2011 (Gaspyknometer)									
w <sub>Boden(Pr)</sub> ...Bestimmung in Anlehnung an DIN 18127:2012									
ρ <sub>d,Boden(Pr)</sub> ...Bestimmung in Anlehnung an DIN 18127:2012									
CBR <sub>0</sub> ...Bestimmung in Anlehnung an TP BF-StB Teil 7.1									

### 4.2.2 Zugabe-Material

In mehreren Versuchsreihen wurden die unter Pkt. 4.2.1 vorgestellten Böden durch Zugabe unterschiedlicher RC-Materialien verbessert. Die Ergebnisse der klassifizierenden Versuche an diesen RC-Materialien sind nachfolgend, getrennt für die jeweiligen Versuchsreihen, aufgelistet.

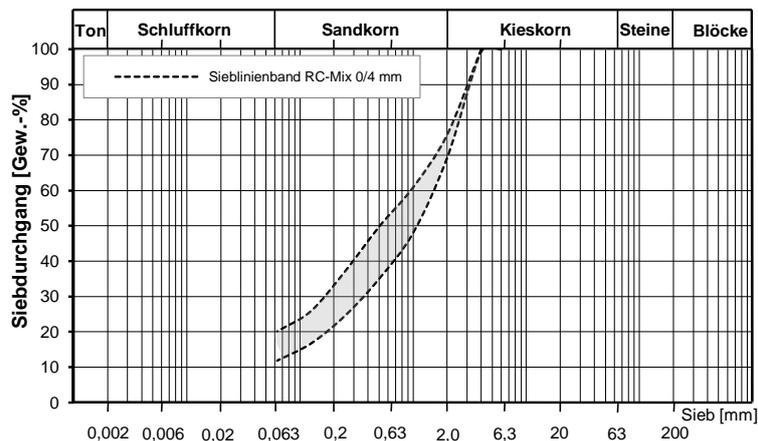
**RC-Mix 0/4 aus Versuchsreihe 1.** Das Sieblinienband (stellvertretend für 4 Messungen) des in Versuchsreihe 1 verwendeten RC-Materials (RC-Mix 0/4 mm) ist in Abb. 4.3 dargestellt.

Das Material wurde aus einer Körnung 0/8 mm durch Absiebung des Anteils  $> 4$  mm hergestellt. Bautechnisch kann das Material der Gruppe SU nach DIN 18196:2011 zugeordnet werden. Im Vergleich zu jenem in den Versuchsreihen 2 und 4 verwendeten RC-Mix 0/4 und dem in Versuchsreihe 3 verwendeten RC-Mix 0/4 mm (B) ist dieser RC-Mix 0/4 gröber, sein Anteil an Material  $< 0,063$  mm liegt etwa um 10 %.



**Abb. 4.3:** Sieblinienband des in Versuchsreihe 1 verwendeten RC-Materials

**RC-Mix 0/4 aus Versuchsreihe 2.** Das Sieblinienband (stellvertretend für 7 Messungen) des in Versuchsreihe 2 verwendeten RC-Mix 0/4 mm ist in [Abb. 4.4](#) dargestellt. Bautechnisch kann das Material den Gruppen SU und SU\* nach DIN 18196:2011 zugeordnet werden. Das Material stammt aus mehreren Lieferungen und wurde jeweils durch Absiebung der Fraktion  $> 4$  mm aus der Körnung 0/8 mm und 0/56 mm hergestellt. Der Feinkornanteil ( $< 0,063$  mm) schwankte zwischen 12 und 20 %.



**Abb. 4.4:** Sieblinienband des in Versuchsreihe 2 verwendeten RC-Materials

Der bei den Versuchen in Versuchsreihe 2 verwendete RC-Mix der Körnung 0/4 mm stammt, wie bereits erwähnt, aus mehreren Lieferungen (drei) im zeitlichen Abstand von mehreren Monaten. Anhand von Teilproben (4/32 mm) jener Materialien, die in der Körnung 0/56 mm bezogen wurden, wurde die stoffliche Kennzeichnung durch visuelle Auszählung gemäß TP Gestein Teil 3.1.5 ermittelt. Dies erfolgte einmal an jeweils drei Proben, ein anderes Mal an nur einer Probe. Das Ergebnis dieser Untersuchungen ist in [Tab. 4.2](#) zusammenfassend

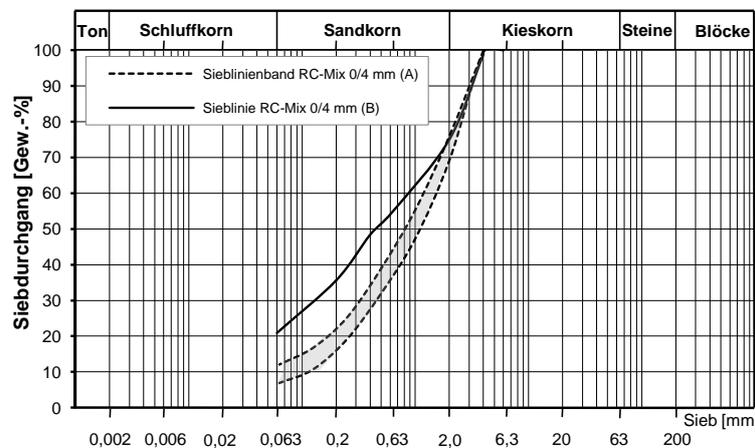
dargestellt und weist auf die Hauptbestandteile eines solchen RC-Materials aus gemischtem Bauschutt hin.

**Tab. 4.2: Stoffliche Kennzeichnung des in Versuchsreihe verwendeten RC-Mix**

Bestandteil	Recyclingmaterial	RC-Mix (a/1) [M.-%]	RC-Mix (a/2) [M.-%]	RC-Mix (a/3) [M.-%]	RC-Mix (b/1) [M.-%]
Beton, Betonprodukte, Mauersteine aus Beton, zementgebundene Gesteinskörnung		51,29	48,51	40,78	21,96
Kalksandstein, Mörtel und ähnliche Stoffe		1,06	4,83	3,21	14,07
Klinker, Ziegel und Steinzeug		10,99	12,04	11,23	20,74
Natürliche und industriell hergestellte Gesteinskörnung		35,42	33,41	43,49	41,99
Mineralische Leicht- und Dämmbaustoffe, nicht schwimmender Porenbeton und Bims		0,07	0,00	0,08	0,57
Asphaltgranulat		0,00	0,00	0,04	0,14
Glas (Fliesen, Keramik)		0,96	1,43	0,81	0,43
Gipshaltige Baustoffe		0,00	0,01	0,18	0,00
Nicht schwimmende Fremdstoffe, wie Gummi, Kunststoffe, Textilien, Pappe und Papier		0,03	0,01	0,02	0,04
Eisen / nichteisenhaltige Metalle		0,17	0,00	0,03	0,00
Schwimmendes Material		0,21	0,21	0,12	0,05
Siebverlust bzw. Fehler		-0,19	-0,47	0	0

Wie der Vergleich der stofflichen Zusammensetzung von RC-Mix (a/1) bis (a/3) mit dem RC-Mix (b/1) verdeutlicht, setzt sich das gemischte RC-Material zwar hauptsächlich aus den Gruppen Betonbruch, natürliche Gesteinskörnung (mutmaßlich Zugschlagstoffe aus Betonbruch), Ziegelmaterial und Kalksandstein/Mörtel zusammen, die Anteile können grundsätzlich aber durchaus in mehr oder weniger großen Bereichen variieren.

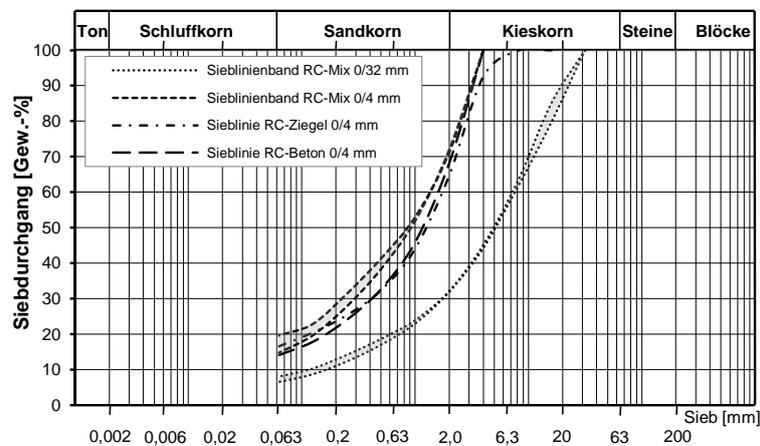
**RC-Mix 0/4 aus Versuchsreihe 3.** Als Zugabe-Material in Versuchsreihe 3 diente hauptsächlich der in Versuchsreihe 1 verwendete RC-Mix 0/4 mm (hier bezeichnet als RC-Mix 0/4 mm (A)). Wie bereits erwähnt, kann das Material nach DIN 18196:2011 der Gruppe SU zugeordnet werden. Zum Vergleich wurde für ausgewählte Mischungen auch Material verwendet, das aus einer Lieferkörnung 0/56 mm abgesiebt wurde und einen deutlich höheren Feinkornanteil aufwies (RC-Mix 0/4 mm (B)). Dieses Material ist nach DIN 18196:2011 als SU\* zu klassifizieren. Die Sieblinien beider Materialien sind in Abb. 4.5 dargestellt.



**Abb. 4.5: Zusammenfassung der Sieblinien des in Versuchsreihe 3 verwendeten RC-Materials**

**RC-Materialien aus Versuchsreihe 4 und 5.** Das Zugabe-Material für die vierte und fünfte Versuchsreihe wurde von unterschiedlichen Herstellern im Großraum München bezogen. Der bei den Versuchen verwendete RC-Mix 0/4 und 0/32 wurde jeweils durch Abtrennung des Anteils  $> 31,5$  mm und  $> 4$  mm aus der Körnung 0/56 mm gewonnen. Der RC-Beton 0/4 wurde durch Abtrennen des Anteils  $> 4$  mm aus einer Körnung 0/8 mm hergestellt. Das Ziegelbruchmaterial RC-Ziegel 0/4 konnte hingegen bereits in der in [Abb. 4.6](#) dargestellten Körnung bezogen werden.

Die Sieblinienbänder aller in den Versuchsreihen 4 und 5 verwendeten RC-Materialien sind in [Abb. 4.6](#) zusammengefasst. Die unterschiedlichen Zugabe-Materialien der Korngröße 0/4 mm weisen vergleichbare Kornverteilungslinien auf. Bautechnisch können die Materialien den Gruppen SU\* (RC-Mix 0/4 mm, RC-Beton 0/4 mm und RC-Ziegel 0/4 mm) sowie GU (RC-Mix 0/32 mm) nach DIN 18196:2011 zugeordnet werden.



**Abb. 4.6:** Sieblinien der in den Versuchsreihen 4 und 5 verwendeten RC-Materialien

Anhand einer Teilprobe des RC-Materials (4/32 mm) wurde die stoffliche Kennzeichnung gemäß TP Gestein Teil 3.1.5 durch visuelle Auszählung ermittelt. Das Ergebnis dieser Untersuchung ist in [Tab. 4.3](#) zusammenfassend dargestellt.

**Tab. 4.3:** Stoffliche Kennzeichnung des in den Versuchsreihen 4 und 5 verwendeten RC-Mix

Bestandteil	Recyclingmaterial	RC-Mix [M.-%]
Beton, Betonprodukte, Mauersteine aus Beton, zementgebundene Gesteinskörnung		49,21
Kalksandstein, Mörtel und ähnliche Stoffe		4,10
Klinker, Ziegel und Steinzeug		16,25
Natürliche und industriell hergestellte Gesteinskörnung		29,06
Mineralische Leicht- und Dämmbaustoffe, nicht schwimmender Porenbeton und Bims		0,11
Asphaltgranulat		0,00
Glas (Fliesen, Keramik)		0,74
Gipshaltige Baustoffe		0,00
Nicht schwimmende Fremdstoffe, wie Gummi, Kunststoffe, Textilien, Pappe und Papier		0,15
Eisen / nichteisenhaltige Metalle		0,00
Schwimmendes Material		0,13
Siebverlust bzw. Fehler		-

**Zusammenfassung.** Die bautechnische Klassifizierung sowie weitere relevante Eigenschaften der in den Versuchsreihen verwendeten RC-Materialien sind in Tab. 4.4 zusammenfassend aufgelistet.

**Tab. 4.4: Zusammenfassung der Eigenschaften der RC-Materialien**

Versuchsreihe	VR 1	VR 2	VR 3	VR 4 und VR 5			
Gruppe	SU	SU / SU*	SU / SU*	SU*	GU	SU*	SU*
Bezeichnung	RC-Mix				RC-Mix	RC-Beton	RC-Ziegel
Nennkörnung [mm/mm]	0/4				0/32	0/4	0/4
$\leq 63 \mu\text{m}$ [%]	6,9 - 12,1	11,9 - 20,1	6,9 - 20,9	14,8 - 19,6	6,5 - 8	14,1	16,6
$\leq 2 \text{ mm}$ [%]	69,1 - 75,9	69,3 - 75,8	69,1 - 75,0	71,2 - 71,9	31,9 - 32,1	68,2	64,7
$\rho_a$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2,648 <sup>1)</sup>				2,650 <sup>2)</sup>	2,598 <sup>3)</sup>	2,688 <sup>4)</sup>
Eigenwassergehalt [%]	2,2 - 2,4	2,4 - 2,6	2,0 - 12,3	2,3 - 2,8	2,2 - 3,0	3,7 & 5,5	2,6
Anmerkung:							
Gruppe ...Bodengruppe nach DIN 18196:2011							
$\leq 63 \mu\text{m}$ ...Bestimmung nach DIN 18123:2011 (Feinkornanteil)							
$\leq 2 \text{ mm}$ ...Bestimmung nach DIN 18123:2011							
$\rho_a$ ...Bestimmung nach DIN 18124:2011 (Gaspkyrometer) oder nach TP BF – StB Teil B 3.3 (Luftpyknometer)							
1) ...Ermittelt im Gaspkynometerverfahren nach DIN 18124:2011; Mittelwert aus 3 Messungen, Standardabweichung = 0,022 g/cm <sup>3</sup>							
2) ...Ermittelt im Luftpyknometerverfahren nach TP BF – StB Teil B 3.3; Mittelwert aus 2 Messungen, Differenz der beiden Werte = 0,040 g/cm <sup>3</sup>							
3) ...Ermittelt im Gaspkynometerverfahren nach DIN 18124:2011; Mittelwert aus 2 Messungen, Differenz der beiden Werte = 0,006 g/cm <sup>3</sup>							
4) ...Ermittelt im Gaspkynometerverfahren nach DIN 18124:2011; Mittelwert aus 2 Messungen, Differenz der beiden Werte = 0,001 g/cm <sup>3</sup>							

### 4.3 Versuchsdurchführung

**Einstellen der Ausgangswassergehalte der Böden.** Die Böden wurden, falls nicht bereits in Pulverform bezogen, vorab bis zum niedrigsten für die Versuche erforderlichen Wassergehalt getrocknet und mittels Kutter zerkleinert (Abb. 4.7). Dieses Grundmaterial wurde dann in verschlossenen Behältern bis zur Wasserzugabe gelagert.



**Abb. 4.7: Kutter zur Einmischung des Wassers in die feinkörnigen Böden<sup>107</sup>**

Die Wasserzugabe zur Erreichung der für die einzelnen Versuche erforderlichen Ausgangswassergehalte der Böden ( $w_{\text{Boden},0}$ ) erfolgte jeweils am Tag vor den Verdichtungsversuchen im Zwangsmischer (Kutter, siehe Abb. 4.7). Der Mischvorgang wurde dabei erst abgebro-

<sup>107</sup> Hersteller: Fa. Eduard Müller, ohne Typenbezeichnung.

chen, wenn eine optisch und haptisch homogene Grundmasse vorlag. Anschließend wurde der so vorbereitete Boden zur weiteren Homogenisierung in verschlossenen Eimern bis zur Versuchsdurchführung am nächsten Tag gelagert.

**Bodenverbesserung im Labor - Mischung von Boden und RC-Material.** Die Einmischung des Zugabe-Materials in den Boden erfolgte in einem Knetmischer, der aus der Teigwarenherstellung stammt. Der Mischer ist typisch für Eignungsprüfungen zu Bodenbehandlungsmaßnahmen im Erdbau und wurde im rotierenden Bewegungsmuster auf mittlerer Umdrehungsstufe (etwa 110 Rotationen pro Minute) betrieben. Die Auslenkung des Mischhakens wurde bei jedem Mischvorgang händisch gesteuert, um eine gleichmäßige Einmischung des Zugabe-Materials in den Boden zu gewährleisten und Anlagerungen am Rand und Boden des Mischgefäßes zu vermeiden. Die Dauer der Mischung wurde jeweils auf 120 Sekunden beschränkt.



**Abb. 4.8:** Knetmischer zur Einmischung des RC-Materials in die feinkörnigen Böden<sup>108</sup>

**Durchführung und Auswertung der Verdichtungsversuche.** Die Herstellung der einzelnen Probekörper wurde in Anlehnung an DIN 18127:2012 und TP BF-StB Teil 7.1 durchgeführt. Die Verdichtung erfolgte mit einer Verdichtungsarbeit von  $W \approx 0,6 \text{ MNm/m}^3$  (Standard-Proctor). Da bei den Versuchsreihen 2, 3, 4 und 5 im Anschluss an die Verdichtungsversuche teilweise auch CBR-Versuche an den Probekörpern durchgeführt werden sollten, wurde für alle Versuche die Verwendung eines Zylinders mit 15 cm Durchmesser (Proctortopf Typ B nach DIN 18127:2012; CBR-fähige Ausführung) gewählt. Die Verdichtung erfolgte bei allen Schichten ohne Stahlplatte; die verdichteten Proben wurden auf Zylinderoberkante abgezogen.

Die jeweils an den Proben der Ausgangsböden nach Einmischung des Wassers ermittelten Wassergehalte erwiesen sich als leicht fehleranfällig. Dies obwohl die Vorgaben der DIN 18121-1:1998 zu Mindestprobenmengen in den eigenen Versuchen deutlich überschritten wurden. Da aber allem dieser Wassergehalt des Bodens vor Verbesserung für die Beurteilung des Verbesserungserfolges einer Maßnahme von entscheidender Bedeutung ist, wurde der Betrag nachträglich durch Rückrechnung abgesichert. Dies erfolgte, da Abweichungen

<sup>108</sup> Hersteller: Fa. REGO - Rich. Hofheinz & Co. Maschinenfabrik, Typ SM 3

im ermittelten Ausgangswassergehalt des Bodens bei der Auswertung solcher Versuche zur Bodenverbesserung ungewünschte Folgen haben können. Ein Fehler geht einerseits in die Ermittlung der zu mischenden Materialmengen (Boden und Zugabe-Material) ein und verfälscht so das Mischungsverhältnis. Andererseits nimmt der Wert des Wassergehalts des Ausgangsbodens bei der Beurteilung des Verbesserungserfolges eine zentrale Rolle ein. So erfolgte die Versuchsauswertung der Verdichtungsversuche nach einer speziellen Auswerterroutine, mit Hilfe derer der Wassergehalt des Ausgangsmaterials und die Abweichung des tatsächlichen Mischungsverhältnisses vom Nennwert nachträglich überprüft werden konnte.

Die verwendete Auswerterroutine orientierte sich an den am genauesten bestimmbaren Parametern solcher Mischungen:

- Dem **Wassergehalt der Mischung** ( $w_{\text{Mischung}}$ ), der an einer repräsentativen Teilprobe des verdichteten Probekörpers bestimmt wurde und jeweils vergleichsweise große Probemengen umfasste. Es wurden Wasseranteile vernachlässigt, die während der Versuchsdurchführung zum Beispiel durch Verdunstung verloren gehen können. Dies war bei einer entsprechend sorgfältigen Versuchsdurchführung mit ausreichender Genauigkeit gerechtfertigt.
- Dem **Eigenwassergehalt des RC-Materials** ( $w_{\text{ZM},0}$ ). Das Zugabe-Material wurde über die Versuchsreihen hinweg in geschlossenen Behältern vorgehalten. Der Wassergehalt wurde so nahezu konstant gehalten und war aufgrund fortlaufender Kontrolle zu jedem Zeitpunkt ausreichend genau bekannt.
- Den **tatsächlich gemischten Feuchtmassen** von Boden und Zugabe-Material ( $m_{\text{w},\text{Boden}}$ ,  $m_{\text{w},\text{ZM}}$ ).

Bilanziert man die Massen zur Bestimmung des Wassergehaltes der Mischung so ergibt sich nachfolgende Gleichung (4-1):

$$w_{\text{Mischung}} = \frac{(m_{\text{w},\text{Boden}} - m_{\text{d},\text{Boden}}) + (m_{\text{w},\text{ZM}} - m_{\text{d},\text{ZM}})}{m_{\text{d},\text{Boden}} + m_{\text{d},\text{ZM}}} \quad (4-1)$$

Durch Umformung und Berücksichtigung von  $m_{\text{d},\text{ZM}} = m_{\text{w},\text{ZM}} / (1 + w_{\text{ZM},0})$  erhält man:

$$m_{\text{d},\text{Boden}} = \frac{m_{\text{w},\text{Boden}} + m_{\text{w},\text{Zugabe}} \cdot \left(1 - \frac{1 + w_{\text{Mischung}}}{1 + w_{\text{ZM},0}}\right)}{1 + w_{\text{Mischung}}} \quad (4-2)$$

$m_{\text{d},\text{Boden}}$	Gesuchte Trockenmasse des Bodens [M]
$m_{\text{w},\text{Boden}}$	Bekannte Feuchtmasse des Bodens [M]
$m_{\text{w},\text{ZM}}$	Bekannte Feuchtmasse des Zugabe-Materials [M]
$w_{\text{ZM},0}$	Bekannter Eigenwassergehalt des Zugabe-Materials [-]
$w_{\text{Mischung}}$	Versuchstechnisch ermittelter Wassergehalt der Mischung [-]

Als einziger unbekannter Parameter in Gleichung (4-1) lässt sich die Trockenmasse des Bodenanteils ( $m_{\text{d},\text{Boden}}$ ) identifizieren. Mithilfe von Gleichung (4-2) lässt sich die Trockenmasse des Bodenanteils aus den restlichen bekannten Werten ermitteln. Damit sind alle zur Rückrechnung des Ausgangswassergehalts des Bodenanteils und des tatsächlichen Mischungsverhältnisses (der Trockenmassen) erforderlichen Parameter bekannt.

Wich in den Versuchen das anhand dieser Routine ermittelte tatsächliche Mischungsverhältnis um mehr als 1 % vom Nennwert ab (zum Beispiel 0,3 M.-% bei einer Zugabemenge von 30 M.-%), wurde die Probe bei der weiteren Auswertung nicht mehr berücksichtigt.

**Tragfähigkeitsversuche ( $CBR_0$  und  $CBR_w$ ).** In den Versuchsreihen 2, 3 und 4 wurden anschließend an die Verdichtungsversuche teilweise auch Versuche zur Tragfähigkeit ( $CBR_0$ ) durchgeführt. Die Durchführung der Stempel Eindringversuche erfolgte jeweils an der Probenunterseite der verdichteten Proctorproben und wurde in Anlehnung an TP BF-StB Teil 7.1 mit einer seitlichen Auflast von 5 kg (4 Halbschalen zu je 1,25 kg) durchgeführt. Die angegebenen  $CBR_0$ -Werte verstehen sich als jeweils größerer Wert der erforderlichen Eindringkraft bei 2,5 und 5,0 mm (korrigierter) Eindringung. Abweichend von den Vorgaben der TP BF-StB Teil 7.1 wurden die Stempel Eindringversuche (gerätebedingt) mit einer Eindringgeschwindigkeit von 1,15 mm/min durchgeführt. Vergleichsversuche am unverbesserten Boden TA1 zeigten keine Unterschiede der Last/Eindringkurven zwischen einer Geschwindigkeit von 1,15 mm/min und einer Geschwindigkeit von 1,25 mm/min (Vorgabe TP BF-StB Teil 7.1).

Zusätzlich dazu wurden in Versuchsreihe 5 auch Tragfähigkeitsversuche nach 7-tägiger Wasserlagerung durchgeführt ( $CBR_w$ ). Dazu wurde die Probe mit dem Zylinder nach Verdichtung umgedreht und auf einer gelochten Grundplatte befestigt. Die Wasserlagerung erfolgte dann bei 20°C und mit einer Auflast von etwa 1,1 kg (gelochte Deckplatte zur Aufnahme des Messuhrbolzens für die Ermittlung des Schwellwertes). Die Hebung der Oberfläche wurde während der Zeit der Wasserlagerung aufgezeichnet und der  $CBR_w$ -Versuch im Anschluss an der geschwollenen Probenoberfläche durchgeführt. Dabei wurde analog wie bei der Versuchsdurchführung ohne Wasserlagerung ( $CBR_0$ ) vorgegangen.

**Durchlässigkeitsversuche.** An ausgewählten Proben (festgelegt in Versuchsreihe 4) wurden in Versuchsreihe 5 Versuche zur Durchlässigkeit in der Triaxialzelle gemäß DIN 18130-1:1998 bei veränderlichem Druckgefälle ( $i \leq 30$ ) und einem Zelleninnendruck von 0,5 bar durchgeführt. Die dazu verwendeten Proben wurden vorab wie bei den Verdichtungsversuchen vorbereitet und im Proctorzylinder mit Proctorenergie verdichtet.

#### 4.4 Untersuchungsprogramm

**Versuchsreihe 1<sup>109</sup>.** Es ist aus der Bindemittelverbesserung von Böden bekannt, dass sich feinkörnige Böden abhängig von ihrer Plastizität unterschiedlich gut verbessern lassen. Dies gilt auch für die Bodenverbesserung mit RC-Material und wurde in Versuchsreihe 1 nachgewiesen. Dazu wurden 6 unterschiedliche feinkörnige Böden (Bodengruppen TL, TM und TA gemäß DIN 18196:2011) durch Zugabe eines RC-Materials aus trockenem gemischtem Bauschutt (RC-Mix) der Körnung 0/4 mm verbessert. Das zur Verbesserung der Böden zugegebene RC-Material wies durchgehend eine gleichbleibende Zusammensetzung und Körnung auf.

Die untersuchten Mischungen der Böden mit RC-Mix der Körnung 0/4 mm sind in Tab. 4.5 zusammenfassend dargestellt. Die für Versuchsreihe 1 gewählten Zugabemengen orientierten sich an den Erkenntnissen aus den chronologisch ersten der durchgeführten Versuchs-

---

<sup>109</sup> Die Bearbeitung der Versuchsreihe erfolgte im Rahmen einer Studentendarbeit am Zentrum Geotechnik der TU München (KRÜGER 2015).

reihen zum Verfahren (siehe Versuchsreihen 4 und 5). Dabei wurden Zugabemengen zwischen 10 M.-% und maximal 70 M.-% untersucht.

**Tab. 4.5: Untersuchte Mischungen in Versuchsreihe 1**

Boden \ Mischung	TL1	TL2	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TA1
+ 30 % RC-Mix 0/4	X	X	X	-	X	X	-	-	X
+ 50 % RC-Mix 0/4	X	X	X	-	X	X	-	-	X

Die für die Mischungen verwendeten Materialien (Böden, RC-Mix 0/4 mm) wurden bereits unter Pkt. 4.2 beschrieben. Der mittlere Eigenwassergehalt des Zugabe-Materials für die Versuche in Versuchsreihe 1 betrug vor Mischung jeweils etwa  $w_{ZM,0} \approx 2,2$  bis  $2,4$  %.

Die Untersuchungen umfassten für alle Mischungen Verdichtungsversuche in Anlehnung an DIN 18127:2012 im Proctortopf  $\varnothing$  15 cm. Siehe dazu auch Pkt. 4.3. Versuche zur Tragfähigkeit ( $CBR_0$  oder  $CBR_w$ ) wurden in Versuchsreihe 1 nicht durchgeführt.

**Versuchsreihe 2<sup>110</sup>**. Versuchsreihe 2 wurde als Verallgemeinerung und Erweiterung von Versuchsreihe 1 angelegt. In die Ergebnisse ging aber auch jene Schwankung in der Zusammensetzung und der Körnung des RC-Materials (innerhalb der Materialklasse RC-Mix 0/4 mm) ein, die sich aus der sehr unterschiedlichen Herkunft dieses Materials aus Rückbauarbeiten ergibt. Untersucht wurden insgesamt Mischungen aus 8 feinkörnigen Böden (Bodengruppen TL, TM und TA gemäß DIN 18196:2011) mit trockenem gemischtem RC-Material (RC-Mix) der Körnung 0/4 mm. Das zugegebene RC-Material stammt aus drei unterschiedlichen Lieferungen und wies entsprechende Schwankungen in Zusammensetzung und Körnung innerhalb der Materialklasse (RC-Mix 0/4 mm) auf. Das Untersuchungsprogramm ist in Tab. 4.6 aufgelistet.

**Tab. 4.6: Untersuchte Mischungen in Versuchsreihe 2**

Boden \ Mischung	TL1	TL2	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TA1
+ 30 % RC-Mix 0/4	X	X	X	X	X	-	X	X	X
+ 50 % RC-Mix 0/4	X	X	X	X	X	-	X	X	X

Die in dieser Versuchsreihe verwendeten Materialien (Böden, RC-Mix 0/4 mm) wurden bautechnisch unter Pkt. 4.2 beschrieben, der mittlere Eigenwassergehalt des Zugabe-Materials vor Mischung kann für die Versuche in Versuchsreihe 2 mit jeweils etwa  $w_{ZM,0} \approx 2,4$  bis  $2,6$  % angegeben werden.

Die Untersuchungen umfassten für alle Mischungen Verdichtungsversuche in Anlehnung an DIN 18127:2012 und Stempfeleindringversuche ( $CBR_0$ ) in Anlehnung TP BF-StB Teil 7.1 (siehe Pkt. 4.3).

**Versuchsreihe 3<sup>111</sup>**. In Vorversuchen wurde die Relevanz des Eigenwassergehaltes des Zugabe-Materials für das Ausmaß des Verbesserungserfolges identifiziert (EDER 2013). In

<sup>110</sup> Die Bearbeitung der Versuchsreihe erfolgte im Rahmen einer Studentearbeit am Zentrum Geotechnik der TU München (RUHLAND 2014).

<sup>111</sup> Die Bearbeitung der Versuchsreihe erfolgte überwiegend im Rahmen zweier Studentearbeiten am Zentrum Geotechnik der TU München (RUHLAND 2014 und KRÜGER 2015).

Versuchsreihe 3 wurde daher systematisch der Einfluss des Eigenwassergehaltes des Zugabe-Materials (RC-Mix 0/4) auf die Verbesserungswirkung von 3 feinkörnigen Böden (Bodengruppen TL und TM gemäß DIN 18196:2011) untersucht. Vor Verdichtung wurden die Mischungen jeweils für mehrere Tage zur Homogenisierung des Wassergehaltes in geschlossenen Behältern gelagert. Dies erfolgte, um zeitabhängige Effekte des Feuchtigkeitsaustausches zwischen Boden und trockenem RC-Materials möglichst auszugleichen. Das Untersuchungsprogramm in Versuchsreihe 3 ist mit den verschiedenen Eigenwassergehalten des Zugabe-Materials in Tab. 4.7 zusammenfassend dargestellt.

**Tab. 4.7: Untersuchte Mischungen in Versuchsreihe 3**

Mischung	Boden	TL1	TL2	TM3
+ 30 % RC-Mix 0/4 (A) bei $w_{ZM,0} \approx 2,0$ bis 2,2 %		X	X	X
+ 30 % RC-Mix 0/4 (A) bei $w_{ZM,0} \approx 4,7$ bis 4,8 %		X	X	X
+ 30 % RC-Mix 0/4 (A) bei $w_{ZM,0} \approx 11,8$ bis 12,3 %		X	X	X
+ 50 % RC-Mix 0/4 (A) bei $w_{ZM,0} \approx 2,0$ bis 2,2 %		-	X	X
+ 50 % RC-Mix 0/4 (A) bei $w_{ZM,0} \approx 4,7$ bis 4,8 %		-	X	X
+ 50 % RC-Mix 0/4 (A) bei $w_{ZM,0} \approx 11,8$ bis 12,3 %		-	X	X
+ 30 % RC-Mix 0/4 (B) bei $w_{ZM,0} \approx 2,9$ %		X	-	-
+ 30 % RC-Mix 0/4 (B) bei $w_{ZM,0} \approx 7,6$ %		X	-	-
+ 30 % RC-Mix 0/4 (B) bei $w_{ZM,0} \approx 11,6$ %		X	-	-

Die für die Untersuchungen verwendeten Böden und RC-Materialien wurden unter Pkt. 4.2 bautechnisch beschrieben. Der Eigenwassergehalt des Zugabe-Materials betrug vor Mischung zwischen  $w_{ZM,0} \approx 2,0$  und 12,3 % und ist in Tab. 4.7 jeweils angegeben.

Die Untersuchungen umfassten für alle Mischungen Verdichtungsversuche in Anlehnung an DIN 18127:2012 im Proctortopf  $\varnothing$  15 cm und für Teile der Mischungen Versuche zur Tragfähigkeit ( $CBR_0$ ) an den verdichteten Proben in Anlehnung an TP BF-StB Teil 7.1. Zwischen Mischung und Verdichtung der verbesserten Böden wurde das gemischte Material zur Homogenisierung des Wassergehaltes für mindestens 4 Tage in geschlossenen Eimern gelagert. Für genaue Angaben zur Versuchsdurchführung siehe auch Pkt. 4.3.

**Versuchsreihe 4<sup>112</sup>.** Während in den Versuchsreihen 1 bis 3 der Schwerpunkt auf der Verbesserung feinkörniger Böden mit Recyclingmaterial aus Bauschutt (RC-Mix) der Körnung 0/4 mm lag, wurden in Versuchsreihe 4 auch gezielt Zugabe-Materialien untersucht, die von dieser Materialklasse abwichen. Es sollte geklärt werden, ob gröberes Material der Körnung 0/32 mm oder stofflich abweichend zusammengesetzte Materialien (reiner RC-Beton und reiner RC-Ziegel) die Verbesserungswirkung im Vergleich zur Verwendung des RC-Mix 0/4 deutlich beeinflussen. Die Untersuchung erfolgte anhand von Mischungen verschiedener RC-Materialien mit 2 feinkörnigen Böden (Bodengruppen TL und TA gemäß DIN 18196:2011). An den so verbesserten Böden wurden Proctor- und CBR-Versuche durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen bildeten auch die Grundlage zur Festlegung von Einbaubedingungen für Versuchsreihe 5, in der der Einfluss der Verbesserungsmaß-

<sup>112</sup> Die Bearbeitung der Versuchsreihe erfolgte im Rahmen von FE 05.0166/2011/ERB (im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen; siehe HENZINGER et al. 2015b) und einer Studentenarbeit am Zentrum Geotechnik der TU München (KARAS 2013). Die Daten zur Verdichtung wurden in dieser Arbeit abweichend zu FE 05.0166 (HENZINGER et al. 2015b), HENZINGER & HEYER (2015a) und HENZINGER & HEYER (2015b) mit einem weiterentwickelten Verfahren gemäß den Angaben unter Pkt. 4.3 ausgewertet.

nahmen auf weitere bautechnische Eigenschaften untersucht wurde. Die so untersuchten Mischungen sind in Tab. 4.8 aufgelistet.

**Tab. 4.8: Untersuchte Mischungen in Versuchsreihe 4**

Mischung RC-Mat.	Eigenwasser- gehalt RC-Mat.	Boden + 20 % RC	Boden + 30 % RC	Boden + 40 % RC	Boden + 50 % RC	Boden + 70 % RC
RC-Mix 0/4	$w_{ZM,0} \approx 2,3 - 2,8 \%$	TL1	TL1, TA1	TL1	TL1, TA1	-
RC-Mix 0/32	$w_{ZM,0} \approx 2,2 - 3,0 \%$	TL1	TL1, TA1	TL1	TL1, TA1	-
RC-Beton 0/4	$w_{ZM,0} \approx 3,7 \%$	-	TL1	-	TL1	-
RC-Beton 0/4	$w_{ZM,0} \approx 5,5 \%$	TL1	TL1	TL1	TL1	TL1
RC-Ziegel 0/4	$w_{ZM,0} \approx 2,6 \%$	TL1	TL1	TL1	TL1	-

Die für die Mischungen verwendeten Materialien wurden unter Pkt. 4.2 bautechnisch beschrieben. Der mittlere Eigenwassergehalt des Zugabe-Materials für die Versuche in Versuchsreihe 4 betrug nach Tab. 4.8 vor Mischung jeweils etwa  $w_{ZM,0} \approx 2,2$  bis  $5,5 \%$ .

Die Untersuchungen umfassten Verdichtungsversuche in Anlehnung an DIN 18127:2012 und Stempeldringversuche ( $CBR_0$ ) in Anlehnung an TP BF-StB Teil 7.1 (siehe Pkt. 4.3). Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden als Grundlage zur Festlegung von Einbaubedingungen für Versuchsreihe 5 verwendet.

**Versuchsreihe 5<sup>113</sup>**. Neben der Beurteilung der Verbesserung der Verarbeitbarkeit sind im Erdbau oft auch andere Parameter zur Beurteilung der Eignung einer Verbesserungsmaßnahme relevant. Die Verwendung von RC-Material aus Bauschutt zur Bodenverbesserung feinkörniger Böden bedingt zum Beispiel die umwelttechnische Eignung beider Materialien (Boden und Zugabe-Material) gemäß den länderspezifischen Regelungen und/oder dem straßenbautechnischen Regelwerk. In Fällen, in denen das RC-Material umweltrelevante Inhaltsstoffe enthält, ist die Verwendung der verbesserten Böden gegebenenfalls noch in Erdbauwerken mit technischen Sicherungsmaßnahmen gemäß dem Merkblatt über Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau (M TS E) möglich. Zur Beurteilung der möglichen Bauweisen nach M TS E ist die Kenntnis des Durchlässigkeitsbeiwertes erforderlich. Aus diesem Grund wurde in Versuchsreihe 5 untersucht, wie sich die Durchlässigkeit verdichteter feinkörniger Böden durch die Verbesserung mit RC-Materialien ändert. Parallel dazu wurde auch die Änderung des Schwellverhaltens bei Wasserlagerung und die Änderung der Tragfähigkeit nach Wasserlagerung ( $CBR_w$ ) untersucht. Als Basis für die Untersuchungen wurden die Mischungen und Verdichtungsergebnisse der Versuchsreihe 4 herangezogen. Das Untersuchungsprogramm ist tabellarisch in Tab. 4.9 zusammengestellt.

<sup>113</sup> Die Bearbeitung der Versuchsreihe erfolgte im Rahmen von FE 05.0166/2011/ERB (im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen; siehe HENZINGER et al. 2015b) und einer Studentenarbeit am Zentrum Geotechnik der TU München (KARAS 2013).

**Tab. 4.9: Untersuchte Mischungen in Versuchsreihe 5**

Mischung RC-Mat.	Eigenwasser- gehalt RC-Mat.	Boden + 20 % RC	Boden + 30 % RC	Boden + 40 % RC	Boden + 50 % RC	Boden + 70 % RC
RC-Mix 0/4	$w_{ZM,0} \approx 2,3 - 2,8 \%$	-	TL1, TA1	-	TA1	-
RC-Mix 0/32	$w_{ZM,0} \approx 2,2 - 3,0 \%$	TL1	TL1, TA1	TL1	TL1, TA1	-
RC-Beton 0/4	$w_{ZM,0} \approx 3,7 \%$	TL1	TL1	TL1	TL1	-
RC-Beton 0/4	$w_{ZM,0} \approx 5,5 \%$	-	-	-	-	-
RC-Ziegel 0/4	$w_{ZM,0} \approx 2,6 \%$	-	TL1	-	TL1	-

Die Wasserlagerungsversuche von etwa im Verdichtungsoptimum hergestellten Proben (Schwellung bei Wasserlagerung) und die jeweils darauf folgenden Stempel Eindringversuche ( $CBR_w$ ) erfolgten in Anlehnung an TP BF-StB Teil 7.1. Die Durchlässigkeitsversuche von ebenfalls etwa im Verdichtungsoptimum hergestellten Proben wurden nach DIN 18130-1:1998 durchgeführt. Für Angaben zur Versuchsdurchführung siehe auch Pkt. 4.3.

#### 4.5 Zusammenfassende Auswertung

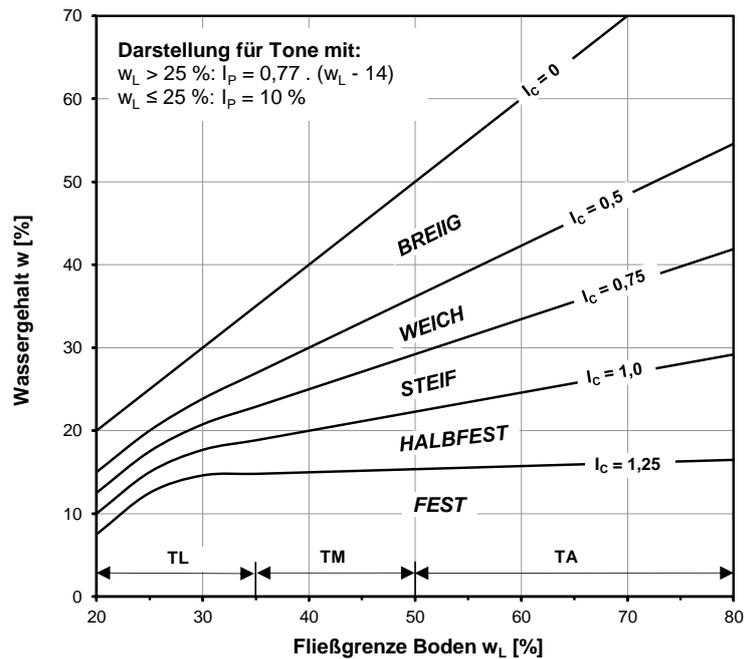
Aus den Ergebnissen der Untersuchungen lassen sich bei vergleichender Auswertung die unter Pkt. 4.1 formulierten Forschungsfragen beantworten. Die dieser Auswertung zugrunde liegenden Einzelergebnisse sind dieser Arbeit in Anhang A.2 bis A.6 beigelegt.

##### 4.5.1 Ausmaß der Verbesserung bei feinkörnigen Böden (FF1)

**Allgemeines.** Nach ZTV E-StB, Pkt. 1.2.8, ist der Zweck einer Verbesserungsmaßnahme die „[...] Verbesserung der Einbaufähigkeit und Verdichtbarkeit von Böden [...]“. Bodenverbesserungsmaßnahmen kommen also typischerweise zur Anwendung, wenn der natürliche Wassergehalt eines Bodens oberhalb seines Verdichtungsoptimums liegt. Je nachdem, wie groß die Differenz zwischen dem vorhandenen Wassergehalt zum jeweiligen Optimumswassergehalt ist, führen unterschiedliche Wege zum Ziel der erdbautechnischen Verarbeitbarkeit (vgl. HENZINGER et al. 2015b). Eine für den Erdbau typische Möglichkeit ist die Einfräsung von Weißfeinkalk in die nassen Böden. Gebrannter Kalk ist in der Lage, Wasser chemisch und adsorptiv zu binden und so die Konsistenz positiv zu beeinflussen. Gleichzeitig entsteht durch das Ablöschen des Kalkes Wärme, die dabei hilft, zusätzlich Bodenwasser zu verdunsten. Die Zugabemenge an Kalk muss in Eignungsuntersuchungen auf den Boden und den Bodenwassergehalt so abgestimmt werden, dass die entstehende Mischung dann im Verdichtungsoptimum verarbeitet werden kann. Je höher der Ausgangswassergehalt des vorliegenden Bodens dabei ist, desto mehr Kalk ist dazu erforderlich.

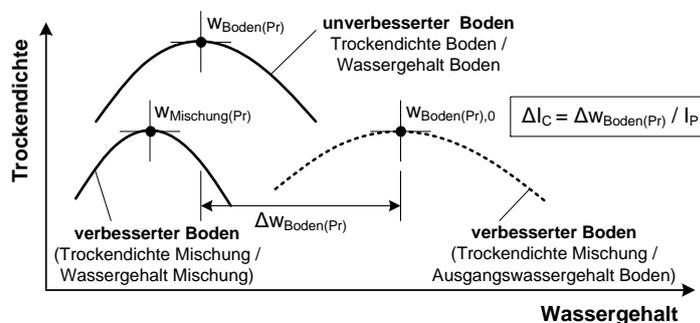
Für die Bewertung des Erfolges einer Bodenverbesserungsmaßnahme folgt aus den Überlegungen, dass dieser an dem mit der Maßnahme noch optimal verarbeitbaren Ausgangswassergehalt des Bodenanteils gemessen werden kann. Je höher dieser optimal verarbeitbare Ausgangswassergehalt für eine Maßnahme im Vergleich zum jeweiligen Optimum des unverbesserten Bodens liegt, desto ausgeprägter die Verbesserungswirkung und desto höher ist der Verbesserungserfolg (Abb. 4.10). Es ist allerdings zu beachten, dass feinkörnige Böden durchaus sehr unterschiedliche Voraussetzungen für eine Verbesserungsmaßnahme mitbringen. Ein ausgeprägt plastischer Ton hält innerhalb der Konsistenzgrenzen im Vergleich zu einem leicht plastischen Ton deutlich mehr Wasser. Dies ist in Abb. 4.9 beispielhaft für feinkörnige Böden oberhalb der A-Linie im Plastizitätsdiagramm nach DIN 18196:2011 dargestellt. Um einen leicht plastischen Ton mit weicher Konsistenz zur Verbesserung seiner

bautechnischen Eigenschaften in den steifen Konsistenzbereich zu bringen, muss ihm also deutlich weniger Wasser entzogen werden als einem ausgeprägt plastischen Ton.



**Abb. 4.9:** Zusammenhang zwischen Konsistenz und Wassergehalt für Böden über der A-Linie im Plastizitätsdiagramm nach DIN 18196 (nach SCHMIDT 2006, adaptiert)<sup>114</sup>

Die Differenz zwischen dem verarbeitbaren Ausgangswassergehalt des Bodens und dem optimalen Wassergehalt des unverbesserten Bodens ermöglicht eine Beurteilung des absoluten Verbesserungserfolgs einer Maßnahme an einem bestimmten Boden. Der Vergleich des Erfolges der selben Maßnahme an unterschiedlichen Böden erfolgt allerdings besser über einen für feinkörnige Böden vergleichbaren Maßstab: die Konsistenzzahl  $I_c$ . Damit kann beim Vergleich der Ergebnisse berücksichtigt werden, dass die Erhöhung des optimal verarbeitbaren Ausgangswassergehaltes von  $\Delta w_{\text{Boden(Pr)}} = X \%$  bei einem leicht plastischen Ton eine deutlich große Verbesserungswirkung mit sich bringt als bei einem ausgeprägt plastischen Ton. Bei einem solchen Vorgehen erhält man den Verbesserungserfolg als Verschiebung der optimal verarbeitbaren Konsistenz  $\Delta I_c$  des Bodens nach Abb. 4.10.



**Abb. 4.10:** Beschreibung des Verbesserungserfolgs als Verschiebung der optimal verarbeitbaren Konsistenz des Bodens (Ausgangswassergehalt)

<sup>114</sup> SCHMIDT (2006): S. 64.

Der Parameter zum absoluten Verbesserungserfolg lässt sich in Anlehnung an Abb. 4.10 folgendermaßen definieren:

$$\Delta w_{\text{Boden(Pr)}} = w_{\text{Boden(Pr),0}} - w_{\text{Boden(Pr)}} \quad (4-3)$$

$\Delta w_{\text{Boden(Pr)}}$	Erhöhung des opt. verarbeitbaren Wassergehalt des Bodens [-]
$w_{\text{Boden(Pr),0}}$	Optimaler Ausgangswassergehalt des Bodenanteils der Mischung [-]
$w_{\text{Boden(Pr)}}$	Optimaler Wassergehalt des unverbesserten Bodens [-]

Dieser Parameter kann anhand der Plastizitätszahl eines Bodens umgerechnet werden zu:

$$\Delta I_C = \frac{\Delta w_{\text{Boden(Pr)}}}{I_P} \quad (4-4)$$

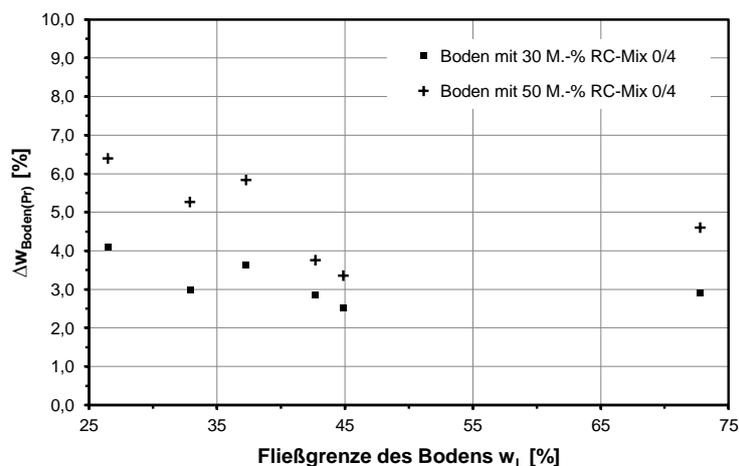
$\Delta I_C$	Erhöhung der opt. verarbeitbaren Konsistenz des Bodens [-]
$\Delta w_{\text{Boden(Pr)}}$	Erhöhung des opt. verarbeitbaren Wassergehalt des Bodens [-]
$I_P$	Plastizität des Bodens [-]

Auf dieser Grundlage können die Ergebnisse der eigenen Untersuchungen zu Beantwortung der unter Pkt. 4.1 in Bezug auf die Verbesserungswirkung angeführten Forschungsfragen miteinander verglichen werden.

**FF1-A.** Die erste der unter Pkt. 4.1 formulierten Fragen lautete:

**FF1-A** *Wie gut lassen sich feinkörnige Böden mit trockenem RC-Material aus Bauschutt (RC-Mix 0/4) bei Zugabemengen bis 50 M.-% verbessern? Gibt es Böden, die mit diesem Verfahren nicht verbessert werden können?*

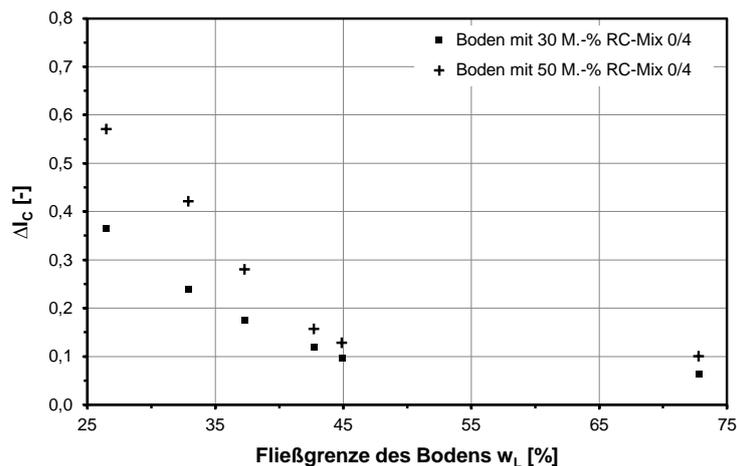
In Abb. 4.11 sind die Ergebnisse zum Absolutbetrag der Verbesserungswirkung ( $\Delta w_{\text{Boden(Pr)}}$ ) aus der Versuchsreihe 1 zusammengefasst. Die verschiedenen Böden wurden dazu anhand ihrer Fließgrenze charakterisiert.



**Abb. 4.11:** Verbesserungserfolg bei der Verbesserung feinkörniger Böden mit RC-Mix 0/4 (VR 1)

Bei einer Zugabemenge von 30 M.-% RC-Mix 0/4 führte die Verbesserungsmaßnahme dazu, dass die Böden bei Wassergehalten 2,5 bis 4 % oberhalb ihres Optimums verdichtet werden

konnten. Wurde der zugegebene Anteil an RC-Mix 0/4 weiter auf 50 M.-% erhöht, so ließ sich dieser Betrag auf 3,5 bis 6,5 % erhöhen. Die Darstellung verdeutlicht, dass der Absolutbetrag der Verbesserungswirkung bei unterschiedlich plastischen Böden zwar etwa in der gleichen Größenordnung, bei Böden mit niedriger Fließgrenze tendenziell aber doch höher liegt. Ändert man nun die Perspektive und bezieht zusätzlich zum Absolutbetrag der Verbesserungswirkung ( $\Delta w_{\text{Boden(Pr)}}$ ) auch noch die Bodeneigenschaften nach Gleichung (4-4) mit ein, so lässt sich das Verbesserungsergebnis zusammenfassend für die untersuchten Böden folgendermaßen abbilden (Abb. 4.12):



**Abb. 4.12: Verbesserungserfolg bei der Verbesserung feinkörniger Böden mit RC-Mix 0/4 (VR 1)**

Der Verbesserungserfolg ( $\Delta I_c$ ) fällt mit steigender Fließgrenze der Böden bis  $w_L \approx 40$  bis 45 % markant ab und verläuft bei noch höheren Fließgrenzen auf sehr niedrigem Niveau. Unabhängig von wirtschaftlichen Überlegungen weisen die Ergebnisse also darauf hin, dass die Bodenverbesserung mit RC-Mix 0/4 bei Böden mit einer Fließgrenze über 40 % nicht mehr sinnvoll angewendet werden kann.

**FF1-B.** Nun lohnt es sich einen Blick auf das Zugabe-Material (RC-Mix 0/4) und dessen Einfluss zu werfen. Die unter Pkt. Pkt. 4.1 formulierte Forschungsfrage lautet:

***FF1-B Welchen Einfluss haben Schwankungen der stofflichen Zusammensetzung und Kornverteilung des Zugabe-Materials innerhalb der Materialklasse RC-Mix 0/4 auf den Verbesserungserfolg?***

Die Bodenverbesserung mit RC-Material der Klasse RC-Mix 0/4 wurde an unterschiedlichen feinkörnigen Böden neben Versuchsreihe 1 auch in Versuchsreihe 2 untersucht. Der in den Versuchsreihen verwendete RC-Mix 0/4 stammte dabei aus unterschiedlichen Lieferungen und wies entsprechende Unterschiede in der Körnung und der stofflichen Zusammensetzung auf (siehe Pkt. 4.2.2). Der im Zuge der Versuchsreihe 1 verwendete RC-Mix 0/4 war allgemein feiner als das für die Versuchsreihe 2 verwendete RC-Mix 0/4 (vgl. Abb. 4.3 und Abb. 4.4). In Tab. 4.10 sind die Ergebnisse der beiden Versuchsreihen ( $\Delta w_{\text{Boden(Pr)}}$ ) einander gegenübergestellt, der jeweils größere Betrag ist hervorgehoben.

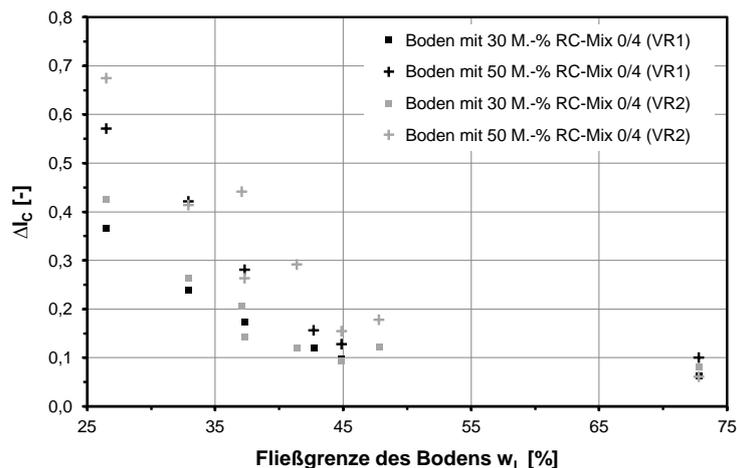
Der Vergleich der Ergebnisse in Tab. 4.10 führt zu dem Schluss, dass die Unterschiede in den Ergebnissen aus beiden Versuchsreihen wohl noch innerhalb der üblichen Versuchsgenauigkeit für die verschiedenen Böden liegen. Jene Mischungen mit Böden, an denen ein

direkter Vergleich erfolgen konnte (TL1, TL2, TM1, TM3, TA1), wiesen insgesamt jedenfalls keine eindeutigen Tendenzen auf.

**Tab. 4.10: Vergleich der Absolutbeträge der Verbesserungswirkung zwischen VR 1 und VR 2**

Mischung	Boden	TL1	TL2	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TA1
		Änderung des verarbeitbaren Ausgangswassergehalts des Bodens $\Delta w_{\text{Boden(Pr)}} [\%]$								
Boden + 30 % RC-Mix 0/4 (VR 1)		4,10	2,98	3,62	-	2,52	2,86	-	-	2,90
Boden + 30 % RC-Mix 0/4 (VR 2)		4,76	3,30	2,94	3,53	2,44	-	3,27	2,39	3,77
Boden + 50 % RC-Mix 0/4 (VR 1)		6,39	5,26	5,83	-	3,35	3,75	-	-	4,60
Boden + 50 % RC-Mix 0/4 (VR 2)		7,55	5,17	5,47	5,14	4,05	-	6,97	5,85	2,78

In Abb. 4.13 ist der Verbesserungserfolg an den untersuchten Böden aus beiden Versuchsreihen vergleichend dargestellt. Die Böden TM5 und TM6, die nur im Zuge von Versuchsreihe 2 untersucht wurden, ließen sich vor allem bei einer Zugabemenge von 50 M.-% im Vergleich zu den anderen Böden überdurchschnittlich gut verbessern. Dies kann wohl als Hinweis darauf gewertet werden, dass die Wahl der Charakterisierung der Bodeneigenschaften über nur einen Parameter (Fließgrenze) eine starke Vereinfachung der tatsächlichen Bodeneigenschaften darstellt. Die Fließgrenze liefert aus den Kennwerten zur Plastizität (Fließgrenze, Ausrollgrenze und Plastizitätszahl) allerdings die aussagekräftigste Darstellung.



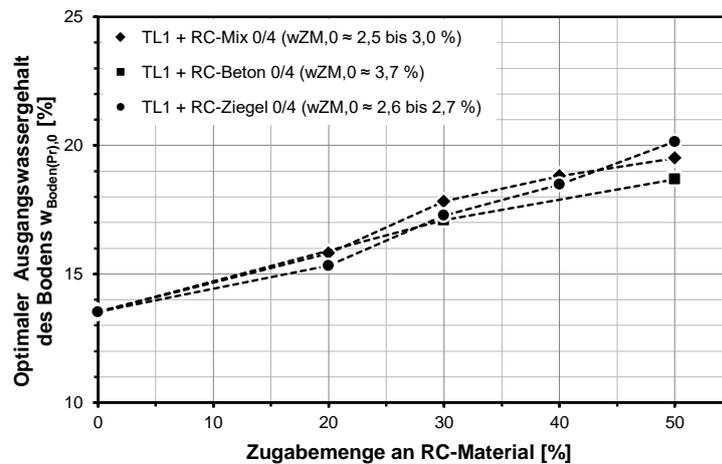
**Abb. 4.13: Verbesserungserfolg bei der Verbesserung feinkörniger Böden mit RC-Mix 0/4 (VR 1)**

**FF1-C.** Da der Verbesserungserfolg beim Boden TL1 in den Versuchsreihen am deutlichsten ausgeprägt war, wurden an diesem ergänzend auch Untersuchungen zum Einfluss der stofflichen Zusammensetzung und der Korngröße des Zugabe-Materials durchgeführt. Die zugehörige Forschungsfrage lautete:

***FF1-C Welchen Einfluss haben Änderungen in der stofflichen Zusammensetzung und der Kornverteilung des Zugabe-Materials außerhalb der Materialklasse RC-Mix 0/4 auf den Verbesserungserfolg?***

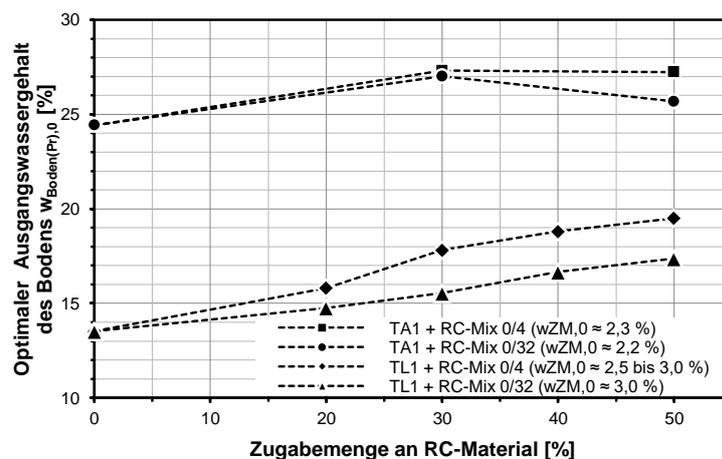
Hauptsächlich besteht gemischtes RC-Material der Klasse RC-Mix aus gebrochenem Beton und den Zuschlagsstoffen dieses Betons sowie Ziegelanteilen (vgl. Pkt. 4.2.2). In Versuchsreihe 4 wurde der Boden TL1 also vergleichend zum RC-Mix 0/4 mit RC-Material dieser material-Hauptgruppen verbessert (RC-Beton 0/4, RC-Ziegel 0/4). Der zusammenfassende

Vergleich des optimal verarbeitbaren Ausgangswassergehaltes des jeweils verbesserten Bodens ist in nachfolgender Abb. 4.14 dargestellt.



**Abb. 4.14:** Optimaler Ausgangswassergehalt des Bodens TL1 bei der Verbesserung mit verschiedenen Zugabe-Materialien

Die unterschiedlichen zur Verbesserung verwendeten RC-Materialien der Körnung 0/4 mm liefern nahezu identische Ergebnisse. Tendenziell konnte der Boden mit RC-Beton 0/4 am wenigsten stark verbessert werden. Dieser wies mit etwa 3,7 % allerdings den höchsten Eigenwassergehalt ( $w_{ZM,0}$ ) der zur Verbesserung verwendeten RC-Materialien auf (vgl. Tab. 4.4). Die Ergebnisse zeigen insgesamt, dass die in der Praxis erwartbaren Schwankungen in der Zusammensetzung eines Recycling-Gemisches der Materialklasse RC-Mix wohl nur einen untergeordneten Einfluss auf die Verbesserungsmaßnahme haben können. Da der Boden TL1 von den untersuchten Böden allgemein das größte Verbesserungspotential aufwies, dürfen die Erkenntnisse wohl auf die restlichen in dieser Arbeit verwendeten Böden verallgemeinert werden. Böden, die sich grundsätzlich weniger gut verbessern lassen als Boden TL1, werden demnach auch weniger stark auf Änderungen in der genauen Zusammensetzung des Zugabe-Materials reagieren.



**Abb. 4.15:** Optimaler Ausgangswassergehalt der Böden TL1 und TA1 bei der Verbesserung mit für RC-Mix 0/4 und 0/32

In Versuchsreihe 4 wurde anhand ebenfalls untersucht, welche Unterschiede sich aus der Verwendung von RC-Mix der Körnung 0/32 mm im Vergleich zum RC-Mix der Körnung

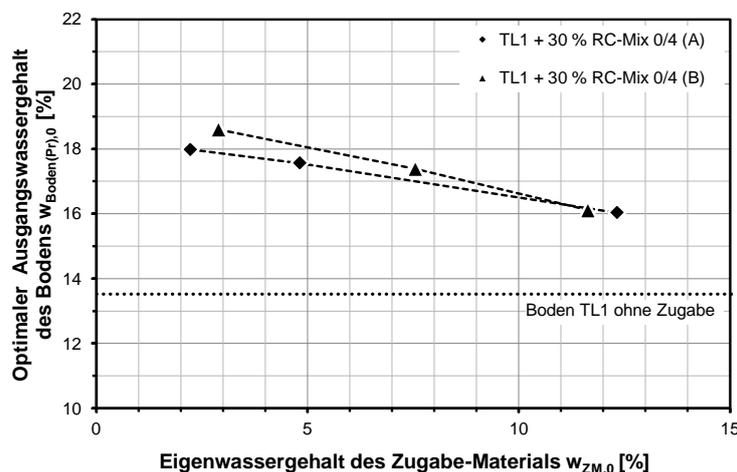
0/4 mm ergeben. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind für die Böden TL1 und TA1 (also jene Böden mit dem größten und kleinsten Verbesserungspotential) in [Abb. 4.15](#) vergleichend dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, dass sich die Verwendung des größeren RC-Materials (RC-Mix 0/32) bei beiden Böden nachteilig auf die Verbesserungswirkung auswirkt. Mit dem feineren Zugabe-Material (RC-Mix 0/4) konnten die Böden jeweils bei höheren Ausgangswassergehalten optimal verdichtet werden. Es ist aber durchaus zu erwarten, dass der Einfluss der Körnung des Zugabe-Materials mit steigender Plastizität der zu verbessernden Böden auch immer weniger markant ausfällt.

**FF1-D.** Nicht nur durch die stoffliche Zusammensetzung und die Körnung des zur Verbesserung verwendeten RC-Materials war eine Beeinflussung des Verbesserungserfolges zu erwarten, auch der Einfluss des Eigenwassergehalts des Zugabe-Materials wurde in VR 3 untersucht.

**FF1-D Welchen Einfluss haben Änderungen des Eigenwassergehaltes des Zugabe-Materials der Materialklasse RC-Mix 0/4 auf die Verbesserungswirkung?**

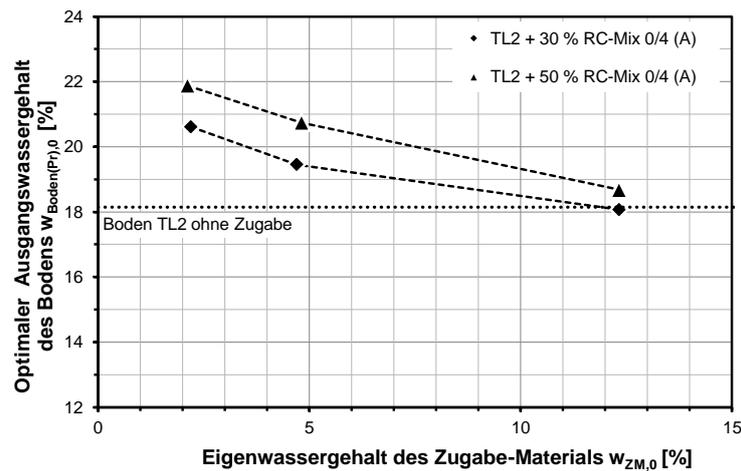
Die Versuche wurden an Mischungen mit den Böden TL1, TL2 und TM3 durchgeführt. Die zur Verbesserung verwendeten Materialien RC-Mix 0/4 (A) und RC-Mix 0/4 (B) unterschieden sich vorrangig im Feinkornanteil und wurden unter Pkt. 4.2.2 bautechnisch beschrieben.

In [Abb. 4.16](#) sind die Ergebnisse der Versuche an Mischungen des Bodens TL1 mit RC-Mix 0/4 (A) und (B) zusammenfassend dargestellt. Es handelt sich jeweils um Mischungen des Bodens mit 30 M.-% dieser RC-Materialien. Es ist deutlich erkennbar, dass der optimal verarbeitbare Ausgangswassergehalt des Bodens mit steigendem Eigenwassergehalt des Zugabe-Materials ( $w_{ZM,0}$ ) sinkt. Mit dem optimalen Ausgangswassergehalt des Bodenanteils fällt nach Gleichung (4-3) auch der Verbesserungserfolg ab. Die vorliegenden Daten weisen auf einen nahezu linearen Zusammenhang hin.



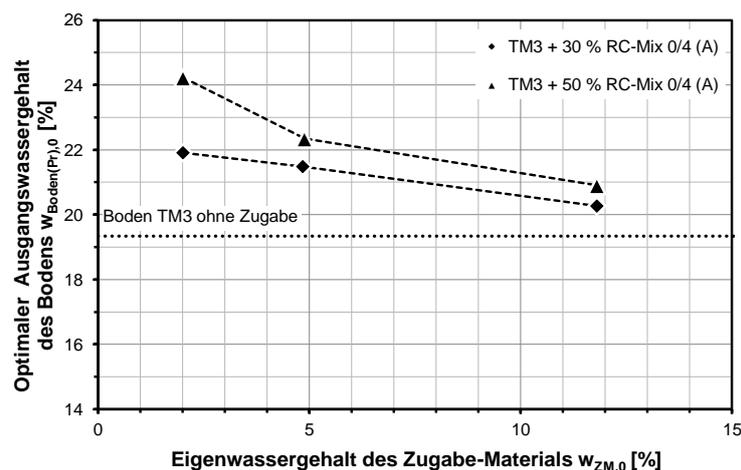
**Abb. 4.16:** Optimaler Ausgangswassergehalt des Bodens TL1 in Abhängigkeit vom Eigenwassergehalt des RC-Mix 0/4

Auch die Ergebnisse der Versuche an Mischungen des Bodens TL2 mit 30 und 50 M.-% RC-Mix 0/4 (A) in [Abb. 4.17](#) zeigen einen deutlich sinkenden Verbesserungserfolg mit steigendem Eigenwassergehalt des Zugabe-Materials ( $w_{ZM,0}$ ).



**Abb. 4.17:** Optimaler Ausgangswassergehalt des Bodens TL2 in Abhängigkeit vom Eigenwassergehalt des RC-Mix 0/4

Die Ergebnisse von Mischungen mit Boden TM3, dargestellt in [Abb. 4.18](#), bestätigen die aus den Versuchsergebnissen der Mischungen mit den Böden TL1 und TL2 ableitbaren Tendenzen. Auch hier wurden Mischungen mit 30 und 50 M.-% des RC-Materials untersucht.



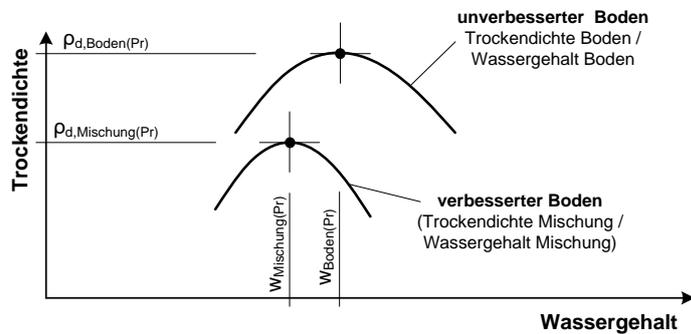
**Abb. 4.18:** Optimaler Ausgangswassergehalt des Bodens TM3 in Abhängigkeit vom Eigenwassergehalt des RC-Mix 0/4

Aus den Darstellungen in [Abb. 4.16](#), [Abb. 4.17](#) und [Abb. 4.18](#) kann abschließend gefolgert werden, dass der Verbesserungserfolg bei der Bodenverbesserung mit RC-Material deutlich vom Eigenwassergehalt des Zugabe-Materials ( $w_{ZM,0}$ ) abhängt. Je mehr Wasser im Zugabe-Material vor der Einmischung in den zu verbessernden Boden bereits gespeichert ist, desto schlechter lassen sich Böden damit verbessern.

#### 4.5.2 Verdichtungseigenschaften der entstehenden Mischungen (FF2)

**Allgemeines.** Der unter Pkt. 4.5.1 beschriebene Verbesserungserfolg steht im direkten Zusammenhang zu den Verdichtungseigenschaften der entstehenden Mischungen, bildet allerdings den Ausgangswassergehalt des Bodenanteils ab, der in der Mischung mit dem Zugabe-Material zum Verdichtungsoptimum führt. Für die Beurteilung des Verdichtungserfolges gemäß den Anforderungen des Erdbaus müssen allerdings die Verdichtungseigenschaften

im Optimum der Mischungen ( $w_{\text{Mischung}(Pr)}$  und  $\rho_{d,\text{Mischung}(Pr)}$ ) herangezogen werden. Wie die Änderungen dieser Eigenschaften im Vergleich zum unverbesserten Boden beschrieben werden können, ist in Abb. 4.19 skizziert:

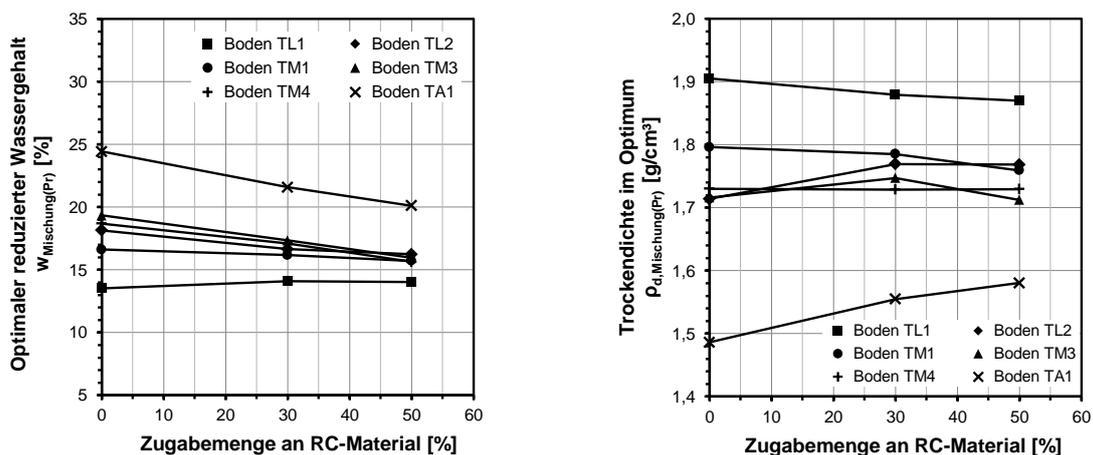


**Abb. 4.19:** Änderung der Verdichtungseigenschaften durch die Verbesserungsmaßnahme

**FF2-A.** Zur Änderung der Verdichtungseigenschaften durch die Verbesserung eines Bodens mit RC-Material wurden unter Pkt. 4.1 mehrere Fragen formuliert. Die erste davon lautet:

**FF2-A** *Wie ändern sich die Verdichtungseigenschaften feinkörniger Böden durch die Verbesserung mit RC-Material aus Bauschutt (RC-Mix 0/4)?*

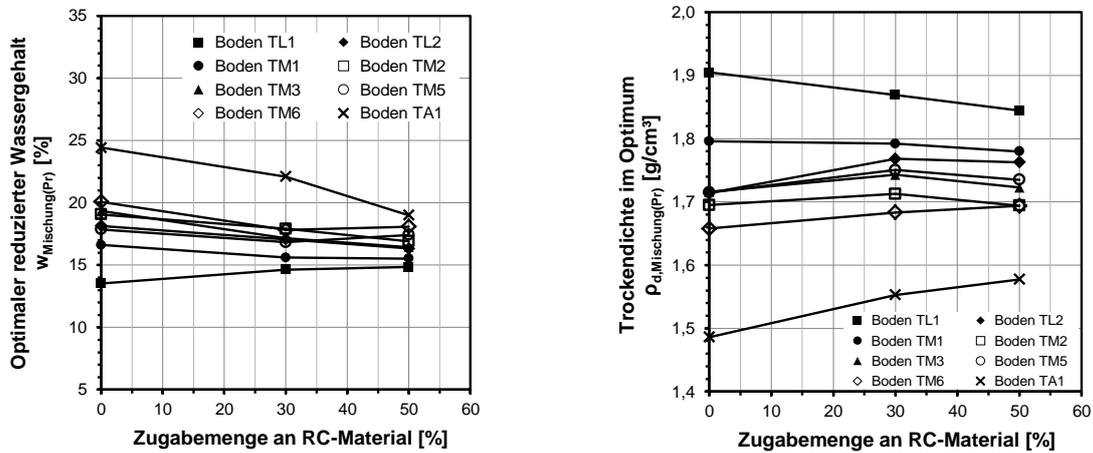
In Abb. 4.20, Abb. 4.21 und Abb. 4.22 sind die Eigenschaften der durch die Verbesserung mit RC-Mix 0/4 entstandenen Mischungen aus den Versuchsreihen 1, 2 und 4 jeweils für das Verdichtungs optimum zusammengefasst. Dargestellt sind die optimalen Wassergehalte der Mischungen ( $w_{\text{Mischung}(Pr)}$ ), auch optimaler reduzierter Wassergehalt genannt, und die zugehörigen Trockendichten ( $\rho_{d,\text{Mischung}(Pr)}$ ) in Abhängigkeit von der Zugabemenge an RC-Material.



**Abb. 4.20:** Entwicklung der Verdichtungseigenschaften in Versuchsreihe 1

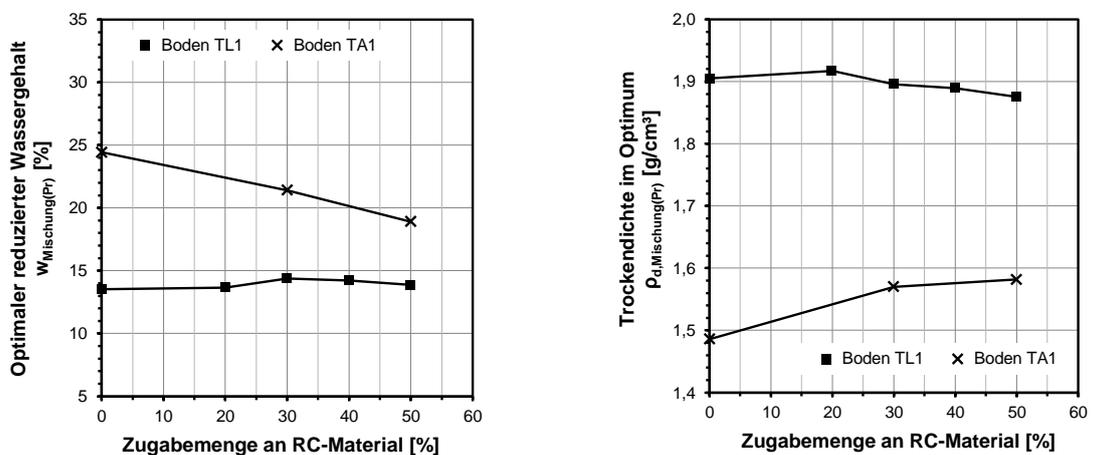
Zur Entwicklung des optimalen Wassergehaltes der Mischungen (reduzierter Wassergehalt) sind für die Böden unterschiedliche Tendenzen erkennbar: Der Vergleich der Ergebnisse aus den einzelnen Versuchsreihen in Abb. 4.20, Abb. 4.21 und Abb. 4.22 (jeweils linke Seite) legt nahe, dass diese Entwicklung von den Bodeneigenschaften des zu verbessernden Bodens abhängig ist. Bei Böden mit (relativ) hohen optimalen Verdichtungswassergehalten (unverbessert) sinkt der optimale Wassergehalt in Mischungen mit RC-Mix 0/4 mit steigender Zu-

gabemenge tendenziell ab. Bei Böden mit vergleichsweise niedrigen optimalen Wassergehalten (unverbessert) ist es auch möglich, dass der optimale Wassergehalt in den Mischungen mit der Zugabemenge ansteigt. Insgesamt scheinen die optimalen Wassergehalte der Mischungen so einem festen Wert (Wassergehalt) zuzustreben. Es ist eine berechnete Annahme, dass es sich dabei letztlich um den optimalen Wassergehalt des „reinen“ RC Mix 0/4 im Verdichtungs optimum handelt.



**Abb. 4.21:** Entwicklung der Verdichtungseigenschaften in Versuchssreihe 2

Die Trockendichte der verschiedenen Mischungen aus den Versuchsreihen 1, 2 und 4 ist in [Abb. 4.20](#), [Abb. 4.21](#) und [Abb. 4.22](#) auf der jeweils rechten Seite dargestellt. Auch diese entwickelte sich für die verbesserten Böden unterschiedlich. Es liegt hier ebenfalls die Vermutung nahe, dass die Entwicklung jeweils von den Verdichtungseigenschaften der unverbesserten Böden abhängt. Während Böden mit vergleichsweise hohen Trockendichten (unverbessert) in der Mischung mit RC-mix 0/4 wohl eher dazu neigen niedrigere Trockendichten zu entwickeln (markant zum Beispiel bei Boden TL1), zeigen Böden mit niedrigen Trockendichten (unverbessert) in der Mischung mit dem RC-Material durchaus auch höhere Werte als der jeweils unverbesserte Boden (deutlich zum Beispiel bei Boden TA1). Insgesamt scheinen sich auch die Trockendichten der Mischungen im Verdichtungs optimum so mit steigender Zugabemenge auf einen bestimmten Wert hinzuentwickeln. Es ist auch hier eine berechnete Annahme, dass es sich dabei letztlich um die Trockendichte des „reinen“ RC Mix 0/4 im Verdichtungs optimum handelt.



**Abb. 4.22:** Entwicklung der Verdichtungseigenschaften in Versuchssreihe 4 (RC-Mix 0/4)

Aus dem in [Abb. 4.20](#), [Abb. 4.21](#) und [Abb. 4.22](#) ersichtlichen Verdichtungsverhalten der entstehenden Mischungen können folgende qualitative Trends zusammengefasst werden: Einerseits, dass Tone höherer Plastizität mit steigender Zugabemenge an RC-Mix 0/4 tendenziell auch zu höheren Trockendichten verdichtet werden konnten. Dabei sank der optimale Wassergehalt der Mischungen gleichzeitig ab. Bei Mischungen mit weniger plastischen Tonen zeigte sich ein entgegengesetztes Verhalten. So sank die Trockendichte mit steigender Zugabemenge im Verdichtungsoptimum eher ab, während der optimale Verdichtungswassergehalt der jeweiligen Mischung anstieg. Das Verdichtungsverhalten von feinkörnigen Böden mit plastischen Eigenschaften dazwischen ordnete sich zwischen diesen beiden gegenläufigen Entwicklungen ein.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass sich die Verdichtungseigenschaften der Mischungen in Abhängigkeit von den Bodeneigenschaften der Zugabemenge an RC-Material ändern. Für die Verdichtungsbeurteilung ergibt sich daraus auch, dass Verdichtungsanforderungen nicht anhand der Daten des unverbesserten Bodens festgelegt werden können, sondern anhand von Eignungsprüfungen für die jeweils verwendete Mischung zu erfolgen haben.

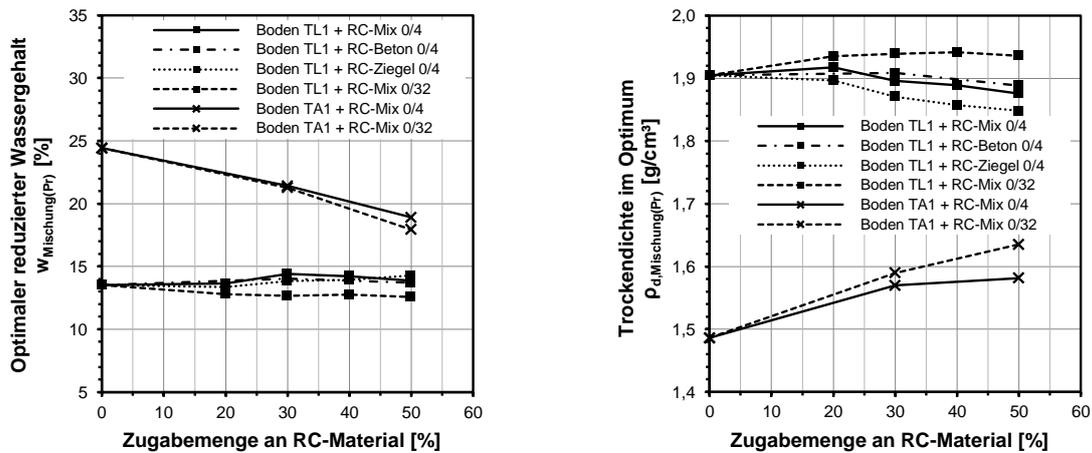
**FF2-B.** Es ist bekannt, dass die stoffliche Zusammensetzung von RC-Material aus Bauschutt je nach Herkunft und Aufbereitung streuen kann. Unter Pkt. 4.5.1 (FF1-C) wurde bereits der mögliche Einfluss solcher Schwankungen auf den Verbesserungserfolg erörtert. Es stellt sich nun die Frage, ob Schwankungen dieser Zusammensetzung des RC-Mix 0/4 denn die Verdichtungseigenschaften der entstehenden Mischungen systematisch beeinflussen können. Gleichzeitig sollte die Änderung der Verdichtungseigenschaften von Böden geklärt werden, die anstatt mit RC-Mix 0/4 mit größerem RC-Material der Klasse RC-Mix 0/32 verbessert wurden. Unter Pkt. 4.1 wurde die Fragestellung folgendermaßen formuliert:

***FF2-B Welchen Einfluss haben Änderungen in der stofflichen Zusammensetzung und der Kornverteilung des Zugabe-Materials außerhalb der Materialklasse RC-Mix 0/4 auf die Entwicklung der Verdichtungseigenschaften der entstehenden Mischungen?***

Wie bereits erwähnt setzt sich gemischtes RC-Material aus Bauschutt hauptsächlich aus Betonbruch und den Zuschlagsstoffen des Betonbruches (natürliche Gesteinskörnung), sowie Ziegelanteilen zusammen (vgl. Pkt. 4.2.2). Dementsprechend wurde in Versuchsreihe 4 der Boden TL1 vergleichend zur Verbesserung mit RC-Mix 0/4 mit RC-Material dieser Materialgruppen verbessert (RC-Beton 0/4, RC-Ziegel 0/4). Gleichzeitig wurde an den Böden TL1 und TA1 untersucht, welche Unterschiede sich aus der Verwendung von RC-Mix der Körnung 0/32 mm im Vergleich zum RC-Mix der Körnung 0/4 mm ergeben. Der zusammenfassende Vergleich der Ergebnisse der durchgeführten Verdichtungsversuche an Mischungen mit den beiden Böden ist in [Abb. 4.23](#) dargestellt.

Aus der Darstellung in [Abb. 4.23](#) (linke Seite) zu Mischungen am Boden TL1 ist deutlich erkennbar, dass der optimale Wassergehalt der Mischungen (reduzierter Wassergehalt) nahezu unabhängig von der Materialart des zugegebenen RC-Materials der Klasse 0/4 mm bleibt. Dahingegen wurden bei Mischungen aus Boden TL1 sowie Boden TA1 mit dem größeren RC-Mix 0/32 immer niedrigere optimale reduzierte Wassergehalte ( $w_{\text{Mischung(Pr)}}$ ) dokumentiert als bei Mischungen mit RC-Mix 0/4. Das größere Zugabe-Material führt in den Mischungen wohl dazu, dass im Verdichtungsoptimum weniger Wasser gehalten werden kann. Dieses Verhalten kann wahrscheinlich darauf zurückgeführt werden, dass größere Körner aufgrund

der kleineren spezifischen Oberfläche je Masseneinheit weniger Wasser halten können, als feinkörnige Böden mit entsprechend höherer spezifischer Oberfläche.



**Abb. 4.23: Entwicklung der Verdichtungseigenschaften der Mischungen in Versuchsreihe 4**

Die Entwicklung der Trockendichten ist für Mischungen mit den Böden TL1 und TA1 auf der rechten Seite in [Abb. 4.23](#) eingetragen. Die Mischungen des Bodens TL1 mit unterschiedlichen RC-Materialien der Körnung 0/4 mm liefern ab etwa 20 bis 30 M.-% Zugabemenge tendenziell abfallende Trockendichten. Vergleicht man die Ergebnisse untereinander, so scheint sich auch eine Reihung entsprechend der erwarteten Kornrohdichten<sup>115</sup> (Beton > Mix > Ziegel) abzubilden. Die Mischungen der Boden TL1 und TA1 mit RC-Mix 0/32 zeigen im Verdichtungsoptimum im Vergleich zu Mischungen mit dem feineren RC-Mix 0/4 höhere Trockendichten. In größeren Körnern wird die selbe Masse an Zugabe-Material auf weniger Volumen vereint und führt so in der verdichteten Mischung mit Böden zu entsprechend höheren Trockendichten.

**FF2-C.** Unter Pkt. 4.5.1 wurde der Einfluss des Eigenwassergehaltes des Zugabe-Materials auf den Verbesserungserfolg bei unterschiedlichen Böden beschrieben. Wie sich dieser Eigenwassergehalt auf die Verdichtungseigenschaften der jeweiligen Mischungen auswirkt, soll nachfolgend zusammengefasst werden. Nach Pkt. 4.1:

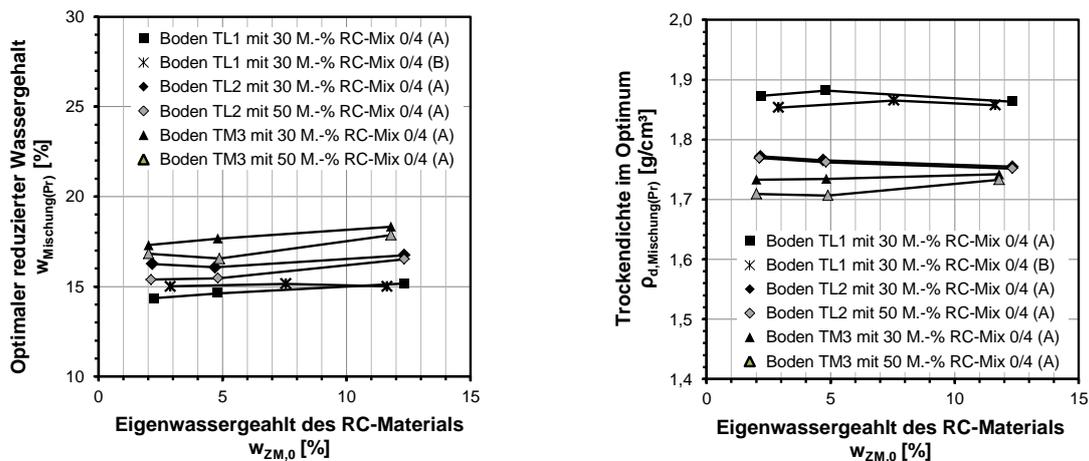
**FF2-C Welchen Einfluss haben Änderungen des Eigenwassergehaltes des Zugabe-Materials der Materialklasse RC-Mix 0/4 auf die Entwicklung die Verdichtungseigenschaften der entstehenden Mischungen?**

In [Abb. 4.24](#) sind die Auswertungen der entsprechenden Versuche aus Versuchsreihe 3 dargestellt. Auf der linken Seite in [Abb. 4.24](#) ist die Entwicklung des optimalen Wassergehaltes der Mischungen (reduzierter Wassergehalt) mit steigendem Eigenwassergehalt des RC-Materials dargestellt, die rechte Seite zeigt die Entwicklung der zugehörigen Trockendichten.

Aus [Abb. 4.24](#), linke Seite, lässt sich ableiten, dass der optimale Wassergehalt der Mischungen mit steigendem Eigenwassergehalt des Zugabe-Materials ( $w_{\text{ZM},0}$ ) tendenziell leicht ansteigt. Dies ist bemerkenswert, da alle Mischungen einer Serie in Bezug auf ihre stoffliche

<sup>115</sup> Siehe Pkt. 3.4. Der Begriff „Kornrohdichte“ bezieht sich in Anlehnung an die Definition in DIN EN 1097-6:2013 auf das Verhältnis von Masse einer Probe zum Feststoffvolumen, inklusive des wasserzugänglichen Porenvolumens. Es handelt sich also um das Volumen, das ein poröses Korn im (verdichteten) Gemisch mit Boden physisch einnimmt.

Zusammensetzung und Kornverteilung identisch waren und sich nur im Eigenwassergehalt des Zugabe-Materials unterschieden. Die untersuchten Mischungen aus unterschiedlichen Böden und porösem RC-Material (RC-Mix 0/4) wurden zur Homogenisierung des Wassergehaltes vor Verdichtung mindestens 4 Tage in verschlossenen Behältern gelagert (siehe Pkt. 4.4). Der trotzdem erkennbare Anstieg des optimalen Wassergehaltes der Mischungen weist daher darauf hin, dass die Verteilung des Wassers in den jeweiligen Mischungen einer Serie im Optimum nicht vollständig identisch ist. Das beobachtete Verhalten kann wahrscheinlich darauf zurückgeführt werden, dass ein bestimmter Anteil des im Zugabe-Material gespeicherten Wassers (Eigenwassergehalt) nicht am Wasseraustausch zwischen Boden und dem porösen Zugabe-Material teilnimmt, bei der Wassergehaltsermittlung jedoch angezeigt wird. Dieser Wasseranteil steigt mit dem Eigenwassergehalt des Zugabe-Materials an.



**Abb. 4.24:** Entwicklung der Verdichtungseigenschaften der Mischungen in Versuchsreihe 3

Dass jener Wasseranteil, der mit steigendem Eigenwassergehalt des Zugabe-Materials ( $w_{ZM,0}$ ) auch zum Anstieg des optimalen Wassergehaltes der Mischungen führt, in den porösen RC-Körnern gespeichert ist und gleichzeitig verdichtungsneutral ist, wird auch durch die Ergebnisse zu den entsprechenden Trockendichten im Verdichtungs optimum gestützt, dargestellt auf der rechten Seite in Abb. 4.24. Deren Entwicklung deutet nicht auf eine systematische Abhängigkeit vom Eigenwassergehalt des Zugabe-Materials hin.

### 4.5.3 Tragfähigkeit der entstehenden Mischungen (FF3)

**Allgemeines.** Um erste Anhaltswerte zur Entwicklung der Tragfähigkeiten im Verdichtungs optimum der verbesserten Böden zu gewinnen, wurden im Anschluss an die Verdichtungsversuche Stempeldringversuche (CBR) durchgeführt (vor allem in Versuchsreihe 2 und 4). Für die Beurteilung dieses empirischen Vergleichswertes stehen unterschiedliche Möglichkeiten zur Verfügung. SCHULTZE & MUHS (1967) geben zum Beispiel die in Tab. 4.11 dargestellte Zuordnung der CBR-Werte zu unterschiedlichen Baugrundgütern. Außerdem kann nach FLOSS (1973)<sup>116</sup> die in den ZTV E-StB angegebene Anforderung an den Verformungsmodul von  $E_{v2} \geq 45 \text{ MN/m}^2$  (für frostempfindlichen Untergrund) in einen CBR – Wert umgerechnet werden. Ein Verformungsmodul von  $E_{v2} = 45 \text{ MN/m}^2$  entspricht demnach für bindige Böden etwa einem CBR – Wert von 13,6 %. Andere Möglichkeiten zur Umrechnung von  $E_v$  –

<sup>116</sup> FLOSS (1973): S. 20.

Angaben in CBR-Werte können zum Beispiel in der Arbeit von LOTTOMANN (2003)<sup>117</sup> nachgeschlagen werden.

**Tab. 4.11: Baugrundgüte nach SCHULTZE & MUHS (1967)<sup>118</sup>**

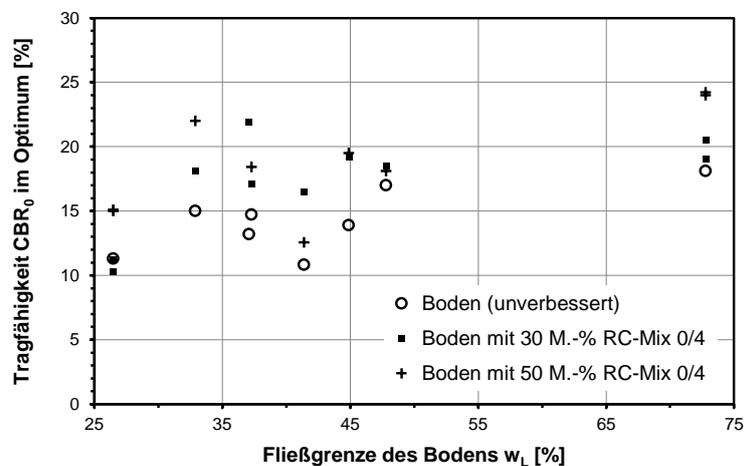
CBR-Wert	Qualität des Untergrundes
2 - 4 %	Sehr schlechter Untergrund
4 - 7 %	Schlechter Untergrund
7 - 15 %	Mittelmäßiger Untergrund
15 - 40 %	Guter Untergrund
40 - 100 %	Ausgezeichneter Untergrund

Vergleicht man die Kozepte von SCHULTZE & MUHS (1967) und FLOSS (1973) so kann gefolgert werden, dass die im Erdbau üblicherweise erforderliche Tragfähigkeit von verdichteten fein- und gemischtkörnigen Böden etwa bei CBR-Werten in der Größenordnung ab etwa CBR = 14 und 15 % erreicht wird.

**FF3-A.** Die erste Frage zur Tragfähigkeit der verbesserten Böden nach Pkt. 4.1 lautet:

**FF3-A Wie sind Tragfähigkeiten der entstehenden Mischungen aus feinkörnigen Böden mit gemischtem RC-Material aus Bauschutt (RC-Mix) der Körnung 0/4 mm im Vergleich zum jeweils unverbesserten Boden zu beurteilen?**

In Abb. 4.25 sind die Tragfähigkeiten unterschiedlicher verbesserter Böden im Verdichtungs-optimum dargestellt (Daten aus Versuchsreihe 2 und 4), wobei die Böden jeweils wieder anhand ihrer Fließgrenze charakterisiert sind.



**Abb. 4.25: Tragfähigkeit der Mischungen unterschiedlicher Böden mit RC-Mix 0/4 im Verdichtungs-optimum (VR 2 und VR4)**

Die dargestellten Daten weisen einerseits darauf hin, dass die Tragfähigkeit zu nasser Böden durch die Zumischung trockener RC-Materialien verbessert werden kann. Gleichzeitig überschreiten die Tragfähigkeiten (CBR<sub>0</sub>) der Mischungen im Verdichtungs-optimum jeweils nur leicht die Tragfähigkeiten der unbehandelten Böden (ebenfalls im Verdichtungs-optimum). Bei keiner Mischung konnte die Tragfähigkeit durch die Verbesserungsmaßnahme um mehr als  $\Delta CBR_0 = 10 \%$  angehoben werden. Siehe dazu Abb. 4.25.

<sup>117</sup> LOTTOMANN (2003): S. 46 bis 48.

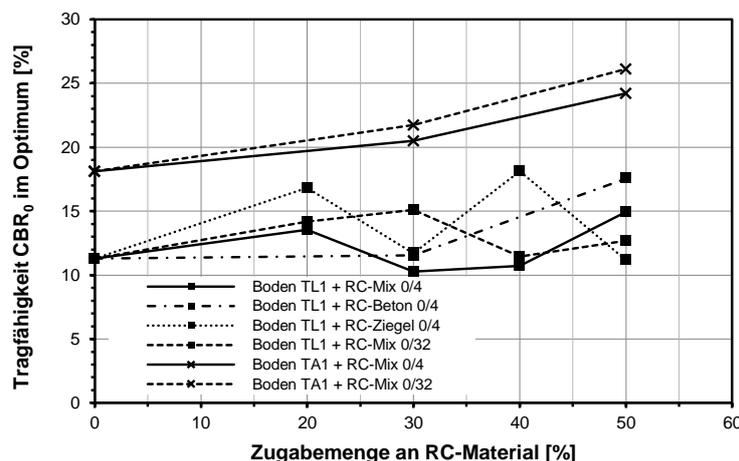
<sup>118</sup> SCHULTZE & MUHS (1967): S. 420.

Die Einzelergebnisse der CBR-Versuche zu den jeweiligen Verdichtungskurven, dargestellt in Anhang A.3 und A.5, zeigen außerdem, dass die Tragfähigkeit der verdichteten Mischungen in jedem Fall eine ähnliche Abhängigkeit vom Wassergehalt aufwies, wie die Tragfähigkeit des unverbesserten Bodens. Daraus lässt sich ableiten, dass die Konsistenz des feinkörnigen Bodenanteils in der verdichteten Mischung der maßgebliche Faktor für die Gesamttragfähigkeit blieb und bei den untersuchten Zugabemengen keine grundsätzliche Änderung des Tragverhaltens hin zu einem tragenden Grobkorngerüst erzielt wurde.

**FF3-B.** Nun stellt sich die Frage, ob Änderungen in der stofflichen Zusammensetzung des Zugabe-Materials oder die Verwendung größerer Zugabe-Materialien zu abweichenden Ergebnissen führen. Die unter Pkt. 4.1 gestellte Forschungsfrage hierzu lautet:

**FF3-B Welchen Einfluss haben Änderungen der stofflichen Zusammensetzung und der-Kornverteilung des Zugabe-Materials außerhalb der Materialklasse RC-Mix 0/4 auf die Tragfähigkeit der Mischungen?**

In [Abb. 4.26](#) sind Tragfähigkeiten im Optimum verdichteter Mischungen der Böden TL1 und TA1 bei Verbesserung mit unterschiedlichen RC-Materialien der Körnung 0/4 mm (RC-Mix, RC-Beton, RC-Ziegel) sowie mit RC-Mix 0/32 dargestellt. Zunächst bestätigt die Darstellung die Ergebnisse aus [Abb. 4.25](#). Die Mischungen wiesen im Verdichtungsoptimum tendenziell leicht höhere Tragfähigkeiten auf als die unverbesserten Böden (ebenfalls im Optimum). Gleichzeitig zeigten die Untersuchungen aber, dass die stark unterschiedliche stoffliche Zusammensetzung und die von der Körnung 0/4 mm abweichende Körnung des RC-Mix 0/32 keinen maßgeblichen Einfluss auf die  $CBR_0$ -Werte hatte. Auch dieses Ergebnis kann als Hinweis darauf gedeutet werden, dass das Tragverhalten auch in den Mischungen jeweils noch vom feinkörnigen Bodenanteil dominiert wurde, der (solange sich kein tragendes Grobkorngerüst ausbildet) keine maßgebliche Erhöhung der Tragfähigkeit zulässt.



**Abb. 4.26:** Tragfähigkeit der Mischungen der Böden TL1 und TA1 mit unterschiedlichen RC-Materialien (VR4)

Die in [Abb. 4.26](#) dargestellten Tragfähigkeiten beziehen sich, wie bereits erwähnt, auf das jeweilige Verdichtungsoptimum der Mischungen. Unter Pkt. 4.5.1 (siehe [Abb. 4.15](#)) wurde bereits festgestellt, dass die mit RC-Mix 0/4 verbesserten Böden tendenziell bei höheren Ausgangswassergehalten verdichtet werden konnten als Mischung mit grobem RC-Material. So darf gefolgert werden, dass bei der Bodenverbesserung mit RC-Materialien der Körnung

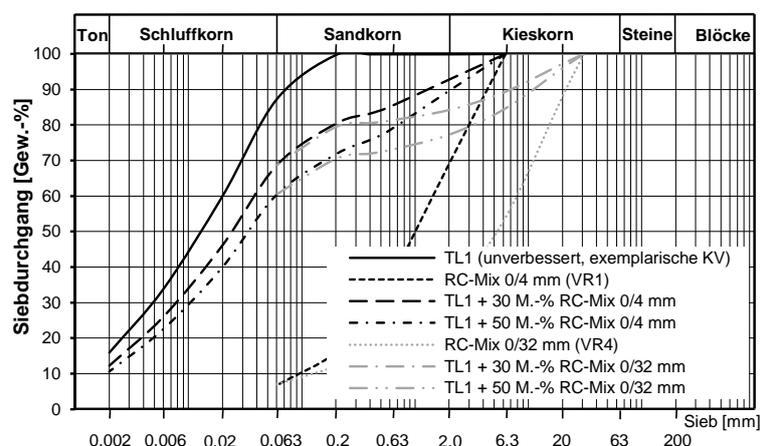
0/4 mm tolerierbare Tragfähigkeiten noch bei höheren Ausgangswassergehalten des Bodenanteils erzielt werden konnten als mit Zugabe-Materialien der Körnung 0/32 mm. Bei den untersuchten Zugabe-Mengen ergab sich in Bezug auf die Tragfähigkeiten also kein Vorteil aus der Verwendung des groben RC-Materials.

**FF3-C.** Wie bereits erwähnt, zeigten die Einzelergebnisse der  $CBR_0$ -Versuche an den verdichteten Mischungen keinen Hinweis darauf, dass durch die Bodenverbesserungsmaßnahmen eine grundlegende Änderung des Tragverhaltens erzielt wurde. Trotzdem verbleibt die förmliche Beantwortung der unter Pkt. 4.1 formulierten Frage:

**FF3-C Wie ist das Verfahren „Bodenverbesserung mit RC-Materialien“ insgesamt im Vergleich zur herkömmlichen mechanischen Bodenverbesserung zu beurteilen?**

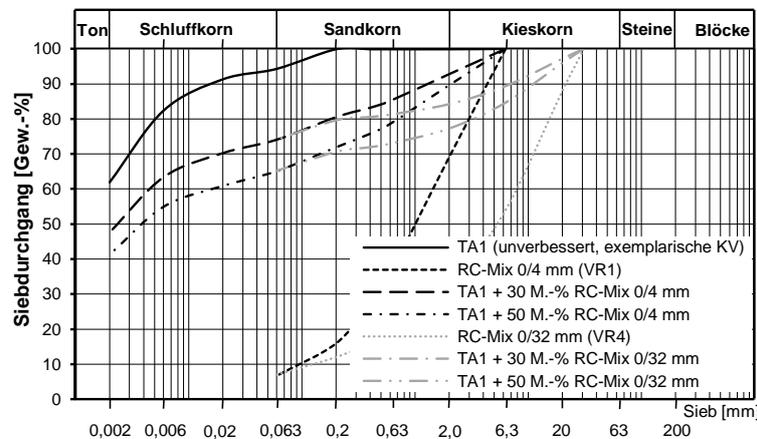
Im erdbautechnischen Sprachgebrauch wird unter dem Begriff der mechanischen Bodenverbesserung in der Regel die Verbesserung des Bodenverhaltens durch eine Änderung des Tragverhaltens verstanden. Dies wird üblicherweise durch Zugabe von grobkörnigem Material zu einem fein- oder gemischtkörnigen Boden erreicht, sodass die grobkörnigen Anteile in der Mischung ein tragendes Gerüst bilden können und der wassergehaltsempfindliche Feinkornanteil nur mehr die Poren zwischen den groben Körnern ausfüllt. Ab welchem Verhältnis von Grobkornanteil zu Feinkornanteil dies bei Böden und bei Mischungen aus feinkörnigen Böden und porösen RC-Materialien etwa der Fall ist, wurde bereits unter Pkt. 3.2 beschrieben. Im Rahmen von FF3-A und FF3-B wurde jeweils schon gezeigt, dass durch die Verbesserungsmaßnahme wohl kein tragendes Grobkorngerüst entsteht.

Neben diesen Hinweisen auf das Tragverhalten der verdichteten Mischungen kann ergänzend noch eine Bewertung anhand der Kornverteilungslinien der entstehenden Mischungen erfolgen. Dies lässt sich stellvertretend an den verbesserten Böden TL1 und TA1 darstellen. In [Abb. 4.27](#) sind die Kornverteilungslinien von Mischungen aus dem Boden TL1 mit RC-Mix der Körnung 0/4 mm aus Versuchsreihe 1 (grobes Material innerhalb der Klasse RC-Mix 0/4) und dem RC-Mix 0/32 mm aus Versuchsreihe 4 dargestellt.



**Abb. 4.27:** Kornverteilungslinien der Mischungen aus Boden TL1 mit RC-Mix 0/4 und 0/32

Abb. 4.28 zeigt die Kornverteilungslinien der Mischungen des Bodens TA1 mit den selben RC-Materialien. Der Feinkornanteil dieser Mischungen ist noch höher als jener der Mischungen mit Boden TL1.



**Abb. 4.28: Kornverteilungslinien der Mischungen aus Boden TA1 mit RC-Mix 0/4 und 0/32**

Der Feinkornanteil ( $< 0,063$  mm) lag bei allen dargestellten Mischungen auch bei hohen Zugabemengen an RC-Material stets über 60 M.-%. Es ist also auch nach den Angaben von VOß et al. (1986) und OSTERMAYER (1976) nicht zu erwarten, dass sich ein tragendes Grobkorngerüst ausbilden kann (siehe Pkt. 3.2). Da im Regelwerk der FGSV (ZTV E-StB) allerdings nicht explizit darauf verwiesen wird, welcher Mechanismus zu der durch die Maßnahme angestrebten Verbesserung „[...] der Einbaufähigkeit und Verdichtbarkeit von Böden und zur Erleichterung der Ausführbarkeit von Bauarbeiten [...]“ führen soll, kann das Verfahren allgemein der mechanischen Bodenverbesserung nach ZTV E-StB zugeordnet werden. Auf die Gefahr von Missverständnissen bei der Verwendung des Begriffes für die Bodenverbesserung feinkörniger Böden mit Vorsiebmaterial aus Bauschutt ist allerdings besonders zu achten, da im herkömmlichen Verständnis der Begriff eben oft mit einer Änderung des Tragverhaltens assoziiert wird.

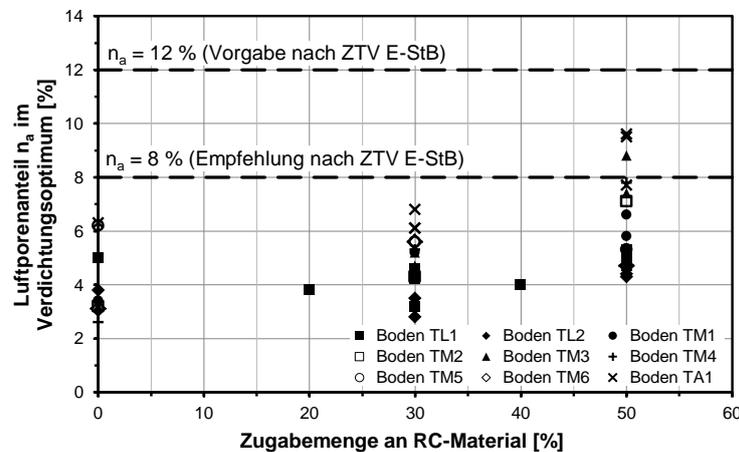
#### 4.5.4 Einfluss der Maßnahme auf weitere bautechnische Kennwerte (FF4)

Nicht allein die Verdichtungseigenschaften oder der Verbesserungserfolg sind bestimmend dafür, ob eine Bodenverbesserungsmaßnahme als geeignet eingestuft werden kann. Auf weitere im Erdbau oftmals relevante Merkmale wird nachfolgend eingegangen.

**FF4-A.** Ein wichtiges Merkmal zur Beurteilung des Verdichtungserfolges fein- und gemischt-körniger Böden ist der Luftporenanteil. Dieser ist ein wichtiger Indikator für das Verhalten des verdichteten Materials im Kontakt mit Wasser. Zu hohe Luftporenanteile führen unter Umständen zu einem nachteiligen Schwell- und Sackungsverhalten (Pkt. 3.1). Die Vorgaben für maximal zulässige Luftporenanteile aus dem straßenbautechnischen Regelwerk der FGSV wurden unter Pkt. 3.1 beschrieben und es stellt sich die Frage, ob die zusätzlichen intragranularen Poren der RC-Körner zu Problemen bei der Beurteilung des gesamten Luftporenanteils führen. Anhand der Untersuchungsergebnisse aus den unterschiedlichen Versuchsreihen kann die unter Pkt. 4.1 formulierte Forschungsfrage hierzu beantwortet werden:

**FF4-A Können die Vorgaben für den maximal zulässigen Luftporenanteil nach ZTV-E StB mit diesem Verfahren grundsätzlich eingehalten werden?**

In Abb. 4.29 sind die Luftporenanteile im Verdichtungsoptimum der Mischungen unterschiedlicher Böden mit RC-Material der Klasse Mix 0/4 aus den Versuchsreihen 1, 2 und 4 dargestellt.



**Abb. 4.29:** Luftporenanteile der Mischungen unterschiedlicher Böden mit RC-Mix 0/4 im jeweiligen Verdichtungsoptimum (Daten aus VR1, VR2 und VR4)

Wie das Bild zeigt, konnten die Vorgaben nach den ZTV E-StB bei allen Mischungen eingehalten werden. Großteils unterschritten die Werte sogar die Empfehlung dieses Regelwerkes. Für Anmerkungen zur Auswertung des Luftporenanteils solcher Mischungen aus natürlichen Böden mit porösen RC-Materialien siehe auch Pkt. 3.5.

**FF4-B.** Parallel zu den Verdichtungsversuchen wurde in Versuchsreihe 5 auch die Änderung des Schwellverhaltens und der Tragfähigkeit nach Wasserlagerung ( $CBR_w$ ) in Verbindung mit der Verbesserungsmaßnahme untersucht. Als Grundlage dieser Versuche (Einbaubedingungen) dienten die Verdichtungsergebnisse aus Versuchsreihe 4. Die entsprechende Frage unter Pkt. 4.1 lautet:

**FF4-B Welche Entwicklungen ergeben sich aus der Verbesserung feinkörniger Böden mit RC-Materialien in Bezug auf die Schwellhebung bei Wasserlagerung und die Tragfähigkeit nach Wasserlagerung?**

Die Zusammenfassung der Versuchsergebnisse zum Schwellverhalten der verbesserten und etwa im Verdichtungsoptimum verdichteten Böden in Tab. 4.12 zeigt in Abhängigkeit von der untersuchten Bodenart unterschiedliche Ergebnisse. Während der leicht plastische Boden TL1 durch die Verbesserung mit RC-Mix 0/4 und RC-Mix 0/32 sowie RC-Beton 0/4 nahezu unabhängig von der Zugabemenge nur mehr untergeordnete Beträge für die Schwellhebung anzeigte, lagen die Werte zur Schwellhebung nach Zugabe von RC-Ziegel 0/4 zwar deutlich unter jenen des unverbesserten Bodens, stiegen mit der Zugabemenge allerdings an. Die Schwellhebung des Bodens TA1 wurde durch die Zugabe des RC-Materials nur in untergeordnetem Ausmaß beeinflusst.

Insgesamt wirkte sich die Bodenverbesserungsmaßnahme durch Zugabe von RC-Material also entweder neutral (ausgeprägt plastischer Ton TA1) bis deutlich positiv (leicht plastischer Ton TL1) auf das Schwellverhalten aus. Eine negative Beeinflussung wurde bei keiner der

untersuchten Proben festgestellt. Ein Grund für das beobachtete Verhalten konnte aus den Versuchen nicht abgeleitet werden.

**Tab. 4.12: Zusammenfassung der dokumentierten Schwellhebungen (Versuchsreihe 5)**

Boden	Boden TL1				Boden TA1	
Zugabe-Material	RC-Mix 0/4 mm	RC-Mix 0/32 mm	RC-Beton 0/4 mm	RC-Ziegel 0/4 mm	RC-Mix 0/4 mm	RC-Mix 0/32 mm
Zugabemenge	Schwellwert nach 7 Tagen Wasserlagerung (ohne Auflast)					
	$s_{Sch,i}$ [%]					
ohne	2,68 / 3,10				14,10 / 17,81	
20 M.-%	-	0,18	-	0,50	-	-
30 M.-%	0,21	0,18	0,15	0,85	14,22	11,93
40 M.-%	-	0,22	-	0,71	-	-
50 M.-%	-	0,36	0,10	1,60	12,86	11,63

Es ist anzumerken, dass die Beobachtung der Schwellhebung anhand von wassergelagerten Probekörpern im CBR-Topf nur erste Anhalts-Werte zum Verhalten des verdichteten Materials bei Wassersättigung liefern kann. Die Proben neigen vor allem in der Nähe der Stelle des Wasserzutritts (Ober- und Unterseite der Zylinder) dazu zu schwellen, das freie Schwellen ist aufgrund der Einspannung an der Unterseite (gelochte Grundplatte) aber nur an der Probenoberseite zwängungsfrei möglich (abhängig von der gewählten Auflast). Gemäß Prüfvorschrift (TP BF-StB Teil B 7.1) sind die gemessenen Werte trotzdem auf die Gesamthöhe der Proben zu beziehen.

Auch die Zusammenfassung der Ergebnisse zur Änderung der Tragfähigkeit der verbesserten und im Verdichtungsoptimum verdichteten Böden TL1 und TA1 in Tab. 4.13 deutet auf unterschiedliche Entwicklungen hin. Während die Tragfähigkeit des leicht plastischen Tons TL1 durch die Mischung mit den RC-Materialien großteils deutlich unempfindlicher auf den Zutritt von Wasser reagierte (und die dokumentierten Werte teilweise sogar auf eine Verfestigung hinweisen), ist für Mischungen des Bodens TA1 mit RC-Material eine Verschlechterung der Eigenschaften im Vergleich zum unverbesserten Boden dokumentiert.

**Tab. 4.13: Tragfähigkeitsänderungen durch Wasserlagerung (Versuchsreihe 5)<sup>119</sup>**

Boden	Boden TL1				Boden TA1	
Zugabe-Material	RC-Mix 0/4 mm	RC-Mix 0/32 mm	RC-Beton 0/4 mm	RC-Ziegel 0/4 mm	RC-Mix 0/4 mm	RC-Mix 0/32 mm
Zugabemenge	Tragfähigkeitsänderung nach 7 Tagen Wasserlagerung (ohne Auflast)					
	$\Delta CBR$ [%]					
ohne	-9,1 / -11,8				-14,5 / -16,1	
20 M.-%	-	+1,8	-	-2,6	-	-
30 M.-%	-	-1,4	+8,8	-4,0	-20,9	-18,6
40 M.-%	+0,4	+6,0	-	+0,4	-	-
50 M.-%	-	+2,7	+10,7	-3,0	-22,9	-25,9

Zusammenfassend konnte das Schwell- und Tragfähigkeitsverhalten des leicht plastischen Tons TL1 durch die Verbesserung mit RC-Materialien bei nachträglichem Wasserzutritt also deutlich verbessert werden, beim ausgeprägt plastischen Ton TA1 kann dieses Verhalten

<sup>119</sup> Die angegebenen Änderungen ( $\Delta CBR = CBR_0 - CBR_w$ ) beziehen sich auf die Differenz zwischen dem Versuchswert der Tragfähigkeit nach Wasserlagerung ( $CBR_w$ ) und dem entsprechenden Wert der Ausgleichskurve der Tragfähigkeiten vor Wasserlagerung ( $CBR_0$ ) bei jeweils gleichem Einbauwasser-gehalt.

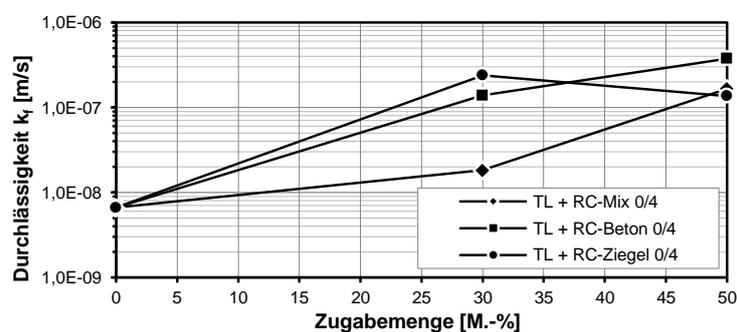
auch negativ beeinflusst werden. Es kommt der Gesamtbeurteilung des Verbesserungsverfahrens daher entgegen, dass dieses vor allem bei Böden niedriger Plastizität anschlägt (vgl. Pkt. 4.5.1).

**FF4-C.** Die Verwendung von RC-Material aus Bauschutt zur Bodenverbesserung feinkörniger Böden bedingt vor allem auch die umwelttechnische Eignung des RC-Materials gemäß den länderspezifischen Regelungen und/oder dem straßenbautechnischen Regelwerk. In Fällen, in denen das RC-Material umweltrelevante Inhaltsstoffe enthält, ist die Verwendung der damit verbesserten Böden gegebenenfalls noch in Erdbauwerken mit technischen Sicherungsmaßnahmen gemäß M T S E möglich. Grundlegender Gedanke bei der Anwendung dieser technischen Sicherungsmaßnahmen ist, die Elution von umweltrelevanten Inhaltsstoffen aus dem verwendeten Erdbaustoff durch Minimierung der Durchströmung zu verhindern. Dies erfolgt einerseits durch Verhinderung des Wasserzutritts in das Bauwerk und andererseits durch Vorgabe niedriger Durchlässigkeiten für den Erdbaustoff selbst. Für die Beurteilung der zulässigen Bauweisen nach M T S E ist also die Kenntnis des Durchlässigkeitswertes des Baustoffes von wesentlicher Bedeutung. Auch aus der Anforderung zur Kenntnis dieser Bodeneigenschaft ergibt sich also die unter Pkt. 4.1 formulierte Frage:

**FF4-C Wie ändert sich die Durchlässigkeit eines feinkörnigen Bodens durch die Verbesserung mit RC-Materialien?**

Die Untersuchungen zur Änderung der Durchlässigkeit erfolgte in Versuchsreihe 5. Sie umfassten die verbesserten Böden TL1 und TA1 und somit stellvertretend jene beiden Böden mit der niedrigsten beziehungsweise höchsten Plastizität aller untersuchten Böden.

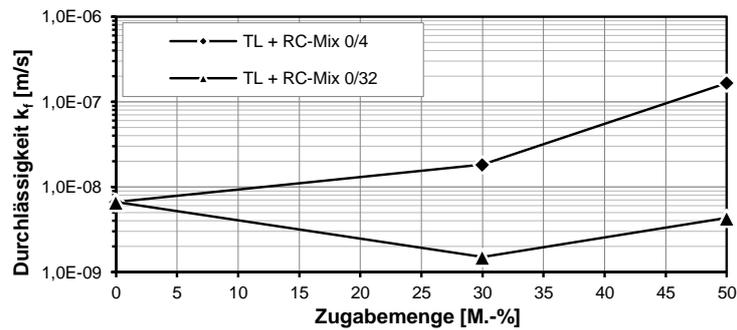
Die Ergebnisse der Versuche zur Durchlässigkeit der Mischungen des Bodens TL1 mit unterschiedlichen RC-Materialien der Klasse 0/4 mm (RC-Mix, RC-Beton und RC-Ziegel) sind in nachfolgender Abb. 4.30 abgebildet. Die Daten zeigen, dass die Durchlässigkeit der Mischungen mit RC-Material der Körnung 0/4 mm mit steigender Zugabemenge tendenziell ebenfalls anstieg. Die Schwankungen der Werte können wahrscheinlich den tatsächlich leicht vom Verdichtungsoptimum abweichenden Einbaubedingungen der untersuchten Proben zugeordnet werden (siehe Anhang A.6).



**Abb. 4.30:** Durchlässigkeit des mit RC-Material der Körnung 0/4 mm verbesserten Bodens TL1 (jeweils etwa Verdichtungsoptimum)

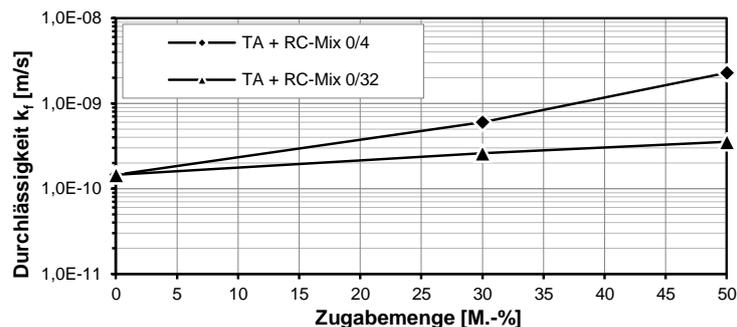
Deutlich anders stellt sich die Entwicklung der Durchlässigkeit der Mischungen des Bodens TL1 mit RC-Mix der Kornklasse 0/32 mm dar. Während, wie bereits beschrieben, die Verbesserung mit RC-Material der Klasse 0/4 tendenziell zu ansteigenden Durchlässigkeiten

fürte, so sank die Durchlässigkeit bei der Verbesserung des Bodens mit dem größeren RC-Material ab. Siehe dazu [Abb. 4.31](#).



**Abb. 4.31:** Durchlässigkeit des mit RC-Mix 0/4 und RC-Mix 0/32 verbesserten Bodens TL1 (jeweils etwa Verdichtungsoptimum)

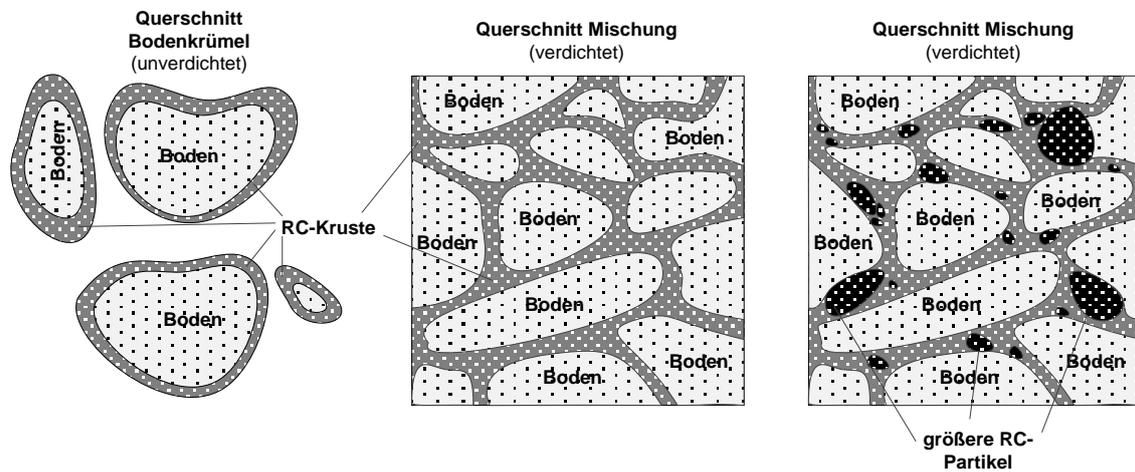
Die Zusammenfassung der Ergebnisse zu den Mischungen mit Boden TA1 in [Abb. 4.32](#) weisen ebenfalls auf einen Anstieg der Durchlässigkeiten mit steigender Zugabemenge hin. Dieser Anstieg fiel für das grobe RC-Material (RC-Mix 0/32) allerdings weniger deutlich aus, als für das RC-Material der Körnung 0/4 mm.



**Abb. 4.32:** Durchlässigkeit des mit RC-Mix 0/4 und RC-Mix 0/32 verbesserten Bodens TA1 (jeweils etwa Verdichtungsoptimum)

Eine Möglichkeit zur Erklärung für dieses bodenabhängig unterschiedliche Verhalten liefert eine Beobachtung im Zuge der Herstellung der Mischungen. Einerseits bewirkte der feine Anteil des zur Verbesserung verwendeten RC-Materials die Bildung einer Hülle um die Bodenkrümel (RC-Kruste). In der verdichteten Mischung ergab sich daraus ein wabenartiges Geflecht an - im Vergleich zum Bodenkrümel selbst - durchlässigeren „Adern“ (siehe dazu [Abb. 4.33](#)). Gleichzeitig ersetzten die groben RC-Partikel Teile des durchströmten Querschnittes und verkleinerten diesen insgesamt. Dieser grobe Anteil mag zwar porös sein, weist aber wohl eine vernachlässigbar kleine Wasserdurchlässigkeit auf (zum Beispiel Durchlässigkeit von Zementstein oder Ziegel). Es ist zu vermuten, dass sich beide Effekte überlagern und je nach Durchlässigkeit des Bodenanteils und Körnung des RC-Materials unterschiedlich stark in den Vordergrund treten. So zeigten die Ergebnisse aus Versuchen an Mischungen mit dem (im Vergleich zum Boden TA1) durchlässigeren leicht plastischen Ton TL1, dass grundsätzlich beide der beschriebenen Entwicklungen dominant sein können, je nach den Eigenschaften des zugegebenen Materials. Die Verbesserung mit RC-Materialien der Körnung 0/4 mm führte dort zu einer Erhöhung der Durchlässigkeiten, die Verbesserung mit RC-Mix 0/32 mm zu einer Verringerung. Bei der Verbesserung des sehr

undurchlässigen Bodens, wie Boden TA1, hingegen überwog die Bildung des vergleichsweise durchlässigeren wabenartigen Geflechtes, da der Durchlässigkeitsunterschied zwischen dem Bodenanteil und den groben RC-Körnern deutlich kleiner war. So lag die Durchlässigkeit dieser Mischungen unabhängig von der Körnung des zur Verbesserung verwendeten RC-Materials tendenziell höher als jene des unverbesserten Bodens, jeweils im Verdichtungsoptimum.



**Abb. 4.33:** Bodenkrümel mit RC-Kruste (unverdichtet) und Struktur der verdichteten Mischungen

## 5 Großmaßstäbliche Versuche<sup>120</sup>

### 5.1 Allgemeines

Da die Bodenverbesserung mit RC-Körnungen noch kein im Erdbau etabliertes Verfahren darstellt und die Laborversuche vielversprechende Ergebnisse gezeigt hatten, wurden ergänzend auch großmaßstäbliche Versuche durchgeführt. Diese wurden im Sommer 2015 in einer Grube nordwestlich von München realisiert und erfolgten in Zusammenarbeit mit einem lokalen Recyclingunternehmen, der Firmengruppe Ettengruber.



**Abb. 5.1:** Die Fräse CAT RM500 beim Großversuch; Bewegung von links nach rechts

### 5.2 Untersuchungskonzept und Versuchsmaterialien

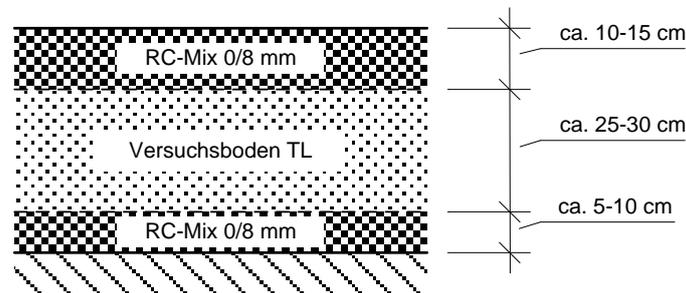
In Anlehnung an die Laborversuche zur Bodenverbesserung mit RC-Material sollte ein Boden mit RC-Mix 0/8 mm verbessert werden. Beide Materialien wurden getrennt voneinander in Lagen aufgebracht und im Anschluss durch eine Erdbaufräse vermischt. Der Schichtaufbau der Materialien vor dem Fräsen ist in nachfolgendem [Abb. 5.2](#) dargestellt. Die dem feinkörnigen Boden unterliegende Schicht aus RC-Mix 0/8 diente in den Versuchen als Pufferschicht zum Untergrund (Frästiefe).

Zwei Probefelder wurden aufeinanderfolgend hergestellt (nachfolgend als Versuch 1 und Versuch 2 bezeichnet). Bei Versuch 1 wurden zwei Fräsdurchgänge durchgeführt (Fräse Typ CAT RM 500, max. Frästiefe etwa 0,5 m) und die danach verdichtete Oberfläche (Walze Typ

---

<sup>120</sup> Die Schrifffassung zum Kapitel entstand im Rahmen von FE 05.0166/2011/ERB (im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen; siehe HENZINGER et al. 2015b). Das Kapitel wurde vom Autor verfasst und für diese Arbeit leicht abgeändert.

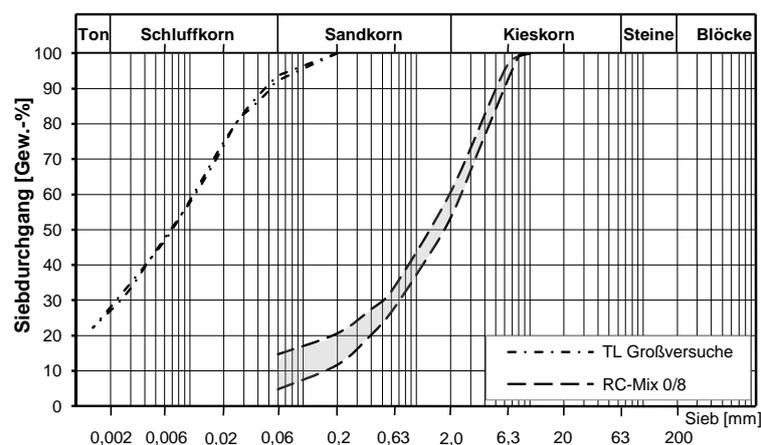
BOMAG BW 156 D-3) jeweils nach 3 und 6 Walzen-Überfahrten<sup>121</sup> untersucht. Da beim ersten Versuch zwischen erstem und zweitem Fräsdurchgang augenscheinlich keine maßgebliche Änderung der Aggregatgrößen erkennbar war, wurde bei Versuch 2 auf den zweiten Fräsdurchgang verzichtet.



**Abb. 5.2:** Aufbau des Schichtpaketes vor dem Fräsdurchgang für beide durchgeführten Versuche

Die vorliegenden Untersuchungen am jeweils gefrästen und verdichteten Paket umfassen statische Lastplattenversuche, dynamische Lastplattenversuche, dynamische CBR-Versuche und Densitometerversuche zur Bestimmung der Trockendichte. Die Versuchspunkte für die beprobten Oberflächen (Versuch 1 mit 3 Überfahrten, Versuch 1 mit 6 Überfahrten und Versuch 2 mit 6 Überfahrten) sind in [Abb. 5.8](#) und [Abb. 5.12](#) dargestellt.

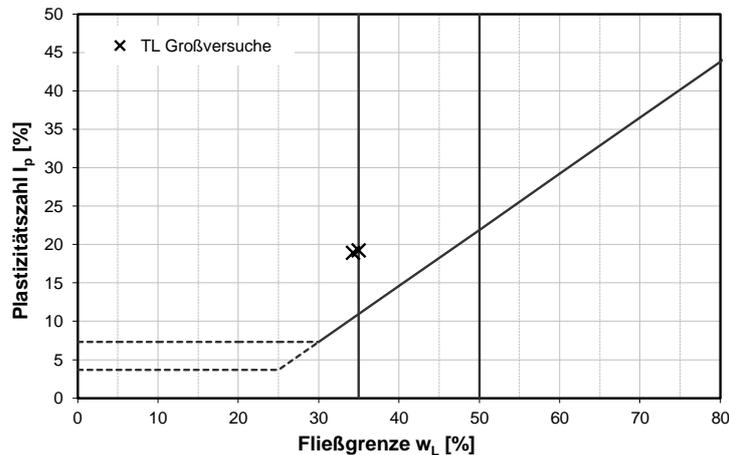
Als Versuchsboden wurde ein Material ähnlich jenem aus den Laboruntersuchungen (Versuchsboden TL1) verwendet, beide Materialien entstammen der Kieswäsche und waren mittels Kammerfilterpresse entwässert worden. Der in den Großversuchen verwendete Boden wies allerdings im Vergleich zu jenem in den Laborversuchen verwendeten Ton eine höhere Fließgrenze auf und näherte sich somit den Eigenschaften eines mittelplastischen Tons. Zugemischt wurde diesem Boden ein RC-Mix der Körnung 0/8 mm. Die Sieblinien der Materialien sind in nachfolgender [Abb. 5.3](#) und die Einordnung des Versuchsbodens im Plastizitätsdiagramm nach DIN 18196:2011 ist in [Abb. 5.4](#) dargestellt.



**Abb. 5.3:** Sieblinien der Versuchsmaterialien

<sup>121</sup> Der Begriff „Überfahrt“ entspricht dabei einer tatsächlichen Überfahrt (Hin- oder Rückfahrt) mit dynamischer Verdichtung.

Der verwendete RC-Mix 0/8 entsprach bis auf das Größtkorn dem in den Laborversuchen verwendeten Material. Untersuchungen eines externen Prüfinstitutes (im Auftrag des Herstellers) zufolge handelt es sich um Material der Güteklasse RW1 (offener Einbau; uneingeschränkt verwertungsfähiges Material unter Beachtung der im Leitfaden aufgeführten Bedingungen) gemäß Leitfaden des bayerischen Staatsministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz zu Anforderungen an die Verwertung von Recycling-Baustoffen in technischen Bauwerken (StMUGV 2005).



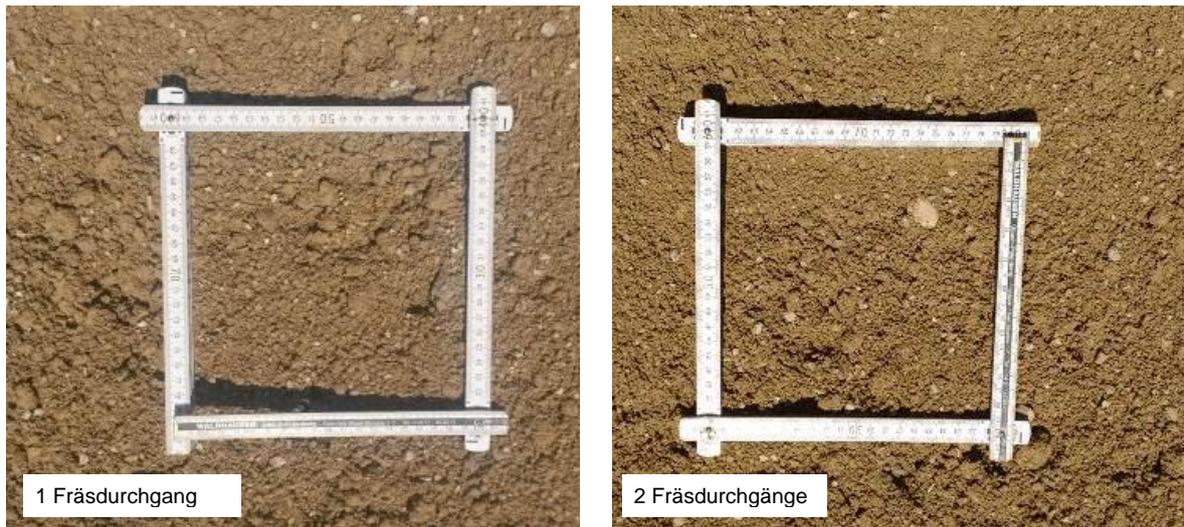
**Abb. 5.4:** Versuchsboden im Plastizitätsdiagramm

### 5.3 Untergrund

Vorab wurden auf der Versuchsfläche (verdichteter RC-Beton 0/45 mm auf Auffüllung) erkundende Versuche durchgeführt. Die vier im Nahbereich der Versuchsfläche realisierten Rammsondierungen (leichte Rammsonde; DPL-5) wiesen durchwegs hohe bis sehr hohe Schlagzahlen aus (mind. 15 Schläge, größtenteils aber über 50 Schläge je 10 cm) und mussten bei 60 bis 120 cm Rammtiefe abgebrochen werden. Ebenfalls im Bereich des Versuchsfeldes durchgeführte statische Lastplattenversuche (2 Stk.) wiesen  $E_{v1}$ -Werte zwischen etwa 60 und 85 MN/m<sup>2</sup> und  $E_{v2}$ -Werte zwischen etwa 430 und 600 MN/m<sup>2</sup> auf. Mittels dynamischer Lastplatte wurden 6 Versuche im Bereich des Versuchsfeldes durchgeführt und  $E_{vd}$ -Werte zwischen 105 und 133 MN/m<sup>2</sup> dokumentiert. Die erzielten Werte der dynamischen Plattendruckversuche überschritten dabei den in TP BF-StB Teil 8.3 für diesen Versuch angegebenen Gültigkeitsbereich von 15 bis 70 MN/m<sup>2</sup>.

### 5.4 Versuche zur Einfräsung und Verdichtung

**Erster Versuch.** Beim ersten Versuch lag der leicht plastische Boden mit einem Ausgangswassergehalt ( $w_{\text{Boden},0}$ ) von etwa 18 % vor. Das damit aufgebaute Schichtpaket ([Abb. 5.2](#)) wurde in zwei Fräsübergängen vermischt ([Abb. 5.1](#)). Zwischen dem ersten und zweiten Übergang der Fräse wurde keine augenscheinlich auffällige Änderung der Aggregatgrößen erkannt. Die maximale Aggregatgröße betrug in beiden Fällen etwa 20 bis 30 mm (siehe [Abb. 5.5](#)).



**Abb. 5.5:** Das Ergebnis der Fräsung im Versuch 1 nach 1 und 2 Fräsdurchgängen

Die dynamische Verdichtung erfolgte direkt im Anschluss an den zweiten Fräsdurchgang mit erst 3 Verdichtungsübergängen (siehe [Abb. 5.6](#)) und nach Beprobung 3 weiteren Verdichtungsübergängen.

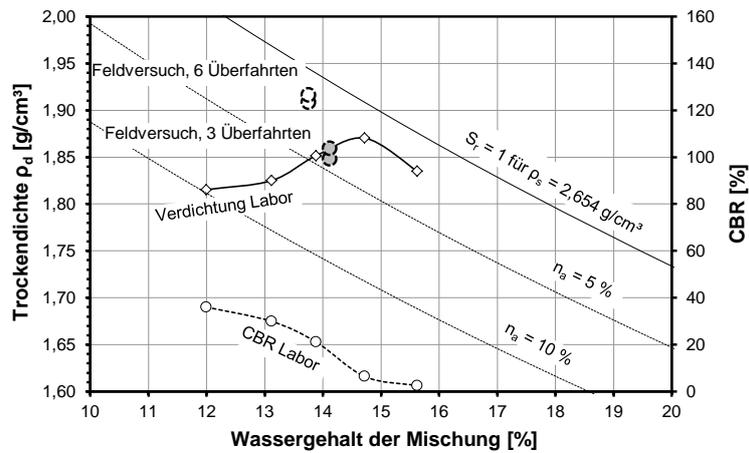


**Abb. 5.6:** Verdichtung des gefrästen Schichtpaketes

Das tatsächliche Mischungsverhältnis zwischen Boden und RC-Mix 0/8 wurde nach den Versuchen aus den Sieblinien der Ausgangsmaterialien und des Gemisches rückgerechnet. Demnach entsprach das Mischungsverhältnis einem Verhältnis Boden zu Zugabe von etwa 100:125, bezogen auf die jeweiligen Trockenmassen. Das entstehende Gemisch wies bei diesem hohen Mischungsverhältnis immer noch einen Feinanteil von über 40 M.-% auf. Ein Umschlag des Tragverhaltens auf ein tragendes Grobkorngerüst wurde auch bei dieser hohen Zugabemenge also nicht erreicht (vgl. Pkt. 3.2). Darauf weisen auch die deutlich vom Wassergehalt abhängigen CBR-Werte in [Abb. 5.7](#) hin, die bei Versuchen im Labor an verdichteten Proben entsprechender Mischungen dokumentiert wurden.

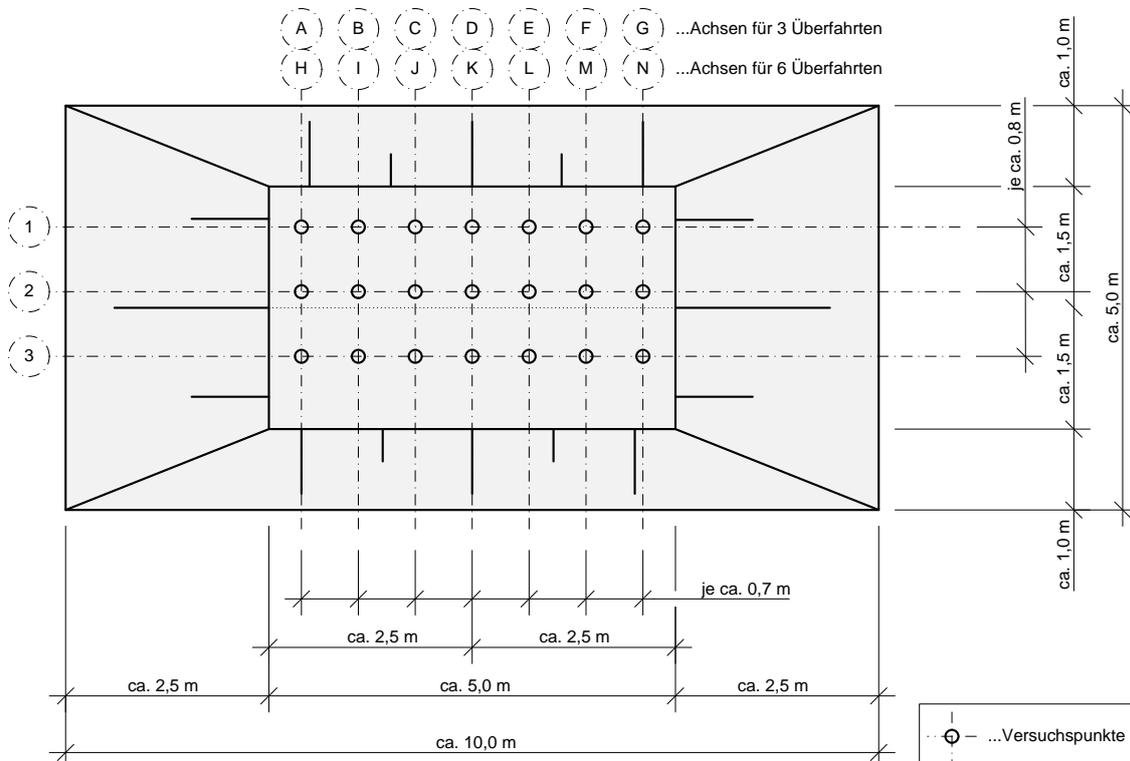
Mit dem ermittelten Mischungsverhältnis wurde nachträglich im Labor die zugehörige Proctorkurve der Mischung ermittelt. Diese ist in nachfolgender [Abb. 5.7](#) mit den Ergebnissen der Densitometerversuche und Wassergehaltsbestimmungen dargestellt. Die Sättigungslinie

wurde anhand jener Korndichte ermittelt, die sich für die Mischung aus Boden und RC-Material ergab.



**Abb. 5.7:** Verdichtungskurve des verbesserten Bodens und erreichte Verdichtung im Großversuch

Die Beprobung des Versuchsfeldes wurde im Anschluss an die jeweiligen Verdichtungsüberfahrten durchgeführt. Die Aufteilung der Versuchspunkte erfolgte so, dass kein Punkt zwei Mal zu beproben war. Das Versuchsfeld und das zugehörige Versuchsraster sind in **Abb. 5.8** dargestellt.



**Abb. 5.8:** Versuchsraster zu Versuch 1 der Großversuche

Nach 3 Walzenüberfahrten wurden an den Versuchspunkten A2 und G2 Dichtebestimmungen mittels Densitometer durchgeführt. Die ermittelten Trockendichten ( $\rho_{d, \text{Mischung}}$ ) können mit 1,85  $\text{g/cm}^3$  (A2) und 1,86  $\text{g/cm}^3$  (G2) angegeben werden. Die Ergebnisse von zwei Lastplat-

tenversuchen auf der Oberfläche der verdichteten Schicht sind in nachfolgender Tabelle dargestellt:

**Tab. 5.1: Ergebnisse der statischen Lastplattenversuche nach 3 Walzenübergängen**

Versuchspunkt	Statische Lastplatte		
	$E_{v1}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{v2}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{v2} / E_{v1}$ [-]
G3	9,7	49,1	5,1
A3	11,4	53,5	4,7

Gleichzeitig erfolgten Versuche mit dynamischer Lastplatte auf der verdichteten Ebene. Die Ergebnisse der 5 Versuche schwanken zwischen 14 und 27 MN/m<sup>2</sup>. Die Einzelergebnisse sind in [Tab. 5.2](#) zusammengefasst.

**Tab. 5.2: Ergebnisse der dynamischen Lastplattenversuche nach 3 Walzenübergängen**

Versuchspunkt	Dynamische Lastplatte		
	$s_{max}$ [mm]	$s_{max} / v_{max}$ [s]	$E_{vd}$ [MN/m <sup>2</sup> ]
C1	0,961	4,604	23,9
E1	1,604	5,676	14,0
G2	1,576	5,967	14,3
B3	0,850	4,377	26,5
F3	1,217	4,392	18,5

Nach 3 weiteren Walzenüberfahrten (also insgesamt 6 Walzenübergängen) wurden an den Versuchspunkten J2 und L2 weitere Dichtebestimmungen mittels Densitometer durchgeführt. Die ermittelten Trockendichten ( $\rho_{d,Mischung}$ ) können mit 1,92 g/cm<sup>3</sup> (J2) und 1,91 g/cm<sup>3</sup> (L2) angegeben werden (dargestellt in [Abb. 5.7](#)). Die Ergebnisse der Lastplattenversuche auf der Oberfläche der verdichteten Schicht sind in nachfolgender Tabelle dargestellt:

**Tab. 5.3: Ergebnisse der statischen Lastplattenversuche nach 6 Walzenübergängen**

Versuchspunkt	Statische Lastplatte		
	$E_{v1}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{v2}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{v2} / E_{v1}$ [-]
J3	13,9	54,0	3,9
L3	9,5	35,1	3,7

Gleichzeitig erfolgten wiederum Versuche mit der dynamischen Lastplatte. Die Ergebnisse der 4 Versuche schwanken zwischen 12 und 24 MN/m<sup>2</sup>. Die Einzelergebnisse sind in [Tab. 5.4](#) zusammengefasst.

**Tab. 5.4: Ergebnisse der dynamischen Lastplattenversuche nach 6 Walzenübergängen**

Versuchspunkt	Dynamische Lastplatte		
	$s_{max}$ [mm]	$s_{max} / v_{max}$ [s]	$E_{vd}$ [MN/m <sup>2</sup> ]
K1	1,859	5,385	12,1
H1	0,943	4,229	23,9
K3	1,258	5,292	17,9
N1	1,499	6,001	15,0

Durch die zusätzlichen 3 Walzenübergänge konnte eine weitere Erhöhung der Trockendichte erzielt werden. Warum die Versuchswerte der Lastplattenversuche gleichzeitig absinken, ist

schwer zu deuten. Es wird vermutet, dass die durch die starke Sonneneinstrahlung bedingte Austrocknung der Oberfläche zwischen den ersten 3 Walzenübergängen und den weiteren 3 Walzenübergängen mit den dokumentierten Ergebnissen zusammenhängt.

**Zweiter Versuch.** Für den zweiten Versuch wurde abermals die Unterlage aus RC-Mix 0/8 aufgebracht und darauf der leicht plastische Ton ausgelegt. Im Anschluss daran erfolgte die Zugabe von Wasser zur Erhöhung des Ausgangswassergehaltes (Abb. 5.9, links) und in zwei Durchgängen das Einfräsen dieses Wassers in den Boden (Abb. 5.9, rechts). Der feinkörnige Boden wies nach der Bewässerung einen Wassergehalt ( $w_{\text{Boden},0}$ ) von etwa 21,9 % auf (deutlich auf der nassen Seite des Verdichtungsoptimums, vgl. Abb. 5.11).



**Abb. 5.9:** Wasserzugabe zum leicht plastischen Ton und Einfräsen des zugegebenen Wassers mit 2 Fräsdurchgängen

Nach dem zweiten Fräsdurchgang wurde die Geometrie des Versuchsfeldes durch den Hydraulikbagger wieder hergestellt und die obere Lage RC-Mix 0/8 gemäß dem oben dargestellten Schichtpaket (Abb. 5.2) aufgebaut. Im Anschluss erfolgte der Fräsdurchgang, bei dem die Materialien des Schichtpaketes miteinander vermischt wurden.

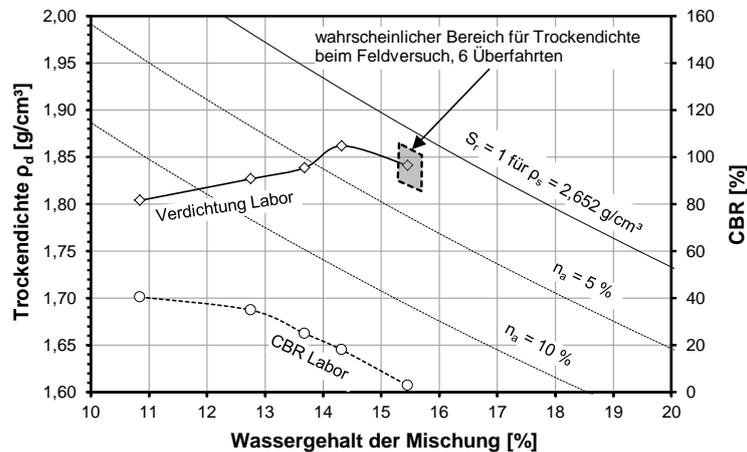


**Abb. 5.10:** Das Ergebnis der Fräsung im Versuch 2 nach 1 Fräsdurchgang

Die dynamische Verdichtung erfolgte direkt im Anschluss an den Fräsdurchgang mit 6 Verdichtungsübergängen. Das tatsächliche Mischungsverhältnis des Gemisches wurde wieder erst nach den Versuchen aus den Sieblinien der Ausgangsmaterialien und des Gemisches rekonstruiert. Demnach entsprach das Mischungsverhältnis einem Verhältnis Boden zu Zugabe von etwa 100:135, bezogen auf die jeweiligen Trockenmassen. Das verdichtete Gemisch wies auch bei diesem hohen Mischungsverhältnis immer noch einen Feinanteil von

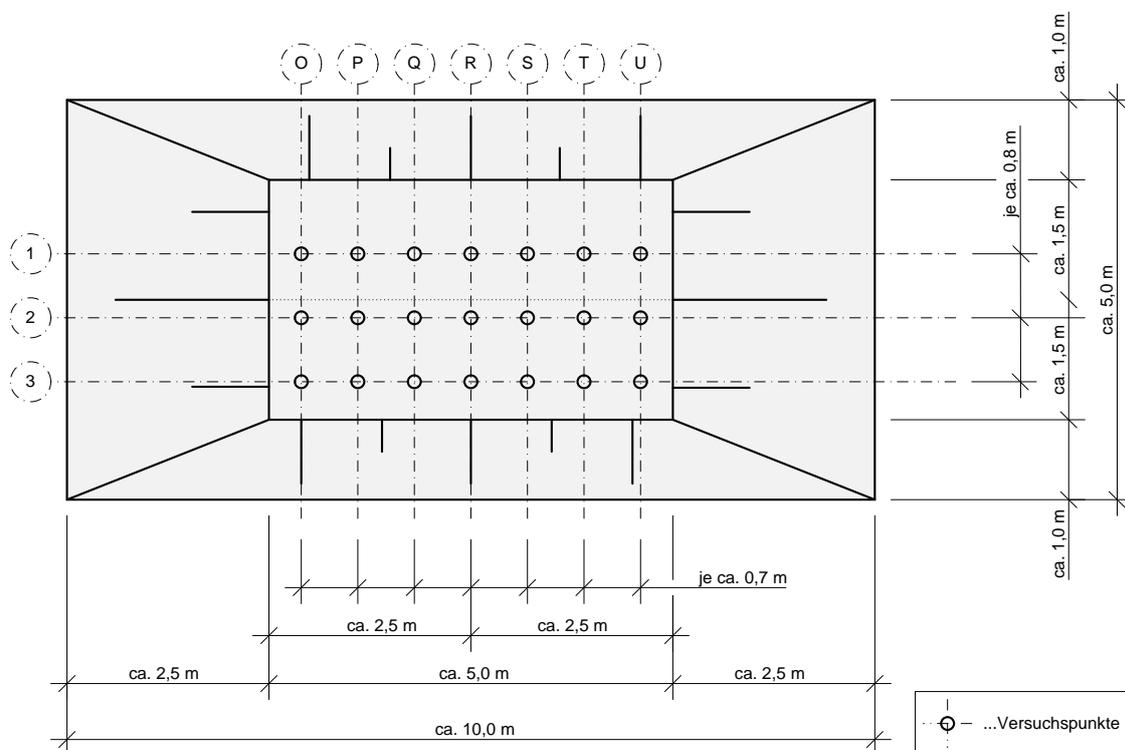
über 40 M.-% auf. Ein Umschlag des Tragverhaltens auf ein tragendes Grobkorngerüst wurde auch bei dieser hohen Zugabemenge also nicht erreicht (siehe Pkt. 3.2).

Mit dem ermittelten Mischungsverhältnis wurde nachträglich im Labor die zugehörige Proctorkurve ermittelt. Diese ist in nachfolgender Abb. 5.11 dargestellt. Die Sättigungslinie wurde wieder anhand jener Korndichte ermittelt, die sich für die Mischung aus Boden und RC-Material ergab.



**Abb. 5.11:** Verdichtungskurve des verbesserten Bodens und erreichte Verdichtung im Großversuch

Die Beprobung des Versuchsfeldes wurde im Anschluss an die Verdichtungsüberfahrten durchgeführt. Das Versuchsfeld und der zugehörige Versuchsraster sind in Abb. 5.12 dargestellt.



**Abb. 5.12:** Versuchsraster zu Versuch 2 der Großversuche

Die mittels Densitometerversuchen ermittelten Trockendichten konnten aufgrund eines Ablesefehlers nicht ausgewertet werden. Der am Gemisch bestimmte Wassergehalt des Gemisches lag bei etwa 15,4 % und wies im Zusammenhang mit der eingebrachten Verdichtungsenergie (6 Walzenübergänge, vgl. auch Versuch 1 in [Abb. 5.7](#)) darauf hin, dass bei der Verdichtung eine Trockendichte nahe der Sättigungslinie erreicht wurde. Die Ergebnisse von zwei statischen Lastplattenversuchen auf der Oberfläche der verdichteten Schicht sind in nachfolgender Tabelle dargestellt:

**Tab. 5.5: Ergebnisse der statischen Lastplattenversuche nach 6 Walzenübergängen**

Versuchspunkt	Statische Lastplatte		
	$E_{v1}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{v2}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{v2} / E_{v1}$ [-]
S3	6,7	38,3	5,7
Q3	11,4	47,8	4,2

Gleichzeitig erfolgten Versuche mit der dynamischen Lastplatte auf der verdichteten Ebene. Die Ergebnisse der 6 Versuche schwanken zwischen 7 und 15 MN/m<sup>2</sup> und bewegen sich damit unterhalb des Anwendungsbereichs dieses Verfahrens (15 bis 70 MN/m<sup>2</sup>). Die Einzelergebnisse sind in [Tab. 5.6](#) zusammengefasst.

**Tab. 5.6: Ergebnisse der dynamischen Lastplattenversuche nach 6 Walzenübergängen**

Versuchspunkt	Dynamische Lastplatte		
	$s_{max}$ [mm]	$s_{max} / v_{max}$ [s]	$E_{vd}$ [MN/m <sup>2</sup> ]
O3	1,958	6,956	11,49
P1	1,81	6,541	12,43
P3	1,736	5,887	12,96
R1	1,828	5,916	12,31
T1	3,175	6,931	7,09
T3	1,52	5,168	14,8

Nach 3 Wochen offener Liegezeit (Juli 2015; Hitzeperiode mit sporadischen Wärmegewittern) wurde die Oberfläche erneut mittels statischem und dynamischem Lastplattengerät untersucht. Die Versuchspunkte lagen dabei jeweils in der Mitte eines Feldes, das durch vier Punkte des Punktrasters in [Abb. 5.10](#) aufgespannt wurde. Die nachfolgende Zuordnung der Versuchspunkte erfolgt über die Angabe dieser 4 Punkte. In [Tab. 5.7](#) sind die Ergebnisse der statischen Lastplattenversuche zusammengefasst.

**Tab. 5.7: Nachuntersuchung zu Versuch 2; Ergebnisse der statischen Lastplattenversuche**

Versuchspunkt	Statische Lastplatte		
	$E_{v1}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{v2}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{v2} / E_{v1}$ [-]
Q1, Q2, R1, R2	45,7	251,2	5,5
T2, T3, U2, U3	44,7	200,6	4,5
O1, O2, P1, P2	44,7	203,6	4,6

Die im Vergleich zur sofortigen Beprobung stark angestiegenen Tragfähigkeiten werden auf die Abtrocknung des Materials im Laufe der Liegezeit zurückgeführt. Das Material lag im Versuchsquerschnitt zwar immer noch „erdfeucht“ vor, dürfte aber zum Versuchszeitpunkt einen Hauptteil seiner Bildsamkeit verloren haben. Ein Querschnitt durch die behandelte Schicht (nach der Nachuntersuchung) ist in [Abb. 5.13](#) dargestellt.



**Abb. 5.13:** Querschnitt durch die verbesserte Schicht nach der Nachuntersuchung

Die durchgeführten Versuche mit dem leichten Fallgewichtsgerät ([Tab. 5.8](#)) zeigen großteils Werte über dem gültigen Anwendungsbereich dieses Verfahrens (15 bis 70 MN/m<sup>2</sup>).

**Tab. 5.8:** Nachuntersuchung zu Versuch 2; Ergebnisse der dynamischen Lastplattenversuche

Versuchspunkt	Dynamische Lastplatte		
	$s_{\max}$ [mm]	$s_{\max} / v_{\max}$ [s]	$E_{vd}$ [MN/m <sup>2</sup> ]
T1, T2, U1, U2	0,2135	2,067	95,74
T2, T3, U2, U3	0,207	2,342	108,7
S1, S2, T1, T2	0,187	2,264	120,32
S2, S3, T2, T3	0,285	2,234	78,95
P1, P2, Q1, Q2	0,2	2,217	112,5
P2, P3, Q2, Q3	0,355	2,289	63,38

## 5.5 Zusammenfassende Beurteilung der großmaßstäblichen Versuche

Die Verdichtung des gemischten Materials erfolgte nach [Abb. 5.7](#) und [Abb. 5.11](#) bei beiden Versuchsfeldern ausreichend nahe am Verdichtungsoptimum; die Anforderungen an den Verdichtungsgrad und den Luftporenanteil wurden eingehalten (siehe Pkt. 3.1). Auffällig sind jedoch die Ergebnisse der statischen Lastplattenversuche als indirektes Prüfverfahren zur Verdichtungskontrolle. Vor allem die dokumentierten Erstverformungsmoduln ( $E_{v1}$ ) der direkt im Anschluss an die Verdichtung durchgeführten Versuche zeigen niedrige Werte zwischen 8 und 14 MN/m<sup>2</sup>. Da für die Zweitverformungsmoduln ( $E_{v2}$ ) aber jeweils Werte zwischen 35 und 54 MN/m<sup>2</sup> ermittelt wurden, ergaben sich sehr hohe Verhältniswerte  $E_{v2}/E_{v1}$  von 3,7 bis 5,7. Es fällt außerdem auf, dass dieses Charakteristikum auch bei der Nachuntersuchung (3 Wochen nach Verdichtung) erhalten blieb. Worauf diese hohen Verhältniswerte zurückgeführt werden können, und ob dieser Wert zur Beurteilung des Verdichtungserfolges solcher Materialien überhaupt sinnvoll angewendet werden kann, ist derzeit nicht eindeutig geklärt. Es ist denkbar, dass bei der Erstbelastung ( $E_{v1}$ ) Bodenwasser in Poren des RC-Materials ausgepresst wird und die Werte bei der Zweitbelastung ( $E_{v2}$ ) deshalb deutlich höher liegen (vgl. [Abb. 6.26](#)).

Zusammenfassend kann die baustellenseitige Mischbarkeit von RC-Material und Boden anhand der durchgeführten Großversuche bestätigt werden. Der Boden konnte mit und ohne Zugabe von RC-Material gefräst werden. Es wurden insgesamt mehrere Fräsdurchgänge zum Einfräsen des Wassers nach Bewässerung und auch mehrere Fräsdurchgänge zur

Einmischung von großen Mengen an RC-Material ohne besondere Auffälligkeiten durchgeführt. Der dabei dokumentierte Mischerfolg ist augenscheinlich mit dem aus den Laborversuchen vergleichbar.

## 6 Modellbildung zum Verbesserungsverhalten

### 6.1 Allgemeines

Für die Modellbildung war eine Beobachtung im Zuge der experimentellen Untersuchungen von entscheidender Bedeutung: Es ist aus der Bodenbehandlung mit Bindemitteln bekannt und wurde im Verlauf der Versuchsreihen auch für diese Art der Bodenverbesserung bestätigt, dass die Einmischung des Zugabe-Materials in die Böden nicht zu einem ideal homogenen Gemisch führt. Wenn die entstehende Mischung im Sinne einer baupraktischen Beurteilung auch augenscheinlich homogen vorliegen mag, in der Größenordnung der Bodenkrümel (Dimension [cm]) ist sie das nicht. So wurde festgestellt, dass das RC-Material in den Mischungen jeweils hauptsächlich in Form einer RC-Kruste um die Bodenkrümel vorlag (vgl. Abb. 6.9). Somit wird streng genommen nicht ein gleichmäßiges Gemisch aus zwei Materialien verdichtet, sondern zwei Materialien in einer Mischung.

Für die Modellbildung ergibt sich daraus die Möglichkeit, jene die Beurteilung der Verdichtbarkeit bestimmenden Parameter (Wassergehalt und Trockendichte) nicht nur in der Summe zu bilanzieren, sondern diese jeweils für den Bodenanteil und das Zugabe-Material getrennt zu betrachten.

### 6.2 Wasserbilanz in der entstehenden Mischung

Bei der Bodenverbesserung mit Recyclingbaustoffen wird trockenes, poröses Material in den nassen Boden eingemischt. Der sich daraus ergebende Wassergehalt der Mischung (reduzierter Wassergehalt) kann rechnerisch einfach über eine Massenbilanz ermittelt werden:

$$w_{\text{Mischung}} = \frac{m_{w,\text{Boden}} + m_{w,\text{ZM}}}{m_{d,\text{Boden}} + m_{d,\text{ZM}}} \quad (6-1)$$

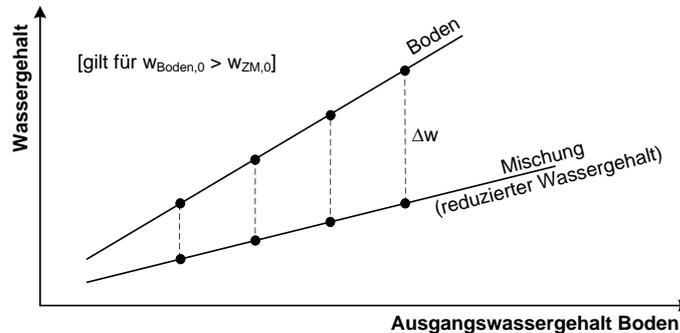
$w_{\text{Mischung}}$	Wassergehalt der Mischung / reduzierter Wassergehalt [-]
$m_{w,\text{Boden}}$	Masse Wasser des Bodenanteils [M]
$m_{w,\text{ZM}}$	Masse Wasser des Zugabe-Materials [M]
$m_{d,\text{Boden}}$	Trockenmasse des Bodenanteils [M]
$m_{d,\text{ZM}}$	Trockenmasse des Zugabe-Materials [M]

Die Wassergehaltsreduzierung der Mischung im Vergleich zum unverbesserten Boden ergibt sich aus der Differenz der jeweiligen Wassergehalte zu:

$$\Delta w = w_{\text{Boden},0} - w_{\text{Mischung}} = \frac{m_{w,\text{Boden}}}{m_{d,\text{Boden}}} - \frac{m_{w,\text{Boden}} + m_{w,\text{ZM}}}{m_{d,\text{Boden}} + m_{d,\text{ZM}}} \quad (6-2)$$

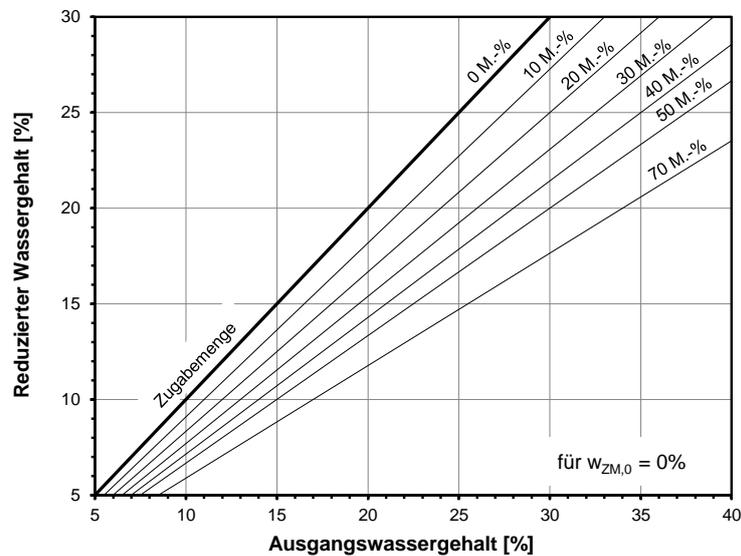
$\Delta w$	Wassergehaltsreduzierung [-]
$w_{\text{Boden},0}$	Ausgangswassergehalt des Bodenanteils [-]
$w_{\text{Mischung}}$	Wassergehalt der Mischung / reduzierter Wassergehalt [-]

Bleibt das Mischungsverhältnis (Verhältnis der Trockenmassen von Boden und Zugabe-Material) und der Eigenwassergehalt des Zugabe-Materials konstant, so steigt die Wassergehaltsänderung mit steigendem Ausgangswassergehalt des Bodenanteils linear an (siehe [Abb. 6.1](#)). Die Änderung des Wassergehaltes  $\Delta w$  ist für die Beurteilung des Ausmaßes der Verbesserung allerdings nicht ausreichend, da vorab nicht bekannt ist, bei welchem Wassergehalt die entstehende Mischung ihr Verdichtungsoptimum aufweist.



**Abb. 6.1:** Ausgangswassergehalt des Bodenanteils und Wassergehalt der Mischung

Für unterschiedliche Zugabemengen eines Zugabe-Materials mit konstantem Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0}$  lässt sich der Zusammenhang zwischen dem Ausgangswassergehalt und dem reduzierten Wassergehalt folgendermaßen darstellen:



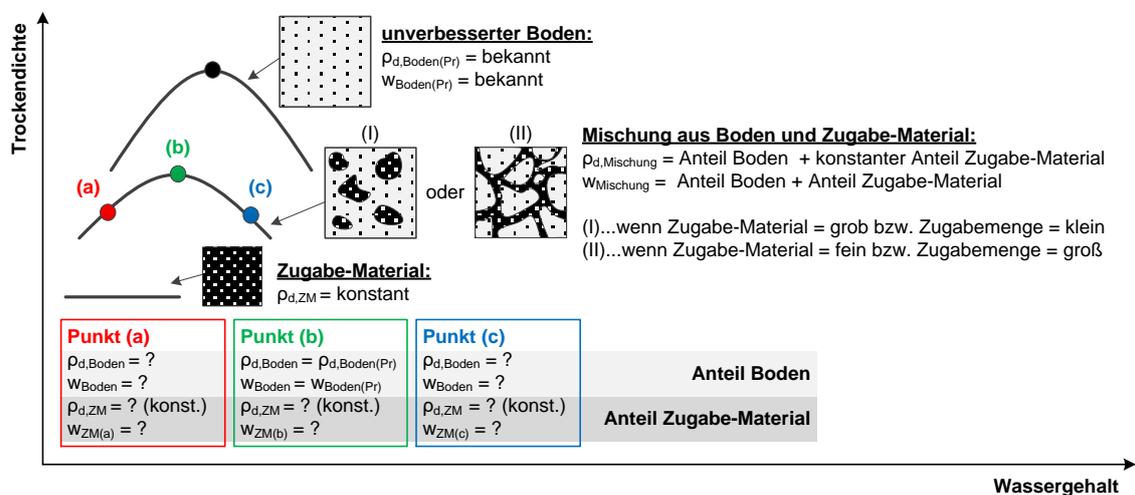
**Abb. 6.2:** Ausgangswassergehalt des Bodenanteils und Wassergehalt der Mischung am Beispiel unterschiedlicher Zugabemengen

### 6.3 Beschreibung des Modells

In Anlehnung an bereits seit langer Zeit bekannten Überlegungen unterschiedlicher Autoren zum Verdichtungsverhalten gemischtkörniger Böden (zum Beispiel zusammengefasst in FLOSS et al. 1968) wird ein bestehendes mathematisches Modell für den gegenständlichen

Zweck adaptiert. Dieses ermöglicht es, den grundlegenden Charakter des Verfahrens „Bodenverbesserung mit porösen RC-Materialien“ zu beschreiben.

Zusammengefasst erfolgt die Beschreibung des Verdichtungsverhaltens von verbesserten Böden durch den getrennten Ansatz der Verdichtungseigenschaften des Bodenanteils und des Zugabe-Materials. Es wird dabei davon ausgegangen, dass die jeweils gemischten Materialien mit ihren Eigenschaften getrennt voneinander das Verhalten des Gemisches bestimmen und sich gegenseitig nicht beeinflussen. Die Verbindung der Eigenschaften beider Materialien erfolgt über das zwischen ihnen ausgetauschte Wasser. Die Anwendung des Modells setzt demnach eine inhomogene Mischung voraus, wie sie unter Pkt. 6.1 beschrieben wurde. Eine weitere wichtige Annahme für die Anwendung des Modells ist, dass die Trockendichte des Zugabe-Materials im verdichteten Gemisch nur in vernachlässigbarem Ausmaß variiert und somit keinen direkten Einfluss auf die Lage des Verdichtungsoptimums der Mischung nimmt<sup>122</sup>. Das Modell ist beispielhaft in Abb. 6.3 veranschaulicht.



**Abb. 6.3: Verdichtungseigenschaften am vereinfachten Modell**

Das sich aus diesen Annahmen ergebende vereinfachte Modell erlaubt bei bekannten Verdichtungseigenschaften einer Mischung in einem ersten Schritt die Analyse der Eigenschaften des Zugabe-Materials durch Rückrechnung aus Versuchsergebnissen. Andererseits können, wie später veranschaulicht werden wird, die Verdichtungseigenschaften von unterschiedlichen Mischungen aus einer solchen Rückrechnung prognostiziert werden.

**Optimaler Verdichtungswassergehalt.** Wie sich der optimale Verdichtungswassergehalt durch die Zumischung ändert, kann für das vereinfachte Modell ohne erheblichen Aufwand abgeleitet werden. Entsprechend der Modellannahmen lässt sich bei einem beliebigen Mischungs-Wassergehalt nach Gleichung (6-1) die Bilanz über den Wasser- und Feststoffanteil ziehen. Mit dem Mischungsverhältnis  $MV$  ( $m_{d,ZM} = MV \cdot m_{d,Boden}$ ), dem Wassergehalt des Zugabe-Materials  $w_{ZM}$  ( $m_{w,ZM} = MV \cdot m_{d,Boden} \cdot w_{ZM}$ ) und dem Wassergehalt des Bodens im Ver-

<sup>122</sup> Grundlage dieser Annahme: Die Verdichtung des reinen RC-Mix 0/4 mm ist zum Beispiel in Abb. 7.1 nach HENZINGER et al. (2015b) dargestellt. Die Verdichtung des Materials kann als nahezu unabhängig vom Wassergehalt beschrieben werden. Da der Wassergehalt des Zugabe-Materials in einer verdichteten Mischung außerdem nur in vergleichsweise engen Grenzen variieren kann, ist die Möglichkeit zur Ausprägung unterschiedlicher Trockendichten dieses Anteils zusätzlich eingeschränkt.

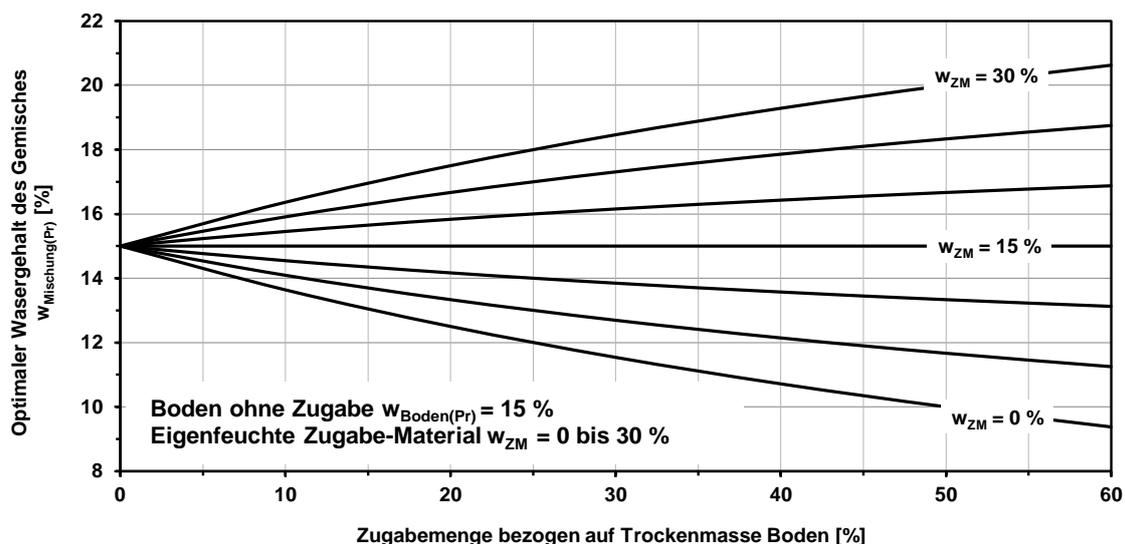
dichtungsoptimum  $w_{\text{Boden(Pr)}}$  ( $w_{\text{Boden(Pr)}} = m_{d,\text{Boden}} \cdot w_{\text{Boden(Pr)}}$ ), ergibt sich nach Vereinfachung die allgemeine Bilanzgleichung beim optimalen Wassergehalt der Mischung zu:

$$w_{\text{Mischung(Pr)}} = \frac{w_{\text{Boden(Pr)}} + MV \cdot w_{\text{ZM}}}{1 + MV} \quad (6-3)$$

$w_{\text{Mischung(Pr)}}$	Optimaler Wassergehalt der Mischung [-]
$w_{\text{Boden(Pr)}}$	Optimaler Wassergehalt des unverbesserten Bodens [-]
$w_{\text{ZM}}$	Wassergehalt des Zugabe-Materials im verdichteten Gemisch [-]
MV	Mischungsverhältnis der Trockenmassen [(Zugabemenge in %) / 100]

In Gleichung (6-3) sind die beschriebenen Modellannahmen implizit enthalten. Die Trockendichte der Mischung entwickelt sich mit dem Wassergehalt des Bodenanteils. Das Optimum wird allein durch das Verdichtungsoptimum des Bodenanteils bestimmt, der Wassergehalt des Zugabe-Materials bewirkt in Abhängigkeit von der Zugabemenge lediglich eine seitliche Verschiebung der Proctorkurve (bezogen auf den Wassergehalt der Mischung).

Eine inhaltlich identische Gleichung wird in DIN 18127:2012<sup>123</sup> zur Korrektur des optimalen Wassergehaltes bei Versuchsdurchführung ohne Überkorn angegeben. Ihre Anwendung setzt voraus, dass der Wassergehalt des Zugabe-Materials im Gemisch bekannt ist. Im Sinne der Anwendung nach DIN 18127:2012 ist dies einfach möglich, wenn man der berechtigten Annahme folgt, dass der Überkornanteil natürlicher Körnungen nicht porös ist und in Relation zu seiner Feststoff-Masse nahezu kein Wasser speichern kann. Bleibt man hingegen allgemein bei der Annahme, dass auch das Zugabe-Material aufgrund der Porosität einen relevanten Anteil an Wasser hält, so lässt sich anhand eines einfachen Beispiels (optimaler Verdichtungswassergehalt des Bodens bei  $w_{\text{Boden(Pr)}} = 15\%$ ) die Gleichung (6-3) für unterschiedliche Wassergehalte des Zugabe-Materials folgendermaßen auswerten:

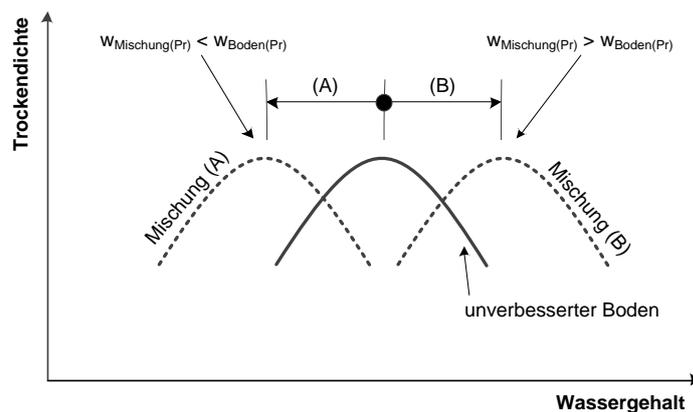


**Abb. 6.4:** Optimaler Verdichtungswassergehalt der Mischung anhand eines Beispiels

Aus [Abb. 6.4](#) ist ableitbar, dass sich der optimale Verdichtungswassergehalt der Mischung je nach Eigenfeuchte des Zugabe-Materials unterschiedlich entwickelt. Liegt der Wassergehalt

<sup>123</sup> DIN 18127:2012: S.16 Gleichung (7).

des Zugabe-Materials in der verdichteten Mischung unter dem optimalen Wassergehalt des Bodens, so wird der optimale Verdichtungswassergehalt der Mischung beider Materialien auf der trockenen Seite des optimalen Wassergehaltes des Ausgangsbodens liegen (Pfad/Mischung (A) in Abb. 6.5). Ist eine größere Menge an Wasser in den porösen Körnern der Zugabe gespeichert, so kann das Verdichtungs optimum auch auf der nassen Seite des optimalen Wassergehaltes des unverbesserten Bodens zu liegen kommen (Pfad/Mischung (B) in Abb. 6.5). Im Spezialfall, bei dem die Eigenfeuchte des Zugabe-Materials im verdichteten Gemisch dem optimalen Wassergehalt des Bodenanteils entspricht, bleibt der optimale Verdichtungswassergehalt der Mischung unabhängig von der Zugabemenge konstant (vgl.  $w_{ZM} = 15\%$  in Abb. 6.4).



**Abb. 6.5:** Entwicklung des optimalen Verdichtungswassergehalts der Mischung

Will man nun berücksichtigen, dass das poröse Zugabe-Material zur Wasseraufnahme fähig ist, so muss der Wassergehalt des Zugabe-Materials nach Gleichung (6-3) weiter unterteilt werden: Einerseits in einen Anteil, der der Eigenfeuchte des Zugabe-Materials (vor Mischung) zuzuordnen ist und andererseits in jenen Anteil an Wasser, der aus dem Boden in die Poren des Zugabe-Materials abgegeben wird. Unter Berücksichtigung von  $w_{ZM} = w_{ZM,0} + \Delta w_{ZM}$  lässt sich Gleichung (6-3) umformen zu:

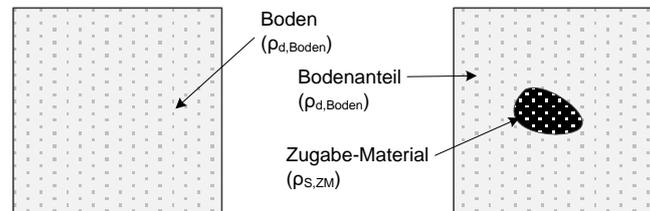
$$w_{\text{Mischung(Pr)}} = \frac{w_{\text{Boden(Pr)}} + MV \cdot (w_{ZM,0} + \Delta w_{ZM})}{(1 + MV)} \quad (6-4)$$

$w_{\text{Mischung(Pr)}}$	Optimaler Wassergehalt der Mischung [-]
$w_{\text{Boden(Pr)}}$	Optimaler Wassergehalt des unverbesserten Bodens [-]
$w_{ZM,0}$	Eigenfeuchte (Eigenwassergehalt) des Zugabe-Materials [-]
$\Delta w_{ZM}$	Wasseraufnahme des Zugabe-Materials aus dem Boden [-]
MV	Mischungsverhältnis der Trockenmassen [(Zugabemenge in %) / 100]

Diese Bilanz berücksichtigt nicht nur die eingangs erwähnten Modellannahmen, sondern auch die Tatsache, dass nach der Mischung beider Materialien Bodenwasser in die Poren des Zugabe-Materials abgegeben wird und sich der zugehörige Wassergehalt dieses Anteils dadurch ändert.

**Trockendichte im Verdichtungs optimum.** Die für diese Fragestellung relevanten, grundlegenden Überlegungen wurden bereits vor geraumer Zeit im Zuge von Untersuchungen zum Verdichtungsverhalten gemischtkörniger Böden entwickelt. FLOSS et al. (1968) widmen sich

ausgiebig der Thematik, fassen die Erkenntnisse unterschiedlicher Autoren zusammen und erwähnen unter anderem einen, in den USA durch das *Bureau of Reclamation* entwickelten, idealisierten Ansatz zur Berechnung der durch Verdichtung erreichbaren Trockendichte von Gemischen aus feinkörnigen Böden mit unterschiedlichen Anteilen an Grobkorn (siehe FLOSS et al. 1968)<sup>124</sup>. Dabei wird allgemein davon ausgegangen, dass das Grobkorn mit seiner jeweiligen Korndichte im Gemisch das entsprechende Volumen an Feinkorn mit dessen jeweiliger Trockendichte ersetzt (siehe Abb. 6.6).



**Abb. 6.6:** Darstellung des vereinfachten Ansatzes; links Boden - rechts Mischung

In Anlehnung daran kann für die Dichte eines Gemisches aus feinkörnigem Boden und porösem Zugabe-Material im Verdichtungsoptimum ebenfalls die Bilanz zwischen Trockenmasse und Volumen gezogen werden. Im Gegensatz zu den Ausführungen in FLOSS et al. (1968) erstreckt sich diese Bilanz aber auch auf den gesamten Porenraum (intergranulare und intragranulare Poren) des Zugabe-Materials:

$$\rho_{d,Mischung} = \frac{m_{d,Boden} + m_{d,ZM}}{V_{P,Boden} + V_{S,Boden} + V_{P,ZM} + V_{S,ZM}} \quad (6-5)$$

$\rho_{d,Mischung}$	Trockendichte der Mischung [ $M \cdot L^{-3}$ ]
$m_{d,Boden}$	Trockenmasse des Bodenanteils [M]
$m_{d,ZM}$	Trockenmasse des Zugabe-Materials [M]
$V_{P,Boden}$	Porenvolumen des Bodenanteils [ $L^3$ ]
$V_{S,Boden}$	Feststoffvolumen des Bodenanteils [ $L^3$ ]
$V_{P,ZM}$	Porenvolumen des Zugabe-Materials [ $L^3$ ]
$V_{S,ZM}$	Feststoffvolumen des Zugabe-Materials [ $L^3$ ]

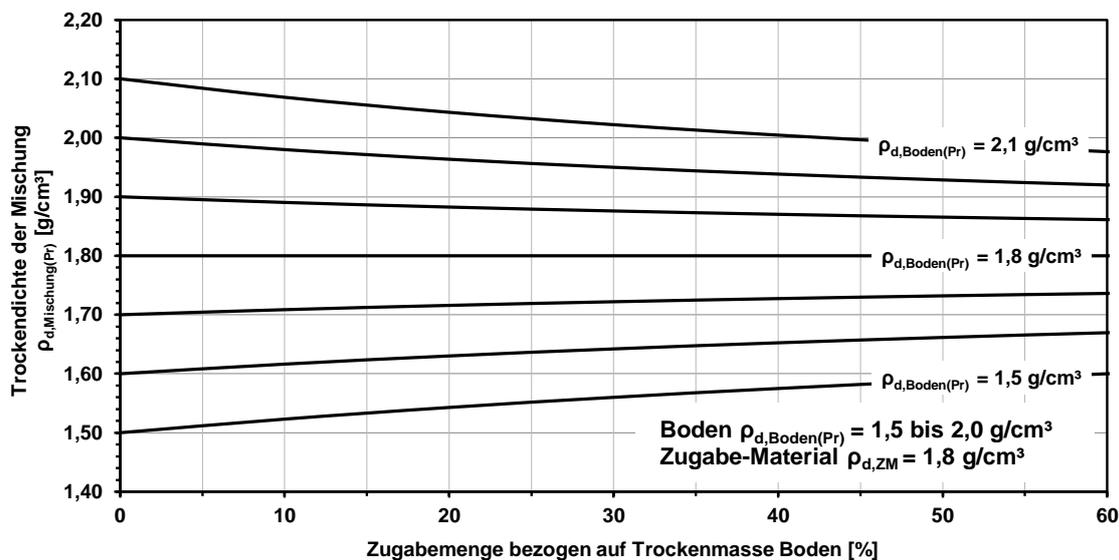
Unter Berücksichtigung der Trockendichte des Bodenanteils im Verdichtungsoptimum  $\rho_{d,Boden(Pr)}$  ( $\rho_{d,Boden(Pr)} = m_{d,Boden} / (V_{P,Boden} + V_{S,Boden})$ ), der gemäß der Modellannahme unabhängig vom Wassergehalt etwa gleichbleibenden Trockendichte des Zugabe-Materials  $\rho_{d,ZM}$  ( $\rho_{d,ZM} = m_{d,ZM} / (V_{P,ZM} + V_{S,ZM})$ ) und dem Mischungsverhältnis zwischen Boden und Zugabe-Material MV ( $m_{d,ZM} = MV \cdot m_{d,Boden}$ ) lässt sich Gleichung (6-5) umformen zu:

$$\rho_{d,Mischung(Pr)} = \frac{\rho_{d,Boden(Pr)} \cdot \rho_{d,ZM} \cdot (1 + MV)}{\rho_{d,ZM} + \rho_{d,Boden(Pr)} \cdot MV} \quad (6-6)$$

$\rho_{d,Mischung(Pr)}$	Trockendichte der Mischung im Verdichtungsoptimum [ $M \cdot L^{-3}$ ]
$\rho_{d,Boden(Pr)}$	Trockendichte des unverbesserten Bodens im Optimum [ $M \cdot L^{-3}$ ]
$\rho_{d,ZM}$	Trockendichte des Zugabe-Materials [ $M \cdot L^{-3}$ ]
MV	Mischungsverhältnis der Trockenmassen [(Zugabemenge in %) / 100]

<sup>124</sup> FLOSS et al. (1968): S. 6.

Anhand eines Beispiels ist die Auflösung von Gleichung (6-6) in [Abb. 6.7](#) dargestellt. Aus der Darstellung wird deutlich, wann durch die Mischung eine Erhöhung (wenn  $\rho_{d,ZM} > \rho_{d,Boden(Pr)}$ ) und wann ein Absinken der Trockendichte des Gemisches (wenn  $\rho_{d,ZM} < \rho_{d,Boden(Pr)}$ ) zu erwarten ist. Im Spezialfall, bei dem die Trockendichte des Zugabe-Materials der Trockendichte des Grundmaterials (Boden) im Verdichtungsoptimum entspricht, bleibt die Trockendichte der Gemische unabhängig vom Mischungsverhältnis gleich (siehe  $\rho_{d,Boden(Pr)} = 1,8 \text{ g/cm}^3$  in [Abb. 6.7](#)).



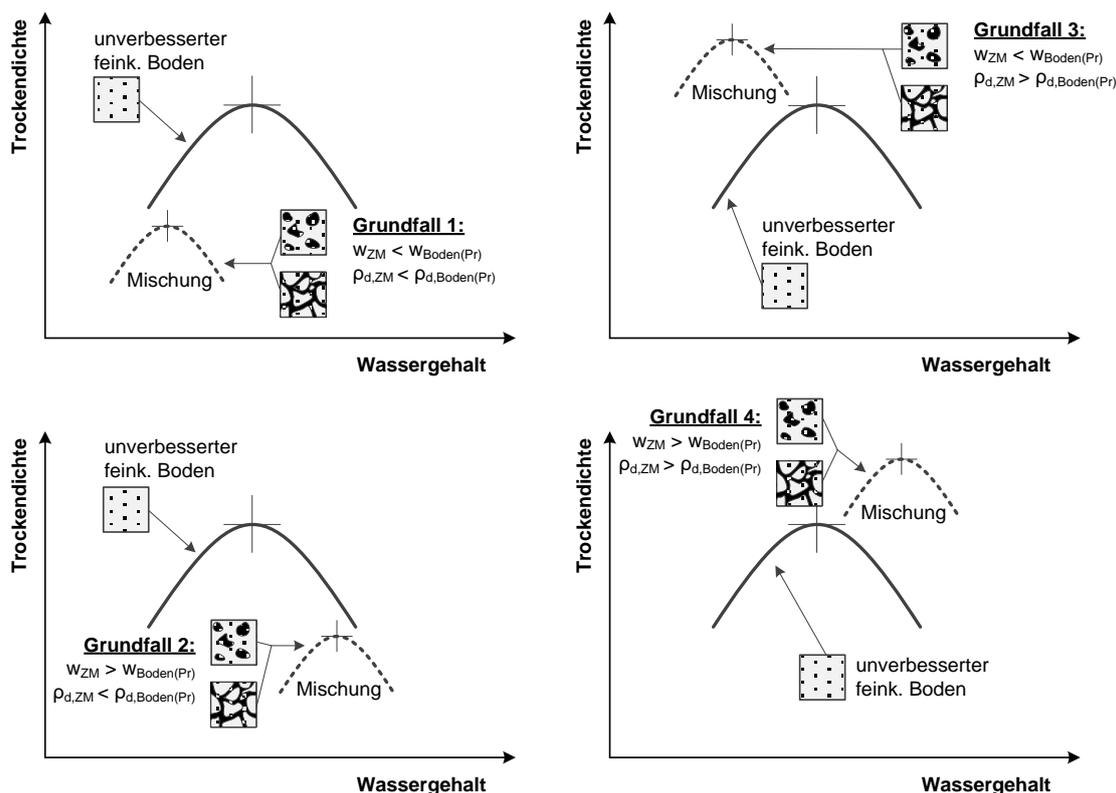
**Abb. 6.7:** Entwicklung der Trockendichte im Verdichtungsoptimum der Mischung anhand eines Beispiels

**Zusammenfassung.** Den Überlegungen liegt die grundlegende Annahme zugrunde, dass sich die Verdichtungseigenschaften der Mischungen in die einzelnen Verdichtungseigenschaften der zur Mischung verwendeten Materialien aufteilen lassen. Um diese Trennung rechnerisch zu ermöglichen, wird in einer berechtigten Vereinfachung (siehe [Abb. 7.1](#)) angenommen, dass die Verdichtbarkeit des Zugabe-Materials unabhängig von dessen Wassergehalt etwa konstant ist. Daraus ergibt sich, dass letztlich nur der Bodenanteil die Lage des optimalen Wassergehaltes der Mischung bestimmt. Des Weiteren wurde für die Darstellungen in [Abb. 6.4](#) und [Abb. 6.7](#) angenommen, dass die Trockendichte des Zugabe-Materials unabhängig vom Mischungsverhältnis konstant bleibt (diese Annahme wird in einem späteren Schritt den realen Verhältnissen angepasst; siehe Pkt. 6.5).

Lässt man Sonderfälle außer Acht, so können aus den Gleichungen (6-3) und (6-6) oder aus [Abb. 6.4](#) und [Abb. 6.7](#) folgende vier Grundfälle zum Verdichtungsverhalten der Mischungen im Vergleich zum unbehandelten Boden abgeleitet werden (siehe auch [Abb. 6.8](#)):

- **Grundfall 1:** Ist der Wassergehalt des porösen Zugabe-Materials in der verdichteten Mischung kleiner als jener des Bodenanteils (Verdichtungsoptimum) und ist die Trockendichte des Zugabe-Materials in der verdichteten Mischung kleiner als die Trockendichte des Bodens (Verdichtungsoptimum), so liegt das Verdichtungsoptimum der Mischung in Bezug auf Wassergehalt und Trockendichte unter jenem des unverbesserten Bodens.

- **Grundfall 2:** Ist der Wassergehalt des porösen Zugabe-Materials in der verdichteten Mischung größer als jener im Boden (Verdichtungsoptimum) und die Trockendichte des Zugabe-Materials in der verdichteten Mischung kleiner als die Trockendichte des Bodens (Verdichtungsoptimum), so liegt das Verdichtungsoptimum der Mischung in Bezug auf den Wassergehalt über und in Bezug auf die Trockendichte unter jenem des unverbesserten Bodens.
- **Grundfall 3:** Ist der Wassergehalt des porösen Zugabe-Materials in der verdichteten Mischung niedriger als jener im Boden (Verdichtungsoptimum) und die Trockendichte des Zugabe-Materials in der verdichteten Mischung größer als die Trockendichte des Bodens (Verdichtungsoptimum), so liegt das Verdichtungsoptimum der Mischung in Bezug auf Wassergehalt unter und in Bezug auf die Trockendichte über jenem des unverbesserten Bodens.
- **Grundfall 4:** Ist der Wassergehalt des porösen Zugabe-Materials in der verdichteten Mischung größer als jener im Boden (Verdichtungsoptimum) und die Trockendichte des Zugabe-Materials in der verdichteten Mischung größer als die Trockendichte des Bodens (Verdichtungsoptimum), so liegt das Verdichtungsoptimum der Mischung in Bezug auf Wassergehalt und Trockendichte über jenem des unverbesserten Bodens.



**Abb. 6.8:** Unterscheidung von Grundfällen zum Verdichtungsverhalten der Mischungen

#### 6.4 Wassergehalt des Zugabe-Materials in der verdichteten Mischung

Nach der Einmischung des RC-Materials in den Boden umfasst bei höheren Mischungsverhältnissen das trockene Zugabe-Material die feuchten Bodenaggregate. Beispielhaft ist die Bildung der „Krümel-Kruste“ in [Abb. 6.9](#) dargestellt. Das RC-Material lagert dabei an der

Oberfläche der Bodenkrümel als lose Ansammlung an. Die so entstehende Struktur ändert sich durch die Verdichtung der Mischung nicht grundsätzlich. Bei größeren RC-Körnern oder niedrigen Mischungsverhältnissen ist es aber auch denkbar, dass die Körner einzeln in der feinkörnigen Matrix „schwimmen“. Nun ist es einerseits von Interesse, welchen Wassergehalt das Zugabe-Material in dieser Form aufweist, andererseits lassen sich Überlegungen zu möglichen Grenzwerten anstellen.



**Abb. 6.9:** Typisches Boden-Makroaggregat (hellgrau) mit Kruste aus RC-Material (braun)

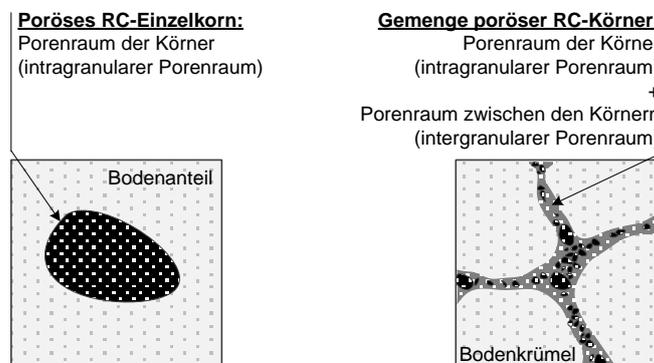
Löst man Gleichung (6-3) für die Massenbilanz im Optimum der Mischung nach  $w_{ZM}$  auf, so lässt sich aus einem Ergebnis eines Verdichtungsversuches an einer Mischung der im RC-Material vorhandene Wassergehalt rückrechnen. Die Umformung ergibt:

$$w_{ZM} = \frac{w_{\text{Mischung(Pr)}} \cdot (1 + MV) - w_{\text{Boden(Pr)}}}{MV} \quad (6-7)$$

$w_{ZM}$	Wassergehalt des Zugabe-Materials [-]
$w_{\text{Mischung(Pr)}}$	Optimaler Wassergehalt der Mischung [-]
$w_{\text{Boden(Pr)}}$	Optimaler Wassergehalt des unverbesserten Bodens [-]
MV	Mischungsverhältnis der Trockenmassen [(Zugabemenge in %) / 100]

Bleibt man bei der Modellannahme, dass die Verdichtungseigenschaften der einzelnen Bestandteile im Gemisch getrennt voneinander vorliegen, so hält der Anteil des feinkörnigen Grundmaterials (Boden) im Verdichtungsoptimum gleich viel Wasser wie im Verdichtungsoptimum des unverbesserten Zustands. Der Anteil des Zugabe-Materials kann im verdichteten Gemisch grundsätzlich unterschiedlich viel Wasser halten, je nachdem welchen Eigenwasseranteil es bereits vor der Mischung aufwies und wieviel Wasser aus dem Boden in die porösen Körner übertragen wurde. Eben jene Menge an Wasser, die aus dem Boden in das poröse Zugabe-Material abgegeben wird (und somit die beobachtbare Verbesserungswirkung definiert) ist vorab nicht bekannt. Sie unterliegt aber grundsätzlich ableitbaren Grenzen, die im direkten Zusammenhang zur Möglichkeit des RC-Materials stehen, Wasser aufzunehmen (Porosität, Eigenwassergehalt). Während die Obergrenze der Wasseraufnahmefähigkeit und des Wassergehaltes aus dem Platzangebot des Zugabe-Materials für Wasser (Porenvolumen) abgeleitet werden kann, ergibt sich die Untergrenze aus der Notwendigkeit der Wasserbewegung in der Gegenwart eines hydraulischen Gradienten. Dieser Gradient entsteht im gegenständlichen Fall durch den Kontakt des trockenen und porösen RC-Materials mit dem nassen Boden in Form von Saugspannungs-Unterschieden.

**Obere Grenze des möglichen Wassergehaltes des Zugabe-Materials.** Wie bereits angedeutet, lässt sich die Obergrenze der Wasseraufnahmefähigkeit des Zugabe-Materials aus dem zur Verfügung stehenden Porenvolumen ableiten. Je nach Körnung und dem Mischungsverhältnis zwischen Boden und Zugabe-Material besteht dabei ein Unterschied darin, welche Porenanteile des porösen Zugabe-Materials für die Speicherung von Bodenwasser zur Verfügung stehen (siehe [Abb. 6.10](#)). So ergibt sich für einzelne poröse Körner in einer feinkörnigen Matrix nur der Anteil der Poren in den RC-Körnern selbst als relevant (intragranularer Porenraum). Bei höheren Mischungsverhältnissen kommt dazu noch ein Anteil an Poren, der sich zwischen den RC-Körnern in der RC-Kruste der Bodenkrümel ausbildet und als intergranularer Porenraum des RC-Materials bezeichnet werden kann (Die typische „Kruste“ aus RC-Material um die Bodenkrümel ist zum Beispiel in [Abb. 6.9](#) dargestellt.). Stehen in einer Mischung im Zugabe-Material beide Formen des Porenraumes zur Verfügung, so erfolgt die Befüllung dieser Porenräume konkurrierend.



**Abb. 6.10:** Porenraum des Zugabe-Materials, der zur Wasseraufnahme zur Verfügung steht

Bilanziert man für den allgemeinen Fall den zur Verfügung stehenden Porenraum des Zugabematerials, so ergibt sich ohne Differenzierung in inter- und intragranularen Anteil:

$$V_{d,ZM} = V_{s,ZM} + V_{p,ZM} \quad (6-8)$$

$V_{d,ZM}$	Volumen des Zugabe-Materials in der verdichteten Mischung [L <sup>3</sup> ]
$V_{s,ZM}$	Volumen des Feststoff-Anteils des Zugabe-Materials [L <sup>3</sup> ]
$V_{p,ZM}$	Volumen des Poren-Anteils des Zugabe-Materials [L <sup>3</sup> ]

Der für den Fall poröser Einzelkörner relevante intragranulare Porenraum (siehe [Abb. 6.10](#)) lässt sich über Gleichung (6-8) und die relevanten Dichteangaben von Boden und Zugabe-Material ermitteln. Ist dieser Porenraum vollständig mit Wasser gefüllt, ist der maximal mögliche Wassergehalt des porösen Zugabe-Materials für diesen Fall erreicht. Dieser Wassergehalt wird nachfolgend mit dem Kürzel OG-A bezeichnet.

Aus Gleichung (6-8) folgend und unter Berücksichtigung der Kornrohddichte  $\rho_{rd,ZM}$  ( $\rho_{rd,ZM} = m_{d,ZM} / V_{d,ZM}$ ), der scheinbaren Kornrohddichte  $\rho_{a,ZM}$  ( $\rho_{a,ZM} = m_{d,ZM} / V_{s,ZM}$ ), der Dichte des Wassers im gefüllten Porenraum  $\rho_w$  ( $\rho_w = m_{w,ZM} / V_{p,ZM}$ ) und dem Wassergehalt des Zugabe-Materials im verdichteten Gemisch  $w_{ZM}$  ( $m_{w,ZM} = m_{d,ZM} \cdot w_{ZM}$ ) erhält man die Bestimmungsgleichung für die Obergrenze der Wasseraufnahmefähigkeit im Porenraum der Einzelkörner des Zugabe-Materials, nachfolgend mit dem Kürzel OG-A bezeichnet:

$$w_{ZM(OG-A)} = \left( \frac{1}{\rho_{rd,ZM}} - \frac{1}{\rho_{a,ZM}} \right) \cdot \rho_w \quad (6-9)$$

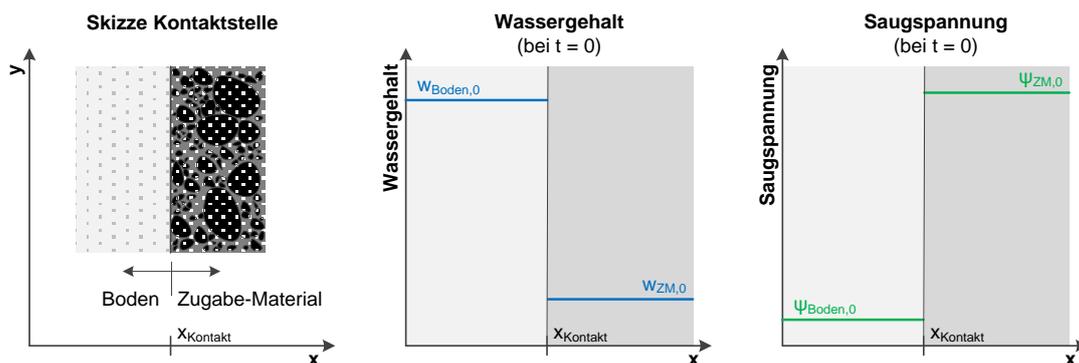
$w_{ZM(OG-A)}$	Obergrenze OG-A des Wassergehaltes des Zugabe-Materials [-]
$\rho_{rd,ZM}$	Korndrohichte des Zugabe-Materials nach Pkt. 3.4 [M·L <sup>-3</sup> ]
$\rho_{a,ZM}$	Scheinbare Kornrohichte des Zugabe-Materials nach Pkt. 3.4 [M·L <sup>-3</sup> ]
$\rho_w$	Dichte des Wassers in den Poren des Zugabe-Materials [M·L <sup>-3</sup> ]

Bei höheren Zugabemengen kommt zur Volumenbilanz zusätzlich noch das intergranulare Porenvolumen der Poren zwischen den Zugabe-Körnern hinzu (Abb. 6.10, rechts). Damit wird die Kornrohichte  $\rho_{rd,ZM}$  des Zugabe-Materials in Gleichung (6-9) durch die (durch Verdichtung mit Proctorenergie erreichbare) Trockendichte abgelöst und man erhält die zweite Obergrenze des vom porösen RC-Material aufnehmbaren Wassers (OG-B):

$$w_{ZM(OG-B)} = \left( \frac{1}{\rho_{d,ZM}} - \frac{1}{\rho_{a,ZM}} \right) \cdot \rho_w \quad (6-10)$$

$w_{ZM(OG-B)}$	Obergrenze OG-B des Wassergehaltes des Zugabe-Materials [-]
$\rho_{d,ZM}$	Trockendichte (verdichtet) des Zugabe-Materials [M·L <sup>-3</sup> ]
$\rho_{a,ZM}$	Scheinbare Kornrohichte des Zugabe-Materials nach Pkt. 3.4 [M·L <sup>-3</sup> ]
$\rho_w$	Dichte des Wassers in den Poren des Zugabe-Materials [M·L <sup>-3</sup> ]

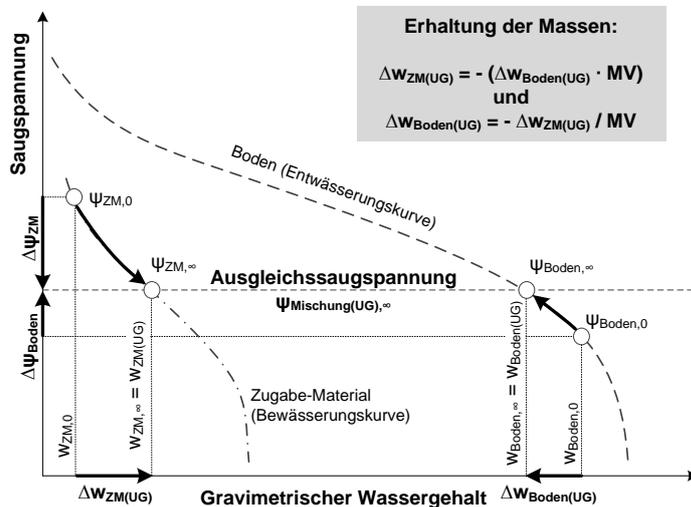
**Untere Grenze des Wassergehaltes des porösen Zugabe-Materials.** Die Darstellung in Abb. 6.11 verdeutlicht anhand der Kontaktfläche zwischen den trockenen, porösen Zugabe-Körnern und dem nassen Boden, dass eine Wasserbewegung aufgrund einer Potentialdifferenz (Saugspannungs-Differenz) stattfinden wird.



**Abb. 6.11: Wassergehalte und Saugspannungen an der Kontaktstelle zwischen den gemischten und unverdichteten Materialien (nasser Boden / trockenes poröses Zugabe-Material)**

Diese Wasserbewegung ist abgeschlossen, wenn alle Saugspannungs-Gradienten im Gemisch abgebaut sind und überall die gleiche Saugspannung (Ausgleichs-Saugspannung  $\Psi_{Mischung(UG),\infty}$ ) herrscht. Da der Boden und das Zugabe-Material in der Mischung getrennt voneinander vorliegen (siehe Pkt. 6.3) und beide üblicherweise unterschiedliche Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen aufweisen, bleibt in der Regel auch der Wassergehalt in beiden Materialien unterschiedlich.

Die Ausgleichs-Saugspannung lässt sich bei bekannten Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen der Materialien unabhängig von der zeitlichen Entwicklung aus der Massenbilanz im Gleichgewichtszustand (Eingangswert sind die jeweiligen Ausgangs-Wassergehalte) und dem Mischungsverhältnis der Trockenmassen errechnen. Die Ermittlung ist in [Abb. 6.12](#) veranschaulicht.



**Abb. 6.12:** Feuchtigkeitsaustausch zwischen Boden und Recyclingkörung

Die Saugspannungen als Funktionen des jeweiligen Wassergehaltes ergeben am Ausgangspunkt für den Boden den Funktionswert beim Ausgangswassergehalt:

$$\Psi_{\text{Boden},0} = f(w_{\text{Boden},0}) \quad (6-11)$$

und für das Zugabe-Material ebenfalls den Funktionswert beim Eigenwassergehalt:

$$\Psi_{\text{ZM},0} = g(w_{\text{ZM},0}) \quad (6-12)$$

Die Ausgleichssaugspannung ( $\Psi_{\text{Mischung(UG),\infty}$ ) ist als jener Wert definiert, bei dem der Bodenanteil und das Zugabe-Material die gleiche Saugspannung aufweisen, also keine Wasserbewegung mehr stattfindet:

$$\Psi_{\text{Mischung(UG),\infty} = \Psi_{\text{Boden},\infty} = \Psi_{\text{ZM},\infty} \quad (6-13)$$

Für die einzelnen Materialien bezeichnet diese Saugspannung jeweils einen Funktionswert, der um den Betrag des ausgetauschten Wassers vom jeweiligen Ausgangs- bzw. Eigenwassergehalt verschoben ist. Für den Fall, dass  $\Psi_{\text{Boden},0} < \Psi_{\text{ZM},0}$  kann daher für beide Materialien festgehalten werden:

$$\Psi_{\text{Boden},\infty} = f(w_{\text{Boden},0} - \Delta w_{\text{Boden(UG)}}) \quad (6-14)$$

und

$$\Psi_{\text{ZM},\infty} = g(w_{\text{ZM},0} + \Delta w_{\text{ZM(UG)}}) \quad (6-15)$$

wobei  $\Delta w_{ZM(UG)}$  und  $\Delta w_{Boden(UG)}$  für die Wassergehaltsänderungen im Boden und dem Zugabe-Material stehen. Setzt man gemäß Gleichung (6-13) die Funktionswerte aus (6-14) und (6-15) gleich, so lässt sich die Ausgleichs-Saugspannung ( $\psi_{Mischung(UG),\infty}$ ) ermitteln. Diese ist im konkreten Fall über Iteration errechenbar. Dabei gehen der Ausgangswassergehalt des Bodens, der Eigenwassergehalt des Zugabe-Materials und der sich aus dem Mischungsverhältnis ergebende Zusammenhang gemäß (6-16) als Eingangswerte ein. Aufgrund der Masseerhaltung muss die vom Zugabe-Material aufgenommene Wassermenge eben jener Wassermenge entsprechen, die vom Bodenanteil abgegeben wird. In Form der Wassergehalte ausgedrückt bedeutet dies:

$$\Delta w_{ZM(UG)} = -(\Delta w_{Boden(UG)} \cdot MV) \quad (6-16)$$

MV	Mischungsverhältnis der Trockenmassen [(Zugabemenge in %) / 100]
$\Delta w_{ZM(UG)}$	Wassergehaltsänderung im Zugabe-Material durch Wasseraufnahme [-]
$\Delta w_{Boden(UG)}$	Wassergehaltsänderung im Bodenanteil durch Wasserabgabe [-]

Zusammengefasst erhält man:

$$\psi_{Mischung(UG),\infty} = f(w_{Boden,0} - \Delta w_{Boden(UG)}) = g(w_{ZM,0} - \Delta w_{Boden(UG)} \cdot MV) \quad (6-17)$$

oder äquivalent:

$$\psi_{Mischung(UG),\infty} = f\left(w_{Boden,0} + \frac{\Delta w_{ZM(UG)}}{MV}\right) = g(w_{ZM,0} + \Delta w_{ZM(UG)}) \quad (6-18)$$

Wenn die Saugspannungs-Wassergehalts Beziehungen beider Materialien und die jeweiligen Ausgangs- und Eigenwassergehalte sowie das Mischungsverhältnis bekannt sind, verbleibt als Unbekannte nur mehr die Änderung des Wassergehaltes der gemischten Materialien. Damit ist die endgültig in der unverdichteten Mischung vorhandene Ausgleichssaugspannung zwar bestimmbar, aber keine Aussage über die zeitliche Entwicklung der Saugspannungen in den einzelnen Materialien möglich. Für eine reine Grenzwertabschätzung bleibt die zeitliche Entwicklung allerdings von nachrangiger Relevanz.

Die ermittelte Ausgleichssaugspannung verliert im verdichteten Gemisch ihre Gültigkeit, da durch die Verdichtung die Porengeometrie vor allem im Bodenanteil geändert wird und sich der Verlauf der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen dadurch im Bereich niedriger Saugspannungen ändert (von den Kapillaren beeinflusster Bereich). Da auch in der verdichteten Mischung ein Gleichgewicht der Saugspannungen herrschen muss, ist dies in weiterer Folge auch Grundvoraussetzung dafür, dass das Zugabe-Material noch mehr Wasser aufnimmt als den durch  $\Delta w_{ZM(UG)}$  errechneten Betrag (siehe dazu Absatz Schlussfolgerungen unter Pkt. 6.6 mit [Abb. 6.26](#)).

## 6.5 Trockendichte des Zugabe-Materials in der verdichteten Mischung

Ähnlich wie durch die Anwendung des beschriebenen Modells der Wassergehalt des Zugabe-Materials im verdichteten Gemisch aus einem Ergebnis rückgerechnet werden kann, so

ist durch Umformung von Gleichung (6-6) auch die Ermittlung der Trockendichte des Zugabe-Materials in der verdichteten Mischung möglich.

$$\rho_{d,ZM} = \frac{\rho_{d,Boden(Pr)} \cdot \rho_{d,Mischung(Pr)} \cdot MV}{\rho_{d,Boden(Pr)} \cdot (1 + MV) - \rho_{d,Mischung(Pr)}} \quad (6-19)$$

$\rho_{d,ZM}$	Trockendichte des Zugabe-Materials in der verdichteten Mischung [ $M \cdot L^{-3}$ ]
$\rho_{d,Mischung(Pr)}$	Trockendichte der Mischung im Verdichtungsoptimum [ $M \cdot L^{-3}$ ]
$\rho_{d,Boden(Pr)}$	Trockendichte des unverb. Bodens (Verdichtungsoptimum) [ $M \cdot L^{-3}$ ]
MV	Mischungsverhältnis der Trockenmassen [(Zugabemenge in %) / 100]

**Obere und untere Grenze der Trockendichte des Zugabe-Materials.** So wie die Ober- und Untergrenzen des möglichen Wassergehaltes des Zugabe-Materials in der verdichteten Mischung durch den vorhandenen Porenraum begrenzt ist, so bestimmt eben dieser Porenraum auch die Trockendichte, die das Zugabe-Material im verdichteten Gemisch einnimmt.

Welche Trockendichten lassen sich mit Gleichung (6-19) ermitteln? Bei sehr niedrigen Zugabemengen wird sich die ermittelte Trockendichte an der Kornrohndichte ( $\rho_{d,ZM} \rightarrow \rho_{rd,ZM} = \rho_{d,ZM(OG-A)}$ ) des Zugabe-Materials orientieren ([Abb. 6.10](#), links). Mit steigender Zugabemenge wird der ermittelte Wert sich immer weiter jener Trockendichte ( $\rho_{d,ZM} \rightarrow \rho_{d,ZM} = \rho_{d,ZM(OG-B)}$ ) annähern, der durch die Verdichtung des reinen Zugabe-Materials (ohne Mischung, bei gleicher Verdichtungsarbeit) ermittelt werden kann ([Abb. 6.10](#), rechts). Diese beiden Dichteangaben (Kornrohndichte und Trockendichte) bezeichnen die obere und untere Grenze der durch das Zugabe-Material in der verdichteten Mischung einnehmbaren Dichte und werden in Anlehnung an die Angaben unter Pkt. 6.4 mit OG-A (Kornrohndichte) und OG-B (Trockendichte) gekennzeichnet.

## 6.6 Darstellung anhand eines einfachen Beispiels<sup>125</sup>

Anhand eines einfachen Beispiels soll nachfolgend einerseits die Anwendung des Modells erläutert und andererseits die Bedeutung des Austausches von Wasser zwischen Boden und dem porösen Zugabe-Material für die Verbesserungswirkung verdeutlicht werden.

**Untersuchungsprogramm.** Untersucht wurde die Verbesserung eines feinkörnigen Bodens (TL2) mit zwei Zugabe-Materialien, die sich hauptsächlich in ihrer Porosität unterschieden. Als Zugabe-Material wurde so einerseits Kies und andererseits Ziegelbruch-Material, jeweils in der Körnung 8/16 mm, verwendet. Die Untersuchungen umfassten zwei Mischungsverhältnisse für den Kies 8/16 und ein Mischungsverhältnis für den porösen Ziegelbruch 8/16 als Zugabe-Material zur Bodenverbesserung. Siehe dazu [Tab. 6.1](#). Eine Mischung des Bodens mit 50 M.-% Ziegelbruch wurde zwar auch hergestellt, konnte aufgrund des hohen volumetrischen Anteils des Ziegelbruchs aber nicht ausreichend homogenisiert werden (Entmischungerscheinungen) und wurde daher in die Auswertung nicht aufgenommen.

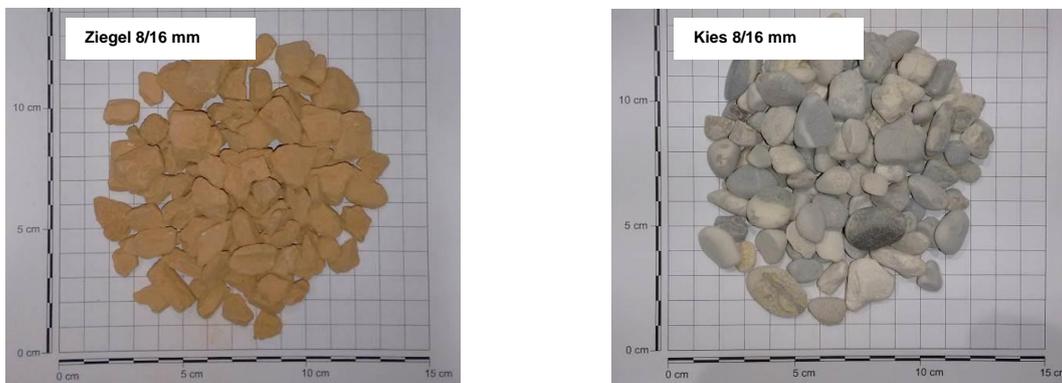
<sup>125</sup> Die Erarbeitung der Datengrundlage erfolgte überwiegend im Rahmen zweier Studentarbeiten am Zentrum Geotechnik der TU München (KRÜGER 2015 und CREPAZ 2015).

**Tab. 6.1: Mischungen für Verdichtungsversuche**

Mischung \ Boden	TL1	TL2	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TA1
+ 30 % Kies 8/16	-	X	-	-	-	-	-	-	-
+ 50 % Kies 8/16	-	X	-	-	-	-	-	-	-
+ 30 % Ziegel 8/16	-	X	-	-	-	-	-	-	-

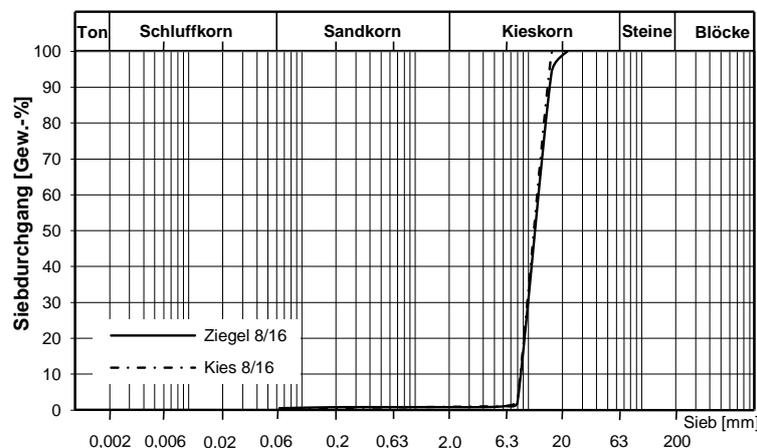
Zur Grenzwertabschätzung der Trockendichte und des Wassergehalts des Zugabe-Materials in der verdichteten Mischung (siehe Pkt. 6.4 und Pkt. 6.5) wurde zusätzlich zu den Verdichtungsversuchen die Korndichte (scheinbare Kornrohichte und Kornrohichte) der Materialien bestimmt und die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen der relevanten Ausgangsmaterialien ermittelt.

**Material.** Die Untersuchungen erfolgten beispielhaft am Boden TL2 (siehe Pkt. 4.2.1). Diesem Boden wurden, wie bereits beschrieben, einerseits 30 und 50 M.-% Kies 8/16 und andererseits 30 M.-% Ziegel 8/16 zugemischt. Die beiden Zugabe-Materialien sind in [Abb. 6.13](#) dargestellt.



**Abb. 6.13: Fotos des verwendeten Ziegelbruchs und der Kieskörnung**

Der Kies und auch das Ziegelmaterial wurden jeweils durch Absiebung aus Grundmaterialien mit einem breiteren Körnungsbereich abgesiebt. Die Sieblinien der letztlich in den Versuchen verwendeten Materialien sind identisch und in [Abb. 6.14](#) dargestellt.



**Abb. 6.14: Sieblinien der Zugabe-Materialien Kies 8/16 und Ziegel 8/16**

Die scheinbare Kornrohddichte und die Kornrohddichte des Ziegelbruch-Materials wurde in Anlehnung an das Drahtkorbverfahren nach DIN EN 1097-6:2013 ermittelt. Das Kornvolumen und die durch das poröse Material aufgenommene Menge an Wasser wurde nach 7 Tagen Wasserlagerung per Tauchwägung bestimmt. Die sich aus diesen Werten ergebende Kornrohddichte kann mit  $\rho_{rd,Ziegel\ 8/16} \approx 1,54\text{ g/cm}^3$  angegeben werden (Diese Dichte würde an diesem Material etwa auch im Gaspyknometerverfahren bestimmt werden). Zieht man das vom Wasser eingenommene Porenvolumen vom daraus ermittelbaren Kornvolumen ab, so ergibt sich in Anlehnung an die Definitionen in DIN EN 1097-6:2013 eine scheinbare Kornrohddichte des Ziegelmaterials von  $\rho_{a,Ziegel\ 8/16} \approx 2,75\text{ g/cm}^3$ . Die im Gaspyknometer, im für den Erdbau üblichen Verfahren nach DIN 18124:2011, ermittelte Korndichte des Kieses zeigte einen Wert von  $\rho_{S,Kies\ 8/16} \approx 2,73\text{ g/cm}^3$  an. Es ist eine berechnete Annahme, dass das Drahtkorbverfahren hier zum gleichen Ergebnis führen würde. Die im Kies nicht vorhandenen Poren führen dazu, dass gilt:  $\rho_s = \rho_a = \rho_{rd}$ . Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tab. 6.2 noch einmal zusammengestellt.

**Tab. 6.2: Scheinbare Kornrohddichte / Korndichte und Kornrohddichte der Zugabe-Materialien**

Zugabe-Material	Scheinbare Kornrohddichte $\rho_s$ bzw. $\rho_a$	Kornrohddichte $\rho_{rd}$
Kies 8/16 mm <sup>1)</sup>	2,73 g/cm <sup>3</sup>	
Ziegel 8/16 mm <sup>2)</sup>	2,75 g/cm <sup>3</sup>	1,54 g/cm <sup>3</sup>
Anmerkung: 1) Ermittelt im Gaspyknometerverfahren nach DIN 18124:2011 2) Ermittelt durch Tauchwägung im Drahtkorbverfahren in Anlehnung an DIN EN 1097-6:2013; Bestimmung des vom Wasser eingenommenen Porenvolumens aus der Differenz des Gewichtes nach 7 tägiger Wasserlagerung und in oberflächentrockenem Zustand.		

Rechnerisch lässt sich die Korndichte des Bodens und des Zugabe-Materials verbinden, um die für die Ermittlung der Sättigungslinie der Mischungen relevante Korndichte zu erhalten (Tab. 6.3). Siehe dazu auch die Anmerkung unter Pkt. 3.4 und Pkt. 3.5.

**Tab. 6.3: Scheinbare Kornrohddichte und Kornrohddichte der verdichteten Mischungen**

Material bzw. Mischung	Berechnung mit $\rho_s$ bzw. $\rho_a$	Berechnung mit $\rho_{rd}$
Boden TL2 ohne Zugabe	2,63 g/cm <sup>3</sup>	
Boden + 30 % Kies 8/16 mm <sup>1)</sup>	2,66 g/cm <sup>3</sup>	
Boden + 50 % Kies 8/16 mm <sup>1)</sup>	2,67 g/cm <sup>3</sup>	
Boden + 30 % Ziegel 8/16 mm <sup>1)</sup>	2,66 g/cm <sup>3</sup>	2,26 g/cm <sup>3</sup>
Anmerkung: 1) Die Korndichten der Mischungen wurden aus der Korndichte des Bodens TL2 und den zugemischten RC-Materialien im entsprechenden Mischungsverhältnis der Massen berechnet.		

Auch der Eigenwassergehalt der Zugabe-Materialien wurde vorab ermittelt. Zweckgemäß wurde für die Versuche relativ trockenes Material verwendet (siehe Tab. 6.4).

**Tab. 6.4: Eigenwassergehalt der Zugabe-Materialien vor der Mischung mit Boden**

Zugabe-Material	Eigenwassergehalt
Kies 8/16 mm	0 %
Ziegel 8/16 mm	1,4 %

Für die Abschätzung der austauschbaren Wassermenge nach Pkt. 6.4 wurde am zu verbesserten Boden und am Ziegelbruch-Material vorab jeweils die Saugspannungs-

Wassergehalts-Beziehung ermittelt. Für niedrige Saugspannungen erfolgte dies für den Boden TL2 mittels Druckplatten-Extraktor (DPE, Fa. SOILMOISTURE). Die Proben wurden dafür im plastischen Konsistenzbereich ohne besondere Einbaubedingung (nur leichtes, händisches Andrücken der Probe zur Herstellung einer ebenen Probenoberfläche) eingebaut. Die Probenherstellung erfolgte bewusst ohne Verdichtung und sollte den Zustand des Bodenanteils nach der Mischung (vor Verdichtung) mit dem Zugabe-Material realitätsnah abbilden. Die Entwässerung der Probe erfolgte im Druckplattenextraktor durch stufenweise Erhöhung des Luftdruckes oberhalb der Filterplatte. Zur Homogenisierung des Wassergehaltes wurde jede Druckstufe für sieben Tage lang gehalten. Bei höheren Saugspannungen wurde mittels Chilled-Mirror-Hygrometer-Verfahren (WP4c der Fa. DECAGON DEVICES) an eigens hergestellten Proben gemessen, wobei die Probe zwischen den Messungen schonend durch Trocknung an der Luft entwässert wurde. Die Folgemessung erfolgte darauf folgend erst nach einer mehrtägigen Homogenisierungszeit.

Der Ermittlung der Bewässerungskurve des Ziegelbruch-Materials erfolgte an einer zerkleinerten Teilprobe der Körnung 1/4 mm ebenfalls mittels Chilled-Mirror-Hygrometer-Verfahren (WP4c der Fa. DECAGON DEVICES). Auch hier wurde die Probe nicht verdichtet, da der allgemein den Kapillaren zugeordnete Saugspannungs-Anteil (im niedrigen Saugspannungsbereich) in den vorgesehenen Mischungen mit Boden ohnehin nicht zur Verfügung steht (einzelne Körner in feinkörniger Matrix). Die so tatsächlich gemessenen kapillaren Anteile der Saugspannung resultieren hauptsächlich aus dem intragranularen Porenraum der porösen Körner und bilden die Eigenschaften des Versuchsmaterials der Körnung 8/16 (für die Verdichtungsversuche) realitätsnah ab. Da für dieses Material die Bewässerungskurve ermittelt werden sollte, erfolgte die Zugabe von entionisiertem Wasser tropfenweise an der Probenoberfläche der Proben. Vor jeder Messung wurde den vorbereiteten Proben eine mehrtägige Homogenisierungszeit gewährt.

Für den Kies wurde unterstellt, dass die Saugspannung bereits bei sehr niedrigen Wassergehalten deutlich abfällt. Vereinfachend wird also angenommen, dass die durch den Kies aufnehmbare Wassermenge in Relation zu seiner Masse verschwindend gering ist und dies auch in der Mischung mit dem feinkörnigen Boden bleibt ( $w_{ZM} \approx 0\%$ ).



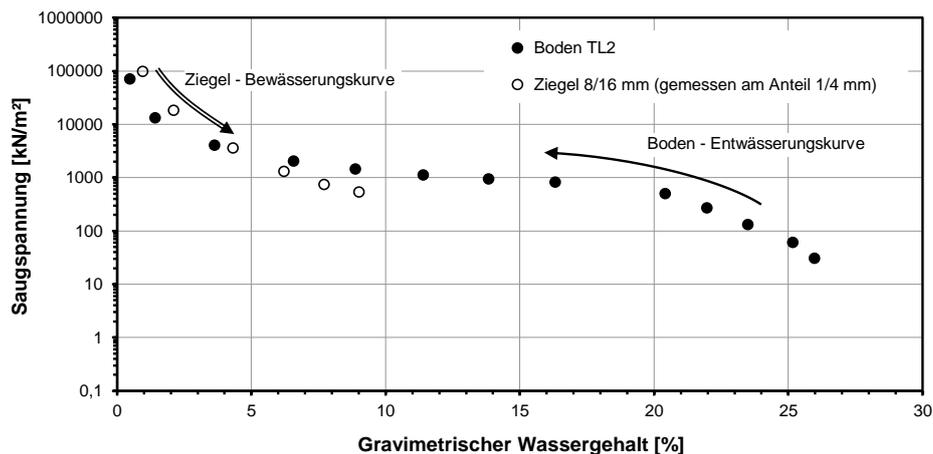
**Abb. 6.15: Proben zur Untersuchung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen**

Grundlegende Daten zu den Einbaubedingungen der Proben und der Versuchsdurchführung sind in nachfolgender [Tab. 6.5](#) zusammengefasst. Die Proben sind in [Abb. 6.15](#) fotografisch dargestellt.

**Tab. 6.5: Probandaten zur Bestimmung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen**

Material	TL2		Ziegel 1/4
	DPE	WP4c	WP4c
Verwendet im Saugspannungs-Bereich	30 – 500 kPa	800 – 70.000 kPa	500 – 100.000 kPa
Probenhöhe (Einbau)	11,8 mm	5,1 mm	ca. 5 mm
Probendurchmesser (Einbau)	51,4 mm	38,6 mm	38,6 mm
Wassergehalt (Einbau)	26,5 %	20,8 %	1,0 %
Trockendichte (Einbau)	1,486 g/cm <sup>3</sup>	1,874 g/cm <sup>3</sup>	lose

Die für den Boden TL2 und den zugemischten Ziegelbruch ermittelten Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen sind in [Abb. 6.16](#) dargestellt.



**Abb. 6.16: Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen des Bodens TL2 (Entwässerung) und der Zugabe Ziegel 8/16 mm (Bewässerung)**

Für die weitere Verwendung wurden die Daten des Zugabe-Materials nach dem modifizierten Modell nach Fredlund & Xing (vgl. FREDLUND et al. 2011)<sup>126</sup> parametrisiert ( $w_s = 0,25$ ,  $a = 200$ ,  $n = 0,5$  und  $m = 2,7$ ). Die Daten des Bodens wurde nach dem ursprünglichen Modell von FREDLUND & XING (1994)<sup>127</sup> parametrisiert. Die Best-Fit Parameter wurden zu  $\psi_r = 55$  kPa,  $w_s = 0,27$ ,  $a = 900$ ,  $n = 3,5$  und  $m = 0,95$  ermittelt. Beide Modellparametersätze beziehen sich dabei auf den gravimetrischen Wassergehalt.

**Ergebnisse der Verdichtungsversuche.** Zur Beschreibung und Interpretation der Ergebnisse ist es vorab von besonderer Bedeutung, die volumetrischen Verhältnisse (Boden / Zugabe-Material) im verdichteten Gemisch zu beurteilen. Dies erfolgte in Anlehnung an die unter Pkt. 6.3 zur Trockendichte des Gemisches vorgestellten Überlegungen. Siehe dazu auch [Abb. 6.6](#).

Da gerade der verdichtete Zustand der Gemische von Interesse ist, wurde bei der Berechnung der volumetrischen Verhältnisse in [Tab. 6.6](#) für den feinkörnigen Boden TL2 die durch Verdichtung mit Proctorenergie erreichbare Trockendichte (siehe [Tab. 4.1](#)) verwendet. Die Ermittlung des Volumens des Zugabe-Materials erfolgte für den Kies anhand der Korndichte

<sup>126</sup> FREDLUND et al. (2011): S. 191.

<sup>127</sup> FREDLUND & XING (1994): S. 527.

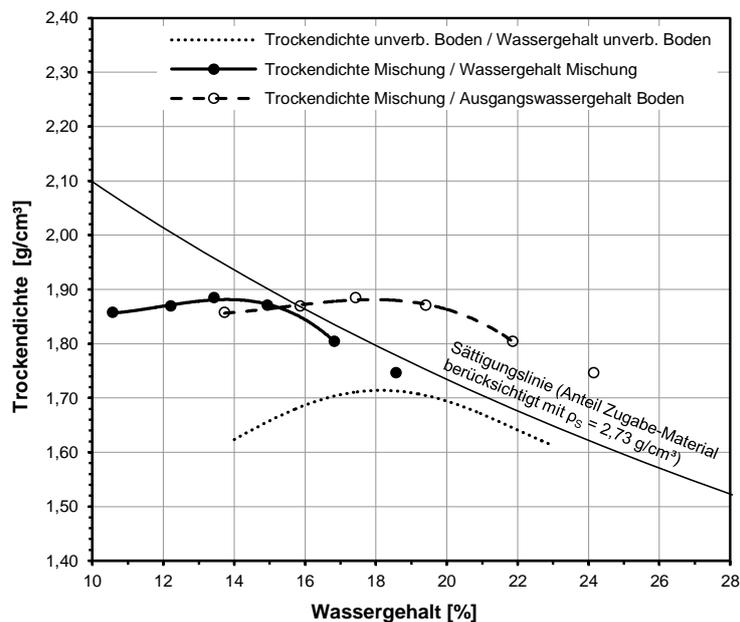
( $\rho_s$ ) und für den porösen Ziegelbruch anhand der Kornrohddichte ( $\rho_{rd}$ ), die jeweils den vom Korn in der verdichteten Mischung einnehmbaren Platz<sup>128</sup> definieren (Werte nach Tab. 6.2).

**Tab. 6.6: Volumetrische Verhältnisse in den verdichteten Mischungen**

Mischung	$V_{d,Boden} / V_{d,ZM}$
Boden + 30 M.-% Kies 8/16 mm	3,45
Boden + 50 M.-% Kies 8/16 mm	2,07
Boden + 30 M.-% Ziegel 8/16 mm	1,95

Aus Tab. 6.6 geht hervor, dass vergleichbare Verdichtungsbedingungen tatsächlich bei unterschiedlichen Mischungsverhältnissen (bezogen auf die Masse) vorhanden sind: bei der Verbesserung des Bodens mit Zugabe von 50 M.-% Kies 8/16 und mit 30 M.-% Ziegel 8/16 nimmt das Zugabe-Material in der verdichteten Mischung etwa den gleichen Raum ein. Die Ergebnisse werden aber unabhängig davon auch für die Mischung des Bodens mit 30 M.-% Kies 8/16 dargestellt.

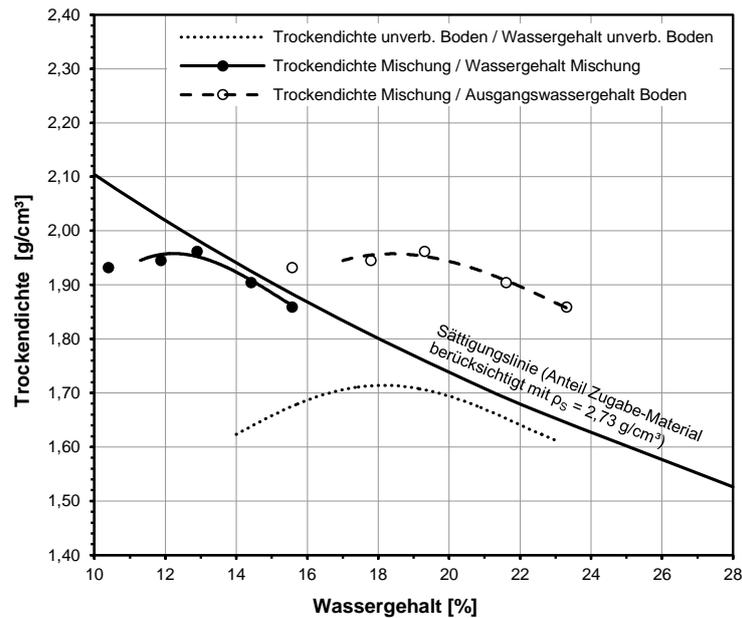
Abb. 6.17 und Abb. 6.18 zeigen die Verdichtungsergebnisse bei der Verwendung des Kieses (Kies 8/16) als Zugabe-Material. Es ist erkennbar, dass es sich in beiden Fällen um den in Abb. 6.8 dargestellten Grundfall 3 handelt: Die Korndichte des Zugabe-Materials ist deutlich höher als die Trockendichte des Bodenanteils, den es in der verdichteten Mischung ersetzt. Gleichzeitig kann der grobe Kies (8/16 mm) bezogen auf seine Masse nahezu kein Wasser binden, daher sinkt der optimale Wassergehalt der Mischung.



**Abb. 6.17: Boden TL2; 30 % Kies 8/16 mm mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 0$  %**

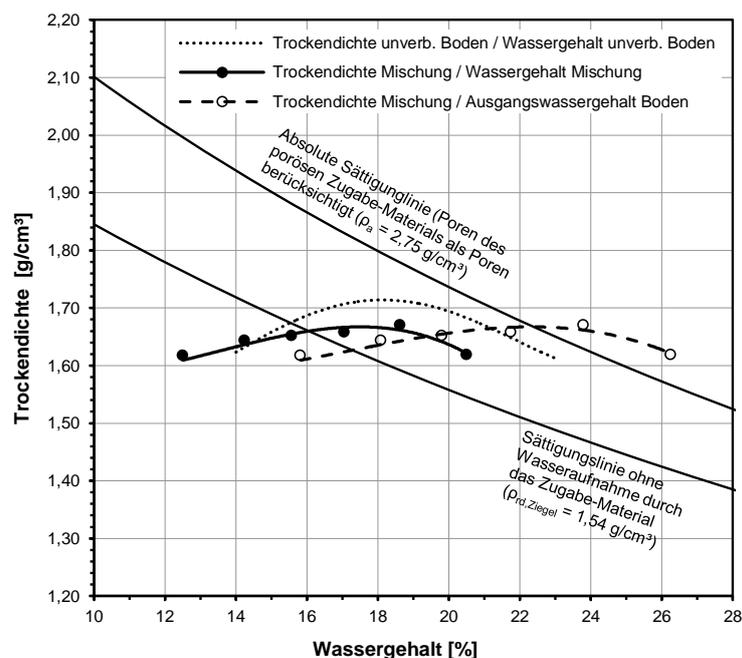
Die in Abb. 6.17 und Abb. 6.18 dargestellte Lage des optimal verdichtbaren Ausgangswassergehaltes des Bodenanteils liefert im Vergleich zum optimalen Wassergehalt des unverbesserten Bodens auch einen anschaulichen Hinweis darauf, dass diesen Mischungen allein der Wassergehalt des feinkörnigen Bodenanteiles bestimmend ist für Verdichtbarkeit des Gemisches. Die Verbesserungswirkung  $\Delta w_{Boden(Pr)}$  (nach Abb. 4.10) geht gegen Null.

<sup>128</sup> Dies gilt, solange die groben Körner des Zugabe-Materials unabhängig voneinander als Einzelkörner in der feinkörnigen Matrix vorliegen.



**Abb. 6.18:** Boden TL2; 50 % Kies 8/16 mm mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 0 \%$

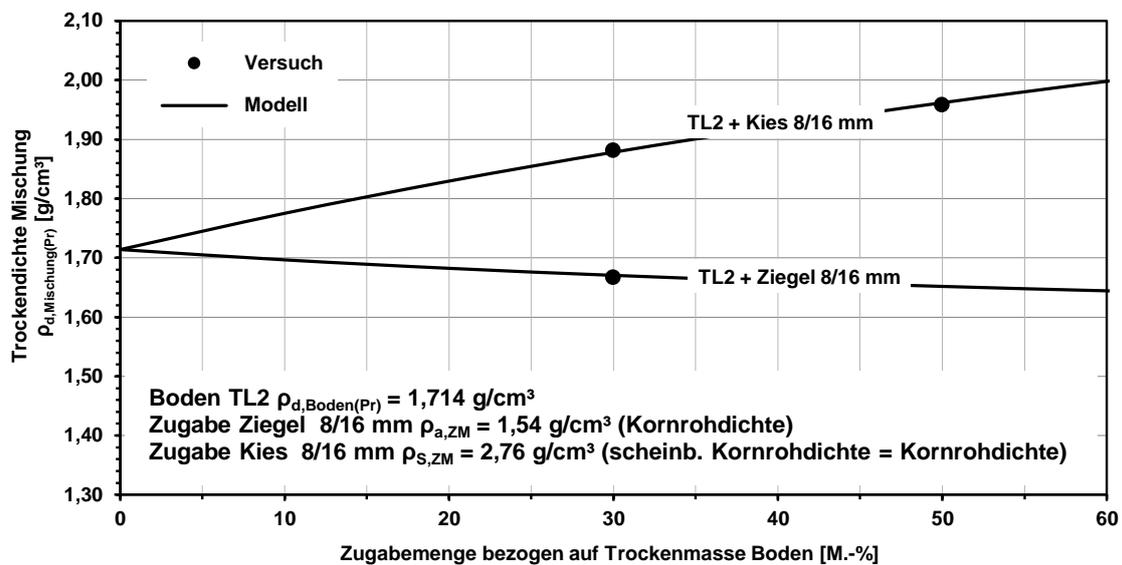
In Abb. 6.19 ist das Ergebnis der Verdichtungsversuche am Boden TL2 mit 30 M.-% Ziegel 8/16 abgebildet. In diesem Diagramm sind zwei Sättigungslinien eingetragen. Die obere der beiden Sättigungslinien ist durch Zuordnung der intragranularen Poren des Zugabe-Materials zum Gesamtporenraum ermittelbar. Sie wird unter Verwendung der scheinbaren Kornroh-dichte ( $\rho_{a,Ziegel}$ ) ermittelt. Die untere Sättigungslinie kann unter Berücksichtigung der Kornroh-dichte errechnet werden. Diese untere Sättigungslinie gilt für den Fall, dass die Poren des Zugabe-Materials nicht für die Einlagerung von Bodenwasser zur Verfügung stehen. Auf die Bedeutung beider Sättigungslinien wird am Ende des Kapitels näher eingegangen.



**Abb. 6.19:** Boden TL2; 30 % Ziegel 8/16 mm mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 1,4 \%$

**Vergleich der Ergebnisse mit einer Modellprognose.** Werden nun die Kornrohdichten der Zugabe-Materialien aus [Tab. 6.2](#) (hier:  $\rho_{rd} = \rho_{d,ZM}$ , da die Körner einzeln in der feinkörnigen Matrix vorliegen) und die Trockendichte des Bodens im Verdichtungsoptimum aus [Tab. 4.1](#) ( $\rho_{d,Boden(Pr)}$ ) in Gleichung (6-6) als Eingangsparameter eingesetzt, so lassen sich die Trockendichten im Optimum der verdichteten Mischungen für beide Zugabe-Materialien und unterschiedliche Mischungsverhältnisse berechnen. In [Abb. 6.20](#) ist das Ergebnis der so errechneten Trockendichten dargestellt. Die Trockendichte der Mischungen mit dem Kies entwickelt sich dabei mit steigender Zugabemenge deutlich über die Trockendichte des reinen Bodens hinaus. Die Trockendichte der Mischungen mit dem porösen Ziegelbruch-Material fällt mit steigender Zugabemenge im Vergleich zum reinen Boden dahingegen leicht ab.

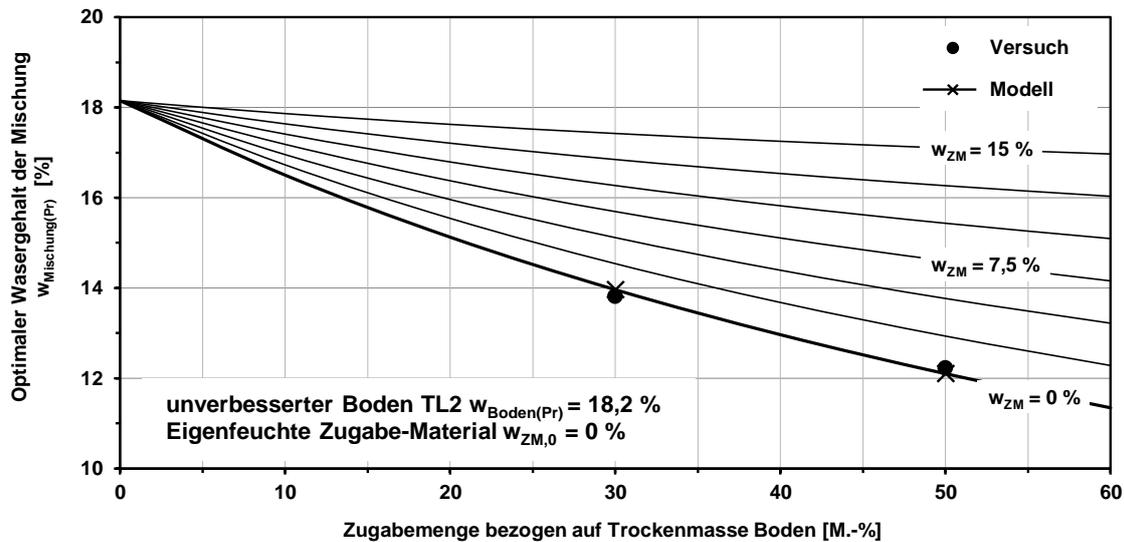
Die in [Abb. 6.20](#) ebenfalls eingetragenen Versuchsergebnisse deuten auf eine sehr gute Übereinstimmung mit den Rechenergebnissen des Modells hin. Es kann davon ausgegangen werden, dass merkbare Abweichungen von den Modellberechnungen ab jener Zugabemenge auftreten, bei der das Zugabe-Material nicht mehr homogen in den Boden eingemischt werden kann und zusätzlicher Porenraum zwischen den einzelnen Körnern des Zugabe-Materials entsteht.



**Abb. 6.20:** Vergleich der Trockendichten aus den Verdichtungsversuchen mit der Modellprognose

In [Abb. 6.21](#) ist Gleichung (6-3) für unterschiedliche Wassergehalte des Zugabe-Materials in der verdichteten Mischung Gemisch ( $w_{ZM}$ ) ausgewertet. Für den Boden wurde dazu der optimale Wassergehalt  $w_{Boden(Pr)}$  nach [Tab. 4.1](#) verwendet. Legt man der Berechnung die berechnete Annahme zu Grunde, dass der grobkörnige Kies 8/16 auch im verdichteten Gemisch in Relation zu seiner Masse nur einen verschwindend kleinen Anteil an Wasser zu binden vermag ( $w_{ZM} \approx 0\%$ ; siehe Spur (A) in [Abb. 6.5](#)), so ergeben sich die Modellvorhersagen für die untersuchten Mischungen auf der zu dieser Annahme zugehörigen Kurve ( $w_{ZM} = 0\%$ ). Die in [Abb. 6.21](#) eingetragenen Versuchswerte für die Mischungen mit 30 und 50 M.-% Kies 8/16 bestätigen eben dies. Das Modell bildet die Versuchsergebnisse der Mischungen des Bodens TL2 mit dem Kies 8/16 sehr gut ab. Die Modellannahme, dass allein der Wassergehalt des feinkörnigen Bodenanteils die Lage des Verdichtungsoptimums bestimmt, kann für den

vorliegenden Fall also anhand der Vergleichsrechnung mit dem Modell nach Gleichung (6-3) bestätigt werden.

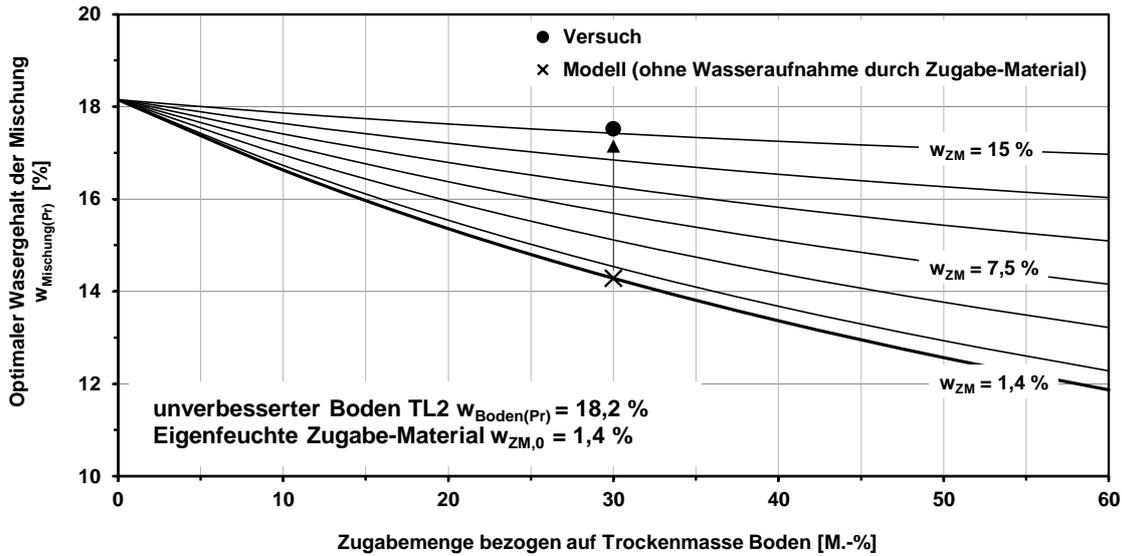


**Abb. 6.21: Vergleich der optimalen Verdichtungswassergehalte aus den Verdichtungsversuchen mit der Modellprognose bei der Zugabe von Kies 8/16 mm**

Die Darstellungen in [Abb. 6.20](#) und [Abb. 6.21](#) bestätigten also die Anwendbarkeit des Modells nach Gleichung (6-3) und Gleichung (6-6) für die Mischung einer groben Zugabe (8/16 mm) in einen feinkörnigen Boden, wenn keine Möglichkeit zum Austausch von Wasser zwischen Boden und Zugabe besteht ( $\Delta w_{\text{ZM}} = 0 \%$ ). Ist das Zugabe-Material porös und daher in der Lage Wasser zu speichern, so wird die Verdichtungskurve der Mischung auf die nasse Seite verschoben (Spur (B) in [Abb. 6.5](#)). Der Betrag dieser Verschiebung ergibt sich aus dem durch das Zugabe-Material gespeicherten Anteil an Wasser und bestimmt damit den Verbesserungserfolg nach [Abb. 4.10](#).

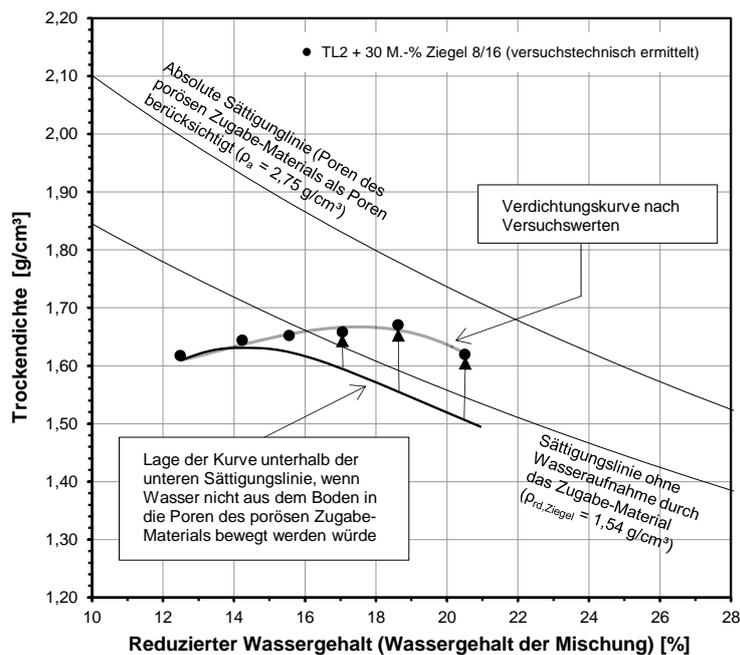
In [Abb. 6.22](#) ist das Verdichtungsergebnis der Mischung des Bodens TL2 mit dem porösen Ziegelbruch und die Auswertung des Modells eingetragen. Bei den Berechnungen wurden wiederum unterschiedliche Wassergehalte des Zugabe-Materials berücksichtigt. Der Vergleich des Versuchsergebnisses mit den Modellrechnungen verdeutlicht, dass das poröse Zugabe-Material in der verdichteten Mischung eine bestimmte Menge an Wasser gespeichert hält. In der verdichteten Mischung zeigt das Ziegelbruch-Material einen Wassergehalt deutlich über dem Eigenwassergehalt ( $w_{\text{ZM},0} \approx 1,4 \%$ ).

Mit dem vorhandenen Versuchsergebnis  $w_{\text{Mischung(Pr)}}$  lässt sich die nach  $w_{\text{ZM}}$  aufgelöste Gleichung (6-3) zur rückrechnenden Ermittlung des Wassergehaltes des Zugabe-Materials in der verdichteten Mischung verwenden (siehe auch Pkt. 6.4). Grafisch ist die Auswertung in [Abb. 6.22](#) enthalten. Im gegenständlichen Fall ergibt die Rückrechnung einen Wert von  $w_{\text{ZM}} = 15,4 \%$ . Um das in [Abb. 6.18](#) dargestellte Verdichtungsergebnis also physikalisch erst zu ermöglichen, muss das poröse Ziegelbruch-Material der Körnung 8/16 mm mit einem Eigenwassergehalt (vor Mischung) von nur 1,4 % also etwa 14 % seiner Masse an Wasser aufgenommen haben.



**Abb. 6.22:** Vergleich der optimalen Verdichtungswassergehalte aus den Verdichtungsversuchen mit der Modellprognose bei der Zugabe von Ziegel 8/16 mm

Dass der Bodenanteil Wasser an das Zugabe-Material abgibt, kann auch veranschaulicht werden, wenn man das Verdichtungsergebnis im Vergleich zu den beiden eingangs beschriebenen Sättigungslinien betrachtet. Die untere Sättigungslinie in [Abb. 6.19](#) und [Abb. 6.23](#) beschreibt allein den Porenraum des Bodenanteils als den mit Wasser füllbaren Porenraum. Sie ist also nur für jenen theoretischen Sonderfall gültig, bei dem die Volumen-Bilanz aus Feststoff, Wasser und Luft für das zugegebene RC-Material fest ist. Das wäre bei einer geschlossenen Oberfläche der RC-Körner der Fall, wenn kein Wasser aus dem Boden in deren Poren bewegt werden kann. Tatsächlich wird, wie die Lage der Verdichtungskurve der Mischung im Vergleich zu dieser Sättigungslinie deutlich macht, durch die Verdichtung auch die Volumen-Bilanz im Zugabe-Material geändert. Bodenwasser ersetzt Luft in den Poren der Körner und ermöglicht so das Überschreiten der unteren Sättigungslinie.



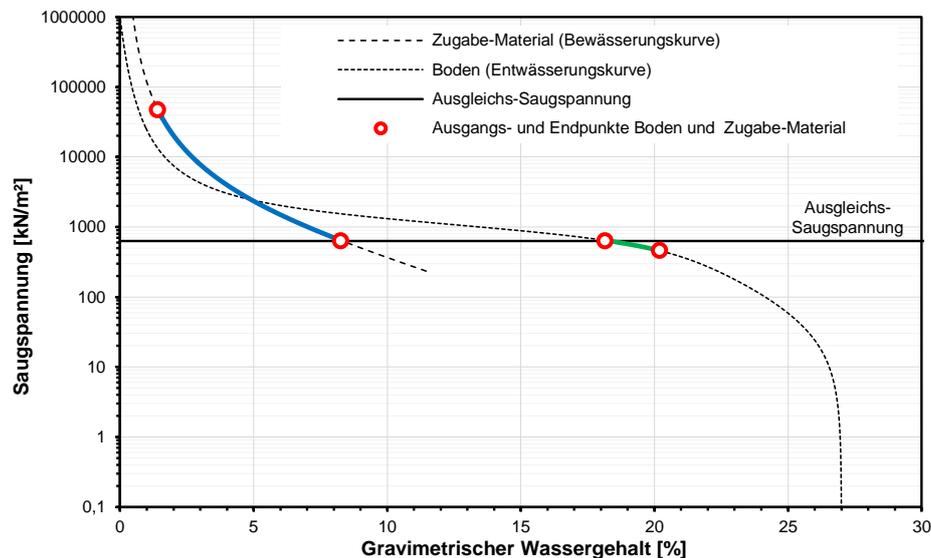
**Abb. 6.23:** Wasseraustausch bei der Verbesserung mit Ziegelbruch-Material 8/16

**Wasseraufnahme des Ziegelbruchs im Vergleich zu den Grenzwerten.** Unter Pkt. 6.4 wurden Überlegungen zu den möglichen Grenzwerten der durch das poröse Zugabe-Material haltbaren Wassermenge angestellt. Diese können nun zur Plausibilitätskontrolle herangezogen werden.

Die Obergrenze des Wassergehaltes des Zugabe-Materials ergibt sich für den vorliegenden Fall (feinkörniger Boden mit grobem Zugabe-Material) unter Vereinfachung der Dichte des Wassers ( $\rho_w = 1,0 \text{ g/cm}^3$ ) nach Gleichung (6-9) zu:

$$w_{\text{ZM(OG)}} = \left( \left( \frac{1}{1,54} - \frac{1}{2,75} \right) \cdot 1,0 \right) \cdot 100 = \underline{28,6 \%}$$

Die Mindestmenge an Wasser, die das Zugabe-Material aufgrund der anfangs vorhandenen Saugspannungsunterschiede aufnimmt, kann bei Kenntnis der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen, wie unter Pkt. 6.4 erläutert, abgeschätzt werden. Die iterative Berechnung anhand der Saugspannungs-Wassergehalts-Funktionen ist in [Abb. 6.24](#) beispielhaft für eine einzelne Kombination von Ausgangs- und Eigenwassergehalten dargestellt.

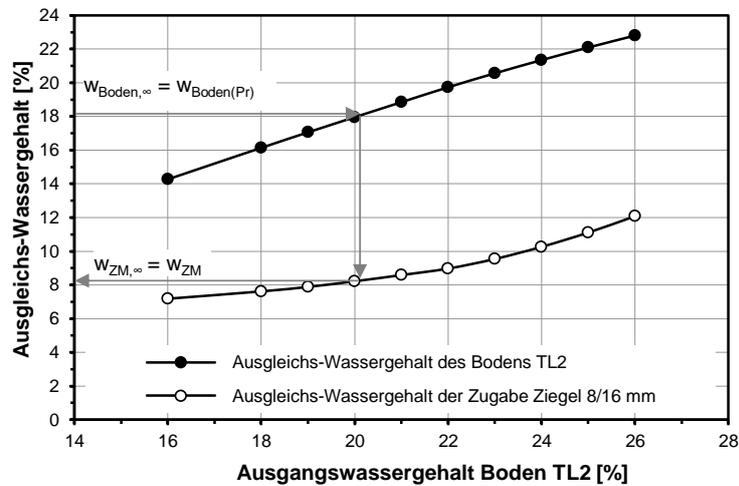


**Abb. 6.24:** Beispielhafte Ermittlung der Ausgleichs-Saugspannung

Wird bei einer Berechnung, den tatsächlichen Gegebenheiten der Verdichtungsversuche entsprechend, nur der Ausgangswassergehalt des Bodenanteils variiert, so ergeben sich im Gleichgewicht der Saugspannungen jeweils Wertepaare für die Wassergehalte beider Materialien. Die in [Abb. 6.25](#) dargestellten Kurven zeigen diese Wertepaare für die Materialien im vorgestellten Versuch (Boden TL2 mit 30 M.-% Ziegel) in Abhängigkeit vom Ausgangswassergehalt des Bodenanteils.

Da das Zugabe-Material nur einen konstanten Betrag zur Trockendichte der Mischung beiträgt, wird das Verdichtungsoptimum der Mischung, wie bereits beschrieben, vom Verdichtungsverhalten des Bodenanteils bestimmt (siehe Pkt. 6.3). Verwendet man den charakteristischen Wert des Bodens ( $w_{\text{Boden(Pr)}}$ ) als Eingangswert in [Abb. 6.25](#), so kann der zugehörige Wassergehalt des Zugabe-Materials im Verdichtungsoptimum der Mischung abgelesen werden. Dieser ergibt sich im gegenständlichen Fall zu etwa  $w_{\text{ZM(UG)}} = w_{\text{ZM,}\infty} = 8,3 \%$  und bezeichnet den Gleichgewichtswassergehalt der porösen Zugabe-Körner vor Verdichtung. Wäre der

Wasseraustausch zwischen Boden und Zugabe-Material auf diesen Saugspannungsausgleich beschränkt, so würde das Zugabe-Material diesen Wassergehalt dann auch in der verdichteten Mischung aufweisen.



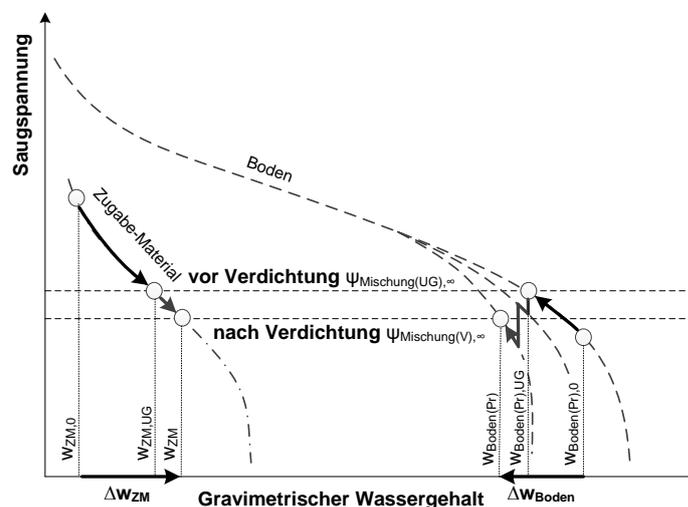
**Abb. 6.25:** Wassergehalt des Bodenanteil und des Zugabe-Materials im Gleichgewicht der Saugspannungen (vor Verdichtung)

Der Vergleich des aus dem Verdichtungsergebnis rückgerechneten Wassergehalts des Zugabe-Materials in der verdichteten Mischung ( $w_{ZM} = 15,4 \%$ ) mit der ebenfalls errechneten Obergrenze ( $w_{ZM(OG)} = 28,6 \%$ ) und Untergrenze ( $w_{ZM(UG)} = 8,3 \%$ ) zeigt, dass die durch reinen Saugspannungsausgleich auf das poröse Ziegelbruch-Material übertragene Wassermenge deutlich überstiegen wurde. Gleichzeitig wurde der maximal mögliche Wassergehalt deutlich unterschritten. Es liegt die Folgerung nahe, dass der Verdichtungsprozess selbst noch einen zusätzlichen Beitrag zum Wasseraustausch zwischen Boden und Zugabe-Material leistet, vor allem da die Verdichtung solcher Mischungen am nassen Ast gegen eine „weiche“ Sättigungslinie erfolgt (vgl. [Abb. 6.23](#)). Vor allem dort wird der Bodenanteil durch die Verdichtung nahezu aufgesättigt und ermöglicht so eine zusätzliche Abgabe von Bodenwasser in die Poren des Zugabe-Materials.

**Schlussfolgerungen zur Wasseraufnahme durch das Zugabe-Material.** Anhand von Verdichtungsversuchen an Mischungen aus Boden TL2 mit Kies der Körnung 8/16 mm sowie mit einem Ziegelbruch-Material der Körnung 8/16 mm wurde das Rechenmodell überprüft. Die rechnerisch ermittelten Trockendichten entsprachen für beide Zugabe-Materialien den in den Versuchen ermittelten Werten. Auch die optimalen Verdichtungswassergehalte konnten nachvollzogen werden. Aus den Ergebnissen kann abgeleitet werden, dass das Rechenmodell die Rückrechnung der Verdichtungseigenschaften des Anteils des Zugabe-Materials (in der verdichteten Mischung) aus einem Verdichtungsergebnis ermöglicht.

Aus dem Vergleich der Ergebnisse der Versuche an den Mischungen des Bodens TL2 mit Ziegelbruch-Material ist ableitbar, dass die vom Zugabe-Material aufgenommene Wassermenge jene Wassermenge übersteigt, die dem reinen Ausgleich der Saugspannungen zwischen Boden und Zugabe-Material im unverdichteten Zustand zugeordnet werden kann. Daraus kann geschlossen werden, dass durch die Verdichtung ein zusätzlicher Teil des Wassers in die porösen Körner bewegt wird. Da auch in der verdichteten Mischung ein Saugspannungsgleichgewicht zwischen dem Bodenanteil und dem porösen Zugabe-Material herrschen muss, ist eine Erweiterung der in [Abb. 6.12](#) zum Feuchtigkeitsaustausch darge-

stellten Schritte notwendig. Der Wassergehalt des Zugabe-Materials steigt durch die Verdichtung über den durch den Saugspannungsausgleich herbeigeführten Wassergehalt vor Verdichtung ( $w_{ZM(UG)}$ ) an und bewirkt so gleichzeitig einen weiteren Anstieg des Verbesserungserfolges ( $\Delta w_{Boden(Pr)}$ ). Die verdichtungsbedingte Verringerung des Luftporenanteils in der Mischung und die damit einhergehende Erhöhung des Gesamtsättigungsgrades haben damit ein Absinken der Gesamt-Saugspannung ( $\psi_{Mischung(V),\infty}$ ) zur Folge. Da vor allem die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen des Bodenanteils durch die Verdichtung beeinflusst werden<sup>129</sup>, ist für die Änderung der Saugspannungen im Zuge der Verdichtung der schematische Ablauf nach [Abb. 6.26](#) vorstellbar (vereinfacht dargestellt anhand von zwei Verdichtungsschritten). Die verdichtungsbedingte Erhöhung der Trockendichte im Bodenanteil führt bei gleichem Wassergehalt zu einer Erhöhung des Sättigungsgrades, die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen ändern sich im kapillar beeinflussten Bereich der Funktion. Sättigt der Bodenanteil durch die Verdichtung also auf, so entsteht ein wiederkehrendes Potentialgefälle im Porenwasser der Mischung, wie es bereits in [Abb. 6.11](#) veranschaulicht wurde.



**Abb. 6.26:** Modell zur Entwicklung der Saugspannung im Bodenanteil und im porösen Zugabe-Material während des Verdichtungsprozesses

Dieses „Auspressen“ von Wasser aus dem Boden in die Poren der RC-Körner setzt allerdings voraus, dass bei der Verdichtung ein maßgeblicher, wiederkehrender Saugspannungsgradient zwischen Bodenwasser und dem Wasser der porösen Zugabe-Körner aufgebaut werden kann<sup>130</sup>. Dies ist wohl vor allem dort der Fall, wo gilt:  $w_{Boden,0} > w_{Boden(Pr)}$ , also wenn der Bodenanteil einen Wassergehalt oberhalb seines Verdichtungsoptimums aufweist (Verdichtung gegen die Sättigungslinie). Die Erwähnung dieser Voraussetzung erfolgt hier nur vollständigheitshalber, da sie überhaupt erst Grundvoraussetzung für die Notwendigkeit der Anwendung einer Maßnahme zur Bodenverbesserung ist.

<sup>129</sup> Eine Änderung der intragranularen Porenstruktur in den Ziegelbruch-Körnern ist aufgrund der starren Struktur nicht möglich. Da die Körner einzeln in der feinkörnigen Bodenmatrix vorliegen, besteht kein intergranularer Porenraum.

<sup>130</sup> Bei der Laborverdichtung wiederkehrend auftretende Porenwasserüberdrücke in teilgesättigten Sanden wurden zum Beispiel von FENG et al. (2000) berichtet. Die Autoren mutmaßen, dass diese Porenwasserdrücke in der Nähe des Kontaktpunktes von Fallgewicht und Boden wohl am stärksten ausgeprägt sind. Untersuchungen an feinkörnigen Böden sind dem Autor dieser Arbeit nicht bekannt.

## 6.7 Möglichkeiten zur praktischen Anwendung des Modells

Grundlegender Ausgangspunkt für die praktische Anwendung des Modells sind die Verdichtungseigenschaften des zu verbessernden Bodens. Das Rechenmodell ermöglicht damit einerseits, wie beschrieben, die Analyse von Versuchsdaten. So können die Gleichungen (6-7) und (6-19) dazu verwendet werden, die Eigenschaften des Zugabe-Materials im verdichteten Gemisch aus bestehenden Versuchsdaten rückzurechnen. Mit diesen Daten ( $w_{ZM}$ ,  $\rho_{d,ZM}$ ) ermöglicht es auch die Extrapolation von Verdichtungseigenschaften (Prognose). Die Anwendung des Modells kann auf unterschiedliche Weise erfolgen:

- Um die Verdichtungseigenschaften einer Mischung bei einem bestimmten Mischungsverhältnis zu berechnen und
- um bei bekanntem Ausgangswassergehalt des Bodens die erforderliche Zugabemenge so zu berechnen, dass das Gemisch im Verdichtungsoptimum verdichtet werden kann. Die Ermittlung der Verdichtungseigenschaften der Mischung kann dann im Anschluss an diesen Schritt erfolgen.

Da, wie unter Pkt. 7 dargestellt wird, rückgerechnete Eingabeparameter ( $w_{ZM}$ ,  $\rho_{d,ZM}$ ) nicht allgemein gültig sind, ist die Prognose aus rückgerechneten Werten jeweils nur für eine Kombination aus Boden und Zugabe-Material zulässig. Allerdings kann das Modell dann unabhängig von der Art des zugegebenen RC-Materials und dessen Eigenwassergehalt verwendet werden.

**Verdichtungseigenschaften bei einem vorgegebenen Mischungsverhältnis.** Die Erstellung einer Prognose der Verdichtungseigenschaften, hier zum optimalen Wassergehalt einer Mischung, erfolgt durch Einsetzen des rückgerechneten Wertes für ( $w_{ZM}$ ) in Gleichung (6-3):

$$w_{\text{Mischung(Pr)}}^* = \frac{w_{\text{Boden(Pr)}} + MV \cdot w_{ZM}}{(1 + MV)} \quad (6-20)$$

$w_{\text{Mischung(Pr)}}^*$	Prognostizierter Wert zum optimalen Wassergehalt der Mischung [-]
$w_{\text{Boden(Pr)}}$	Optimaler Wassergehalt des unverbesserten Bodens [-]
$w_{ZM}$	Wassergehalt des Zugabe-Materials [-]; nach Gleichung (6-7)
MV	Mischungsverhältnis der Trockenmassen [(Zugabemenge in %) / 100]

Analog dazu ist auch die Prognose der Trockendichte einer Mischung durch Einsetzen des rückgerechneten Wertes für ( $\rho_{d,ZM}$ ) in Gleichung (6-6) möglich:

$$\rho_{d,\text{Mischung(Pr)}}^* = \frac{\rho_{d,\text{Boden(Pr)}} \cdot \rho_{d,ZM} \cdot (1 + MV)}{\rho_{d,ZM} + \rho_{d,\text{Boden(Pr)}} \cdot MV} \quad (6-21)$$

$\rho_{d,\text{Mischung(Pr)}}^*$	Prognostizierter Wert zur Trockendichte des Gemisches [ $M \cdot L^{-3}$ ]
$\rho_{d,\text{Boden(Pr)}}$	Trockendichte des unverbesserten Bodens (Optimum) [ $M \cdot L^{-3}$ ]
$\rho_{d,ZM}$	Trockendichte des Zugabe-Materials; nach Gleichung (6-19) [ $M \cdot L^{-3}$ ]
MV	Mischungsverhältnis der Trockenmassen [(Zugabemenge in %) / 100]

Soll in der Prognose ein veränderlicher Wert für die Trockendichte verwendet werden, so kann eine lineare Abhängigkeit von der Zugabemenge ohne besonderen Aufwand in Gleichung (6-21) integriert werden. Wird der Eingabeparameter ( $\rho_{d,ZM}$ ) beim Mischungsverhält-

nis  $MV_B$  ermittelt, so ergibt sich die Änderung der Trockendichte des Zugabe-Materials in der verdichteten Mischung abhängig vom „Abstand“ zum zu prognostizierenden Mischungsverhältnis (MV) zu  $\Delta\rho_{d,ZM}$  ( $\Delta\rho_{d,ZM} = \delta \cdot \Delta MV \cdot 100 \cdot \rho_{d,ZM}$ ). Der empirische Faktor  $\delta$  nach Gleichung (7-1) oder Gleichung (7-2) bildet dabei eine lineare Abnahme der Trockendichte mit dem sich ändernden Mischungsverhältnis ab (für RC-Mix 0/4 im Mittel  $\delta = 0,0015$  [1/%]; siehe auch Pkt. 7.2.4), der Differenzbetrag  $\Delta MV$  bezeichnet den Abstand zwischen Basis ( $MV_B$ ) und dem Ziel der Prognose (MV) und wird über  $\Delta MV = MV_B - MV$  errechnet. Damit kann Gleichung (6-21) umformuliert werden zu:

$$\rho_{d,Mischung(Pr)}^* = \frac{\rho_{d,Boden(Pr)} \cdot \rho_{d,ZM} \cdot (1 - \delta \cdot \Delta MV \cdot 100) \cdot (1 + MV)}{\rho_{d,ZM} \cdot (1 - \delta \cdot \Delta MV \cdot 100) + \rho_{d,Boden(Pr)} \cdot MV} \quad (6-22)$$

$\rho_{d,Mischung(Pr)}^*$	Prognostizierter Wert zur Trockendichte des Gemisches [ $M \cdot L^{-3}$ ]
$\rho_{d,Boden(Pr)}$	Trockendichte des unverbesserten Bodens (Optimum) [ $M \cdot L^{-3}$ ]
$\rho_{d,ZM}$	Trockendichte des Zugabe-Materials; nach Gleichung (6-19) [ $M \cdot L^{-3}$ ]
$\delta$	Faktor zur Abnahme der Trockendichte des Zugabe-Materials mit steigendem Mischungsverhältnis [1/%]
MV	Mischungsverhältnis der Trockenmassen [(Zugabemenge in %) / 100]
$\Delta MV$	Spanne der Prognose = $MV_B - MV$ [-]

Durch Formulierung einer Massenbilanz im Verdichtungsoptimum des Gemisches (siehe Gleichung (6-1)), erhält man unter Berücksichtigung des Ausgangswassergehaltes des Bodens  $w_{Boden(Pr),0}$  ( $m_{W,Boden(Pr),0} = m_{d,Boden} \cdot w_{Boden(Pr),0}$ ), dem Eigenwassergehalt des Zugabe-Materials  $w_{ZM,0}$  ( $m_{W,ZM,0} = MV \cdot m_{d,Boden} \cdot w_{ZM,0}$ ) und dem Mischungsverhältnis MV ( $m_{d,ZM} = MV \cdot m_{d,Boden}$ ) folgende Gleichung:

$$w_{Mischung(Pr)} = \frac{w_{Boden(Pr),0} + MV \cdot w_{ZM,0}}{(1 + MV)} \quad (6-23)$$

$w_{Mischung(Pr)}$	Wassergehalt der Mischung im Verdichtungsoptimum [-]
$w_{Boden(Pr),0}$	Optimaler Ausgangswassergehalt des Bodenanteils der Mischung [-]
$w_{ZM,0}$	Eigenwassergehalt des Zugabe-Materials [-]
MV	Mischungsverhältnis der Trockenmassen [(Zugabemenge in %) / 100]

Gleichung (6-23) beschreibt die Massenbilanz aus Wasser und Feststoff des zum Verdichtungsoptimum führenden Gemisches, wobei dem Bodenanteil und dem Zugabe-Material jeweils noch die Ausgangs- bzw. Eigenwassergehalte zugeordnet sind. Auch wenn der Wassergehalt in der verdichteten Mischung (Gleichung (6-3)) anders verteilt sein mag als in der ursprünglichen Zusammensetzung, bleibt die Massenbilanz im Ergebnis unverändert, denn es wird kein Wasser aus der Mischung genommen, sondern nur umgelagert.

Setzt man also Gleichung (6-23) mit Gleichung (6-3) gleich, so erhält man nach Umformung die Bestimmungsgleichung für jenen optimalen Ausgangswassergehalt des Bodenanteils, der den prognostizierten Verdichtungseigenschaften nach Gleichung (6-20) und Gleichung (6-21) zugehörig ist. Da der Eingangsparameter  $w_{ZM}$  aus einer Rückrechnung verwendet wird, es sich also um eine Prognose handelt, erfolgt die Bezeichnung des Wertes anstatt mit  $w_{Boden(Pr),0}$  mit  $w_{Boden(Pr),0}^*$ .

$$(w_{\text{Boden (Pr),0}} =) w_{\text{Boden (Pr),0}}^* = w_{\text{Boden (Pr)}} - MV \cdot (w_{\text{ZM,0}} - w_{\text{ZM}}) \quad (6-24)$$

$w_{\text{Boden(Pr),0}}^*$	Prognostizierter opt. Ausgangswassergehalt des Bodenanteils der Mischung in [-]
$w_{\text{Boden(Pr)}}$	Optimaler Wassergehalt des unverbesserten Bodens [-]
$w_{\text{ZM,0}}$	Eigenwassergehalt des Zugabe-Materials [-]
$w_{\text{ZM}}$	Wassergehalt des Zugabe-Materials [-]; nach Gleichung (6-7)
MV	Mischungsverhältnis der Trockenmassen [(Zugabemenge in %) / 100]

**Zugabemenge für einen vorgegebenen Ausgangswassergehalt des Bodenanteils.** Ist der Ausgangswassergehalt des Bodens bekannt, so kann durch Umformung von Gleichung (6-24) jene erforderliche Zugabemenge (Mischungsverhältnis) ermittelt werden, bei der das entstehende Gemisch bei Verdichtung mit Proctorenergie im Verdichtungsoptimum verdichtet werden kann:

$$MV = \frac{w_{\text{Boden (Pr)}} - w_{\text{Boden (Pr),0}}}{w_{\text{ZM,0}} - w_{\text{ZM}}} \quad (6-25)$$

$w_{\text{Boden(Pr)}}$	Optimaler Wassergehalt des unverbesserten Bodens [-]
$w_{\text{Boden(Pr),0}}$	Optimaler Ausgangswassergehalt des Bodenanteils der Mischung [-]
$w_{\text{ZM,0}}$	Eigenwassergehalt des Zugabe-Materials [-]
$w_{\text{ZM}}$	Wassergehalt des Zugabe-Materials [-]; nach Gleichung (6-7)
MV	Mischungsverhältnis der Trockenmassen [(Zugabemenge in %) / 100]

## 7 Anwendung des Modells auf die eigenen Untersuchungen

### 7.1 Allgemeines

Nachfolgend dient das Rechenmodell erst als Werkzeug zur Analyse bestehender Verdichtungsdaten. Dazu boten sich die unter Pkt. 4 zusammenfassend vorgestellten Ergebnisse an, die im Einzelnen dieser Arbeit auch im Anhang beigefügt sind. Die Versuchsergebnisse wurden danach aber auch dazu verwendet, die Anwendbarkeit des vorgestellten Modells zur Prognose zu überprüfen und einen ersten Eindruck über die Prognosegenauigkeit zu gewinnen.

### 7.2 Rückrechnende Analyse eigener Versuchswerte

#### 7.2.1 Vorgehen und Datengrundlage

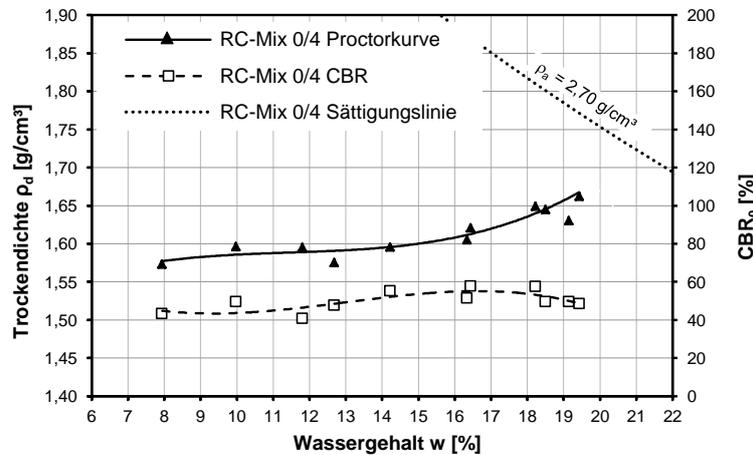
Versuchsreihe 1 eignete sich aufgrund der speziellen Anforderungen an die Homogenität des verwendeten Zugabe-Materials (RC-Mix 0/4) besonders gut für eine eingehende Analyse. So wurden an den in VR1 verwendeten Böden und RC-Materialien die erforderlichen zusätzlichen Eigenschaften ermittelt, um damit die unter Pkt. 6.4 und Pkt. 6.5 beschriebenen Grenzwerte für die Trockendichte und den Wassergehalt des Zugabe-Materials in den jeweils verdichteten Mischungen abschätzen zu können. Die aus den Verdichtungsergebnissen anhand der Gleichungen (6-7) und (6-19) rückgerechneten Eigenschaften des Zugabe-Materials (in der jeweils verdichteten Mischung) wurden damit im Sinne einer Plausibilitätskontrolle überprüft. Verallgemeinernd wurden anschließend auch die Eigenschaften des Zugabe-Materials „RC-Mix 0/4“ aus den Versuchsreihen 2 und 4 rückgerechnet.

#### 7.2.2 Grenzwerte für die Trockendichte des RC-Mix 0/4

**Kornrohddichte (OG-A).** Die Abschätzung der Kornrohddichte des gemischten RC-Materials (RC-Mix 0/4 mm) erfolgte am Anteil 1 – 4 mm in Anlehnung an das Drahtkorbverfahren nach DIN EN 1097-6:2013. Die Bestimmung des Kornvolumens und der durch das poröse Material aufgenommene Menge an Wasser wurde nach 7 Tagen Wasserlagerung ermittelt. Die daraus bestimmte Kornrohddichte betrug  $\rho_{d(\text{OG-A})} = \rho_{rd, \text{RC-Mix } 0/4} \approx 2,1 \text{ g/cm}^3$  und kann als Anhaltswert für die Obergrenze jener Dichte gewertet werden, den dieses RC-Material im verdichteten Gemisch mit Boden einnehmen kann. Die gleichzeitig als Teilergebnis dieses Versuchs ermittelte scheinbare Kornrohddichte des RC-Materials zeigte einen deutlich höheren Wert von  $\rho_{a, \text{RC-Mix } 0/4} \approx 2,71 \text{ g/cm}^3$ .

**Trockendichte durch Verdichtung (OG-B).** Die Verdichtungskurve eines solchen, wie auch in den eigenen Versuchen als Zugabe-Material verwendeten RC-Mix 0/4 ist in HENZINGER et al. (2015b) beschrieben ( $\rho_{d, \text{RC-Mix } 0/4} \approx 1,6 \text{ bis } 1,65 \text{ g/cm}^3$ ), siehe dazu auch [Abb. 7.1](#). Das für die Erstellung der Verdichtungskurve verwendete Material ist mit dem Material aller eigenen Versuchsreihen vergleichbar. Die durch Verdichtung erreichbare Trockendichte zeigte sich dort nahezu unabhängig vom Wassergehalt des Materials. Tendenziell stieg die Trocken-

dichte mit dem Wassergehalt nur leicht an. Aus Abb. 7.1 kann ein Wert von  $\rho_{d(OG-B)} = 1,65 \text{ g/cm}^3$  als Näherung für jene Dichte abgeleitet werden, die der RC-Mix 0/4 in der verdichteten Mischung mit Boden, vor allem bei hohen Mischungsverhältnissen, etwa einnehmen kann.



**Abb. 7.1:** Verdichtungskurve des RC-Mix 0/4 (nach KOUKOULIDOU aus HENZINGER et. al 2015b, adaptiert)

### 7.2.3 Grenzwerte für den Wassergehalt des RC-Mix 0/4

**Obere Grenze des Wassergehaltes.** Unter Pkt. 6.4 ist die Ermittlung der Obergrenzen jenes Wassergehaltes beschrieben, den das Zugabe-Material in der verdichteten Mischung annehmen kann. Grundlage für die hier dargestellte Berechnung für das Zugabe-Material RC-Mix 0/4 sind die unter Pkt. 7.2.2 angeführten Werte für die Kornrohddichte ( $\rho_{rd}$ ), die scheinbare Kornrohddichte ( $\rho_a$ ) und die Trockendichte ( $\rho_d$ ).

Das Einsetzen der Kornrohddichte ( $\rho_{rd}$ ) und scheinbaren Kornrohddichte ( $\rho_a$ ) in Gleichung (6-9) liefert jene Obergrenze, die allein der Aufsättigung der Kornporen zuzuordnen ist. Diese Grenze ist, wie bereits erwähnt, für jenen Fall gültig, dass die porösen Einzelkörner unabhängig voneinander in der feinkörnigen Bodenmatrix schwimmen:

$$w_{ZM(OG-A)} = \left( \left( \frac{1}{2,1} - \frac{1}{2,71} \right) \cdot 1,0 \right) \cdot 100 = \underline{10,7 \%}$$

Das Einsetzen der Trockendichte ( $\rho_d$ ) und scheinbaren Kornrohddichte ( $\rho_a$ ) in Gleichung (6-10) führt zu jenem Wassergehalt, den das Zugabe-Material bei der Aufsättigung aller Kornporen und Kornzwischenporen im verdichteten Gemisch maximal annehmen kann:

$$w_{ZM(OG-B)} = \left( \left( \frac{1}{1,65} - \frac{1}{2,71} \right) \cdot 1,0 \right) \cdot 100 = \underline{23,7 \%}$$

**Untere Grenze des Wassergehaltes des Zugabe-Materials.** Jenen Wassergehalt, den das trockene Zugabe-Material in der Mischung mit einem feuchten Boden im unverdichteten Zustand mindestens annimmt, ist durch den Ausgleich der Saugspannungen festgelegt (siehe Pkt. 6.4). Grundlage der rechnerischen Ermittlung sind die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen der verwendeten Materialien jeweils im unverdichteten Zustand.

In Versuchsreihe 1 wurden die Böden TL1, TL2, TM1, TM3, TM4 und TA1 verwendet. Die Böden wurden bautechnisch unter Pkt. 4.2 beschrieben, die Untersuchung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen wurde nachträglich durchgeführt. Für niedrige Saugspannungen erfolgte dies mittels Druckplatten-Extraktor (DPE, Fa. SOILMOISTURE). Die Bodenproben wurden dabei, wie auch unter Pkt. 6.6 beschrieben, im plastischen Konsistenzbereich ohne besondere Einbaubedingung (nur leichtes, händisches Andrücken der Probe zur Herstellung einer ebenen Probenoberfläche) eingebaut, um den unverdichteten Zustand des Materials abzubilden. Zwischen den Messungen wurde zur Homogenisierung des Wassergehaltes jede Druckstufe für mehrere Tage lang gehalten. Bei höheren Saugspannungen erfolgten die Messungen an eigens hergestellten Proben mittels Chilled-Mirror-Hygrometer-Verfahren (WP4 und WP4c der Fa. DECAGON DEVICES), wobei die Proben jeweils durch Trocknung an der Luft entwässert wurden und vor jeder weiteren Messung eine mehrtägige Homogenisierungszeit eingehalten wurde. Die grundlegenden Daten zu den Einbaubedingungen der Proben und der Versuchsdurchführung sind in nachfolgender Tab. 7.1 zusammengefasst.

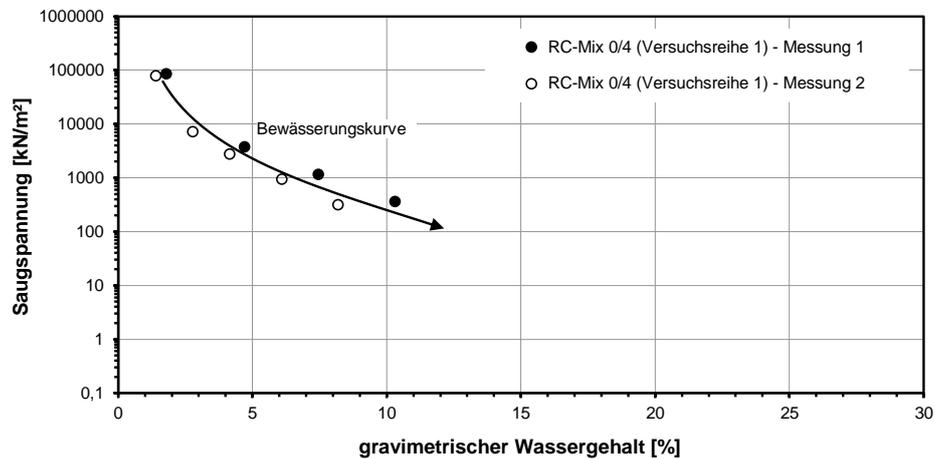
**Tab. 7.1: Probendaten zur Bestimmung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen**

Material	RC-Mix 1	RC-Mix 2	TL1	TL2	TM1	TM3	TM4	TA1
Prüfmittel	-	-	DPE	DPE	DPE	DPE	DPE	DPE
Verwendet im Saugspannungs-Bereich	-	-	30-500 kPa	50-1.000 kPa				
Probenhöhe (Einbau)	-	-	12,6 mm	11,8 mm	11,2 mm	11,2 mm	10,9 mm	10,2 mm
Probendurchmesser (Einbau)	-	-	51,9 mm	51,4 mm	51,6 mm	51,5 mm	51,5 mm	62,2 mm
Wassergehalt (Einbau)	-	-	18,6 %	26,5 %	30,1 %	36,0 %	33,1 %	30,6 %
Trockendichte (Einbau)	-	-	1,680 g/cm <sup>3</sup>	1,486 g/cm <sup>3</sup>	1,464 g/cm <sup>3</sup>	1,349 g/cm <sup>3</sup>	1,415 g/cm <sup>3</sup>	1,432 g/cm <sup>3</sup>
Prüfmittel	WP4c	WP4c	WP4	WP4c	WP4	WP4	WP4	WP4
Verwendet im Saugspannungs-Bereich	400-85.000 kPa	300-80.000 kPa	1.000-110.000 kPa	800-70.000 kPa	1.200-120.000 kPa	1.100-81.000 kPa	1.600-100.000 kPa	1.000-110.000 kPa
Probenhöhe (Einbau)	-	-	7,3 mm	5,1 mm	7,3 mm	5,7 mm	4,8 mm	7,2 mm
Probendurchmesser (Einbau)	-	-	38,8 mm	38,6 mm	38,8 mm	38,6 mm	38,6 mm	38,8 mm
Wassergehalt (Einbau)	1,8 %	1,4 %	19,9 %	20,8 %	22,1 %	25,1 %	19,4 %	27,6 %
Trockendichte (Einbau)	lose	lose	1,704 g/cm <sup>3</sup>	1,874 g/cm <sup>3</sup>	1,633 g/cm <sup>3</sup>	1,582 g/cm <sup>3</sup>	1,878 g/cm <sup>3</sup>	1,451 g/cm <sup>3</sup>

Die bautechnische Beschreibung des in Versuchsreihe 1 verwendeten RC-Materials kann unter Pkt. 4.2.2 nachgelesen werden. Der Ermittlung der Bewässerungskurve des gemischten RC-Materials erfolgte an zwei Teilproben der Körnung 0/4 mm mit dem Chilled-Mirror-Hygrometer-Verfahren (WP4c der Fa. DECAGON DEVICES). Der lose Einbau der Proben entspricht qualitativ der Situation in der unverdichteten Mischung: dort liegt der RC-Mix 0/4 hauptsächlich als lose Anlagerung an der Oberfläche der Bodenkrümel vor (siehe Abb. 6.9). Die Variation des Wassergehaltes für die Messungen erfolgte durch Zugabe von entionisiertem Wasser tropfenweise an der Oberfläche der Proben. Vor der Messung wurde den so vorbereiteten Proben ebenfalls eine mehrtägige Homogenisierungszeit gewährt. Grundle-

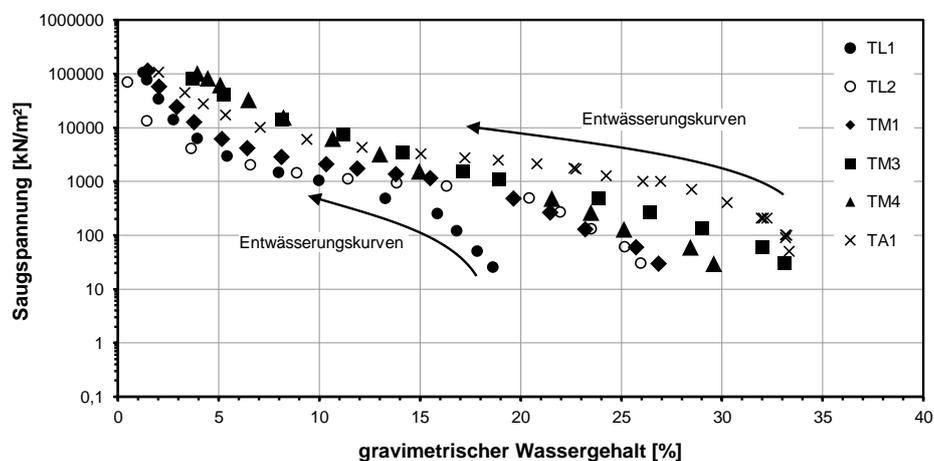
gende Daten zu den Einbaubedingungen der Proben und zur Versuchsdurchführung sind in [Tab. 7.1](#) zusammengefasst.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zum RC-Mix 0/4 sind in [Abb. 7.2](#) abgebildet. Die Unterschiede zwischen beiden untersuchten Proben konnten nicht eindeutig zugeordnet werden. Die Größenordnung der Unterschiede entspricht nach eigener Erfahrung aber etwa den typischen Abweichungen bei der Untersuchung solcher RC-Gemische.



**Abb. 7.2:** Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen (Bewässerung) des verwendeten RC-Materials (Versuchsreihe 1) anhand von 2 Proben

Die grafische Darstellung der Entwässerungskurven für die untersuchten Böden aus Versuchsreihe 1 erfolgt in nachfolgender [Abb. 7.3](#).



**Abb. 7.3:** Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen (Entwässerung) der verwendeten Böden (Versuchsreihe 1)

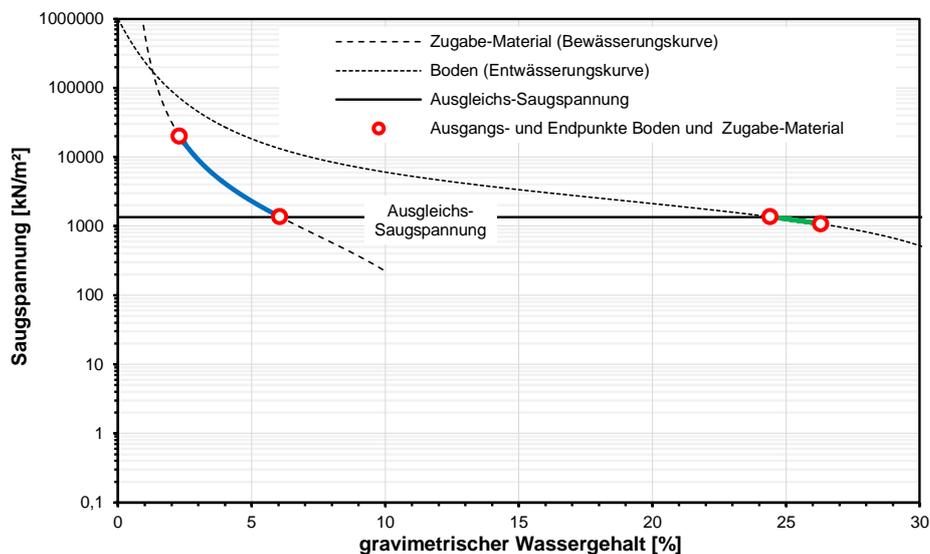
Die iterative Berechnung der Ausgleichssaugspannung bei unterschiedlichen Mischungsverhältnissen wurde im Tabellenkalkulationsprogramm MS Excel gemäß dem unter Pkt. 6.4 beschriebenen Vorgehen durchgeführt. Die dabei verwendeten Modelle für die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen und die zugehörigen Best-Fit-Werte für die Modellparameter sind in [Tab. 7.1](#) aufgelistet.

**Tab. 7.2: Modellparameter für die untersuchten Materialien**

	RC-Mix	TL1	TL2	TM1	TM3	TM4	TA1
Modellparameter	Modell A	Modell B					
$\psi_r$ [kPa]	-	20	55	10	15	15	600
$w_s$ [-]	0,130	0,203	0,270	0,305	0,375	0,330	0,335
$a$ [-]	390	710	900	1160	1090	550	1760
$n$ [-]	0,85	3,20	3,50	2,90	0,90	0,95	2,10
$m$ [-]	1,40	0,45	0,95	0,60	0,60	0,35	0,80
Anmerkung:							
Modell A Modifiziertes Modell nach Fredlund & Xing; siehe FREDLUND et al. (2011) <sup>131</sup>							
Modell B Modell nach Fredlund & Xing; siehe FREDLUND & XING (1994) <sup>132</sup>							

In [Abb. 7.4](#) ist die Ermittlung der Ausgleichs-Saugspannung im unverdichteten Zustand der Mischungen beispielhaft für einen Ausgangswassergehalt des Bodens TA1 dargestellt. Solche Berechnungen wurden für alle genannten Böden und für unterschiedliche Ausgangswassergehalte der Böden durchgeführt. Der Wassergehalt des Zugabe-Materials wurde dabei, den Randbedingungen der Verdichtungsversuche entsprechend, konstant gehalten. Als Ergebnis einer solchen Reihe ergaben sich jeweils Wertepaare für den Wassergehalt des Bodens ( $w_{\text{Boden},\infty} = w_{\text{Boden(UG)}}$ ) und den Wassergehalt des Zugabe-Materials ( $w_{\text{ZM},\infty} = w_{\text{ZM(UG)}}$ ) im Gleichgewicht der Saugspannungen.

Die auf diese Weise für alle Böden ermittelten Wertepaare ( $w_{\text{Boden(UG)}}$ ,  $w_{\text{ZM(UG)}}$ ) sind für unterschiedliche Mischungsverhältnisse, abhängig vom jeweiligen Ausgangswassergehalt der Böden, in Anhang A.7 zu dieser Arbeit dargestellt. Beispielhaft zeigt [Abb. 7.5](#) die Auswertung am Boden TL1.

**Abb. 7.4: Beispielhafte Ermittlung der Ausgleichs-Saugspannung am Boden TA1**

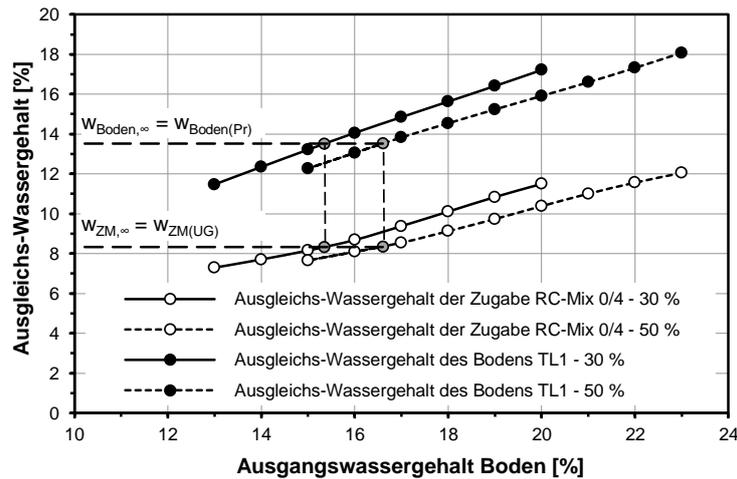
Gemäß der Modellannahme bestimmt allein der feinkörnige Bodenanteil die Lage des optimalen Wassergehaltes der Mischung (siehe Pkt. 6.3). Da der optimale Wassergehalt des Bodenanteils jeweils bekannt ist (siehe [Tab. 4.1](#)), kann aus den Diagrammen jener Wassergehalt abgelesen werden, den das Zugabe-Material in der zugehörigen Mischung annimmt. Dies ist unter der Annahme möglich, dass der Feuchtigkeitaustausch zwischen Bodenanteil

<sup>131</sup> FREDLUND et al. (2011): S. 191.

<sup>132</sup> FREDLUND & XING (1994): S. 527.

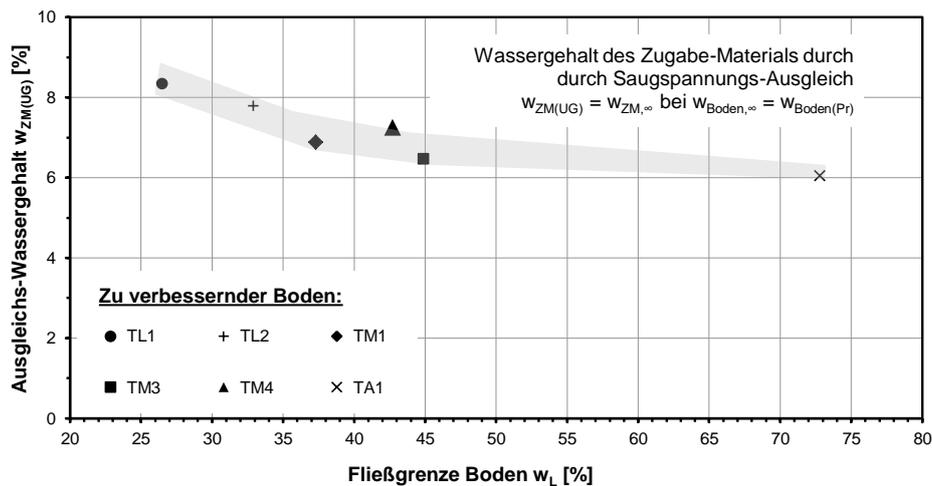
und porösem Zugabe-Material auf den reinen Ausgleich der Saugspannungen nach der Mischung beschränkt bleibt und die Verdichtung selbst keinen zusätzlichen Beitrag zum Wasseraustausch liefert. Auf Basis dieser Annahme gibt der abgelesene Wert für  $w_{ZM(UG)}$  jeweils die untere Grenze des möglichen Wertebereiches an.

Die grafische Ermittlung für die Mischungen mit Boden TL1 ist beispielhaft in Abb. 7.5 angedeutet. Bei der Betrachtung der Ergebnisse fällt auf, dass sich die so ermittelten Wassergehalte für das Zugabe-Material ( $w_{ZM(UG)}$ ) praktisch unabhängig vom Mischungsverhältnis bleiben (vgl. grau unterlegte Punkte bei  $w_{ZM,\infty} = w_{ZM(UG)}$ ).



**Abb. 7.5:** Beispiel zur Ermittlung des Ausgleichs-Wassergehaltes bei der Ausgleichs-Saugspannung anhand einer Mischung des Bodens TL1 mit RC-Mix 0/4 ( $w_{ZM,0} \approx 2,2\%$ )

Zusammenfassend lassen sich die so ermittelten Werte für die Untergrenze des Wassergehaltes des RC-Mix ( $w_{ZM(UG)}$ ) in Abhängigkeit von der Fließgrenze des damit verbesserten Bodens (aus VR1) folgenderweise darstellen:

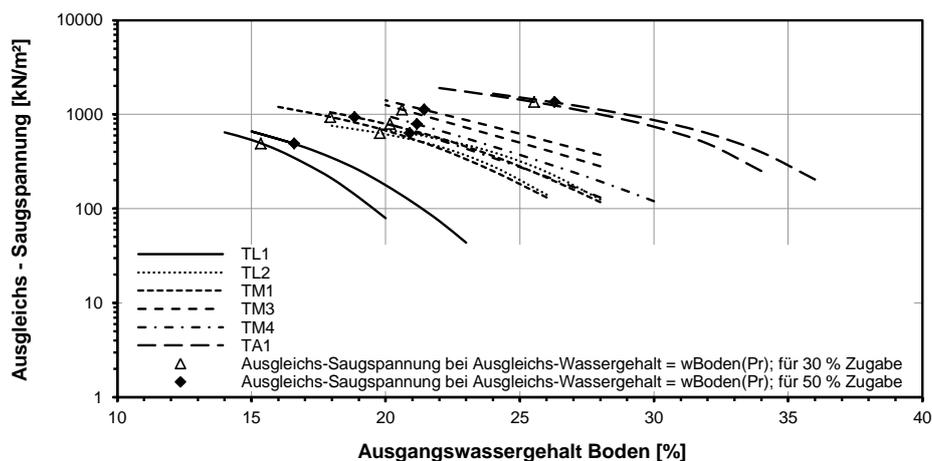


**Abb. 7.6:** Untergrenze des Ausgleichs-Wassergehaltes  $w_{ZM(UG)}$  in der verdichteten Mischung in Abhängigkeit von der Fließgrenze des unverbesserten Bodens (Versuchsreihe 1)

Findet der Wasseraustausch ausschließlich aufgrund von Saugspannungsdifferenzen zwischen dem trockenen RC-Material und dem nassen Boden nach der Mischung beider Materialien statt, so würde das Zugabe-Material in der zum Verdichtungs optimum führenden Mi-

schung (also, wenn  $w_{\text{Boden},\infty} = w_{\text{Boden}(Pr)}$ ) unabhängig von der Zugabemenge etwa die in [Abb. 7.6](#) dargestellten Wassergehalte aufweisen. Die Werte bezeichnen die Untergrenze des erzielbaren Verbesserungserfolges, wenn durch die Verdichtung keine weitere Umlagerung von Bodenwasser stattfindet.

Die Auswertungen nach dem Beispiel in [Abb. 7.5](#) können zusammenfassend auch in einer anderen Form dargestellt werden. Dafür wird die im Zuge der iterativen Berechnung der Wassergehalte für den Anteil des Bodens und jenen des Zugabe-Materials ermittelte Ausgleichssaugspannung gegen den Ausgangswassergehalt des Bodenanteils aufgetragen. Die sich ergebenden Kurvenscharen beschreiben die Änderung des Gleichgewichtes der Saugspannungen mit dem sich ändernden Ausgangswassergehalt des Bodens.



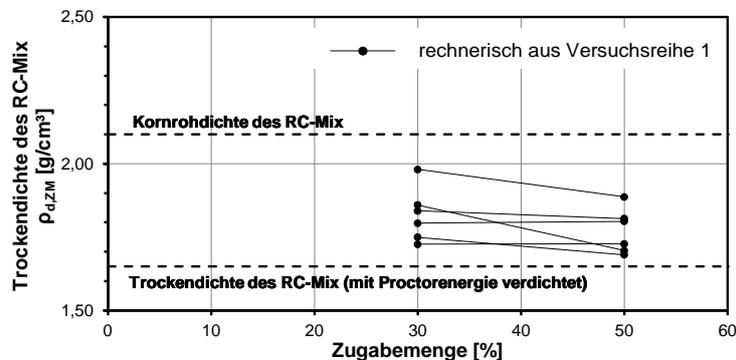
**Abb. 7.7: Ausgleichssaugspannungen der unterschiedlichen Böden (Versuchsreihe 1)**

In [Abb. 7.7](#) sind zusätzlich zu diesen Kurvenscharen auch explizit jene Werte ausgewiesen, bei denen der Ausgleichswassergehalt des Bodenanteils jeweils dessen optimalem Wassergehalt entspricht ( $w_{\text{Boden},\infty} = w_{\text{Boden}(Pr)}$ ), also den oben beschriebenen Wertepaaren zugehörig sind. Aus der Darstellung kann entnommen werden, dass die ermittelten Ausgleichssaugspannungen größtenteils im Bereich unter 1000 kPa liegen, also in einem Bereich der allgemein schon deutlich von kapillaren Saugspannungsanteilen beeinflusst ist. So liegen die Ausgleichssaugspannungen aufgrund der zusätzlichen verdichtungsbedingten Wasseraufnahme durch das Zugabe-Material letztlich noch niedriger (siehe [Abb. 6.26](#)). Die Gleichgewichts-Werte sind demnach grundsätzlich von Änderungen betroffen, die das Porensystem in der Mischung verändern. Ändert sich die Struktur der gemischten Materialien im Zuge der Verdichtung, so ist eine Anpassung der Gleichgewichts-Saugspannung an die neue Situation erforderlich.

#### 7.2.4 Rückrechnung von Verdichtungskennwerten

Unter Pkt. 7.2.2 und Pkt. 7.2.3 wurden nun die möglichen oberen und unteren Grenzwerte für die Verdichtungseigenschaften des Zugabe-Materials RC-Mix 0/4 ermittelt. Nachfolgend wird die Rückrechnung der Eigenschaften des RC-Mix 0/4 in den verdichteten Mischungen aus Versuchsreihe 1 im Vergleich zu diesen Werten dargestellt (Plausibilitätskontrolle). Verallgemeinernd werden im Anschluss auch die Ergebnisse der Versuchsreihen 2 und 4 in die Rückrechnung mit einbezogen. Die Rückrechnung erfolgte unter Anwendung der Gleichungen (6-7) und (6-19).

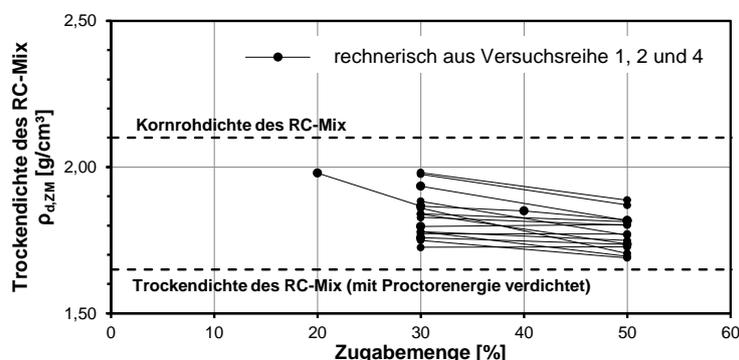
**Trockendichte des Zugabe-Materials in der verdichteten Mischung.** Die aus den Ergebnissen der Versuchsreihe 1 rückgerechneten Trockendichten des RC-Mix 0/4 in den verdichteten Mischungen ( $\rho_{d,ZM}$ ) fügen sich sehr gut zwischen den unter Pkt. 7.2.2 ermittelten oberen und unteren Grenzwerten ein (Abb. 7.8).



**Abb. 7.8:** Rückgerechnete Trockendichte des in Versuchsreihe 1 verwendeten RC-Mix 0/4 mm

In der Auswertung nach Abb. 7.8 kann außerdem folgendes beobachtet werden: Bei steigender Zugabemenge ergibt die Rückrechnung aus den Ergebnissen tendenziell absinkende Trockendichten für das RC-Material. Dies bestätigt die unter Pkt. 6.5 angeführten Überlegungen: Bei niedrigen Mischungsverhältnissen liegt das Zugabe-Material in Form einzelner Körner in der feinkörnigen Matrix vor und nimmt in der verdichteten Mischung das Volumen gemäß seiner Kornrohddichte ein. Mit steigender Zugabemenge führt die nicht ideal homogene Mischung zu einem anwachsenden Porenanteil zwischen den Zugabe-Körnern, in der RC-Kruste an der Oberfläche der Bodenkrümel (siehe Abb. 6.10). Mit steigender Zugabemenge, also steigendem Anteil in der Mischung, nähert sich die Dichte des Anteils des Zugabe-Materials dann immer mehr jener Trockendichte an, die auch erreicht werden kann, wenn man das Material ohne Mischung mit Boden mit Proctorenergie verdichtet.

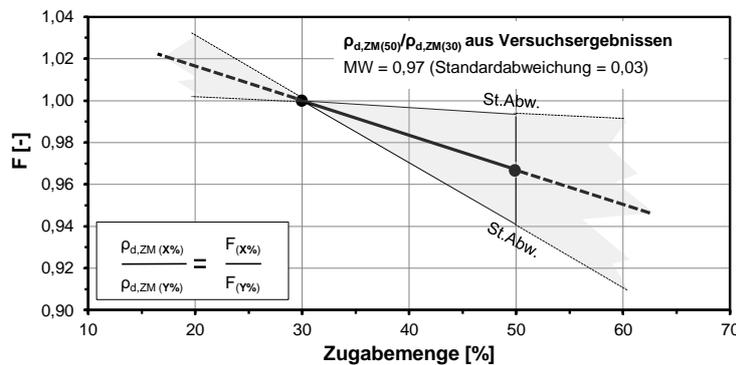
In nachfolgender Abb. 7.9 sind zusätzlich zu den rückgerechneten Trockendichten des RC-Mix 0/4 ( $\rho_{d,ZM}$ ) aus Versuchsreihe 1 auch die rückgerechneten Werte aus den Versuchsreihen 2 und 4 mit aufgenommen. Auch diese zeigen mit steigender Zugabemenge tendenziell fallende Werte, die sich gut zwischen den Grenzwerten einfügen.



**Abb. 7.9:** Rückgerechnete Trockendichte des in den Versuchsreihen 1, 2 und 4 verwendeten RC-Mix 0/4 mm

Aus 16 Vergleichen zwischen der Trockendichte des Zugabe-Materials (RC-Mix 0/4 mm) im verdichteten Gemisch bei jeweils 30 und 50 M.-% Zugabemenge (VR 1, 2 und 4) konnte das

mittlere Verhältnis dieser beiden Werte zu  $F_{(50/30)} = \rho_{d,ZM(50\%)} / \rho_{d,ZM(30\%)} = 0,97 / 1 = 0,97$  ermittelt werden (Abb. 7.10)<sup>133</sup>. In Abb. 7.10 wurde für kleinere Zugabemengen als 30 M.-% und größere als 50 M.-% linear extrapoliert.



**Abb. 7.10:** Korrekturfaktor für die Trockendichte von RC-Mix 0/4 mm (VR 1, 2 und 4)

Für das Zugabe-Material RC-Mix 0/4 kann nun der Korrekturfaktor nach Abb. 7.10 direkt auf den Eingabeparameter ( $\rho_{d,ZM(X\%)}$ ) für einer Prognose nach Gleichung (6-21) angewendet werden ( $\rho_{d,ZM(Y\% \text{ Zugabemenge})} = \rho_{d,ZM(X\%)} \cdot F_{(Y\%)} / F_{(X\%)}$ ). Diese Möglichkeit eignet sich vorrangig für manuelle Einzelwertprognosen. Alternativ dazu erfolgt die Berücksichtigung über den Faktor  $\delta$  nach Gleichung (6-22). Dieser kann einerseits aus Versuchsdaten über die Änderung der Trockendichte ( $\Delta\rho_{d,ZM}$ ) innerhalb eines bestimmten Intervalls ( $\Delta MV$ ) ermittelt werden:

$$\delta = \frac{\Delta\rho_{d,ZM} / \rho_{d,ZM}}{\Delta MV} \quad (7-1)$$

$\delta$	Faktor zur Abnahme der Trockendichte des Zugabe-Materials mit steigendem Mischungsverhältnis [1/%]
$\Delta\rho_{d,ZM}$	Änderung der Trockendichte des Zugabe-Materials innerhalb des Intervalls $\Delta MV$ ; zum Beispiel aus <u>Abb. 7.9</u> [ $M \cdot L^{-3}$ ]
$\rho_{d,ZM}$	Trockendichte des Zugabe-Materials; nach Gleichung (6-19) [ $M \cdot L^{-3}$ ]
$\Delta MV$	Differenzbetrag der Mischungsverhältnisse, zwischen denen $\Delta\rho_{d,ZM}$ ermittelt wurde [-]

Aus Abb. 7.10 lässt sich für RC-Mix 0/4 der Faktor  $\delta$  zum Beispiel auch ermitteln durch:

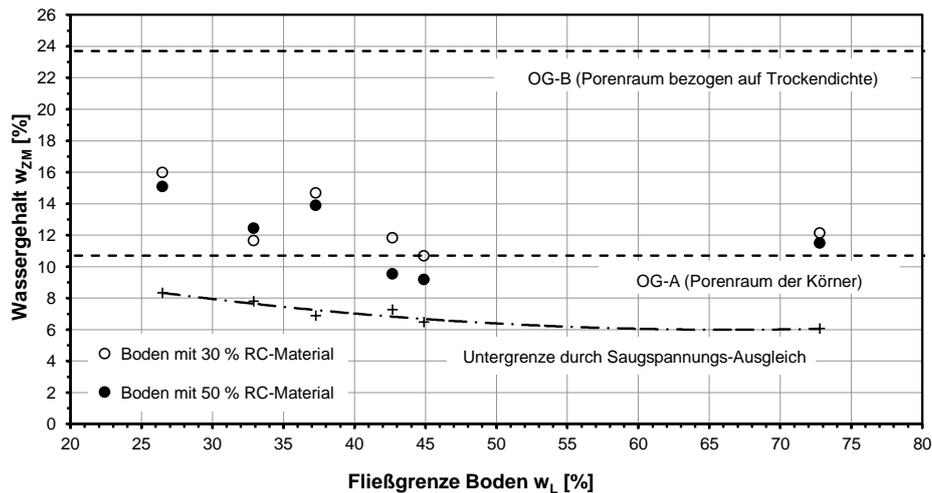
$$\delta = \frac{(1 - F_{(Y\%)} / F_{(X\%)})}{\Delta MV_{(X/Y)}} \quad (7-2)$$

$\delta$	Faktor zur Abnahme der Trockendichte des Zugabe-Materials mit steigendem Mischungsverhältnis [1/%]
$F_{(X\%)}$ und $F_{(Y\%)}$	Faktoren nach <u>Abb. 7.10</u>
$\Delta MV_{(X/Y)}$	Differenzbetrag der nach <u>Abb. 7.10</u> zu den Faktoren $F_{(X\%)}$ und $F_{(Y\%)}$ gehörenden Mischungsverhältnisse = $MV_{(X\%)} - MV_{(Y\%)}$ [%]

<sup>133</sup> Der Vergleich zeigte maximal ein Verhältnis der Trockendichten von 1,0 (Trockendichte des Zugabe-Materials im Gemisch bei beiden Mischungsverhältnissen identisch) und minimal einen Wert von 0,92. Die Schwankungen traten augenscheinlich unabhängig vom zu verbessernden Boden auf.

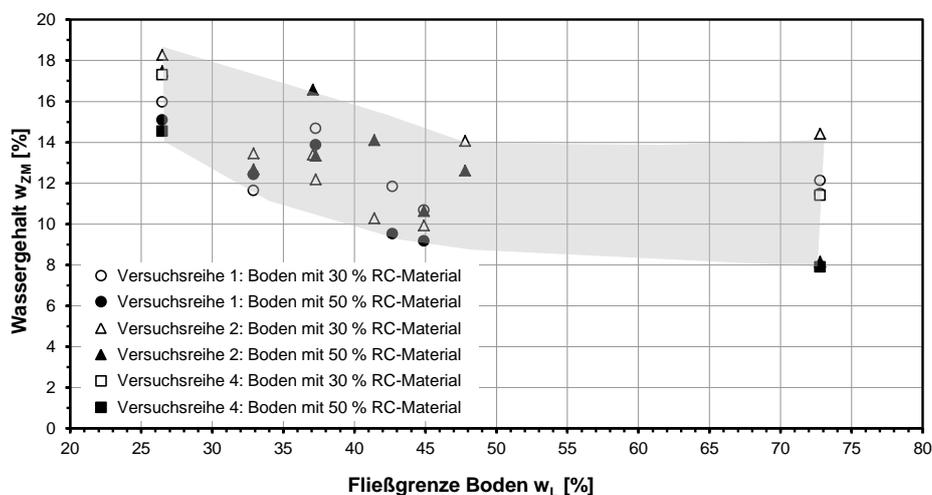
Aus den in [Abb. 7.10](#) dargestellten Ergebnissen zum RC-Mix 0/4 ergibt sich dieser Faktor zu etwa  $\delta = (1 - 0,97 / 1) / 20 \% = 0,0015 [1/\%]$ .

**Wassergehalt des Zugabe-Materials in der verdichteten Mischung.** Unter Zuhilfenahme von Gleichung (6-7) wurde der Wassergehalt des porösen Zugabe-Materials in der jeweils verdichteten Mischung ( $w_{ZM}$ ) aus den Verdichtungsergebnissen der Versuchsreihe 1 rückgerechnet. Die dabei errechneten Werte sind im Vergleich mit den vorab unter Pkt. 7.2.3 ermittelten Grenzwerten in [Abb. 7.11](#) dargestellt.



**Abb. 7.11:** Rückgerechneter Wassergehalt des Zugabe-Materials RC-Mix 0/4 in der verdichteten Mischung (Versuchsreihe 1) im Vergleich zu den Grenzwerten

Die Werte gliedern sich gut zwischen die Grenzwerte ein, in allen Fällen wird der rein durch Saugspannungsausgleich ermittelte Wassergehalt deutlich überschritten. Der Vergleich mit den in [Abb. 7.8](#) dargestellten Ergebnissen zur jeweils entsprechenden Trockendichte des Zugabe-Materials ( $\rho_{d,ZM}$ ) deutet darauf hin, dass der zur Verfügung stehende intragranulare und intergranulare Porenraum des Zugabe-Materials jeweils teilgesättigt sein muss. Nimmt man die Ergebnisse der Versuchsreihen 2 und 4 in die rückrechnende Auswertung mit auf, so ergibt sich die folgende Abbildung:



**Abb. 7.12:** Rückgerechneter Wassergehalt des Zugabe-Materials RC-Mix 0/4 in der verdichteten Mischung (Versuchsreihe 1, 2 und 4)

Die aus [Abb. 7.12](#) ersichtliche Schwankungsbreite der ermittelten Werte resultiert wahrscheinlich aus den über die Versuchsreihen variierenden Eigenschaften des RC-Materials und der Charakterisierung der Böden nur über einen Parameter ( $w_L$ ). Grundsätzlich zeigt die Darstellung aber anschaulich, dass der Wassergehalt des Zugabe-Materials RC-Mix 0/4 in der verdichteten Mischung mit Tonen niedriger Fließgrenze tendenziell höher liegt, als bei Tonen hoher Fließgrenze. Insgesamt wirkt das Ergebnis plausibel, da leicht plastische Böden Bodenwasser weniger stark an sich zu binden vermögen, als ausgeprägt plastische Böden. Daher erscheint es naheliegend, dass auch die durch den Verdichtungsprozess aus dem Bodenanteil in die Poren des Zugabe-Materials transportierbare Wassermenge von den Bodeneigenschaften abhängig ist. Auch der für den reinen Saugspannungsausgleich ermittelte Zusammenhang zwischen Wassergehalt des Zugabe-Materials und Fließgrenze des Bodens (siehe [Abb. 7.6](#)) spiegelt sich in [Abb. 7.12](#) qualitativ wieder.

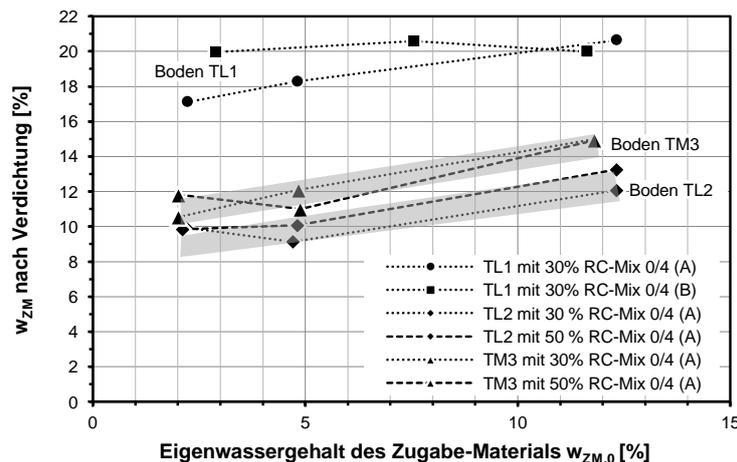
Bis zu diesem Punkt kann also zusammengefasst werden, dass Bodenwasser auch durch die Verdichtung in die intragranularen und intergranularen Poren des RC-Mix bewegt wird und die Menge dieses Wassers von den Bodeneigenschaften des verbesserten Bodens abhängig ist. Bei näherer Betrachtung von [Abb. 7.11](#) fällt als weitere Charakteristik allerdings bereits ins Auge, dass die Ausnutzung der Wasserspeicherkapazität des porösen Zugabe-Materials womöglich nicht markant vom Mischungsverhältnis mit dem Boden abhängt. Um diese Vermutung zu bestätigen oder zu entkräften bot sich die Auswertung der Versuchsreihe 3 (Variation des Eigenwassergehaltes des Zugabe-Materials) an. Die rückrechnende Auswertung überhöht aufgrund der Masseverhältnisse in den Mischungen Fehler bei der Ermittlung des Verdichtungsoptimums (Versuchsdurchführung, Auswertung). Es lohnt sich also ein kurzer Blick darauf, wie stark sich solche Fehler allgemein auf die rückgerechneten Verdichtungseigenschaften (hier  $w_{ZM}$ ) des Zugabe-Materials auswirken. Die Größenordnung dieses Fehlbetrages, in der sich so ein „Ablesefehler“ im rückgerechneten Wassergehalt des Zugabe-Materials niederschlägt, lässt sich aus Gleichung (6-7) abschätzen. Als Differenzbetrag formuliert ergibt sich:

$$\Delta w_{F-ZM} = \frac{\Delta w_{F-Mischung(Pr)} \cdot (1 + MV)}{MV} \quad (7-3)$$

$\Delta w_{F-ZM}$	Fehlbetrag des Wassergehaltes des Zugabe-Materials [-]
$\Delta w_{F-Mischung(Pr)}$	Ablesefehler zum optimalen Wassergehalt der Mischung [-]
MV	Mischungsverhältnis der Trockenmassen [(Zugabemenge in %) / 100]

Für einen beliebigen Ablesefehler von  $\Delta w_{Mischung(Pr)} = 0,5 \%$  ergibt sich beispielsweise bei einer Zugabemenge (Mischungsverhältnis) von 30 % bereits ein potentieller Fehler von  $\Delta w_{ZM} = 2,2 \%$ , bei einer Zugabemenge von 50 % immer noch ein potentieller Fehler von  $\Delta w_{ZM} = 1,5 \%$ . Man erkennt aus diesem Beispiel, dass sich Fehler bei der Ermittlung der Verdichtungseigenschaften der Mischung (hier:  $w_{Mischung(Pr)}$ ) deutlich im Ergebnis der Rückrechnung niederschlagen.

Wertet man nun die Ergebnisse der im Zuge von VR3 durchgeführten Verdichtungsversuche anhand von Gleichung (6-7) aus, so lässt sich der Zusammenhang zwischen dem Eigenwassergehalt des Zugabe-Materials vor Mischung ( $w_{ZM,0}$ ) und dem Wassergehalt des Zugabe-Materials in der verdichteten Mischung ( $w_{ZM}$ ) folgendermaßen darstellen.



**Abb. 7.13: Zusammenhang zwischen dem Eigenwassergehalt des Zugabe-Materials RC-Mix 0/4 vor der Einmischung in den Boden und in der jeweils verdichteten Mischung**

Die Auswertung der Verdichtungsergebnisse der Mischungen des RC-Mix (A) mit Boden TL2 und TM3 in [Abb. 7.13](#) zeigt unabhängig vom Mischungsverhältnis nahezu gleiche Werte für den Wassergehalt des Zugabe-Materials im verdichteten Gemisch ( $w_{ZM}$ ). Aus den Werten ist ableitbar, dass der Unterschied im Betrag von  $w_{ZM}$  zwischen zwei Mischungsverhältnissen in der Regel kleiner ist als der Unterschied, der sich aus einem einzelnen Ablesefehler des optimalen Verdichtungswassergehaltes der Mischung, als Basis der Rückrechnung, von  $\Delta w_{Mischung(Pr)} = 0,5\%$  ergibt. Aus diesem Grund kann für praktische Fragestellungen davon ausgegangen werden, dass das Mischungsverhältnis zwischen Boden und Zugabe-Material nur einen untergeordneten Einfluss auf den Wassergehalt des RC-Materials im verdichteten Gemisch ( $w_{ZM}$ ) nimmt<sup>134</sup>. Damit ist die prognostizierte Verbesserungswirkung nach Gleichung (6-24) etwa linear abhängig vom Mischungsverhältnis.

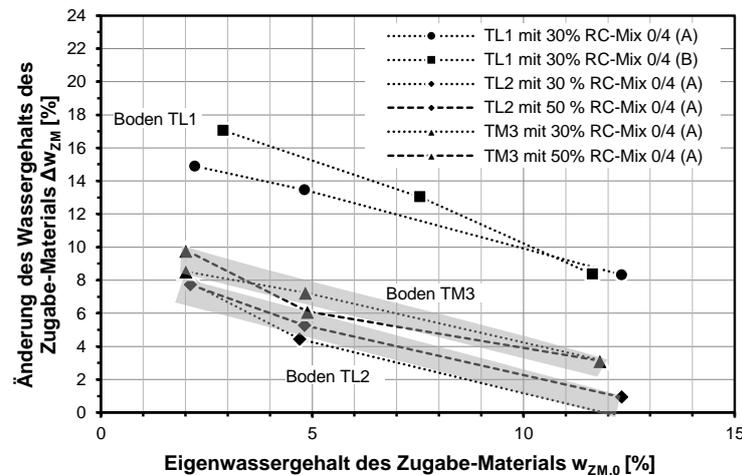
Des Weiteren bestätigt die Auswertung, dass die durch das RC-Material in der verdichteten Mischung gespeicherte Wassermenge abhängig von der Bodenart des zu verbessernden Bodens ist und zeigt zusätzlich, dass diese mit steigendem Eigenwassergehalt des Zugabe-Materials tendenziell zunimmt. Die weniger umfangreichen Versuche mit dem etwas feineren Zugabe-Material RC-Mix 0/4 (B) zeigen keine ausgeprägte Abhängigkeit des Wassergehaltes des Zugabe-Materials in der verdichteten Mischung ( $w_{ZM}$ ) vom Eigenwassergehalt vor der Mischung ( $w_{ZM,0}$ )<sup>135</sup>.

Rechnet man auf die Änderung des Wassergehaltes zurück ( $\Delta w_{ZM} = w_{ZM} - w_{ZM,0}$ ), erhält man folgende Darstellung in [Abb. 7.14](#). Aus dem Vergleich der Ergebnisse am Boden TL1 wird deutlich, dass der feinere RC-Mix 0/4 (B) zu einer stärkeren Wasseraufnahme fähig ist als

<sup>134</sup> Streng genommen gilt diese Aussage auf dieser Datengrundlage für Variationen in der Zugabemenge von +/- 20 M.-%.

<sup>135</sup> Der Wassergehalt des Zugabe-Materials in der verdichteten Mischung ( $w_{ZM}$ ) ist nach oben hin durch das zur Verfügung stehende Porenvolumen begrenzt (vgl. Pkt. 7.2.3). Allein der rückgerechnete Wassergehalt des Zugabe-Materials ( $w_{ZM}$ ) der Mischungen des Bodens TL1 mit RC-Mix 0/4 (B) zeigt in [Abb. 7.13](#) eine vom Eigenwassergehalt des Zugabe-Materials ( $w_{ZM,0}$ ) unabhängige Entwicklung. Dies kann als Hinweis dafür gewertet werden, dass die intergranularen und intragranularen Poren dieses feineren RC-Materials (siehe Pkt. 4.2.2) durch die Verdichtung jeweils nahezu aufgesättigt wurden. Die Verwendung von feinkörnigem RC-Material bedeutet immerhin kurze Transportwege für das Bodenwasser in die Poren zwischen die RC-Körner und in die Poren der RC-Körner selbst.

der etwas gröbere RC-Mix 0/4 (A) und, dass die Wasseraufnahmefähigkeit des Zugabe-Materials mit steigendem Eigenwassergehalt deutlich abfällt.



**Abb. 7.14:** Zusammenhang zwischen der Änderung des Wassergehaltes des Zugabe-Materials und dessen Eigenwassergehalt

### 7.3 Beispiele zur Anwendung des Modells zur Prognose

#### 7.3.1 Allgemeines

Die Anwendung des Modells zur Prognose ist grundsätzlich für die Bodenverbesserung feinkörniger Böden mit unterschiedlichen porösen Zugabe-Materialien möglich. Um dies zu verdeutlichen, werden die Versuchsergebnisse unterschiedlicher Mischungen aus Versuchsreihe 4 mit einer Prognose verglichen. Grundlage der Prognosen sind dabei jeweils Eingabeparameter EP ( $w_{ZM}$ ,  $\rho_{d,ZM}$ ), die aus einem Versuchsergebnis VE ( $w_{\text{Mischung(Pr)}}$ ,  $\rho_{d,\text{Mischung(Pr)}}$ ) mittels Gleichung (6-7) und Gleichung (6-19) rückgerechnet wurden (siehe Tab. 7.3). Als weitere Eingabeparameter wurden entsprechend dem Modellansatz die Verdichtungseigenschaften des Bodenanteils ( $w_{\text{Boden(Pr)}}$ ,  $\rho_{d,\text{Boden(Pr)}}$ ) herangezogen (siehe Tab. 4.1).

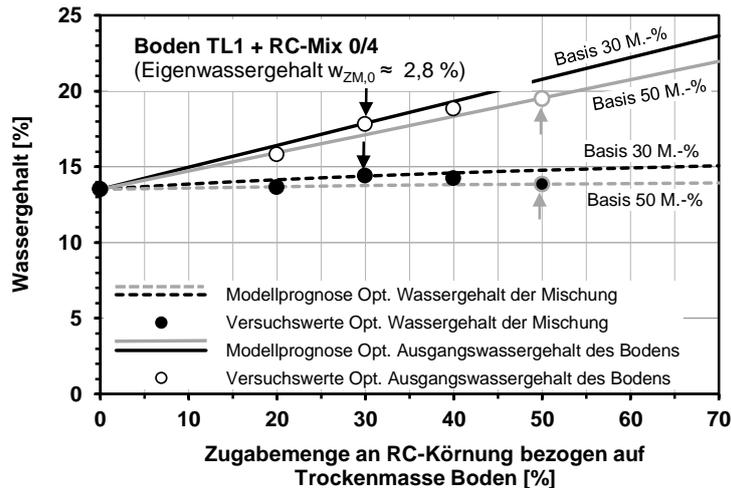
**Tab. 7.3:** Versuchswerte und Basis der Prognosen

Zugabemenge	0 M.-%	10 M.-%	20 M.-%	30 M.-%	40 M.-%	50 M.-%	60 M.-%	70 M.-%
Versuchsergebnis (VE)	VE	-	VE	VE	VE	VE	-	(VE)
Prognose (Basis 30 M.-%)	P ←	← P	← P	← EP	← P	← P	← P	← P
Prognose (Basis 50 M.-%)	P ←	← P	← P	← P	← P	← EP	← P	← P

Als Basis der Prognosen wurden jeweils die Mischungen mit 30 M.-% und 50 M.-% Zugabe-Material ausgewählt. Die Prognose des optimalen Wassergehaltes der Mischung ( $w_{\text{Mischung(Pr)}}^*$ ), der Trockendichte der Mischung ( $\rho_{d,\text{Mischung(Pr)}}^*$ ) und des optimal verdichtbaren Ausgangswassergehaltes des Bodens ( $w_{\text{Boden(Pr),0}}^*$ ) erfolgte dann anhand dieser Parameter für Zugabemengen von 0 bis 70 M.-%. Verwendet wurde dazu Gleichung (6-20) für die Ermittlung von  $w_{\text{Mischung(Pr)}}^*$ , Gleichung (6-21) für die Ermittlung von  $\rho_{d,\text{Mischung(Pr)}}^*$  unter Ansatz eines konstanten Eingabeparameters  $\rho_{d,ZM}$ , Gleichung (6-22) zur Ermittlung von  $\rho_{d,\text{Mischung(Pr)}}^*$  bei Ansatz eines veränderlichen Eingabeparameters  $\rho_{d,ZM}$  ( $\delta$ -Faktor) und Gleichung (6-24) für die Ermittlung von  $w_{\text{Boden(Pr),0}}^*$ .

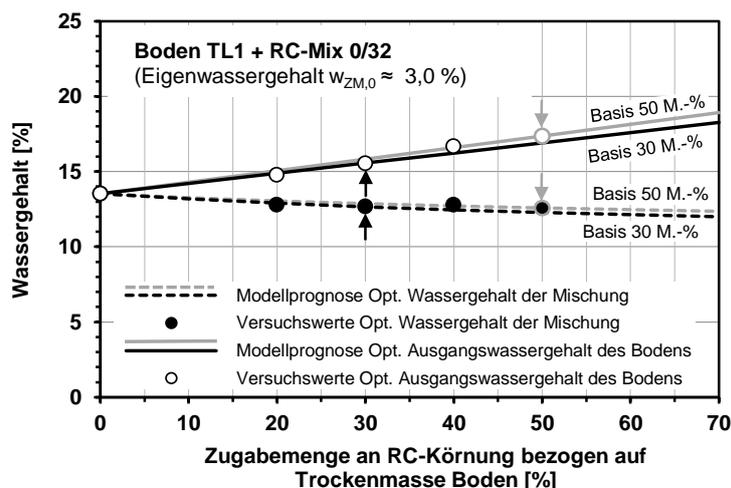
### 7.3.2 Prognose des optimalen Wassergehaltes

**Boden TL1 mit RC-Mix 0/4 und 0/32.** In [Abb. 7.15](#) ist für die Verbesserung des Bodens TL1 mit RC-Mix 0/4 die Prognose den Versuchswerten gegenübergestellt. Die Punkte mit weißer Füllung bezeichnen dabei jeweils den optimalen Wassergehalt des Ausgangsbodens (und weisen damit auf den Verbesserungserfolg durch Erweiterung der Verarbeitbarkeit hin). Jene Punkte mit schwarzer Füllung zeigen die aus den Versuchen ermittelten optimalen Wassergehalte der Mischungen (reduzierte Wassergehalte). Die Modellprognosen sind als Linien eingezeichnet, die Basis (zur Rückrechnung der Eingabeparameter  $w_{ZM}$ ,  $\rho_{d,ZM}$ ) dieser Prognosen ist jeweils mit einem Pfeil gekennzeichnet.



**Abb. 7.15:** Vergleich von Prognose und Versuchswerten für Mischungen des Bodens TL1 mit RC-Mix 0/4, optimaler Wassergehalt bei Verdichtung mit Proctorenergie

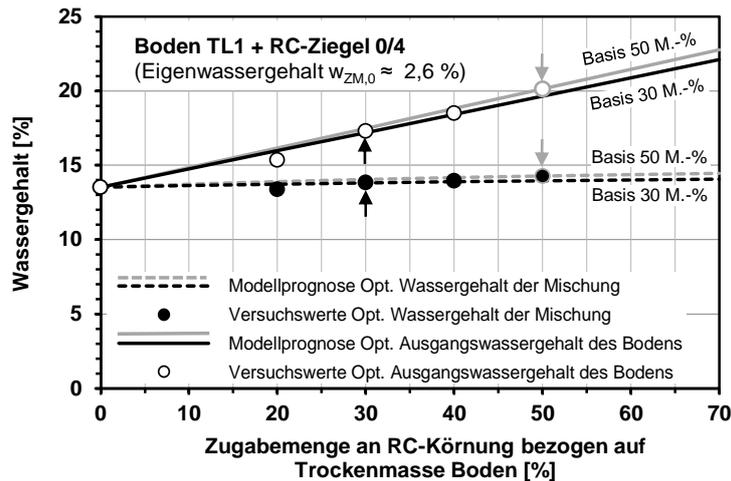
Auch der Vergleich der Prognose mit Versuchswerten für die Mischungen des Bodens TL1 mit dem größeren RC-Mix 0/32, dargestellt in [Abb. 7.16](#), weist auf eine hohe Prognosegenauigkeit hin.



**Abb. 7.16:** Vergleich von Prognose und Versuchswerten für Mischungen des Bodens TL1 mit RC-Mix 0/32, optimaler Wassergehalt bei Verdichtung mit Proctorenergie

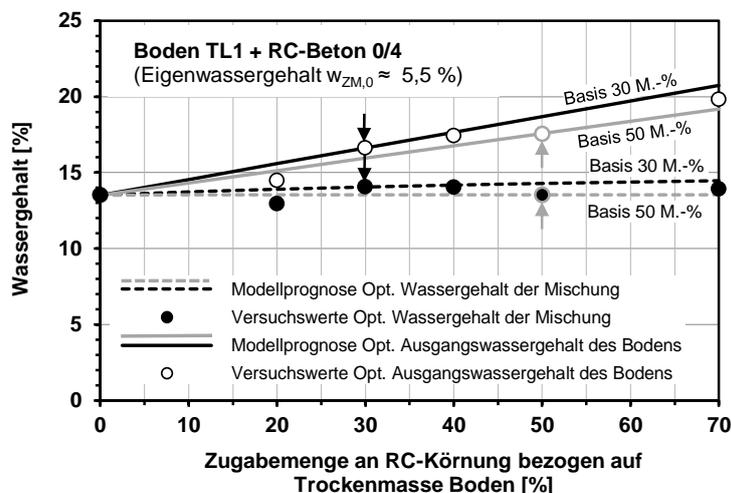
Bei beiden Zugabe-Materialien stimmt jeweils die Prognose des optimalen Wassergehaltes der Mischung ( $w_{\text{Mischung}}^*$ ), als auch jene des optimal verdichtbaren Ausgangswassergehaltes des Bodenanteils ( $w_{\text{Boden(Pr),0}}^*$ ) allgemein gut mit den Versuchswerten überein.

**Boden TL1 mit RC-Ziegel 0/4.** Das Modell wurde auch an den Verdichtungsergebnissen der Mischungen des Bodens TL1 mit Ziegelbruchmaterial angewendet. Die Darstellung in [Abb. 7.17](#) beweist, dass die optimalen Wassergehalte der Mischung und des Bodenanteils vor der Mischung (Ausgangswassergehalt) ohne besondere Abweichungen prognostiziert werden können.



**Abb. 7.17:** Vergleich von Prognose und Versuchswerten für Mischungen des Bodens TL1 mit RC-Ziegel 0/4, optimaler Wassergehalt bei Verdichtung mit Proctorenergie

**Boden TL1 mit RC-Beton 0/4.** Als letztes Beispiel sollen die Ergebnisse der Verdichtungsversuche an Mischungen des Bodens TL1 mit Betonbruch 0/4 herangezogen werden. Dabei wurden die Ergebnisse jener Mischungen verwendet, bei denen das Zugabe-Material einen Eigenwassergehalt von etwa  $w_{\text{ZM},0} \approx 5,5\%$  aufwies. Dieser Eigenwassergehalt des Zugabe-Materials lag deutlich höher als jener der Zugabe-Materialien der vorangegangenen Beispiele. Es lagen außerdem Ergebnisse aus Mischungen mit Zugabemengen bis 70 M.-% vor.



**Abb. 7.18:** Vergleich von Prognose und Versuchswerten für Mischungen des Bodens TL1 mit RC-Beton 0/4, optimaler Wassergehalt bei Verdichtung mit Proctorenergie

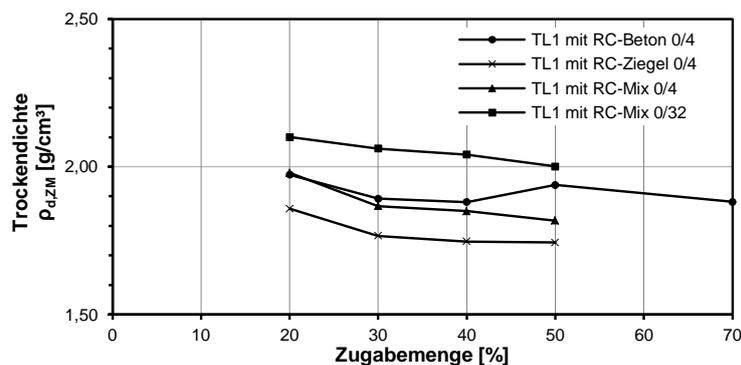
Der Vergleich der Prognosen mit den Versuchsergebnissen in [Abb. 7.18](#) zeigt auch hier eine sehr gute Übereinstimmung.

**Zusammenfassung.** Insgesamt lassen sich die optimalen Wassergehalte sehr gut prognostizieren. Die Rückrechnung des Eingabeparameters  $w_{ZM}$  aus einem Einzelergebnis sollte, falls ausreichend sorgfältig ermittelt, für ein hochwertiges Prognoseergebnis ausreichen (siehe Pkt. 7.4). Stehen mehr als das Verdichtungsergebnis einer einzelnen Mischung zur Rückrechnung zur Verfügung, so kann die Genauigkeit der Prognose verbessert werden. Dazu wird lediglich die Mittelung der rückgerechneten Werte für den Wassergehalt des Zugabematerials in der verdichteten Mischung ( $w_{ZM}$ ) empfohlen.

### 7.3.3 Prognose der Trockendichte im Optimum

**Allgemeines.** Zum Vergleich prognostizierter Trockendichten mit Versuchswerten wurde die gleichen Mischungen herangezogen wie unter Pkt. 7.3.2. Zur Prognose wurde einerseits Gleichung (6-21) verwendet, in der der Eingabeparameter  $\rho_{d,ZM}$  vereinfachend als konstanter Wert eingeht. Vergleichend dazu erfolgte die Prognose mit Gleichung (6-22) in der der Eingabeparameter  $\rho_{d,ZM}$  als linear veränderlicher Wert verwendet wird. Zur Ermittlung des dazu erforderlichen empirischen Faktors  $\delta$  kann entweder in einer ersten Näherung auf die Erkenntnisse zum RC-Mix 0/4 als Zugabe-Material zurückgegriffen werden (Pkt. 7.2.4) oder man verwendet eigene Werte. Diese sind zwar streng genommen für die Erstellung einer Prognose vorab eigentlich nicht bekannt, vor allem die Ableitung der Werte für die Zugabematerialien RC-Mix 0/32, RC-Ziegel 0/4 und RC-Beton 0/4 erscheint aber ohnehin wertvoll.

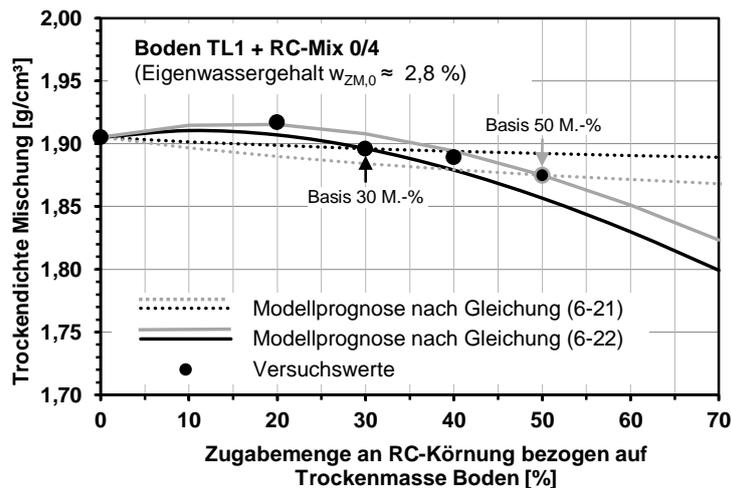
Wird nun beispielsweise die Änderung des Eingabeparameters  $\rho_{d,ZM}$  für die Mischungen des Bodens TL1 mit RC-Mix 0/4 und RC-Mix 0/32 aus [Abb. 7.19](#) linear mit  $0,035 \text{ g/cm}^3$  und  $0,05 \text{ g/cm}^3$  je 10 M.-% Zugabemenge berücksichtigt, so ergibt sich nach Gleichung (7-1) der gesuchte Faktor zu etwa  $\delta_{RC-Mix\ 0/4} \approx 0,0017 [1/\%]$  und  $\delta_{RC-Mix\ 0/32} \approx 0,0027 [1/\%]$ .



**Abb. 7.19:** Änderung Trockendichte der unterschiedlichen Zugabe-Materialien

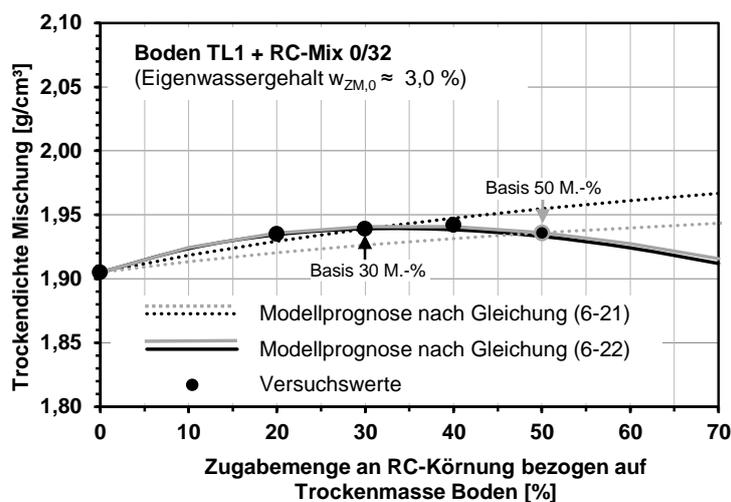
Analog kann für den RC-Ziegel 0/4 und RC-Beton 0/4 als Zugabe-Material vorgegangen werden. In [Abb. 7.19](#) ist ersichtlich, dass sich die Trockendichte des Ziegelbruches in der verdichteten Mischung mit steigender Zugabemenge etwa linear um  $0,035 \text{ g/cm}^3$  je 10 M.-% Zugabemenge ändert, jene des RC-Betons der Körnung 0/4 um etwa  $0,02 \text{ g/cm}^3$  je 10 M.-%. Wiederum nach Gleichung (7-1) ermittelt ergeben sich die gesuchten Faktoren zu  $\delta_{RC-Ziegel\ 0/4} \approx 0,002 [1/\%]$  und  $\delta_{RC-Beton\ 0/4} \approx 0,001 [1/\%]$ . Für alle untersuchten Materialien liegen die Werte für den Faktor  $\delta$  also im Bereich zwischen  $\delta \approx 0,001$  und  $0,003 [1/\%]$ .

**Boden TL1 mit RC-Mix 0/4.** Als erstes Beispiel lässt sich die Mischung des Bodens TL1 mit RC-Mix 0/4 aus Versuchsreihe 4 darstellen. Wiederum sind die Versuchsdaten als Punkte mit schwarzer Füllung dargestellt. Die Prognosen anhand von Gleichung (6-21) sind als gepunktete Linien in Abb. 7.20, jene Prognosen anhand von Gleichung (6-22) sind als durchgezogene Linien eingezeichnet. Im Vergleich der absoluten Werte passen die Versuchsergebnisse gut mit beiden Prognosen überein. Unter Berücksichtigung einer veränderlichen Trockendichte des Zugabe-Materials ( $\rho_{d,ZM}$  modifiziert über Faktor  $\delta$ ) kann die Entwicklung der Trockendichte der verdichteten Mischungen aber vor allem in Bereichen deutlich besser abgebildet werden, die weiter von der Basis der Prognose wegliegen.



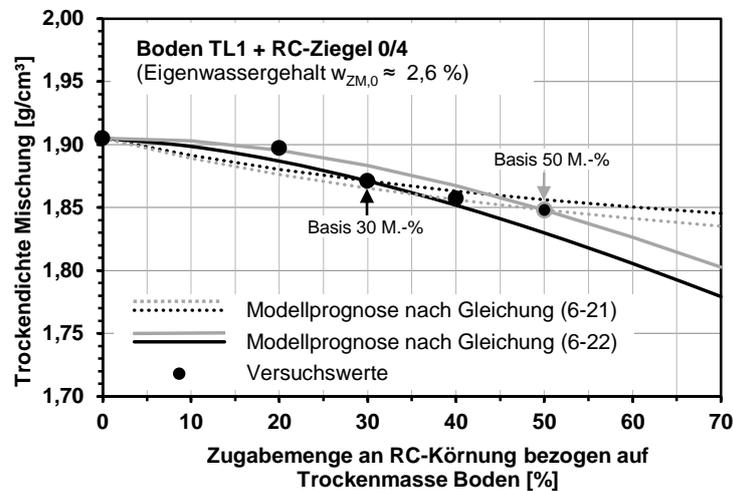
**Abb. 7.20:** Vergleich von Prognose und Versuchswerten für Mischungen des Bodens TL1 mit RC-Mix 0/4, Trockendichte im Verdichtungsoptimum bei Verdichtung mit Proctorenergie

**Boden TL1 mit RC-Mix 0/32.** Auch der Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Prognosen für die Mischung des Bodens TL1 mit RC-Mix 0/32 zeigt grundsätzlich für beide Ansätze nach Gleichung (6-21) und Gleichung (6-22) eine gute Übereinstimmung (Abb. 7.21). Trotzdem ist der Vorteil bei der Anwendung von Gleichung (6-22) deutlich erkennbar.



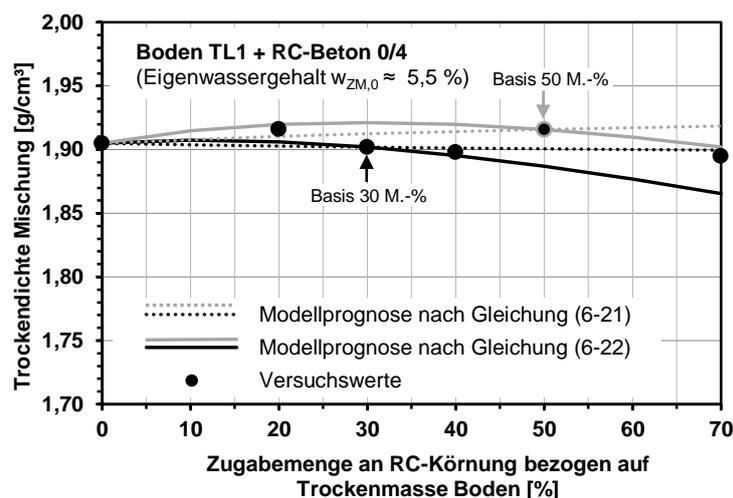
**Abb. 7.21:** Vergleich von Prognose und Versuchswerten für Mischungen des Bodens TL1 mit RC-Mix 0/32, Trockendichte im Verdichtungsoptimum bei Verdichtung mit Proctorenergie

**Boden TL1 mit RC-Ziegel 0/4.** Der Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Prognosewerten bei Verwendung von RC-Ziegel der Körnung 0/4 mm als Zugabe-Material zur Bodenverbesserung sind in [Abb. 7.22](#) dargestellt. Das Bild bestätigt die Beobachtungen aus den vorigen Vergleichen (Mischungen mit RC-Mix 0/4 und RC-Mix 0/32).



**Abb. 7.22:** Vergleich von Prognose und Versuchswerten für Mischungen des Bodens TL1 mit RC-Ziegel 0/4, Trockendichte im Verdichtungs optimum bei Verdichtung mit Proctorenergie

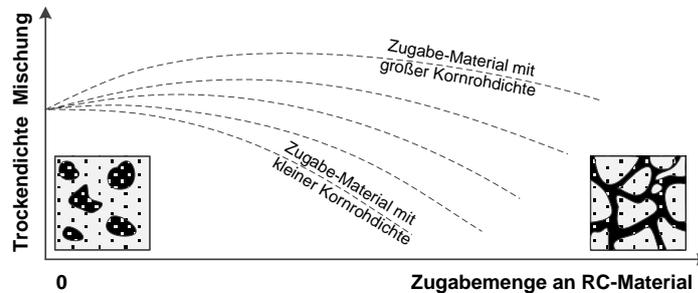
**Boden TL1 mit RC-Beton 0/4.** In [Abb. 7.23](#) zeigt der Vergleich der prognostizierten Trockendichten zu den Versuchswerten keine maßgeblichen Abweichungen. Je nachdem, welche Mischung als Basis der Prognose verwendet wurde, ergaben sich leicht unterschiedliche Entwicklungen. Bei dieser Mischung scheint die Prognose mit Gleichung (6-21) zuverlässigere Ergebnisse zu liefern. Diese Beobachtung soll allerdings nur als Hinweis darauf dienen, dass der Vorteil der Prognose mit Gleichung (6-22) durch die dem Proctorversuch innewohnenden Versuchs- und Auswertungsschwankungen schnell relativiert werden kann.



**Abb. 7.23:** Vergleich von Prognose und Versuchswerten für Mischungen des Bodens TL1 mit RC-Beton 0/4, Trockendichte im Verdichtungs optimum bei Verdichtung mit Proctorenergie

**Zusammenfassung.** Beide Gleichungen zur Prognose der Trockendichte der verdichteten Mischung, Gleichung (6-21) und (6-22), sind grundsätzlich zur Prognose gut anwendbar. Die Ergebnisse unterstreichen allerdings den Vorteil der Berücksichtigung eines veränderlichen

Wertes für den Eingabeparameter ( $\rho_{d,ZM}$ ). Die mit Gleichung (6-22) modellierte Entwicklung der Trockendichte weist für alle untersuchten Mischungen eine nach oben konvex gekrümmte Form auf. Dies wird durch die Versuchsdaten gestützt und ist anhand der Modellvorstellung ableitbar (siehe Pkt. 6.5). In Abb. 7.24 sind typische Kurvenverläufe gemäß der Modellvorstellung in Abhängigkeit von der Kornrohndichte des Zugabe-Materials und dem Mischungsverhältnis abgebildet.



**Abb. 7.24:** Typische Entwicklung der Trockendichte mit steigender Zugabemenge

Stehen mehrere Versuchsergebnisse als „Stützpunkte“ dieser Kurven zur Rückrechnung der Eingabeparameter zur Verfügung, so kann der Parameter  $\delta$  daraus nach Pkt. 7.2.4 ermittelt werden. Ist dies nicht der Fall, so wird die Abschätzung dieses Parameters empfohlen. Für RC-Mix 0/4 wurde  $\delta$  als Mittelwert aus VR 1, 2 und 4 zu  $\delta_{RC-Mix\ 0/4} \approx 0,0015$  [1/%] ermittelt. Die Auswertung der Versuche mit RC-Mix 0/32 zeigte einen Wert  $\delta_{RC-Mix\ 0/32} \approx 0,0027$  [1/%], jene der Versuche mit dem RC-Ziegel 0/4 einen Wert von  $\delta_{RC-Ziegel\ 0/4} \approx 0,002$  [1/%] und die Auswertung der Versuche bei Verwendung des Betonbruchs  $\delta_{RC-Beton\ 0/4} \approx 0,001$  [1/%]. Diese Werte können als erste Anhaltspunkte für eine Abschätzung verwendet werden.

## 7.4 Prognosegenauigkeit

**Fehlerquellen.** Für Angaben zur Prognosegenauigkeit ist es sinnvoll vorab auf die Quellen möglicher Unterschiede zwischen Versuchswerten und Prognosewerten näher einzugehen. Der Vergleich beider Werte bestimmt immerhin jede Angabe zur Prognosegenauigkeit. Fehler können grundsätzlich auf beiden Seiten auftreten, beim Versuchswert und bei der Prognose.

- **Fehler in den Prognosewerten:** Fehler, die den Prognosewerten zugeordnet werden können, sind einzuteilen in zwei Kategorien: a) Fehler die dem Modell zuzuordnen sind und b) Fehler die auf fehlerhafte Eingabeparameter ( $w_{ZM}$ ,  $\rho_{d,ZM}$ ) zurückgeführt werden können. Fehler der Kategorie a) ergeben sich aus den Modellvereinfachungen und können durch Verbesserungen daran ausgeglichen werden. Fehler der Kategorie b) können nicht ausnahmslos vermieden werden, sie wohnen der Versuchsdurchführung und Auswertung inne.
- **Fehler in den Vergleichswerten aus Versuchen:** Auch bei der sorgsamsten Versuchsdurchführung können Ungleichmäßigkeiten in der Versuchsdurchführung und Auswertung von Verdichtungsversuchen nicht vollkommen ausgeschlossen werden.

Unter einfacheren Umständen sollte die Prognosegenauigkeit nur aus dem Unterschied zwischen Versuchswerten und der Modellrechnung abschätzbar sein. Da aber die Fehlerquellen

ineinander greifen, ergibt sich der Betrag der Abweichung des Modells vom Versuchswert jeweils aus der Summe einzelner Fehlbeträge. Diese voneinander zu trennen ist ohne weiteres nicht möglich. In diesem Kontext ist es aber durchaus sinnvoll zu ermitteln, wie stark sich Fehler bei der Ermittlung der Eingabeparameter ( $w_{ZM}$ ,  $\rho_{d,ZM}$ ) auf die Prognose auswirken.

Da in Mischungen zur Bodenverbesserung - dem Sinne einer solchen Maßnahme entsprechend - in der Regel mehr Boden als Zugabe-Material vorhanden ist, reagiert die Rückrechnung von Eingabeparametern sensibel auf Fehler bei der Durchführung und Auswertung jener Verdichtungsversuche, die als Basis der Rückrechnung verwendet werden. Ein Fehler bei der versuchstechnischen Ermittlung des optimalen Wassergehaltes einer Mischung ( $w_{Mischung(Pr)}$ ) wird in der Rückrechnung nach Gleichung (6-7) entsprechend dem Mischungsverhältnis skaliert. Wird dieser rückgerechnete Wert dann zur Prognose der Verdichtungseigenschaften bei anderen Mischungsverhältnissen gemäß Pkt. 6.7 verwendet, so wird er allerdings rückskaliert und geht daher nicht voll in den Prognosefehler ein. In welcher Größenordnung er letztlich in der Prognose eingeht, lässt sich aus dem bestehenden Formelwerk zum Modell ableiten. Formuliert man die Gleichungen (6-7) und (6-20) als Differenzbeträge, so fällt der Absolutwert für den Wassergehalt des Bodens ( $w_{Boden(Pr)}$ ) aus der jeweiligen Gleichung weg. Wird in weiterer Folge die aus der umgeformten Gleichung (6-7) ermittelte Bestimmungsgleichung für  $\Delta w_{ZM}$  in die nach  $\Delta w_{Mischung(Pr)}^*$  umgeformte Gleichung (6-20) eingesetzt, so erhält man die Bestimmungsgleichung für den Prognosefehler, der sich aus einem Fehler bei der Ermittlung der Eingabeparameter aus der Basis der Prognose ergibt:

$$\Delta w_{F-Mischung(Pr)}^* = \Delta w_{F-Mischung(Pr)} \cdot \frac{MV \cdot (1 + MV_B)}{MV_B \cdot (1 + MV)} \quad (7-4)$$

$\Delta w_{F-Mischung(Pr)}^*$	Prognosefehler zum optimalen Wassergehalt der Mischung [-]
$\Delta w_{F-Mischung(Pr)}$	Abweichung des abgelesenen Wertes für den optimalen Wassergehalt der verdichteten Mischung bei Mischungsverhältnis MV vom tatsächlichen [-]
$MV_B$	Mischungsverhältnis jener Mischung, die als Basis der Prognose dient; Mischungsverhältnis der Trockenmassen [(Zugabemenge in %) / 100] [-]
MV	Mischungsverhältnis jener Mischung, die als Ziel der Prognose dient; Mischungsverhältnis der Trockenmassen [(Zugabemenge in %) / 100] [-]

Wird Gleichung (7-4) für unterschiedliche Kombinationen von MV und  $MV_B$  ausgewertet, so fällt auf, dass der Prognosefehler bei einer Prognose von einem niedrigen Mischungsverhältnis hin zu einem höheren Mischungsverhältnis (Vorwärts-Prognose) über den Betrag des Ablesefehlers ansteigt. Wird hingegen von hohen Mischungsverhältnissen hin zu niedrigeren prognostiziert (Rückwärts-Prognose), so liegt der Betrag des Prognosefehlers allgemein unter dem Betrag des Ablesefehlers. Da Versuchs- und Ablesefehler also bei der Vorwärts-Prognose vergrößernd skaliert werden, bietet sich die Rückwärts-Prognose als das zuverlässigere Verfahren an.

**Angaben zur Prognosegenauigkeit anhand von Versuchswerten.** Nachfolgend werden Versuchsergebnisse aus den Versuchsreihen 1, 2 und 4 mit Prognosen verglichen. In den genannten Versuchsreihen stehen Versuchsergebnisse zur Verbesserung feinkörniger Böden mit je 30 M.-% und 50 M.-% RC-Mix 0/4 zur Verfügung. Bei den durchgeführten Vergleichen

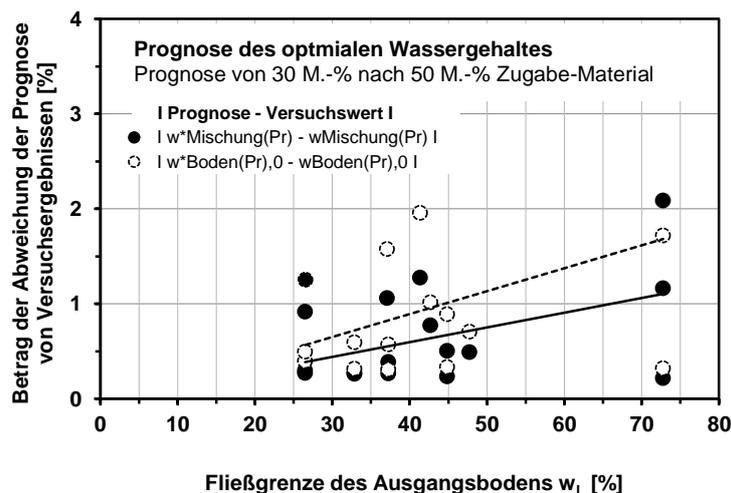
chen dient dabei abwechselnd je ein rückgerechneter Wert aus einem Mischungsverhältnis als Basis für die Prognose für das jeweils andere Mischungsverhältnis.

Die oben beschriebene Feststellung zur günstigen Prognoserichtung von hohen Zugabemengen hin zu niedrigen wird durch die Auswertung der eigenen Versuche in Tab. 7.4 bestätigt. Darin ist der Betrag der mittleren Abweichung der Prognose vom Versuchswert dargestellt. Die Vergleiche für die Trockendichte erfolgte anhand der Prognose mit Gleichung (6-21) unter Berücksichtigung eines konstanten Wertes für die Trockendichte des Zugabe-Materials in der verdichteten Mischung ( $\rho_{d,ZM}$ ).

**Tab. 7.4: Abweichung der Prognose von Versuchsergebnissen (Versuchsreihen 1, 2 und 4)**

	$\Delta w_{\text{Mischung(Pr)}} [\%]$	$\Delta w_{\text{Boden(Pr),0}} [\%]$	$\Delta \rho_{d,\text{Mischung(Pr)}} [\text{g/cm}^3]$
Prognose von 30 M.-% nach 50 M.-% Zugabemenge (16 Vergleiche)			
Mittelwert	0,65	0,98	0,019
Minimal	0,21	0,30	0,000
Maximal	2,08	3,24	0,049
Prognose von 50 M.-% nach 30 M.-% Zugabemenge (16 Vergleiche)			
Mittelwert	0,45	0,57	0,013
Minimal	0,15	0,00	0,000
Maximal	1,44	2,03	0,034
Anm.:			
$\Delta w_{\text{Mischung(Pr)}}$	Betrag der Abweichung der des prognostizierten optimalen Wassergehaltes der Mischung vom Versuchswert = $ w^*_{\text{Mischung(Pr)}} - w_{\text{Mischung(Pr)}} $		
$\Delta w_{\text{Boden(Pr),0}}$	Betrag der Abweichung der des prognostizierten optimalen Ausgangswassergehaltes des Bodens vom Versuchswert = $ w^*_{\text{Boden(Pr),0}} - w_{\text{Boden(Pr),0}} $		
$\Delta \rho_{d,\text{Mischung(Pr)}}$	Betrag der Abweichung der der prognostizierten Trockendichte des Gemisches im Verdichtungsoptimum vom Versuchswert = $ \rho^*_{d,\text{Mischung(Pr)}} - \rho_{d,\text{Mischung(Pr)}} $		

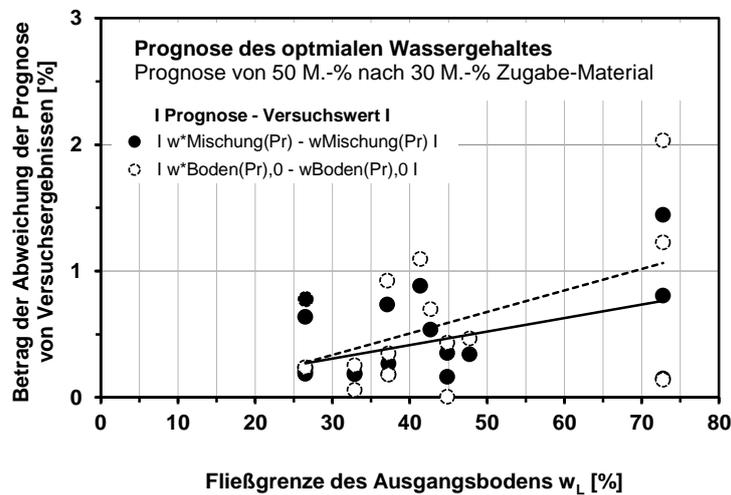
Korrigiert man den Eingabeparameter zur Trockendichte des Zugabe-Materials nach Abb. 7.10 (Anwendung von Gleichung (6-22) mit  $\delta = 0,0015$ ), so lassen sich die Mittelwerte der Abweichung der prognostizierten zur gemessenen Trockendichte der Mischungen weiter auf  $0,013 \text{ g/cm}^3$  (Prognose von 30 M.-% nach 50 M.-% Zugabe) respektive  $0,009 \text{ g/cm}^3$  (Prognose von 50 M.-% nach 30 M.-% Zugabe) abmindern.



**Abb. 7.25: Abweichung der Prognose von Versuchsergebnissen als Funktion der Fließgrenze des verbesserten Bodens (Prognose 30 M.-% nach 50 M.-%)**

Der in Tab. 7.4 dargestellte Vergleich bezieht alle untersuchten Böden mit ein, auch jene mit ausgeprägt plastischen Eigenschaften. Es ist eine berechtigte Annahme, dass das Fehlerpotential bei der Ermittlung des optimalen Wassergehaltes bei flacheren Verdichtungskurven

höher liegt als bei Kurven mit deutlich ausgeprägtem Verdichtungsoptimum. Es wird erwartet, dass der zugehörige Fehleranteil aus Versuchsdurchführung und Auswertung also anwächst. Während die Fehleranteile im Detail nicht zugeordnet werden können, bildet die Summe dieser Anteile (Abweichung der Prognosewerte von Versuchsergebnissen) diese Abhängigkeit von der Plastizität (hier: Fließgrenze) in [Abb. 7.25](#) deutlich ab. Ein qualitativ sehr ähnliches Bild lässt sich für die umgekehrte Prognoserichtung ([Abb. 7.26](#)) erstellen:



**Abb. 7.26:** Abweichung der Prognose von Versuchsergebnissen als Funktion der Fließgrenze des verbesserten Bodens

Die Bodenverbesserung mit RC-Mix 0/4 führt vor allem bei Böden mit ausgeprägt plastischen Eigenschaften nicht zum Erfolg, nach Pkt. 4.5.1 wird die Anwendung des Verbesserungsverfahrens ohnehin auf Böden mit einer Fließgrenze  $\leq 40\%$  eingeschränkt. Nimmt man die Ergebnisse der Mischungen mit dem ausgeprägt plastischen Ton (TA1) also aus dem Vergleich nach [Tab. 7.4](#), so lässt sich die Prognosegenauigkeit für die optimalen Wassergehalte weiter erhöhen. Für die Verbesserung leicht- bis mittelplastischer Tone lässt sich [Tab. 7.4](#) also folgendermaßen präzisieren ([Tab. 7.5](#)):

**Tab. 7.5:** Abweichung der Prognose von Versuchsergebnissen für Böden mit  $w_L < 50\%$  (Versuchsreihen 1, 2 und 4)

	$\Delta w_{\text{Mischung(Pr)}} [\%]$	$\Delta w_{\text{Boden(Pr),0}} [\%]$	$\Delta \rho_{d,\text{Mischung(Pr)}} [\text{g/cm}^3]$
Prognose von 30 M.-% nach 50 M.-% Zugabemenge (13 Vergleiche)			
Mittelwert	0,54	0,80	0,020
Minimal	0,23	0,30	0,000
Maximal	1,27	1,96	0,049
Prognose von 50 M.-% nach 30 M.-% Zugabemenge (13 Vergleiche)			
Mittelwert	0,37	0,44	0,014
Minimal	0,16	0,00	0,000
Maximal	0,88	1,09	0,034
Anm.:			
$\Delta w_{\text{Mischung(Pr)}}$	Betrag der Abweichung des prognostizierten optimalen Wassergehaltes der Mischung vom Versuchswert = $ w^*_{\text{Mischung(Pr)}} - w_{\text{Mischung(Pr)}} $		
$\Delta w_{\text{Boden(Pr),0}}$	Betrag der Abweichung des prognostizierten optimalen Ausgangswassergehaltes des Bodens vom Versuchswert = $ w^*_{\text{Boden(Pr),0}} - w_{\text{Boden(Pr),0}} $		
$\Delta \rho_{d,\text{Mischung(Pr)}}$	Betrag der Abweichung der prognostizierten Trockendichte des Gemisches im Verdichtungsoptimum vom Versuchswert = $ \rho^*_{d,\text{Mischung(Pr)}} - \rho_{d,\text{Mischung(Pr)}} $		

Auch in [Tab. 7.5](#) bezieht sich die Prognose der Trockendichte der Mischungen auf Gleichung (6-21). Durch Ansatz von Gleichung (6-22) zur Berücksichtigung der veränderlichen Trockendichte des Zugabe-Materials in der verdichteten Mischung ( $\delta = 0,0015 [1/\%]$ ) lassen

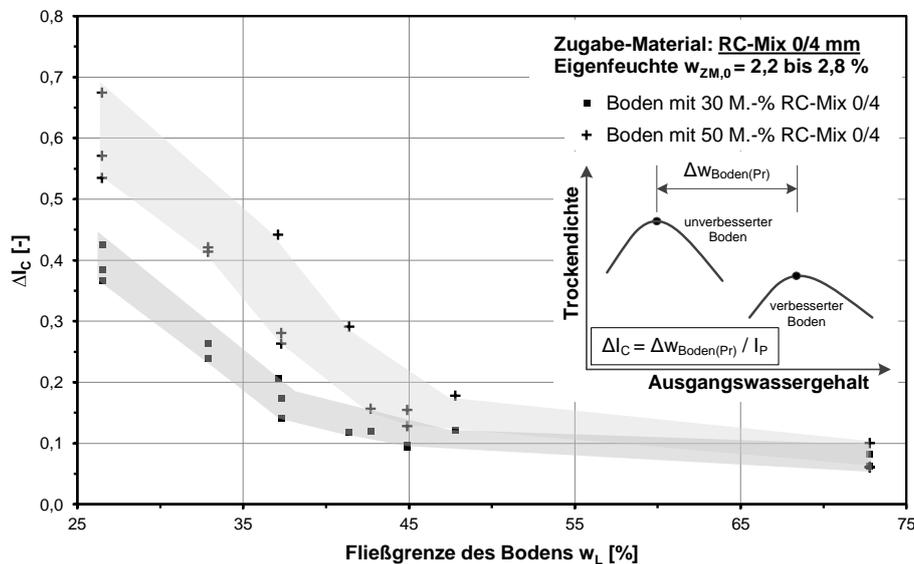
sich die Mittelwerte der Abweichung der prognostizierten zur gemessenen Trockendichte der Mischungen weiter auf  $0,014 \text{ g/cm}^3$  (Prognose von 30 M.-% nach 50 M.-% Zugabe) respektive  $0,009 \text{ g/cm}^3$  (Prognose von 50 M.-% nach 30 M.-% Zugabe) abmindern.

Die Analyse der eigenen Versuchsergebnisse deutet zusammenfassend darauf hin, dass das Verdichtungsergebnis unterschiedlicher Mischungen durch Anwendung des Modells mit etwa der Genauigkeit der Verdichtungsversuche selbst prognostiziert werden kann. Für praktische Belange konnten die getroffenen Modellannahmen (siehe Pkt. 6.3) bestätigt werden. Die angegebenen mittleren Prognosefehler beziehen sich auf Prognosen mit einem Abstand von **+/- 20 M.-% von der Basis der Prognose** (Ermittlung der Eingabeparameter). Werden höhere Schwankungen in Kauf genommen, kann die Prognose auch über größere Spannen erfolgen.

## 8 Erdbaupraktische Folgerungen und Empfehlungen

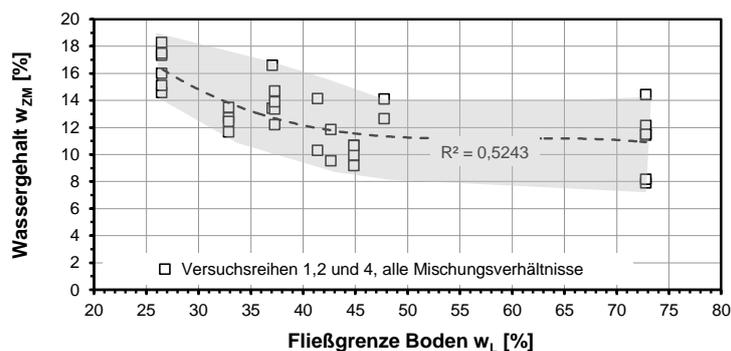
### 8.1 Abschätzung des Verbesserungserfolges bei feinkörnigen Böden

Unter Pkt. 4.5.1 wurde festgestellt, dass die technisch sinnvolle Anwendung des Verfahrens bei feinkörnigen Böden auf solche mit einer Fließgrenze  $w_L \leq 40\%$  eingeschränkt ist. Diese Einschränkung wurde aus den Ergebnissen der Untersuchungen der Versuchsreihen 1,2 und 4 abgeleitet, für die nahezu trockener RC-Mix 0/4 als Zugabe-Material verwendet wurde. Anhand der Fließgrenze eines feinkörnigen Bodens lässt sich aus den in Abb. 8.1 zusammengefassten Versuchsergebnissen der erzielbare Verbesserungserfolg für eine Zugabemenge von 30 und 50 M.-% abschätzen (siehe auch Pkt. 4.5.1).



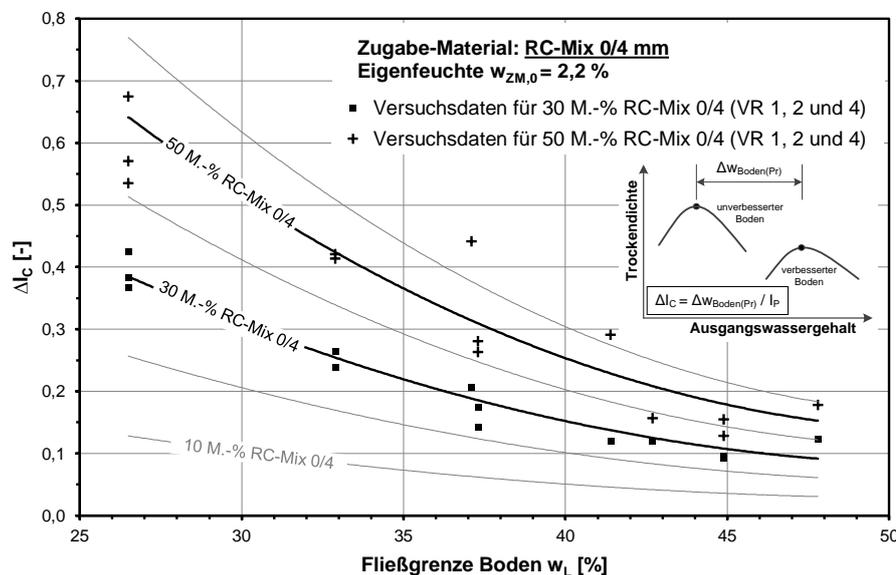
**Abb. 8.1:** Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Versuchsreihen 1, 2 und 4

Die dargestellten Ergebnisse können allerdings mit Hilfe des vorgestellten Modellansatzes verallgemeinert werden. Dazu ist die Kenntnis des Wassergehalts des Zugabe-Materials in der verdichteten Mischung mit den unterschiedlichen Böden erforderlich. Wird der Wassergehalt nach Gleichung (6-7) aus den Versuchsergebnissen rückgerechnet, so ergibt sich daraus die Darstellung in Abb. 8.2.



**Abb. 8.2:** Rückgerechneter Wassergehalt des Zugabe-Materials (RC-Mix 0/4; VR1, VR2, VR4)

Abb. 8.2 zeigt, wieviel Wasser im Zugabe-Material in der verdichteten Mischung mit unterschiedlichen Böden (charakterisiert anhand der Fließgrenze  $w_L$ ) gespreichert ist. Die Darstellung fasst alle Ergebnisse der Versuchsreihen 1, 2 und 4 zusammen und bildet so auch die Variationen in der stofflichen Zusammensetzung und Körnung des Zugabe-Materials (innerhalb der Klasse RC-Mix 0/4) mit ab. Zusätzlich dazu trägt die Charakterisierung der unterschiedlichen Böden über nur einen Parameter  $w_L$  dazu bei, dass der dargestellte Zusammenhang nicht besonders stark ausgeprägt ist ( $R^2 = 0,52$ ). Aus den möglichen Parameterzusammenhängen ergibt sich für die Fließgrenze aber die beste Korrelation. Verwendet man nun die dargestellte Ausgleichsfunktion in Abb. 8.2 als Eingangsparameter für Gleichung (6-24), so lassen sich die Versuchsergebnisse für Böden mit unterschiedlicher Fließgrenze auf mehrere Mischungsverhältnisse verallgemeinern (prognostizieren). In Abb. 8.3 ist eine derartige Auswertung für die untersuchten Böden mit einer Fließgrenze unter  $w_L \leq 50\%$  dargestellt. Für die Erstellung dieses semiempirischen Bemessungsdiagramms wurden Zugabemengen zwischen 10 und 60 M.-% berücksichtigt.



**Abb. 8.3:** Semiempirisches Diagramm zur Abschätzung der Machbarkeit einer Bodenverbesserung feinkörniger Böden mit RC-Mix 0/4 mm

Eine erste Abschätzung, wie erfolgreich das Verfahren „Bodenverbesserung mit RC-Mix 0/4“ bei einem Boden angewendet werden kann und wieviel Zugabe-Material bei einem bestimmten Ausgangswassergehalt dieses Bodens zur Verbesserung zugegeben werden muss, kann dann nach Abb. 8.3 erfolgen, ist allerdings auf den angegebenen Eigenwassergehalt des Zugabe-Materials (vor Einmischung in den Boden) beschränkt.

## 8.2 Empfehlungen zur Eignungsprüfung

Aus den gesammelten Erfahrungen lässt sich ein Mindestuntersuchungsumfang für die Eignungsprüfung ableiten. Die Untersuchungen können in drei Teile eingeteilt werden: Untersuchungen am Boden, am Zugabe-Material und an den Mischungen aus beiden. In Anlehnung an TP BF-StB Teil B 11.3 zur Eignungsprüfung bei Bodenverbesserungen mit Bindemitteln lässt sich der empfohlene Untersuchungsumfang wie in Tab. 4.1 dargestellt zusammenfassen:

**Tab. 8.1: Empfohlener Mindestuntersuchungsumfang für die Eignungsprüfung**

	Prüfungen	Verweis
<b>1</b>	<b>Boden</b>	
1.1	Wassergehalt	
1.2	Korndichte	Pkt. 3.4
1.3	Korngrößenverteilung	
1.4	Zustandsgrenzen	
1.5	Proctordichte und opt. Wassergehalt <sup>1)</sup>	Pkt. 4.3
1.6	Umweltrelevante Inhaltsstoffe <sup>2)</sup>	Pkt. 2.1
<b>2</b>	<b>Zugabe-Material (RC-Material)</b>	
2.1	Wassergehalt	
2.2	Scheinbare Kornrohddichte	Pkt. 3.4
2.3	Korngrößenverteilung	
2.4	Umweltrelevante Inhaltsstoffe	Pkt. 2.1
<b>3</b>	<b>Mischung aus Boden und Zugabe-Material</b>	
3.1	Proctordichte und opt. Wassergehalt <sup>1)</sup>	Pkt. 4.3
3.2	Korndichte (scheinbare Kornrohddichte)	Pkt. 3.4
3.3	Einaxiale Druckversuche <sup>2)</sup> - nach Feuchtraumlagerung - nach Wasserlagerung	
3.4	CBR-Versuche <sup>2)</sup> - nach Feuchtraumlagerung - nach Wasserlagerung	
Anmerkung:		
1) ...Abgestimmte Versuchsdurchführung an unverbessertem Boden und Mischung.		
2) ...Die Prüfungen sind bei Bedarf durchzuführen.		

Die Probenvorbereitung, Versuchsdurchführung und Auswertung nach Pkt. 4.3 wird empfohlen. Der Umfang der empfohlenen Untersuchungen orientiert sich am derzeitigen Stand des Wissens. Er ist bei Bedarf zu erweitern.

**Anmerkung zu den Untersuchungen am Boden.** Die Eigenschaften und der Wassergehalt des Bodens selbst können als Entscheidungshilfe dafür herangezogen werden, ob die Verbesserung mit RC-Mix 0/4 überhaupt sinnvoll angewendet werden kann. Das diesbezügliche Vorgehen wurde unter Pkt. 8.1 erläutert. Sollte sich das Verfahren als mögliche Alternative, zum Beispiel zur Bodenverbesserung mit Bindemitteln, herausstellen, so ist in der Folge auf die speziellen Eigenschaften des verwendeten Zugabe-Materials näher einzugehen.

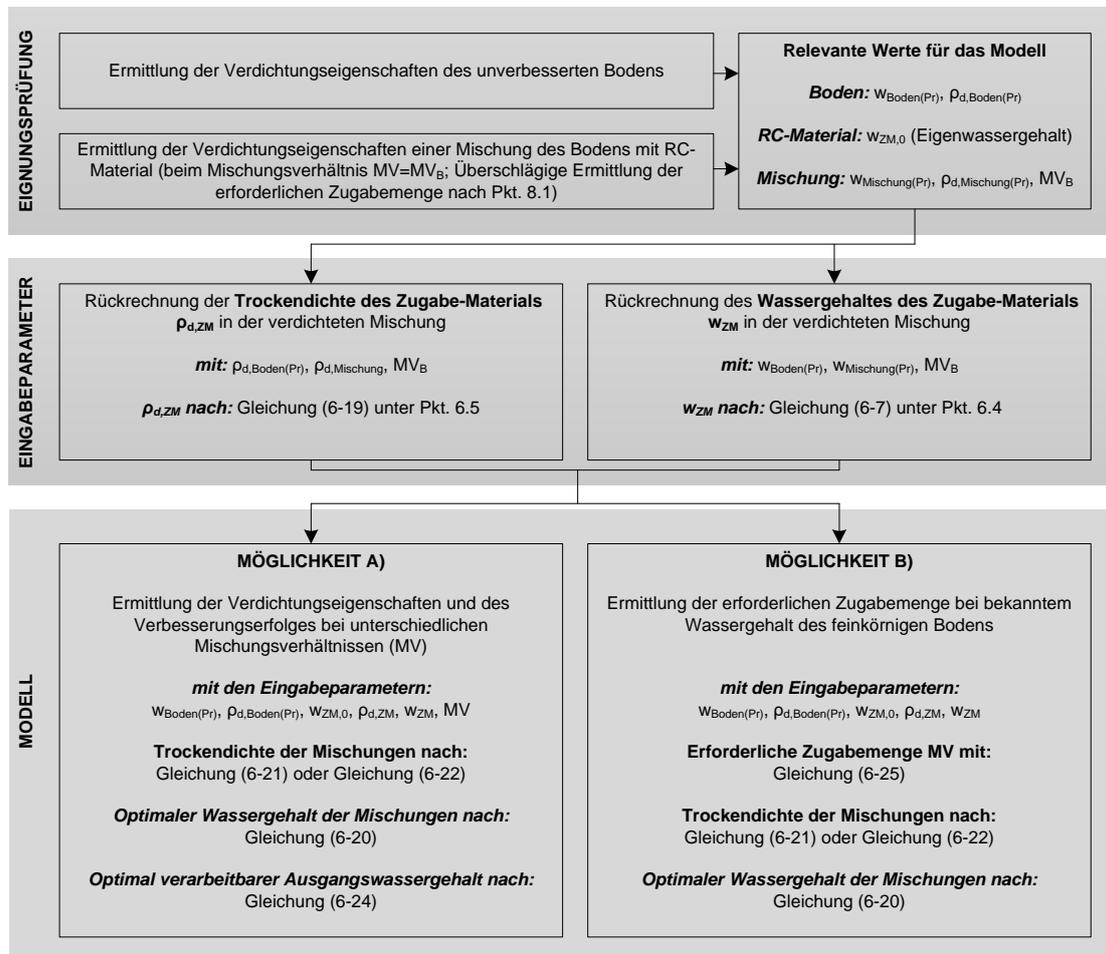
**Anmerkung zu den Untersuchungen am Zugabe-Material.** Wie unter Pkt. 4.5.1 beschrieben ist der Eigenwassergehalt des Zugabe-Materials ein zentraler Punkt für den Verbesserungserfolg. Je trockener das poröse RC-Material, desto mehr Wasser kann es aus dem Bodenanteil aufnehmen und diesen so verbessern. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Ermittlung der umweltrelevanten Inhaltsstoffe des RC-Materials. Diese bestimmen den Regelungen der Bundesländer zufolge die möglichen Bauweisen und können die Anwendung des Verfahrens einschränken. Eine Ermittlung dieser Parameter an der jeweiligen Mischung ist gemäß den derzeitigen Regelwerken nicht zulässig (zum Beispiel Verdünnungs-/Vermischungsverbot nach LAGA M20).

Die Korndichtebestimmung am Zugabe-Material ist wichtig für die spätere Beurteilung des Luftporenanteils der Mischungen (Beurteilung des Verdichtungserfolges). Diese kann entweder an beiden Materialien (Boden und RC-Material) getrennt bestimmt und für die Mischung rechnerisch ermittelt werden. Oder aber die Bestimmung erfolgt an einer repräsentativen Teilprobe der Mischung selbst. Es ist in beiden Fällen darauf zu achten, dass als beurteilungsrelevante Korndichte die scheinbare Kornrohddichte ermittelt wird, also nach DIN EN

1097-6:2013 das „Verhältnis, ermittelt durch Dividieren der ofengetrockneten Masse einer Gesteinsprobe durch das Volumen, das sie in Wasser einnimmt, einschließlich des Volumens innerer geschlossener Hohlräume, aber ausschließlich des Volumens wasserzugänglicher Hohlräume“. Das Gaspyknometerverfahren bietet sich dazu an.

### 8.3 Ablaufschema zur Anwendung des Modells

Liegt bei einer Baumaßnahme der Boden in einer Bandbreite unterschiedlicher natürlicher Wassergehalte vor, so bietet sich anstatt umfangreicher Eignungsprüfungen mit verschiedenen Zugabemengen die Anwendung des unter Pkt. 6 und Pkt. 7 vorgestellten Modells an. Die Erkenntnisse aus einer Eignungsprüfung an nur einem Mischungsverhältnis können so auf unterschiedliche Mischungsverhältnisse extrapoliert werden. Eine rechnerische Ermittlung der erforderlichen Zugabemenge für einen bestimmten Wassergehalt bietet sich aber vor allem auch an, wenn die Mischung mit einer stationären Anlage und auf den Ausgangswassergehalt abgestimmt erfolgt. Das nachfolgend dargestellte Ablaufdiagramm veranschaulicht das Vorgehen für beide Möglichkeiten zur praktischen Anwendung des Modells:



**Abb. 8.4:** Ablaufschema zur praktischen Anwendung des Modells

#### **8.4 Anwendung bei feinkörnigen Böden mit Grobkornanteilen**

Der Verbesserungserfolg wird, wie in dieser Arbeit beschrieben, durch den Transport von Bodenwasser in das poröse Zugabe-Material erzielt. Es ist daher davon auszugehen, dass Böden mit Grobkornanteilen und gemischtkörnige Böden mit RC-Material der Klasse 0/4 mm ebenfalls verbessert werden können. Gleichzeitig ist es denkbar, dass der Verbesserungserfolg noch entsprechend höher ausfällt als bei feinkörnigen Böden. Je höher der grobkörnige Anteil solcher Böden ist, desto weniger Wasser können diese im plastischen Konsistenzbereich halten (vgl. Pkt. 4.5.1). Es wird erwartet, dass das Bodenverhalten durch die durch das poröse RC-Material aufnehmbare Wassermenge demnach umso stärker (positiver) beeinflusst werden kann. Wie ausgeprägt der Verbesserungserfolg einer solchen Maßnahme bei fein- und gemischtkörnigen Böden ist, bei denen die Verbesserung gegebenenfalls auch zu einer Änderung des Tragverhaltens führt, ist derzeit nicht geklärt.

#### **8.5 Zur Wahl des Verdichtungsgerätes auf der Baustelle**

Aus der Analyse von Versuchswerten (siehe Pkt. 6.6 und Pkt. 7.2.4) wurde abgeleitet, dass der Verdichtungsprozess selbst zum „Auspressen“ von Bodenwasser in die Poren des Zugabe-Materials beiträgt. Für die Verdichtung im Feld ist die Wahl der Lagenstärke, der Walzenart und der Verdichtungsenergie also von entscheidender Bedeutung. Der Einsatz eines für feinkörnige Böden typischerweise empfohlenen Verdichtungsverfahrens zur Erreichung einer „walkenden“ Verdichtung wird daher dringend empfohlen.

## 9 Kostenvergleichsrechnung

### 9.1 Allgemeines

Wie unter Pkt. 1.1 dieser Arbeit beschrieben, regelt das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) unter anderem die Abfallhierarchie und ordnet gemäß §6 Abs. (1) die sonstige Verwertung, Verfüllung und Beseitigung dem Recycling nach. Bei der Bewertung einer Maßnahme ist nach § 8 Abs. (1) eine im Sinne des Gesetzes möglichst hochwertige Maßnahme vorzuziehen. Neben technischen Aspekten sind dabei auch wirtschaftliche Aspekte laut § 6 Abs. (2) in die Bewertung einzubeziehen. Es darf angenommen werden, dass der Faktor „Wirtschaftlichkeit“, wie auch sonst, eine zentrale Rolle für die Entscheidung zu einer ressourcenschonenden Verwendung von mineralischen Reststoffen im Erdbau einnimmt. Ein wirtschaftlicher Vorteil bei der Anwendung des Verfahrens „Bodenverbesserung mit Recyclingbaustoffen“ im Vergleich zu anderen Verfahren wird demnach wohl den deutlichsten Anreiz für eine mögliche Anwendung setzen.

### 9.2 Vergleichskonzept

Für die Vergleichsrechnung wird davon ausgegangen, dass ein Boden im Rahmen einer fiktiven Baumaßnahme vor Ort mit geringer Konsistenz vorliegt und ohne Weiteres nicht erdbautechnisch verarbeitet werden kann. Der Boden soll aber nicht gegen anderes Material ausgetauscht, sondern vor Ort verwendet werden. Es ist also eine Bodenverbesserungsmaßnahme erforderlich, wobei einerseits die Verbesserung mit Weißfeinkalk und andererseits die Verbesserung mit RC-Mix 0/4 in Frage kommen. Die Kostenrechnung erfolgt für diese Verfahren vergleichend in 2 Szenarien:

- **Szenario 1:** Bei der Verbesserung mit Weißfeinkalk kann mit dem verbesserten Boden ein Massenausgleich auf der Baustelle erzielt werden. Das verarbeitete Bodenvolumen (verbessert und verdichtet) bildet somit den Richtwert für den resultierenden Materialüberschuss, sollte der Boden mit RC-Mix 0/4 verbessert werden. Bei dieser Form der Bodenverbesserung werden zwar insgesamt höhere Trockendichten erreicht, es sind allerdings auch höhere Material-Zugabemengen erforderlich. Überschüssiges Bodenmaterial muss daher von der Baustelle verbracht (Transport) und gemäß der Einstufung (Annahme: Klasse Z0 nach LAGA M20) entsorgt werden.
- **Szenario 2:** Überschüssiges Bodenmaterial kann auf der Baustelle verbleiben und findet zum Beispiel Verwendung bei Geländemodellierungsmaßnahmen. Der Abtransport und die Kosten für die Entsorgung entfallen. Dieses Szenario ist vor allem dann denkbar, wenn der Wassergehalt nicht zu weit über dem jeweiligen Verdichtungsoptimum liegt.

### 9.3 Kalkulationsgrundlagen

Der Vergleich der Kosten erfolgt vereinfachend unter der Annahme, dass sich der kostenbezogene Unterschied beider Verfahren hauptsächlich aus der Materialmenge des erforderlichen Zugabe-Materials sowie dessen Preis, dem Aufwand für das Ausstreuen und Einarbeiten des Zugabe-Materials und den Entsorgungskosten für überschüssige Materialmengen (Abtransport und Entsorgung) zusammensetzt. Die für die Vergleichsrechnung angesetzten Preise sind in Tab. 9.1 zusammengefasst.

**Tab. 9.1: Preise für die Vergleichsrechnung**<sup>136</sup>

<b>Bodenverbesserung mit Weißfeinkalk</b>		
Position	Preis	Anmerkung
Materialkosten WFK	85 €/t	Preis frei ab Baustelle.
Ausstreuen & Einarbeiten	1,5 €/m <sup>3</sup>	Je m <sup>3</sup> verdichteter Boden unter üblichen Bedingungen.
<b>Bodenverbesserung mit RC-Mix 0/4</b>		
Position	Preis	Anmerkung
Materialkosten RC-Mix 0/4	ab 0 €/t	Derzeit auch unentgeltlich beziehbar. Es ist allerdings Material mit niedrigem Eigenwassergehalt erforderlich (frisches Vorsiebmaterial oder trocken gelagert).
Transportkosten	0,14 €/(t·km)	Preis für Antransport RC-Material und Abtransport Boden. Bezogen auf km Distanz zwischen Baumaßnahme und Grube / Anlage des RC-Herstellers.
Entsorgung Boden Z0	3 €/t	
Ausstreuen & Einarbeiten	3,0 €/m <sup>3</sup> 4,5 €/m <sup>3</sup>	Je m <sup>3</sup> verdichteter Boden (bezeichnet mit <b>F2</b> ; siehe WFK: 2·1,5 €/m <sup>3</sup> = 3,0 €/m <sup>3</sup> ) Je m <sup>3</sup> verdichteter Boden (bezeichnet mit <b>F3</b> ; siehe WFK: 3·1,5 €/m <sup>3</sup> = 4,5 €/m <sup>3</sup> )

Die kalkulierten Kosten für die Bodenverbesserung mit Weißfeinkalk errechnen sich aus dem Materialpreis und den Kosten für das Ausstreuen und Einarbeiten. Da in den untersuchten Szenarien für diese Form der Bodenverbesserung kein Boden abtransportiert werden muss, ist der Preis je m<sup>3</sup> verdichteter Boden nur von der erforderlichen Zugabemenge abhängig. Die Kosten für die Verbesserung mit RC-Mix 0/4 hingegen hängen von unterschiedlichen Faktoren ab. Neben den Transportkosten für die Anlieferung des RC-Materials führt auch der Abtransport überschüssigen Bodenmaterials zu einem Zusammenhang zwischen den anfallenden Kosten und dem räumlichen Abstand der Baumaßnahme von der Anlage des Recyclingunternehmers und der Grube zur Entsorgung des überschüssigen Bodens. Für die Berechnung der Frachtkosten für den Antransport des RC-Materials aus der Anlage des Herstellers und den Abtransport des überschüssigen Bodens in eine Grube werden die Transportkosten mit 85 €/h je Fahrzeug abgeschätzt. Bei einer durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit von etwa 50 km/h und einer transportierten Last von 25 t je Transport ergeben sich die Frachtkosten zu etwa 0,14 € je t Material und km Abstand der Baumaßnahme von der Anlage des Herstellers beziehungsweise der Grube (unter Berücksichtigung des erforderlichen Umlaufes). Vereinfachend wird angenommen, dass die Anlage des RC-Herstellers und die Grube zur Entsorgung des Bodenüberschusses etwa gleich weit von der Baumaßnahme entfernt liegen. Zusätzlich zu den distanzabhängig veränderlichen Kosten ergeben sich maßgebliche Preisanteile außerdem aus dem Aufwand für das Ausstreuen und Einarbeiten des RC-Materials in den feuchten Boden und den Entsorgungskosten für das überschüssige Bodenmaterial. Der tatsächliche Aufwand für den Arbeitsschritt „Ausstreuen und Einarbeiten des Zugabe-Materials“ für die Bodenverbesserung mit RC-Material auf der Baustelle ist vorab nicht bekannt. Die großmaßstäblichen Untersuchungen, beschrieben unter Pkt. 5, erfolgten

<sup>136</sup> Die Preise wurden in Zusammenarbeit mit bayerischen Firmen ermittelt, die solche Leistungen und Materialien in Bayern typischerweise anbieten (Stand Mai/Juni 2016).

anhand eines kleinen Prüffeldes und sind für Großmaßnahmen nicht repräsentativ. Allerdings deuten die Erfahrungen aus diesen Versuchen darauf hin, dass vor allem das gleichmäßige Ausstreuen der großen Materialmengen an RC-Mix einen Mehraufwand im Vergleich zur Bodenverbesserung mit Weißfeinkalk darstellt. Da dieser Mehraufwand im baupraktischen Betrieb vorab nicht bekannt ist, wird er für die Vergleichsrechnung vorsichtig als Mehrfaches des Aufwandes der Bodenverbesserung mit Weißfeinkalk angesetzt. Dabei wird als erste Näherung mit dem Faktor 2 (F2) und Faktor 3 (F3) für die Gesamtposition „Ausstreuen und Einarbeiten“ gearbeitet.

Für eine Kostenrechnung fehlen letztlich noch Angaben zu den Massen. Im Rahmen einer Forschungsarbeit an der TU München (HENZINGER et al. 2015b) wurden an unterschiedlichen Böden vergleichende Untersuchungen zu verschiedenen Verbesserungsverfahren durchgeführt. Unter anderem erfolgte ein Vergleich der Bodenverbesserung mit Weißfeinkalk mit der Bodenverbesserung mit Recyclingbaustoffen. Aus diesen Untersuchungen an feinen und gemischtkörnigen Böden stehen für unterschiedliche Ausgangswassergehalte dieser Böden die für die Verbesserung jeweils erforderlichen Mengen an Weißfeinkalk (WFK) und RC-Mix 0/4 und Angaben zu den verdichteten Mischungen zur Verfügung. Einer der darin verwendeten Ausgangsböden (Boden TL) entspricht dem in dieser Arbeit verwendeten Boden TL1, ein anderer (Boden TA) dem hier verwendeten Boden TA1. Nun kann für den leicht plastischen Ton anhand dieser Daten beispielhaft und überschlägig verglichen werden, wie sich die Kosten für beide Verfahren bei einer fiktiven Bodenverbesserungsmaßnahme entwickeln. Die aus den Untersuchungen von HENZINGER et al. (2015b) abgeleiteten, berechnungsrelevanten Angaben sind in Tab. 9.2 zusammengefasst.

**Tab. 9.2: Daten für die Vergleichsrechnung (Daten aus HENZINGER et al. 2015b)**

Boden	$w_{\text{Boden(Pr),0}}$	Zugabemenge	$\rho_{\text{d,Mischung(Pr)}}$
TL1	≈ 17 %	25 M.-% RC-Mix 0/4	≈ 1,92 g/cm <sup>3</sup>
		2,5 M.-% WFK	≈ 1,86 g/cm <sup>3</sup>
	≈ 20 %	50 M.-% RC-Mix 0/4	≈ 1,88 g/cm <sup>3</sup>
		5 M.-% WFK	≈ 1,79 g/cm <sup>3</sup>

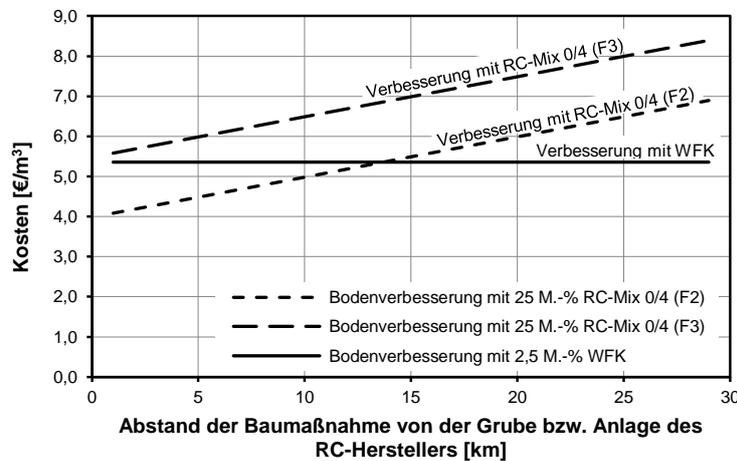
Wichtige Voraussetzung für die Verwendung dieser Werte in der Vergleichsrechnung ist, dass das RC-Material in trockener Form vorliegt (hier etwa  $w_{\text{ZM,0}} \approx 2\%$ ). Dies spielt einerseits für die transportierten Mengen (Feuchtmasse) eine Rolle, andererseits ist der Eigenwassergehalt ein bestimmender Faktor für die Verbesserungswirkung (siehe Pkt. 4.5.1) und damit auch für die erforderliche Zugabemenge.

#### 9.4 Ergebnisse der Vergleichsrechnung

**Szenario 1.** Bei Szenario 1 kann der Massenausgleich auf der Baustelle nur bei der Verbesserung des Bodens mit Weißfeinkalk erfolgen. Die Verbesserung mit RC-Mix 0/4 führt zu einem Überschuss an Bodenmaterial. Dieses muss abtransportiert und entsorgt werden. Die transportbezogenen Kosten steigen mit der Entfernung der Baumaßnahme von der Grube und der Anlage des RC-Herstellers an. Damit ist zu erwarten, dass die Verbesserung mit RC-Mix 0/4 vor allem bei kleinen Transportdistanzen wirtschaftlich ist.

In Abb. 9.1 ist die Entwicklung der Kosten je Kubikmeter des verbesserten und verdichteten Bodens dargestellt. Die Darstellung zeigt, dass die Verbesserung mit RC-Mix 0/4 keinen

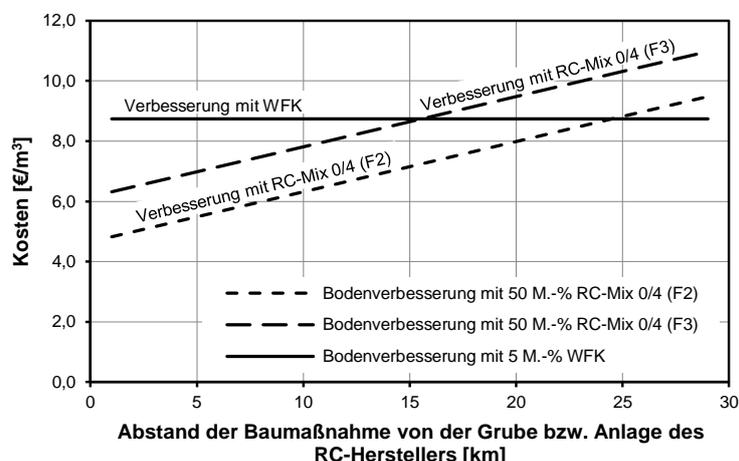
wirtschaftlichen Vorteil bringt, wenn der Aufwand für das Ausstreuen und Einarbeiten des RC-Materials 3 mal so hoch ist (F3), wie jener bei der Bodenverbesserung mit Weißfeinkalk. Ist der Aufwand für diese Arbeiten hingegen nur doppelt so hoch wie bei der Bodenverbesserung mit WFK (F2), so kann das Verfahren bis zu einer Transportdistanz von leicht über 10 km durchaus wirtschaftliche Vorteile bringen.



**Abb. 9.1: Vergleich beim Ausgangswassergehalt des Bodens  $w_{\text{Boden(Pr),0}} = 17\%$  (Szenario 1)**

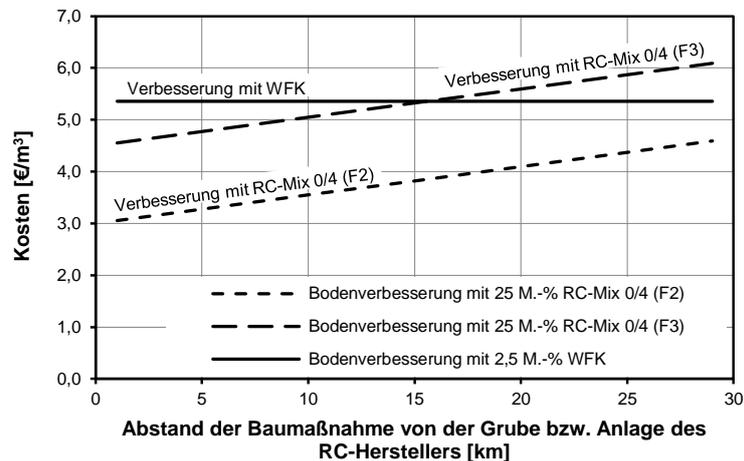
Der Preis für eine Bodenverbesserung mit Weißfeinkalk steigt mit der erforderlichen Zugabemenge an Kalk aufgrund des Materialpreises stark an. Im Gegensatz dazu ist das RC-Material (Vorsiebmaterial RC-Mix 0/4) als mineralischer Reststoff derzeit in der Regel auch in großen Mengen kostenneutral beziehbar. Es ist also zu erwarten, dass die Anwendung des Verfahrens vor allem dann wirtschaftlich attraktiv wird, wenn der Wassergehalt deutlich oberhalb des optimalen Verdichtungswassergehaltes liegt und entsprechend hohe Mengen an Kalk zugegeben werden müssten.

In Abb. 9.2 ist die Kostenentwicklung für jenen Fall dargestellt, dass aufgrund des hohen Ausgangswassergehaltes des Bodens dieser entweder mit 5 M.-% Weißfeinkalk oder mit etwa 50 M.-% trockenem RC-Mix 0/4 verbessert werden muss. Die Darstellung zeigt vor allem im Bereich von Transportdistanzen zwischen 15 und 25 km Kostenvorteile für die Bodenverbesserung mit RC-Mix 0/4. Dies selbst für den ungünstigen Fall, dass die Kosten für Ausstreuen und Einarbeiten des RC-Mix 0/4 insgesamt deutlich höher sind wie bei der Verbesserung mit Weißfeinkalk.



**Abb. 9.2: Vergleich beim Ausgangswassergehalt des Bodens  $w_{\text{Boden(Pr),0}} = 20\%$  (Szenario 1)**

**Szenario 2.** Dieses Szenario beschreibt den günstigen Fall, bei dem überschüssiger Boden auf der Baustelle verbleiben kann und nicht entsorgt werden muss. Die Ergebnisse der Vergleichsrechnung in Abb. 9.3 weisen deutliche Kostenvorteile bei der Bodenverbesserung mit RC-Mix 0/4 im Vergleich zur Verbesserung mit Weißfeinkalk aus. Durch den Entfall der Kosten für den Abtransport und Entsorgung des überschüssigen Bodens steigt die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens deutlich an, sodass es auch bei größeren Entfernungen der Baumaßnahme von der Anlage des RC-Herstellers noch Kostenvorteile bringt.



**Abb. 9.3:** Vergleich beim Ausgangswassergehalt des Bodens  $w_{\text{Boden(Pr),0}} = 17\%$  (Szenario 2)

**Zusammenfassung.** Der überschlägige Vergleich des Verfahrens der Bodenverbesserung mit trockenem RC-Mix 0/4 mit der herkömmlichen Bodenverbesserung mit Weißfeinkalk lässt zusammenfassend folgende Schlüsse zu:

- Das Verfahren bringt vor allem dann Kostenvorteile, wenn die Transportdistanzen für die Anlieferung des RC-Materials und für die Ablieferung des überschüssigen Bodens klein sind. Für die verglichenen Szenarien ergeben sich wirtschaftliche Abstände der Baumaßnahme von der Anlage des RC-Herstellers und der Grube von etwa 15 bis 25 km. Kann das überschüssige Bodenmaterial auf der Baustelle verbleiben, sind auch größere Distanzen möglich.
- Der RC-Mix 0/4 fällt als mineralischer Reststoff bei der Herstellung von RC-Körnungen für den Straßenoberbau an. Dementsprechend kann er derzeit in der Regel ohne Kosten auch in großer Menge bezogen werden. Das wirkt sich vor allem dann positiv auf die Kosten aus, wenn hohe Ausgangswassergehalte der zu verbessernden Böden entsprechend hohe Zugabemengen an (zum Beispiel) Kalk erforderlich machen würden und die Kosten für eine Kalkverbesserung dadurch stark ansteigen.
- Ein entscheidender Faktor für die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens ist der tatsächliche Aufwand für das Ausstreuen und Einarbeiten des RC-Materials in den Boden. Hierfür bestehen derzeit keine Erfahrungen und erst die baupraktische Anwendung wird zeigen, wie die Kosten vor allem für das Ausstreuen des RC-Materials im Vergleich zum Ausstreuen des Kalkes tatsächlich zu bewerten sind.

Die durchgeführte Vergleichsrechnung wird als Hinweis darauf gewertet, dass bei der Durchführung einer Bodenverbesserung mit RC-Mix 0/4 anstatt einer herkömmlichen Bodenver-

besserung mit Bindemitteln bereits heute ein Kostenvorteil erzielt werden kan. Es ist zu erwarten, dass der Kostenvorteil im Vergleich zu einem Bodenaustausch, bei dem das ganze Bodenmaterial entsorgt und neues Material antransportiert werden muss, noch entsprechend größer ausfällt, da ein wesentlicher Teil der dafür erforderlichen Transport- und Entsorgungskosten entfällt.

## 10 Zusammenfassung und Ausblick

### 10.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde die Verwendung von trockenen, porösen RC-Materialien aus Bauschutt zur Verbesserung unterschiedlicher feinkörniger Böden untersucht. Dazu wurde hauptsächlich gemischter Bauschutt der Körnung 0/4 mm, genannt RC-Mix 0/4, verwendet. Dieses Material fällt bei der Herstellung von RC-Körnungen für den Straßenoberbau als Nebenprodukt an und wird derzeit in der Regel keiner hochwertigen Verwendung zugeführt.

Aus den Untersuchungsergebnissen der Laborversuche konnte abgeleitet werden, dass das Verfahren bei wenig plastischen Böden die besten Ergebnisse liefert und die technisch sinnvolle Anwendung auf Böden mit einer Fließgrenze  $w_L \leq 40\%$  beschränkt ist. Aus den Ergebnissen der Untersuchungen wurde auch geschlossen, dass Schwankungen der stofflichen Zusammensetzung des gemischten RC-Materials nur einen untergeordneten Einfluss auf die Verbesserungsergebnisse nehmen und dass die Verwendung von größerem RC-Material das Verbesserungsergebnis sogar negativ beeinflussen kann. Als ein maßgeblicher Faktor für den Verbesserungserfolg wurde der Eigenwassergehalt des Zugabe-Materials identifiziert. Ist dieser zu hoch, so kann der Verbesserungserfolg der Maßnahme sogar ganz ausbleiben. Die vergleichenden Untersuchungen zur Tragfähigkeit (CBR) der durch die Verbesserungsmaßnahme entstehenden Mischungen deuten darauf hin, dass das Tragverhalten der Böden nicht grundsätzlich geändert wird und die Tragfähigkeiten nur leicht oberhalb der Tragfähigkeiten der unverbesserten Böden (im jeweiligen Verdichtungsoptimum) liegen. Es konnte außerdem versuchstechnisch festgestellt werden, dass die Verbesserung feinkörniger Böden mit RC-Mix 0/4 tendenziell zu einer Erhöhung der Durchlässigkeit mit steigender Zugabemenge führt. Das Schwell- und Tragverhalten bei nachträglichem Wasserzutritt kann durch die Verbesserungsmaßnahme unter Umständen verbessert werden. Die praktische Anwendbarkeit des Verfahrens (Mischbarkeit von Boden und RC-Material) wurde durch einen großmaßstäblichen Versuch unter Verwendung einer selbstfahrenden Bodenfräse bestätigt.

Im Anschluss an die Untersuchungen wurde ein bestehendes Modell zur Prognose des Verdichtungsverhaltens fein- und gemischtkörniger Böden adaptiert. Dabei werden die Eigenschaften „Wassergehalt“ und „Trockendichte“ von Boden und Zugabe-Material in der verdichteten Mischung jeweils getrennt voneinander rechnerisch berücksichtigt. Anhand dieses Modells wurden die grundsätzlichen Möglichkeiten zur Entwicklung der Verdichtungseigenschaften der durch die Verbesserungsmaßnahmen entstehenden Mischungen abgeleitet. Es wurde dargestellt, welche Verdichtungskennwerte das zugemischte RC-Material in einer verdichteten Mischung überhaupt annehmen kann. Als Obergrenze der zu berücksichtigenden Dichte des Zugabe-Materials wurde die Kornrohndichte identifiziert (für kleine Mischungsverhältnisse), als Untergrenze die Trockendichte des bei gleicher Verdichtungsenergie verdichteten (reinen) Zugabe-Materials (für große Mischungsverhältnisse). Gleichzeitig wurde die Obergrenze des Wassergehalts des Zugabe-Materials in der verdichteten Mischung aus dem mit Wasser gefüllten Porenraum (intragranulare und ggf. intergranulare Poren) abgeleitet. Die

Untergrenze der durch das RC-Material aufnehmbaren Wassermenge wurde am Punkt des Saugspannungsausgleichs zwischen dem feuchten Boden und dem trockenen Zugabematerial festgemacht. Anhand eines einfachen Beispiels wurde die Anwendung des Modells veranschaulicht und ein wichtiger Aspekt dieses Verfahrens weiter herausgearbeitet: das verdichtungsbedingte „Auspressen“ von Wasser in die Poren des RC-Materials. Ergänzend wurden auch Möglichkeiten zur praktischen Anwendung des vorgestellten Modells erläutert.

In einem nächsten Schritt wurden die Ergebnisse aus den eigenen Untersuchungen anhand des Modells analysiert. Dabei konnte gezeigt werden, dass sich die aus den Versuchsergebnissen rückrechenbaren Verdichtungseigenschaften des Zugabematerials in den verdichteten Mischungen gut zwischen die vorab ermittelten theoretischen oberen und unteren Grenzwerte einordnen. Für den zur Verbesserung verwendeten „RC-Mix 0/4“ wurden die rückgerechneten Verdichtungseigenschaften (in den jeweils verdichteten Mischungen) in Abhängigkeit von der Zugabemenge vom Eigenwassergehalt und vom verbesserten Boden dargestellt. Dabei wurde verdeutlicht, dass der durch das RC-Material in der verdichteten Mischung angenommene Wassergehalt nicht maßgeblich vom Mischungsverhältnis abhängt. Anhand dieser Erkenntnis lässt sich der Verbesserungserfolg aus dem Versuch mit einem Mischungsverhältnis auf andere Mischungsverhältnisse übertragen. Das Modell wurde auf Basis von Ergebnissen der Laborversuche somit letztlich auch zur Prognose der optimalen Verdichtungseigenschaften (optimaler Wassergehalt und zugehörige Trockendichte sowie Verbesserungserfolg) unterschiedlicher Mischungen verwendet. Die Qualität der Prognosen wurde an den Versuchsdaten der eigenen Untersuchungen gemessen und beurteilt, mögliche Fehlerquellen wurden erörtert.

Abschließend wurde anhand einer beispielhaften Vergleichsrechnung die Wirtschaftlichkeit der Bodenverbesserung mit RC-Mix 0/4 im Vergleich zur Bodenverbesserung mit Weißfeinkalk untersucht. Es wurde dargestellt, dass aus derzeitiger Sicht die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens vor allem bei kleinen Transportdistanzen und/oder hohen erforderlichen Zugabemengen gegeben ist.

## 10.2 Ausblick

Die Verbindung zweier mineralischer Reststoffe zu einem qualifizierten Erdbaustoff bietet aus derzeitiger Sicht aufgrund eines sich ergebenden Synergieeffektes eine elegante und wirtschaftliche Ausnutzung von Ressourcenschonungspotentialen. Trotzdem wird erst die Zeit zeigen, ob das Verfahren in der Erdbaupraxis angenommen wird. Es ist dann wahrscheinlich, dass sich aus den Erfahrungen bei der Anwendung unterschiedliche neue Fragestellungen zum Verfahren ergeben. Durch die vorliegende Arbeit im Detail nicht beantwortet bleiben zum Beispiel unterschiedliche Fragen zum bodenmechanischen Verhalten der entstehenden Mischungen als Komposit-Baustoffe. Auch umwelttechnische Fragestellungen, zum Beispiel in Bezug auf das Eluationsverhalten des RC-Materials in Verbindung mit einer solchen Bauweise, wurden bislang nicht untersucht.

Ein weiterer interessanter Gesichtspunkt ergibt sich aus dem verdichtungsbedingten Wasseraustausch, der nachzeitigem Wissen einen direkten Einfluss auf den erzielten Verdichtungserfolg nimmt (vgl. Pkt. 6.6). Dabei wäre das Zusammenspiel aus Wassergehalt, Saugspannung und Trockendichte beider Materialien in der verdichteten Mischung getrennt voneinander als Funktion der fortschreitenden Verdichtung zu untersuchen. Im Zuge einer

Anwendung im Großmaßstab könnte zum Beispiel auch die Entwicklung des Verdichtungsgrades in Abhängigkeit von den Verdichtungsparametern mittels FDVK wertvolle Erkenntnisse bringen.

Abschließend stellt sich im Hinblick auf weitergehende Untersuchungen natürlich auch die Frage, ob die vorgestellten Konzepte auch auf andere Materialmischungen angewendet werden können, bei denen die getrennte Berücksichtigung der Verdichtungseigenschaften der gemischten Materialien (in der verdichteten Mischung) sinnvoll erscheint.

## 11 Referenzen

### 11.1 Literatur

- Baumgärtel, T.; Heyer, D.; Vogt, N. (2009): *Erdbautechnische Eignung und Klassifikation von Böden mit Fremdbestandteilen und von Bauschutt*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Fb 1020. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH
- Bowles, J. E. (1984): *Physical and geotechnical properties of soils*. New York: McGraw-Hill.
- Crepaz, S. (2015): *Experimentelle Ermittlung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung von Böden mithilfe von Chilled-Mirror Hygrometern*. Bachelorarbeit, durchgeführt am Institut für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau der TU München. Betreut durch Christoph Henzinger, unveröffentlicht.
- Dehoust, G., Küppers, P., Gebhardt, P., Rheinberger, U., Hermann, A. (2008): *Aufkommen, Qualität und Verbleib mineralischer Abfälle - Endbericht*. Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamtes. Öko-Institut e.V.
- Eder, A. (2013): *Untersuchung zu den Einflussfaktoren Homogenisierungszeit und Wassergehalt des Zugabematerials auf die mechanische Bodenverbesserung mittels rezyklierten Baustoffen (RC)*. Bachelorarbeit, durchgeführt am Institut für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau der TU München. Betreut durch Christoph Henzinger, unveröffentlicht.
- Feng, T.-W.; Chen, K.-H.; Su, Y.-T.; Shi, Y.-C. (2000): *Laboratory investigation of efficiency of conical-based pounders for dynamic compaction*. In: *Géotechnique* 50 (6), S. 667–674.
- Floss, R.; Siedek, P.; Voß, R. (1968): *Verdichtungs- und Verformungseigenschaften grobkörniger, bindiger Mischböden*. Berlin, München: Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn.
- Floss, R. (1973): *Bodenmechanische Gesichtspunkte bei der Auswahl und Dimensionierung von Straßenbefestigungen*. In: *Straße und Autobahn* (1/1973), S. 17–26.
- Fredlund, D. G.; Sheng, D.; Zhao, J. (2011): *Estimation of soil suction from the soil-water characteristic curve*. *Canadian Geotechnical Journal* 48 (2), S. 186-198.
- Fredlund, D. G.; Xing, A (1994): *Equations for the soil-water characteristic curve*. *Canadian Geotechnical Journal* 31 (4), S. 521-532.
- Grim, R. E. (1953): *Clay Mineralogy*. London: McGraw-Hill.
- Henzinger, C.; Barka, E.; Birle, E.; Heyer, D. (2015a): *Belastbarkeit von eingeführten Volumen-% bzw. Massen-% - Grenzen bei Bodenmaterial*. Forschungsbericht zu FE

- 05.0183/2013/CGB im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen. Derzeit unveröffentlicht.
- Henzinger, C.; Koukoulidou, A.; Huber, S. Kupka, A.; Schönfelder, I.; Wolter, S.; Vogt, S. Birle, E.; Papakyriakopoulos, O.; Bagherpour, I.; Heyer, D. (2015b): *Ressourcenschonung – Bedingungen für die Verwendung organogener und weicher Böden sowie von Sekundärbaustoffen als Massenbaustoffe im Erdbau*. Forschungsbericht zu FE 05.0166/2011/ERB im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen. Derzeit unveröffentlicht.
- Henzinger, C.; Heyer, D. (2015a): *Bodenverbesserung mit Recyclingbaustoffen*. In: Tagungsband zur 10. Österreichischen Geotechniktagung in Wien. Wien, 29. - 30. Jänner 2015, S. 105 - 114.
- Henzinger, C.; Heyer, D. (2015b): *Use of demolition waste in soil improvement*. In: Proceedings of the XVI ECSMGE Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development. Edinburgh, 13. – 17. September, S. 2547 - 2552.
- Hilf, J. W. (1991): *Compacted Fill*. In: Fang, H.-Y. (Hrsg.): *Foundation Engineering Handbook (Second Edition)*. New York: Chapman & Hall Inc.
- Ingles, O. G., Metcalf, J. B. (1972): *Soil Stabilization – Principles and Practice*, Sydney-Melbourne-Brisbane: Butterworths.
- Iwata, S.; Tabuchi, T.; Warkentin, B. P. (1988): *Soil-Water Interactions*. Mechanisms and applications. New York: Marcel Dekker.
- Jasmund, K.; Lagaly, G. (Hrsg.) (1993): *Tonminerale und Tone: Struktur, Eigenschaften, Anwendungen und Einsatz in Industrie und Umwelt*. Darmstadt: Steinkopf Verlag.
- Karas, C. (2013): *Aufbereitung bindiger Böden geringer Konsistenz – Die Verwendung von RC-Baustoffen als Zugabematerial im Rahmen einer mechanischen Bodenverbesserung*. Masterarbeit, durchgeführt am Institut für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau der TU München. Betreut durch Christoph Henzinger, unveröffentlicht.
- Kézdi, Á. (1969): *Handbuch der Bodenmechanik - Band I: Bodenphysik*. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen.
- Kézdi, Á. (1973): *Stabilisierte Erdstrassen*. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen.
- Kickelbick, G. (2008): *Chemie für Ingenieure*. München: Pearson Studium.
- Kreislaufwirtschaft Bau c/o Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V. (2011): *Mineralische Bauabfälle Monitoring 2008 - Bericht zum Aufkommen und Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2008*. [www.kreislaufwirtschaft-bau.de](http://www.kreislaufwirtschaft-bau.de).
- Kreislaufwirtschaft Bau c/o Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V. (2013): *Mineralische Bauabfälle Monitoring 2010 - Bericht zum Aufkommen und Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2010*. [www.kreislaufwirtschaft-bau.de](http://www.kreislaufwirtschaft-bau.de).

- Kreislaufwirtschaft Bau c/o Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V. (2015): *Mineralische Bauabfälle Monitoring 2012 - Bericht zum Aufkommen und Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2012*. www.kreislaufwirtschaft-bau.de.
- Krüger, B. (2015): *Untersuchungen zur Bodenverbesserung mit Recyclingbaustoffen*. Masterarbeit, durchgeführt am Institut für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau der TU München. Betreut durch Christoph Henzinger, unveröffentlicht.
- Lambe, T. W.; Whitman, R. V. (1969): *Soil Mechanics*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Lang, H.-J.; Huder, J.; Amann, P.; Puzrin, A. M. (2011): *Bodenmechanik und Grundbau. Das Verhalten von Böden und Fels und die wichtigsten grundbaulichen Konzepte*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Lottmann, A. (2003): *Tragfähigkeit und Frostempfindlichkeit von kalkbehandelten bindigen Böden im Planumbereich von Verkehrsflächen*. Diss., Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Cottbus.
- Lu, N.; Likos, W. J. (2004): *Unsaturated soil mechanics*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Mifka, K.; Thelen, D. (2008): *Verbesserung bindiger Böden mit Betonrecycling - Fallbeispiel einer Großbaumaßnahme bei Koblenz*. In: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (Hrsg.) – Schriftenreihe der Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau, Bd. 10.
- Mitchell, J. K.; Soga, K. (2005): *Fundamentals of Soil Behaviour*. New Jersey: Wiley & Sons.
- Miyazaki, T. (2006): *Water flow in soils*. Boca Raton: Taylor & Francis.
- Müller, A.; Weiß, A.; Schnell, A. (2011): *Up-Cycling von Mauerwerkbruch*. Recycling Magazin Ausgabe 04/2011, S. 30 - 33.
- Neroth, G.; Vollenschaar, D. (Hrsg.) (2011): *Wendehorst Baustoffkunde*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Ostermayer, H. (1976): *Das Verhalten gemischtkörniger Böden im einachsigen Formänderungszustand*. Mitteilungen aus dem Lehrstuhl und Prüfamts für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität München. Diss., Technische Universität München, München.
- Road Research Laboratory (1952): *Soil Mechanics for Road Engineers*. London: Her Majesty's Stationery Office.
- Ruhland, A. (2014): *Aufbereitung bindiger Böden geringer Konsistenz für den Einbau in Erdbauwerken*. Masterarbeit, durchgeführt am Institut für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau der TU München. Betreut durch Christoph Henzinger, unveröffentlicht.
- Scheffer, F.; Schachtschabel P. et al. (2002): *Lehrbuch der Bodenkunde*. 15. Auflage, Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Schmidt, H.-H. (2006): *Grundlagen der Geotechnik*. 3. Auflage, Wiesbaden: Teubner Verlag.

- Schultze, E.; Muhs, H. (1967): *Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten*. 2. Auflage. Berlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag.
- Soos, P. von, Engel, J. (2008): *Eigenschaften von Boden und Fels - ihre Ermittlung im Labor*. In: Witt K. J. (Hrsg.): *Grundbau-Taschenbuch, Teil 1: Geotechnische Grundlagen*. Berlin: Ernst & Sohn.
- Statistisches Bundesamt (2015): *Umwelt – Abfallbilanz (Abfallaufkommen/-Verbleib, Abfallintensität, Abfallaufkommen nach Wirtschaftszweigen)*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- Tan, K. H. (1998): *Principles of soil chemistry*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Voß, R.; Floss, R.; Brüggemann, K. (1986): *Die Bodenverdichtung im Verkehrswege-, grund- und Dammbau*. Düsseldorf: Werner-Verlag GmbH.
- Yong, R. N.; Warkentin, B. P. (1975): *Soil properties and behaviour*. Amsterdam, New York: Elsevier Scientific Publishing Company.
- Yong, R. N. (1999): *Soil suction and soil-water potentials in swelling clays in engineered clay barriers*. In: *Engineering Geology* 54 (1-2), S. 3 - 13.

## 11.2 Gesetze und Vorgaben des Bundes und der Länder

- KrW-/AbfG, 1994: *Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz - KrW-/AbfG)*. Aufgehoben und ersetzt durch das Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG.
- KrWG, 2012: *Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG)*.
- LAGA M 20, 2003/1997: *Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen - Technische Regeln*. Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 20.
- Mantelverordnung, 2. Entwurf 2012: *Verordnung zur Festlegung von Anforderungen für das Einbringen oder das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser, an den Einbau von Ersatzbaustoffen und für die Verwendung von Boden und bodenähnlichem Material (Entwurf, Stand: 31.10.2012)*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.
- Mantelverordnung, 3. Entwurf 2015: *Verordnung zur Festlegung von Anforderungen für das Einbringen oder das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser, an den Einbau von Ersatzbaustoffen und zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (3. Arbeitsentwurf, Stand: 23.07.2015)*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.
- StMUGV, 2005: *Anforderungen an die Verwertung von Bauschutt in technischen Bauwerken*. Leitfaden des bayerischen Staatsministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (StMUGV).

ZTV wwG-StB By 05, 2005: *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Technische Lieferbedingungen für die wasserwirtschaftlichen Gütemerkmale bei der Verwendung von Recycling-Baustoffen im Straßenbau in Bayern*. Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr.

### 11.3 Normen, Richtlinien

DIN 4047-13, 2002: *Landwirtschaftlicher Wasserbau - Begriffe - Teil 3: Bodenkunde, Bodensystematik und Bodenuntersuchung*.

DIN 18121-1, 1998: *Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Wassergehalt Teil 1: Bestimmung durch Ofentrocknung*.

DIN 18122-1, 1997: *Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen) - Teil 1: Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze*.

DIN 18123, 2011: *Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Korngrößenverteilung*.

DIN 18124, 2011: *Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Korndichte - Kapillarpyknometer, Weithalspyknometer, Gaspyknometer*.

DIN 18127, 2012: *Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Proctorversuch*.

DIN 18130-1, 1998: *Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts Teil 1: Laborversuche*.

DIN 18196, 2011: *Erd- und Grundbau – Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke*.

DIN EN 1097-6: 2013: *Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme; Deutsche Fassung EN 1097-6:2013*.

M TS E, 2009: *Merkblatt über Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau*. Regelwerk der FGSV.

TL BuB E-StB 09, 2009: *Technische Lieferbedingungen für Böden und Baustoffe im Erdbau des Straßenbaus*. Regelwerk der FGSV.

TL Gestein-StB, 04/07: *Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau*. Regelwerk der FGSV.

TP BF-StB Teil B 7.1, 2012: *Prüfverfahren zur Bestimmung des CBR-Wertes (California bearing ratio)*. Regelwerk der FGSV.

TP BF-StB Teil B 3.3, 2012: *Bestimmung der Korndichte im Luftpyknometer*. Regelwerk der FGSV.

TP BF-StB Teil B 8.3, 2012: *Dynamischer Plattendruckversuch mit Leichtem Fallgewichtsgerät*. Regelwerk der FGSV.

- TP BF-StB Teil B 11.3, 2010: *Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau, Eignungsprüfung bei Bodenverbesserungen mit Bindemitteln*. Regelwerk der FGSV.
- TP Gestein-StB Teil 3.1.5, 2012: *Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau, Stoffliche Kennzeichnung von groben rezyklierten Gesteinskörnungen*. Regelwerk der FGSV.
- ZTV E-StB 09, 2009: *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau*. Regelwerk der FGSV.

## 12 Anhang

### Inhalt:

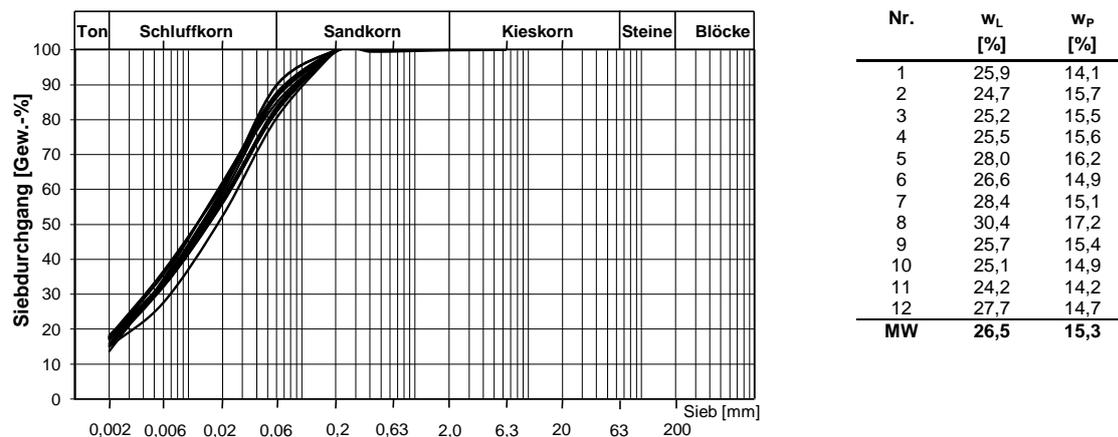
---

Anhang A.1	Beschreibung der Ausgangsböden	S. 159
Anhang A.2	Einzelversuchsergebnisse zu Versuchsreihe 1	S. 171
Anhang A.3	Einzelversuchsergebnisse zu Versuchsreihe 2	S. 175
Anhang A.4	Einzelversuchsergebnisse zu Versuchsreihe 3	S. 179
Anhang A.5	Einzelversuchsergebnisse zu Versuchsreihe 4	S. 185
Anhang A.6	Einzelversuchsergebnisse zu Versuchsreihe 5	S. 191
Anhang A.7	Ausgleichs-Wassergehalte bei der Ausgleichs-Saugspannung	S. 195



## A.1 Beschreibung der Ausgangsböden

**TL1 - Leicht plastischer Ton.** Der Boden TL1 stammt aus einer Kiesgrube nahe München und fällt dort als Nebenprodukt bei der Kieswäsche (Isar-Kies) an. Das Material kann nach erfolgter Entwässerung mittels Kammerfilterpresse in großen Mengen (und über längere Zeiträume) in nahezu konstanter Qualität bezogen werden. Nach DIN 18196:2011 ist der Ton der Bodengruppe TL (leicht plastischer Ton) zuzuordnen. Zu den Ergebnissen der klassifizierenden Versuche siehe [Abb. 12.1](#), in der die einzelnen Korngrößenverteilungen und die Einzelergebnisse zur Bestimmung der plastischen Eigenschaften abgebildet sind. Der Boden ist im Plastizitätsdiagramm nach DIN 18196:2011 in [Abb. 4.2](#) eingetragen.



**Abb. 12.1: Kornverteilungen und Konsistenzgrenzen des Bodens TL1**

Im Zuge mehrerer Versuchsreihen wurde eine große Menge des Materials verarbeitet und daher auch eine entsprechende Menge an klassifizierenden Versuchen durchgeführt. In [Abb. 12.2](#) sind diese zusammengefasst dargestellt. Die Einzelversuche wurden verteilt über die verschiedenen Lieferungen und den damit verbundenen Versuchsreihen durchgeführt.

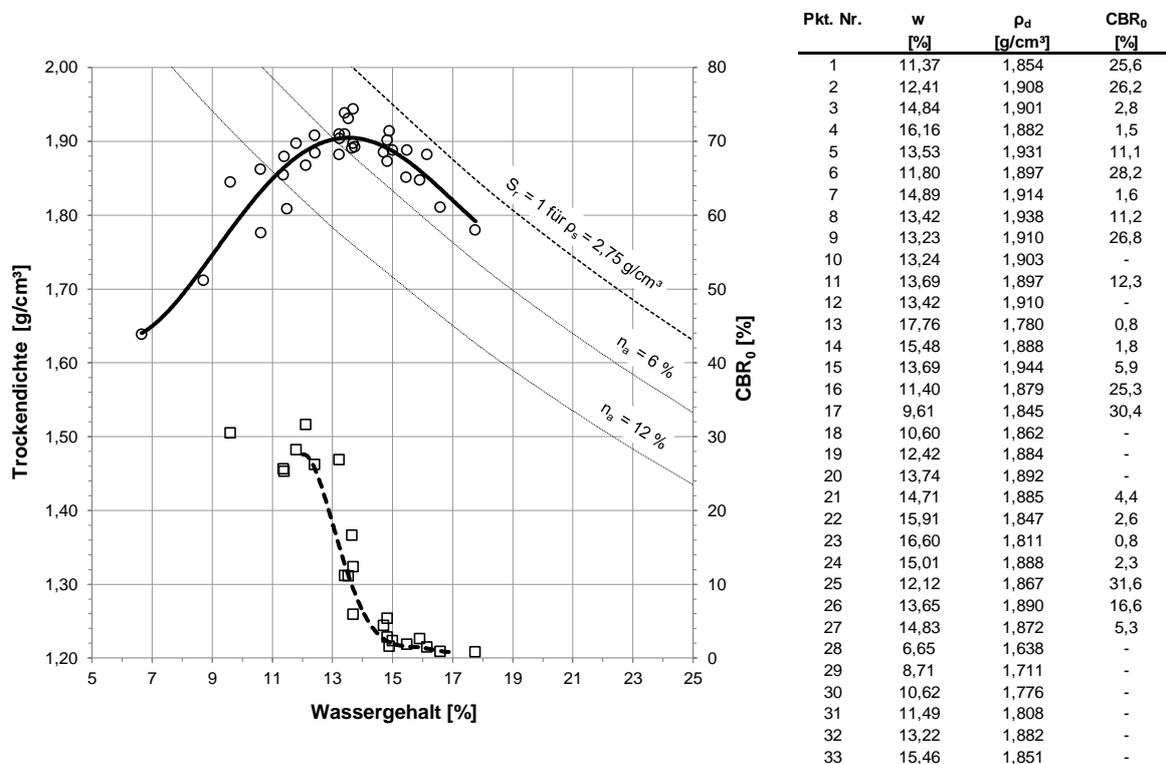
Am Ausgangsboden TL1 wurden durch das GeoZentrum Nordbayern der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg zusätzlich auch tonmineralogische Untersuchungen an der Gesamtkörnung und der Tonfraktion (gemäß [Abb. 12.1](#) beträgt der Anteil < 0,002 mm beim Boden TL1 zwischen 14 und 18 M.-%) durchgeführt. Die tonmineralogische Zusammensetzung ist in [Tab. 12.1](#) getrennt für beide Untersuchungen aufgelistet.

**Tab. 12.1:** Tonmineralogische Zusammensetzung des Bodens TL1<sup>137</sup>

Bestandteil	Gesamt [M.-%]	Tonfraktion [M.-%]
Quarz	20	-
Kaolinit	2	20
Albit	3	-
Muscovit, (Illit)	2	-
Illit	-	40
Dolomit	44	-
Kalzit	27	-
Chlorit	2	40

Die tonmineralogische Untersuchung zeigt für das Gesamtmaterial einen hohen Anteil an Dolomit und Kalzit. Dies deutet auf die Herkunft des Festgesteins aus den Nördlichen Kalkalpen hin.

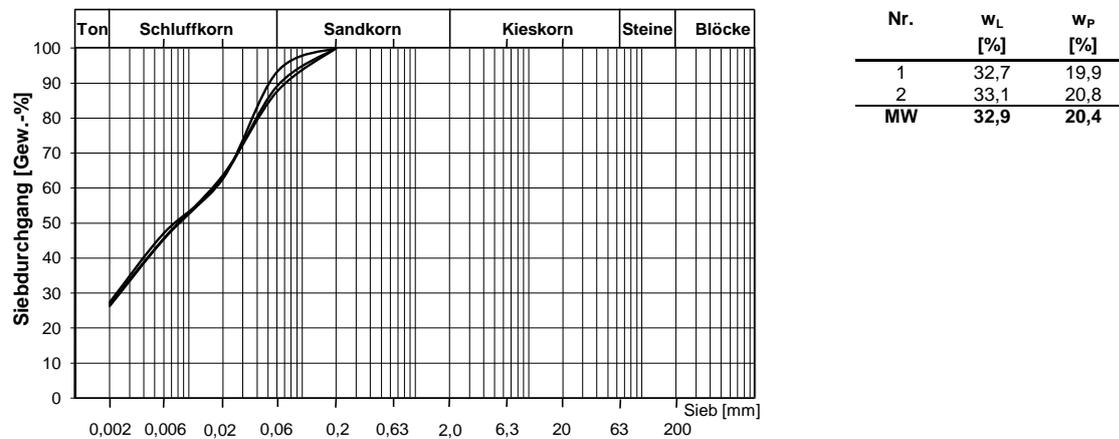
Neben klassifizierenden Versuchen wurde auch das Verdichtungs- und Tragfähigkeitsverhalten des Bodens untersucht. Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche sind in nachfolgender Abbildung dargestellt.

**Abb. 12.2:** Verdichtungs- und Tragfähigkeitseigenschaften des Bodens TL1

**TL 2 - Leicht plastischer Ton.** Der leicht plastische Ton TL2 wurde als Sackware bei der Fa. Carl Jäger Tonindustribedarf GmbH bezogen. Der Ton wird laut Herstellerangabe unter

<sup>137</sup> Die Untersuchung der tonmineralogischen Zusammensetzung erfolgte mittels Röntgendiffraktometrie durch das GeoZentrum Nordbayern der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Prüfbericht zu Projekt 13731, K13006, vom 13.03.2013.

anderem im Bereich der Keramikindustrie verwendet<sup>138</sup>. Nach DIN 18196:2011 ist der Ton der Bodengruppe TL (leicht plastischer Ton) zuzuordnen. Zu den Einzelergebnissen der klassifizierenden Versuche siehe Abb. 12.3, in der die einzelnen Korngrößenverteilungen und die Einzelergebnisse zur Bestimmung der plastischen Eigenschaften abgebildet sind.



**Abb. 12.3: Kornverteilungen und Konsistenzgrenzen des Bodens TL2**

Am Boden TL2 wurde keine eigene tonmineralische Analyse durchgeführt. Die Mineralanalyse des Herstellers ist in Tab. 12.2 angeführt und zeigt hohe Anteile an Quarz, Serizit und Kaolinit.

**Tab. 12.2: Mineralogische Zusammensetzung des Bodens TL2<sup>139</sup>**

Bestandteil	Anteil [M.-%]
Quarz	45
Kaolinit	15
Serizit	33
Kalifeldspat	6
Fe-Ti-Minerale	1

Serizit entspricht nach JASMUND & LAGALY (1993) einem „dichten, feinschuppigen Muscovit“ und ist somit der Gruppe des in der Regel nicht-schwellfähigen Dreischichtminerals Glimmer zuzuordnen (vgl. JASMUND & LAGALY, 1993)<sup>140</sup>. Nach Herstellerangaben wird der Boden insgesamt unter der Bezeichnung „Kaolinitischer Ton“ geführt<sup>141</sup>.

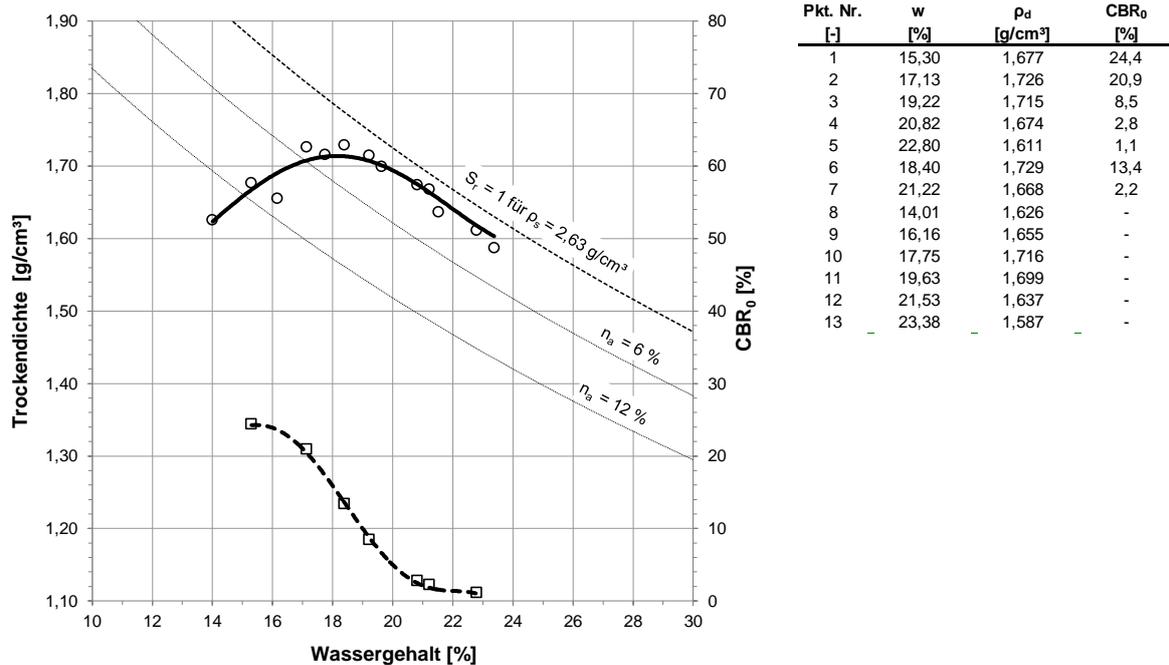
Neben klassifizierenden Versuchen wurde auch das Verdichtungs- und Tragfähigkeitsverhalten des Bodens untersucht. Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche sind in nachfolgender Abbildung dargestellt.

<sup>138</sup> Informationen laut Sicherheitsdatenblatt zum Tonmehl 132/I der Fa. Carl Jäger. Homepage der Fa. Carl Jäger Tonindustribedarf, abgerufen am 28.07.2015 (<http://www.carl-jaeger.de/SD/html/ton.html>).

<sup>139</sup> Informationen zur Analyse des Tonmehls 132/I der Fa. Carl Jäger. Homepage der Fa. Carl Jäger Tonindustribedarf, abgerufen am 28.07.2015 (<http://www.carl-jaeger.de/SD/html/ton.html>).

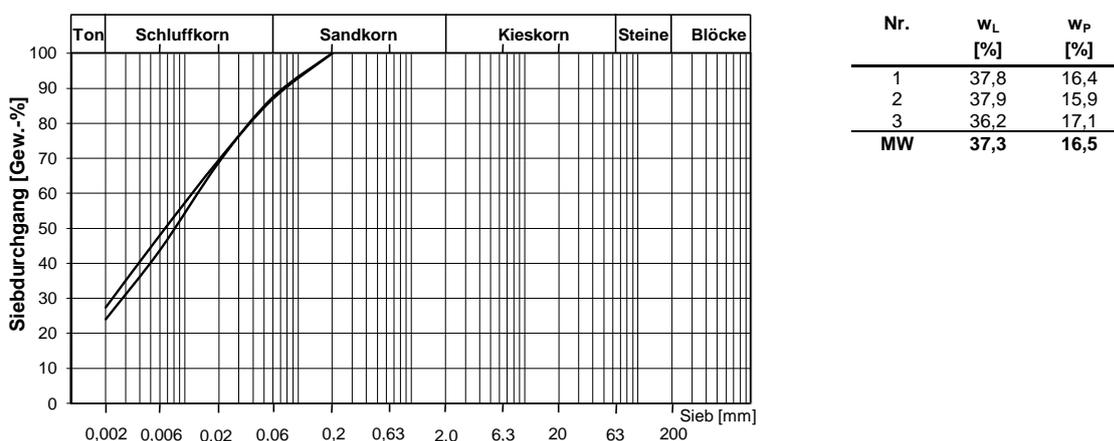
<sup>140</sup> JASMUND & LAGALY (1993): S. 7 und 305.

<sup>141</sup> Informationen laut Sicherheitsdatenblatt zum Tonmehl 132/I der Fa. Carl Jäger. Homepage der Fa. Carl Jäger Tonindustribedarf, abgerufen am 28.07.2015 (<http://www.carl-jaeger.de/SD/html/ton.html>).



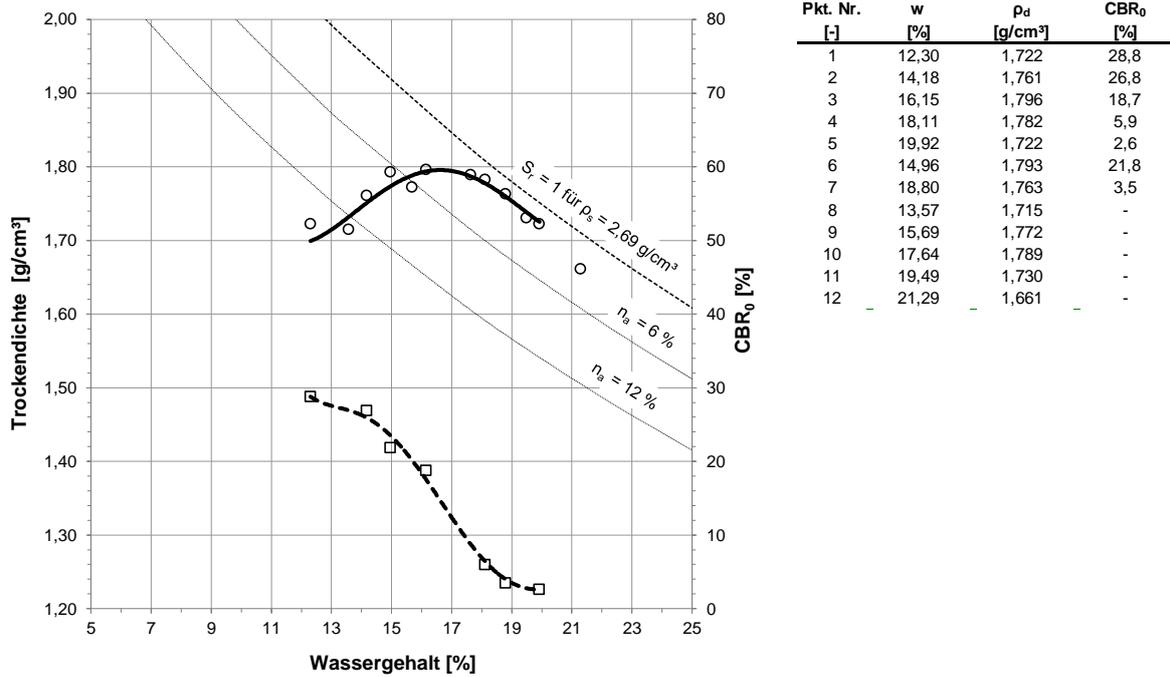
**Abb. 12.4:** Verdichtungs- und Tragfähigkeitseigenschaften des Bodens TL2

**TM1 - Mittelplastischer Ton.** Der Ton TM1 wurde durch Mischung des Bodens TL1 mit dem Boden TA1 im Mischungsverhältnis 25 % zu 75 %, bezogen auf die Trockenmasse, hergestellt. Nach DIN 18196:2011 ist der Ton der Bodengruppe TM (mittelplastischer Ton) zuzuordnen. Zu den Einzelergebnissen der klassifizierenden Versuche siehe [Abb. 12.5](#), in der die zwei ermittelten Korngrößenverteilungen und die Einzelergebnisse zur Bestimmung der plastischen Eigenschaften abgebildet sind.



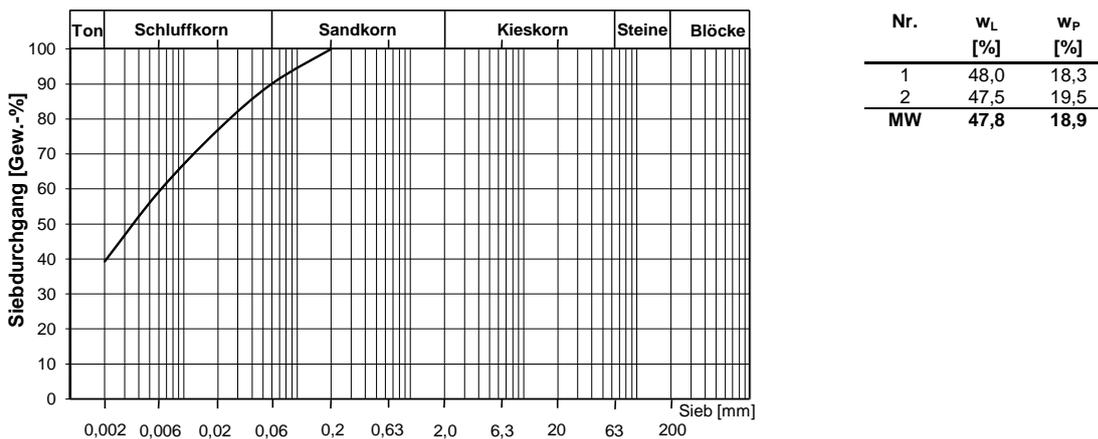
**Abb. 12.5:** Kornverteilungen und Konsistenzgrenzen des Bodens TM1

Neben klassifizierenden Versuchen wurde auch das Verdichtungs- und Tragfähigkeitsverhalten des Bodens untersucht. Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche sind in nachfolgender Abbildung dargestellt.



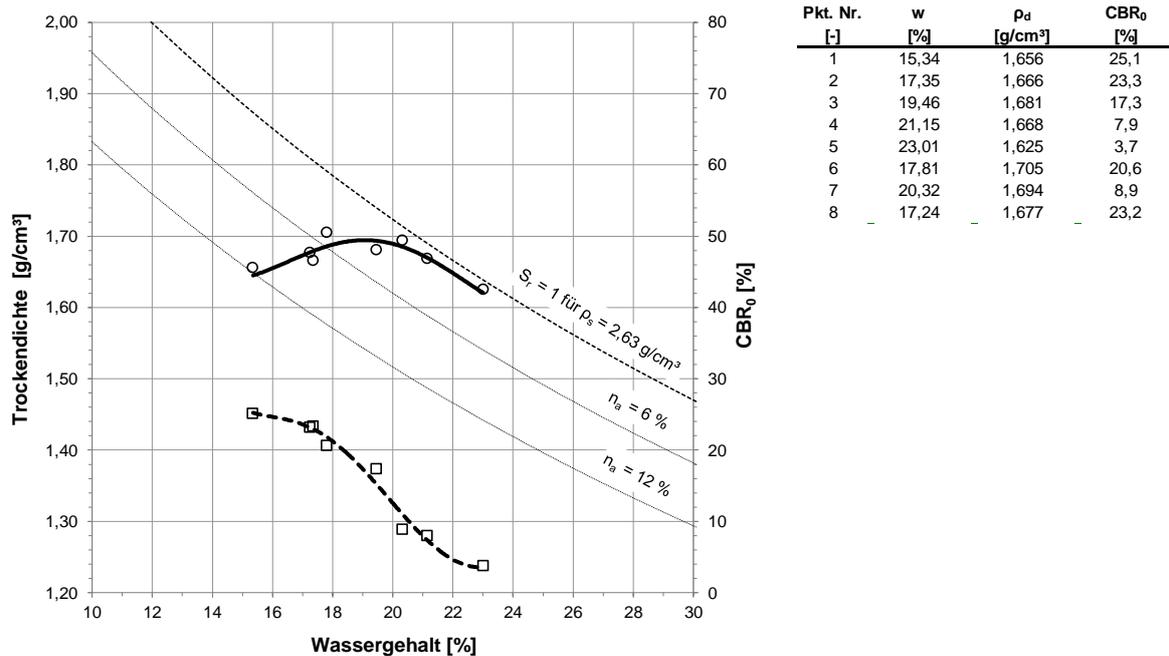
**Abb. 12.6:** Verdichtungs- und Tragfähigkeitseigenschaften des Bodens TM1

**TM 2 - Mittelplastischer Ton.** Der mittelplastische Ton TM2 wurde durch Mischung des Bodens TL1 mit dem Boden TA1 im Mischungsverhältnis der Trockenmassen von 50 % TL1 zu 50 % TA1 hergestellt. Nach DIN 18196:2011 ist der Boden der Bodengruppe TM (mittelplastischer Ton) zuzuordnen. Zu den Einzelergebnissen der klassifizierenden Versuche siehe [Abb. 12.7](#) in der die ermittelte Korngrößenverteilung und die Einzelergebnisse zur Bestimmung der plastischen Eigenschaften abgebildet sind.



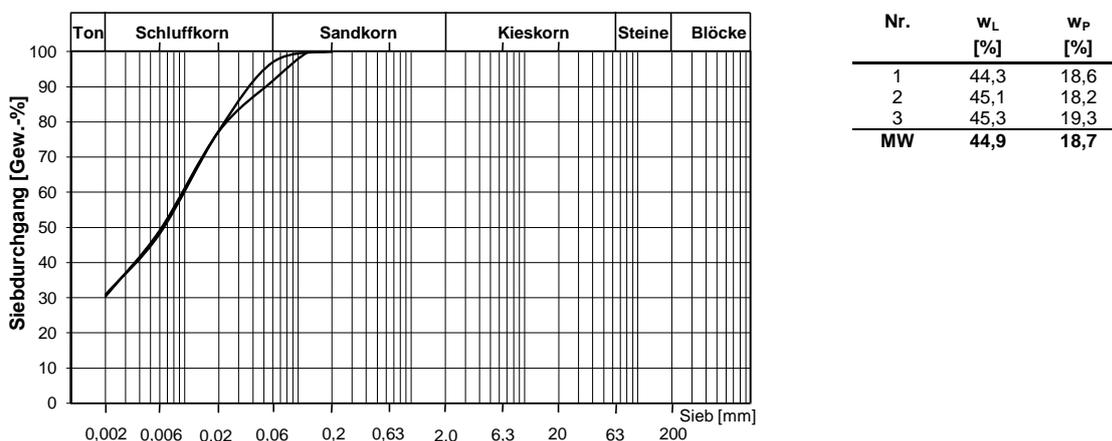
**Abb. 12.7:** Kornverteilungen und Konsistenzgrenzen des Bodens TM2

Neben klassifizierenden Versuchen wurde auch das Verdichtungs- und Tragfähigkeitsverhalten des Bodens untersucht. Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche sind in nachfolgender Abbildung dargestellt.



**Abb. 12.8:** Verdichtungs- und Tragfähigkeitseigenschaften des Bodens TM2

**TM3 - Mittelplastischer Ton.** Der Boden wurde in Pulverform als Sackware von der Fa. Adolf Gottfried Tonwerke GmbH bezogen. Nach DIN18196:2011 ist der Ton der Bodengruppe TM (mittelplastischer Ton) zuzuordnen. Zu den Ergebnissen der klassifizierenden Versuche siehe [Abb. 12.9](#), in der die zwei ermittelten Korngrößenverteilungen und die Einzelergebnisse zur Bestimmung der plastischen Eigenschaften abgebildet sind. Eine Zusammenfassung der klassifizierenden Eigenschaften findet sich auch in [Tab. 4.1](#).



**Abb. 12.9:** Kornverteilungen und Konsistenzgrenzen des Bodens TM3

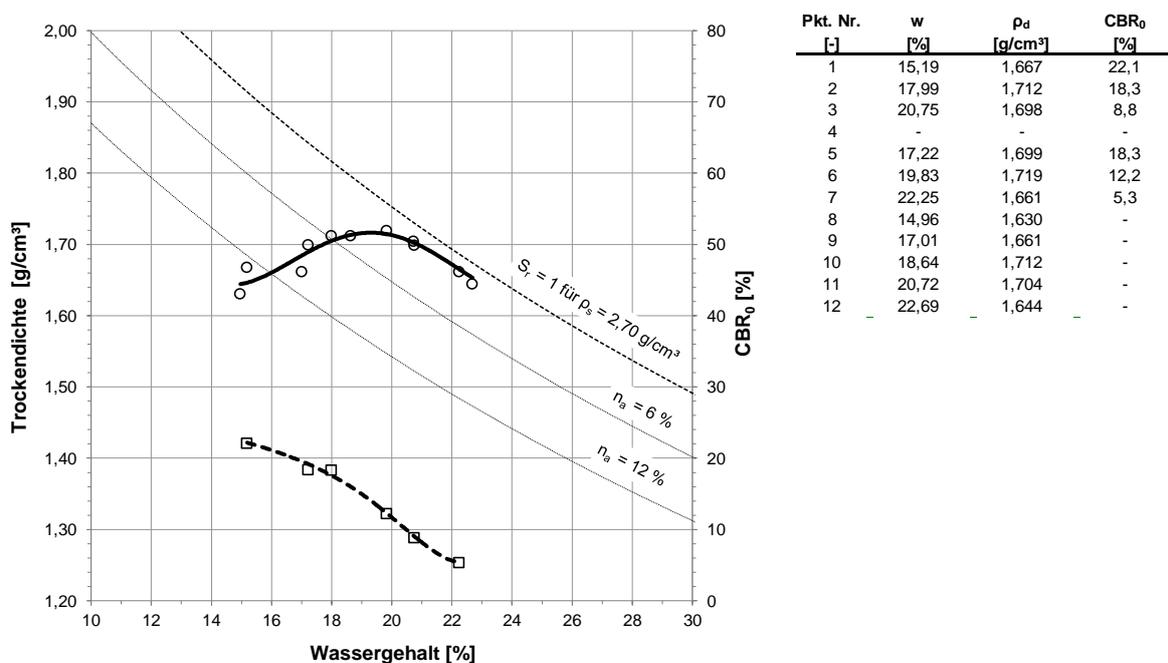
Am Ausgangsboden TM3 wurden durch das GeoZentrum Nordbayern der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg zusätzlich auch tonmineralogische Untersuchungen an der Gesamtkörnung und der Tonfraktion (gemäß [Abb. 12.9](#) beträgt der Anteil < 0,002 mm beim Boden TM3 etwa 30 bis 31 M.-%) durchgeführt. Die tonmineralogische Zusammensetzung ist in [Tab. 12.3](#) getrennt für beide Untersuchungen aufgelistet.

**Tab. 12.3:** Tonmineralogische Zusammensetzung des Bodens TM3<sup>142</sup>

Bestandteil	Gesamt [M.-%]	Tonfraktion [M.-%]
Quarz	54	
Kaolinit	25	25
Albit	2	
Muscovit, (Illit)	6	
Illit		37
Ortoklas	3	
Smektit	8	
Anatas	2	
Illit-Smektit ML		38

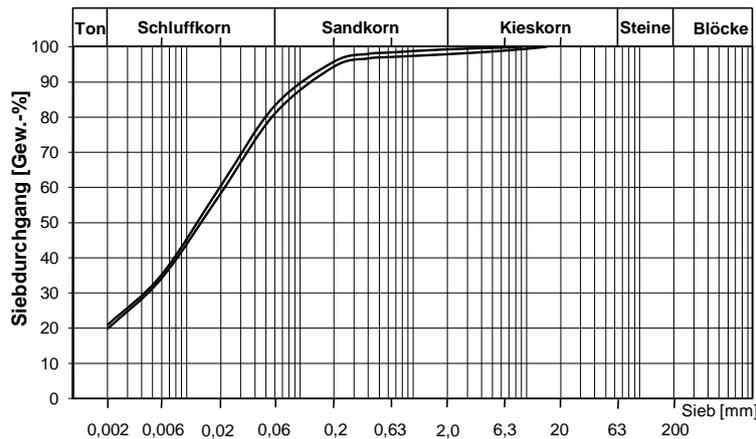
Die Mineralanalyse an der Gesamtfraktion zeigt, dass der Boden TM3 größtenteils aus Quarz und Kaolinit besteht. In der Tonfraktion zeigt er allerdings deutliche Anteile an teils quellbaren Wechsellagerungsmineralien aus Illit und Smektit.

Neben klassifizierenden Versuchen wurde auch das Verdichtungs- und Tragfähigkeitsverhalten des Bodens untersucht. Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche sind in nachfolgender Abbildung dargestellt.

**Abb. 12.10:** Verdichtungs- und Tragfähigkeitseigenschaften des Bodens TM3

**TM4 - Mittelplastischer Ton.** Der Boden TM4 stammt aus einer Kiesgrube im Umkreis von München und wird allgemein als Lösslehm bezeichnet. Nach DIN 18196:2011 ist der Ton der Bodengruppe TM (mittelplastischer Ton) zuzuordnen (siehe [Abb. 12.11](#)).

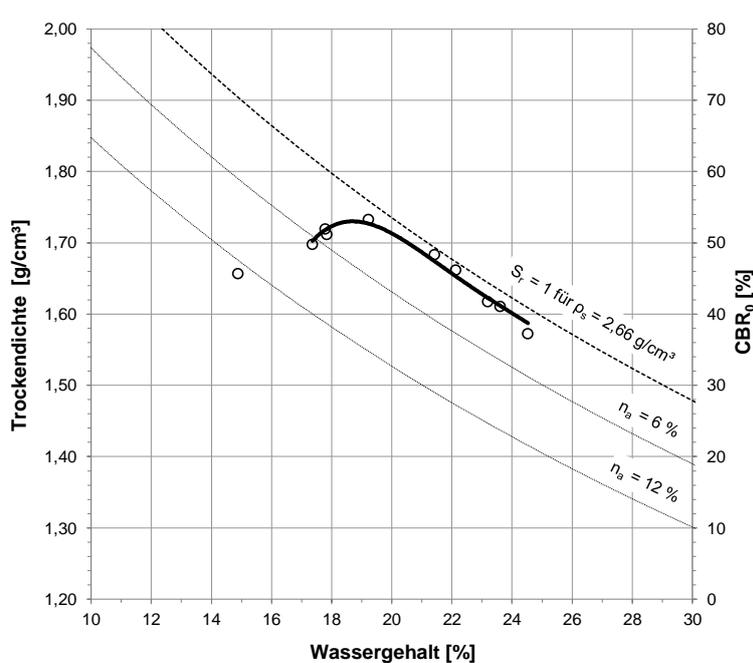
<sup>142</sup> Die Untersuchung der tonmineralogischen Zusammensetzung erfolgte mittels Röntgendiffraktometrie durch das GeoZentrum Nordbayern der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Prüfbericht zu Projekt 13731, K13006, vom 13.03.2013.



Nr.	$w_L$ [%]	$w_P$ [%]
1	43,0	19,1
2	42,3	18,3
<b>MW</b>	<b>42,7</b>	<b>18,7</b>

**Abb. 12.11:** Kornverteilungen und Konsistenzgrenzen des Bodens TM4

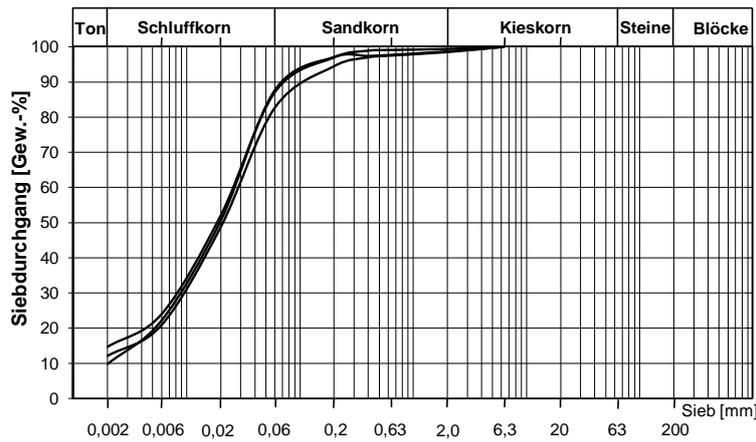
Neben klassifizierenden Versuchen wurde auch das Verdichtungs- und Tragfähigkeitsverhalten des Bodens untersucht. Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche sind in nachfolgender Abbildung dargestellt.



Pkt. Nr. [-]	$w$ [%]	$\rho_d$ [g/cm³]	$CBR_0$ [%]
1	19,23	1,732	-
2	23,20	1,617	-
3	24,53	1,572	-
4	14,89	1,657	-
5	17,85	1,711	-
6	22,14	1,661	-
7	21,43	1,683	-
8	23,61	1,610	-
9	17,37	1,697	-
10	-	-	-
11	17,80	1,719	-

**Abb. 12.12:** Verdichtungseigenschaften des Bodens TM4

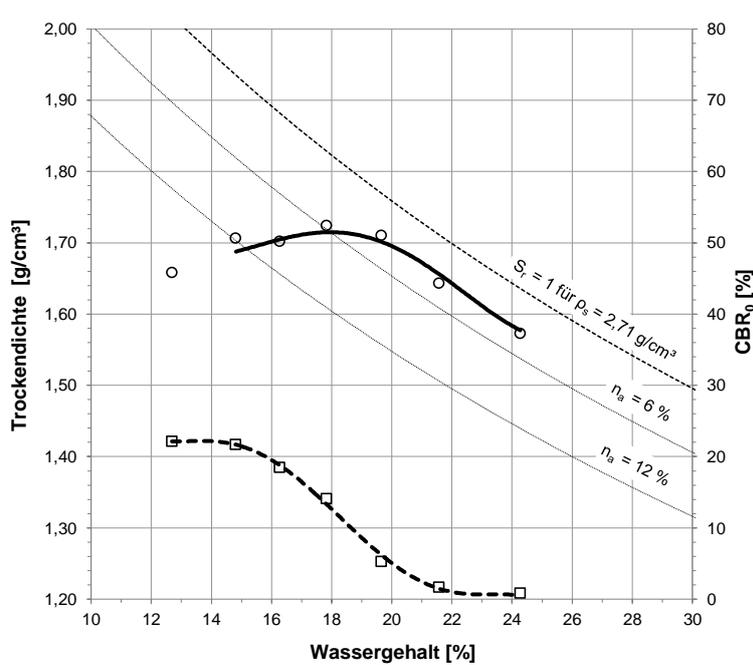
**TM5 - Mittelplastischer Ton.** Der Boden TM5 stammt aus einer Baumaßnahme in Raum von München und wird als tertiärer Ton angesprochen. Nach DIN 18196:2011 ist der Ton der Bodengruppe TM (mittelplastischer Ton) zuzuordnen. Zu den Einzelergebnissen der klassifizierenden Versuche siehe [Abb. 12.13](#), in der die drei ermittelten Korngrößenverteilungen und die Einzelergebnisse zur Bestimmung der plastischen Eigenschaften abgebildet sind.



Nr.	$w_L$ [%]	$w_P$ [%]
1	36,4	21,7
2	37,8	21,2
3	37,2	20,9
<b>MW</b>	<b>37,1</b>	<b>21,3</b>

**Abb. 12.13:** Kornverteilungen und Konsistenzgrenzen des Bodens TM5

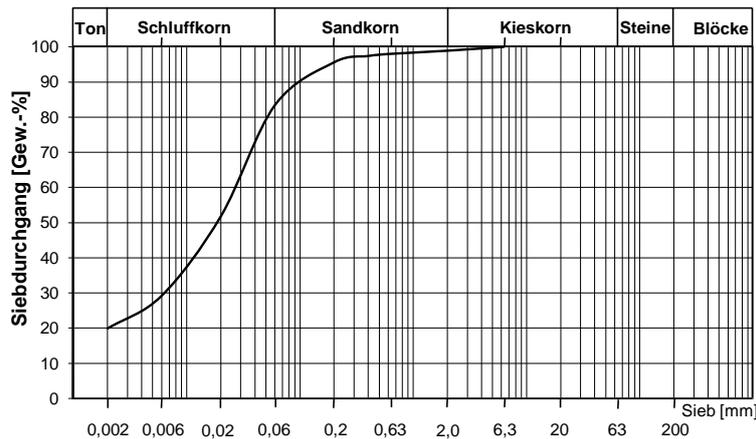
Neben klassifizierenden Versuchen wurde auch das Verdichtungs- und Tragfähigkeitsverhalten des Bodens untersucht. Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche sind in nachfolgender Abbildung dargestellt.



Pkt. Nr. [-]	w [%]	$\rho_d$ [g/cm³]	CBR₀ [%]
1	14,81	1,706	21,7
2	17,83	1,724	14,0
3	19,66	1,710	5,3
4	21,57	1,643	1,7
5	24,28	1,573	0,8
6	16,28	1,702	18,5
7	12,69	1,658	22,1

**Abb. 12.14:** Verdichtungs- und Tragfähigkeitseigenschaften des Bodens TM5

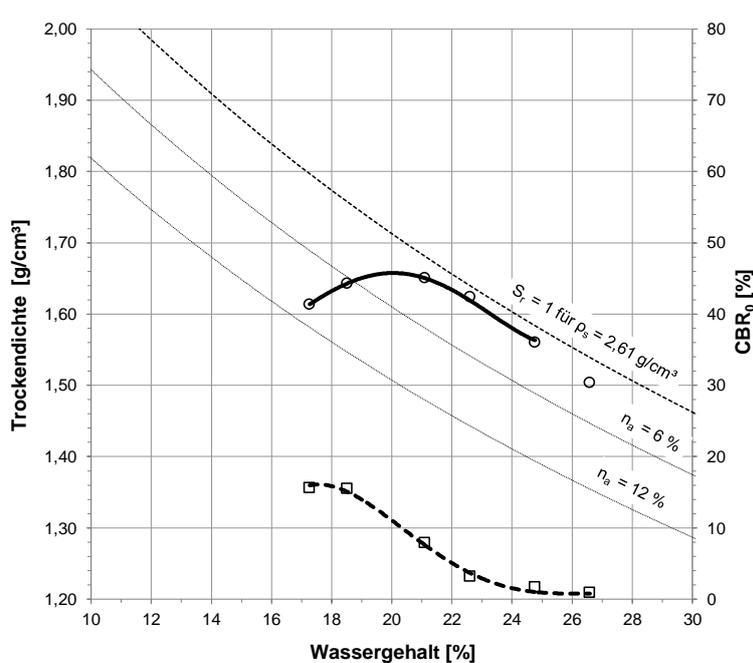
**TM6 - Mittelplastischer Ton.** Der Boden TM5 stammt aus einer Baumaßnahme in Raum von München und wurde dort als Dichtungsmaterial für Absetzbecken eingesetzt. Nach DIN 18196:2011 ist der Ton der Bodengruppe TM (mittelplastischer Ton) zuzuordnen. Zu den Einzelergebnissen der klassifizierenden Versuche siehe [Abb. 12.15](#).



Nr.	$w_L$ [%]	$w_P$ [%]
1	41,0	21,6
2	41,7	21,0
<b>MW</b>	<b>41,4</b>	<b>21,3</b>

**Abb. 12.15:** Kornverteilungen und Konsistenzgrenzen des Bodens TM6

Neben klassifizierenden Versuchen wurde auch das Verdichtungs- und Tragfähigkeitsverhalten des Bodens untersucht. Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche sind in nachfolgender Abbildung dargestellt.



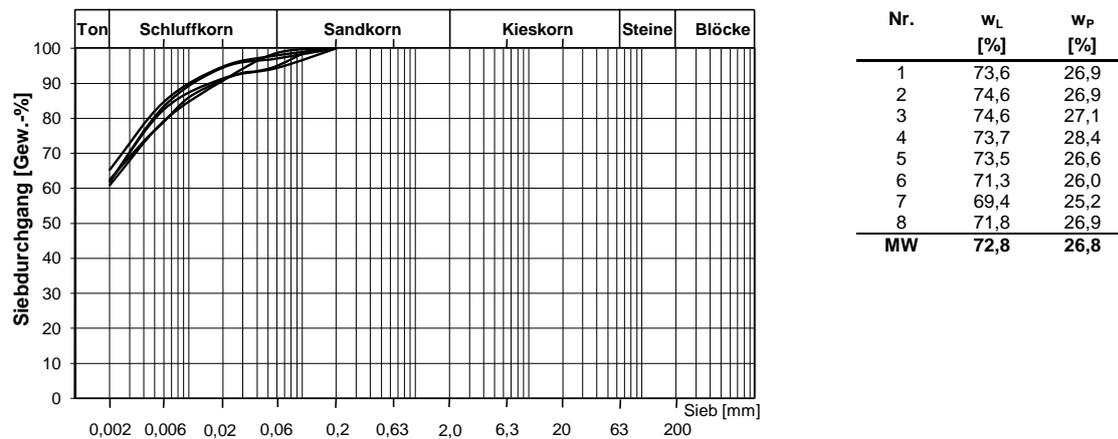
Pkt. Nr.	w [%]	$\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]	CBR <sub>0</sub> [%]
1	17,27	1,614	15,6
2	21,09	1,651	7,9
3	22,61	1,624	3,2
4	24,76	1,560	1,7
5	26,58	1,503	0,9
6	18,51	1,643	15,5

**Abb. 12.16:** Verdichtungs- und Tragfähigkeitseigenschaften des Bodens TM6

**TA1 - Ausgeprägt plastischer Ton.** Der Tonboden wurde in Form von Pellets von der Fa. Amberger Kaolinwerke bezogen, die solche Böden laut mitgeliefertem Produktdatenblatt in Hirschau, Schnaittenbach, Kemmlitz und Caminau produziert. Nach DIN 18196:2011 ist der Ton der Bodengruppe TA (ausgeprägt plastischer Ton) zuzuordnen. Zu den Ergebnissen der klassifizierenden Versuche siehe [Abb. 12.17](#), in der die ermittelten Korngrößenverteilungen und die Einzelergebnisse zur Bestimmung der plastischen Eigenschaften abgebildet sind.

Am Ausgangsboden TA1 wurden am GeoZentrum Nordbayern der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg zusätzlich auch tonmineralogische Untersuchungen an der Gesamtkörnung und der Tonfraktion (gemäß [Abb. 12.17](#) beträgt der Anteil < 0,002 mm beim

Boden TA1 zwischen 61 und 65 M.-%.) durchgeführt. Die ermittelte tonmineralogische Zusammensetzung ist in Tab. 12.4 getrennt für beide Untersuchungen aufgelistet.



**Abb. 12.17:** Kornverteilungen und Konsistenzgrenzen des Bodens TA1

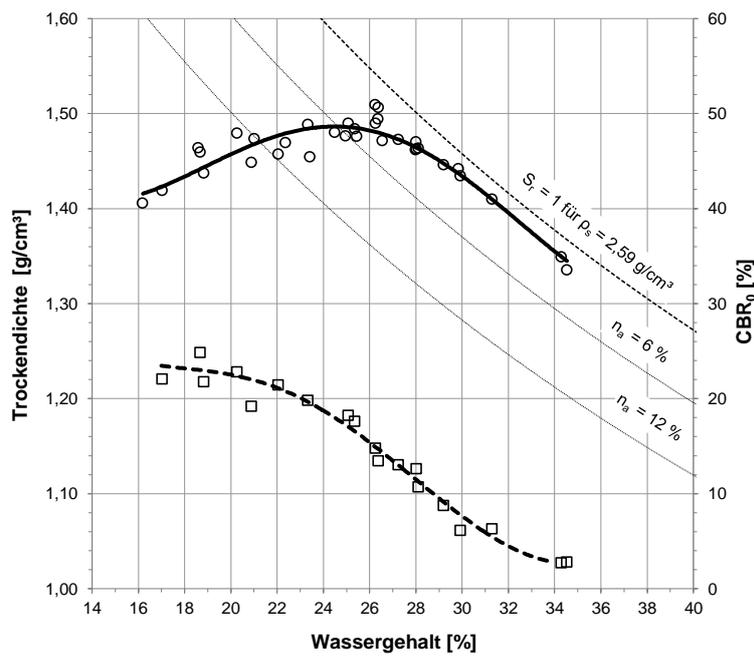
Wie das Ergebnis der mineralogischen Analyse in Tab. 12.4 zeigt, besteht der Ausgangsboden TA1 hauptsächlich aus Kaolinit mit hohen Anteilen an Quarz. In der Gesamtfraction sind mit dem Wechsellagerungsmineral (ML = Mixed Layer) Illit/Smektit niedrige Anteile von teilweise quellbaren Tonmineralen ausgewiesen.

**Tab. 12.4:** Tonmineralogische Zusammensetzung des Ausgangsboden TA1<sup>143</sup>

Bestandteil	Gesamt [M.-%]	Tonfraktion [M.-%]
Quarz	30	-
Kaolinit	55	66
Albit	5	-
Muscovit, (Illit)	4	-
ML Illit / Smektit	6	9
Illit	-	25

Neben klassifizierenden Versuchen wurde auch das Verdichtungs- und Tragfähigkeitsverhalten des Bodens untersucht. Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche sind in nachfolgender Abbildung dargestellt.

<sup>143</sup> Die Untersuchung der tonmineralogischen Zusammensetzung erfolgte mittels Röntgendiffraktometrie durch das GeoZentrum Nordbayern der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Prüfbericht zu Projekt 13731, K13006, vom 13.03.2013.



Pkt. Nr.	w	$\rho_d$	CBR <sub>0</sub>
[-]	[%]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[%]
1	28,03	1,462	12,6
2	31,31	1,410	6,3
3	34,53	1,335	2,8
4	17,03	1,419	22,0
5	18,84	1,437	21,7
6	20,89	1,448	19,1
7	24,96	1,476	-
8	28,02	1,470	-
9	18,67	1,459	24,8
10	29,21	1,446	8,7
11	26,26	1,490	14,8
12	22,05	1,457	21,4
13	34,29	1,349	2,7
14	16,19	1,406	-
15	23,43	1,454	-
16	26,36	1,494	-
17	25,08	1,490	18,2
18	25,44	1,476	-
19	26,38	1,506	13,4
20	26,24	1,509	-
21	20,27	1,479	22,8
22	23,34	1,488	19,8
23	25,36	1,484	17,6
24	27,26	1,472	13,0
25	28,11	1,463	10,7
26	29,94	1,434	6,1
27	18,59	1,464	-
28	21,01	1,473	-
29	22,37	1,469	-
30	24,50	1,480	-
31	26,56	1,471	-
32	28,00	1,461	-
33	29,84	1,441	-

**Abb. 12.18:** Verdichtungs- und Tragfähigkeitseigenschaften des Bodens TA1

## A.2 Einzelversuchsergebnisse zu Versuchsreihe 1

### A.2.1 Grundlagen zur Auswertung

**Tab. 12.5:** Mittlerer Eigenwassergehalt der RC-Materialien in Versuchsreihe 1

Mischung \ Boden	TL1	TL2	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TA1
	Mittlerer Wassergehalt des RC-Mix 0/4 vor Mischung $w_{z_{M,0}}$ [%]								
100 % Boden + 30 % RC-Mix 0/4	2,2	2,3	2,4	-	2,2	2,3	-	-	2,3
100 % Boden + 50 % RC-Mix 0/4	2,2	2,3	2,4	-	2,2	2,3	-	-	2,3

**Tab. 12.6:** Scheinbare Kornrohddichte der RC-Materialien und Mischungen in Versuchsreihe 1

Mischung \ Boden	TL1	TL2	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TA1
	Scheinbare Kornrohddichte <sup>1)</sup> [g/cm <sup>3</sup> ]								
100 % Boden + 30 % RC-Mix 0/4	2,727 <sup>2)</sup>	2,637 <sup>2)</sup>	2,679 <sup>2)</sup>	-	2,687 <sup>2)</sup>	2,655 <sup>2)</sup>	-	-	2,606 <sup>2)</sup>
100 % Boden + 50 % RC-Mix 0/4	2,716 <sup>2)</sup>	2,638 <sup>2)</sup>	2,675 <sup>2)</sup>	-	2,681 <sup>2)</sup>	2,654 <sup>2)</sup>	-	-	2,611 <sup>2)</sup>

Anmerkung:  
 1) Begriff in Anlehnung an die Definition nach DIN EN 1097-6:2013 zu „Scheinbare Rohddichte“, siehe Pkt. 3.4.  
 2) Die Korndichten der Mischungen wurden aus jenen der Böden und RC-Materialien (siehe Pkt. 4.2) im entsprechenden Mischungsverhältnis berechnet.

### A.2.2 Tabellarische Auflistung der Ergebnisse

**Tab. 12.7:** Entwicklung der optimalen Wassergehalte in Versuchsreihe 1

Mischung \ Boden	TL1	TL2	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TA1
	Optimaler Verdichtungswassergehalt des Bodens $w_{\text{Boden(Pr)}}$ [%]								
Boden ohne Zugabe-Material	13,5	18,2	16,6	19,1	19,3	18,7	17,9	20,1	24,4
Optimaler Verdichtungswassergehalt der Mischung $w_{\text{Mischung(Pr)}}$ [%]									
100 % Boden + 30 % RC-Mix 0/4	14,08	16,65	16,17	-	17,34	17,11	-	-	21,58
100 % Boden + 50 % RC-Mix 0/4	14,04	16,24	15,71	-	15,95	15,63	-	-	20,11
Optimaler Ausgangswassergehalt des Bodens $w_{\text{Boden(Pr),0}}$ [%]									
100 % Boden + 30 % RC-Mix 0/4	17,62	21,13	20,24	-	21,86	21,55	-	-	27,31
100 % Boden + 50 % RC-Mix 0/4	19,91	23,41	22,45	-	22,69	22,44	-	-	29,01

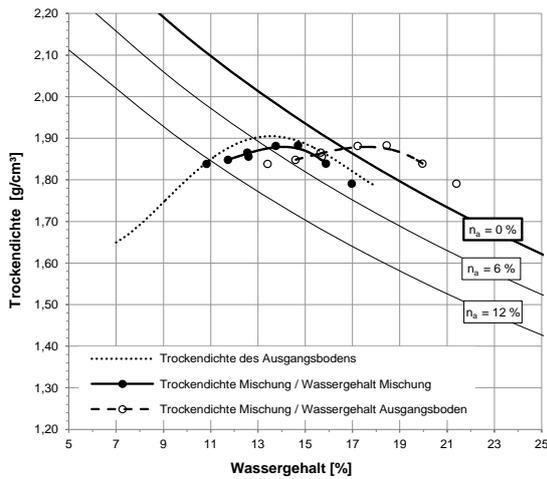
**Tab. 12.8:** Entwicklung der Trockendichten im Optimum der Mischungen in Versuchsreihe 1

Mischung \ Boden	TL1	TL2	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TA1
	Trockendichte im Verdichtungsoptimum des Bodens $\rho_{d,\text{Boden(Pr)}}$ [g/cm <sup>3</sup> ]								
Boden ohne Zugabe-Material	1,905	1,714	1,796	1,695	1,716	1,730	1,715	1,658	1,486
Trockendichte im Verdichtungsoptimum Mischung $\rho_{d,\text{Mischung(Pr)}}$ [g/cm <sup>3</sup> ]									
100 % Boden + 30 % RC-Mix 0/4	1,879	1,769	1,785	-	1,747	1,729	-	-	1,555
100 % Boden + 50 % RC-Mix 0/4	1,870	1,768	1,759	-	1,712	1,730	-	-	1,581

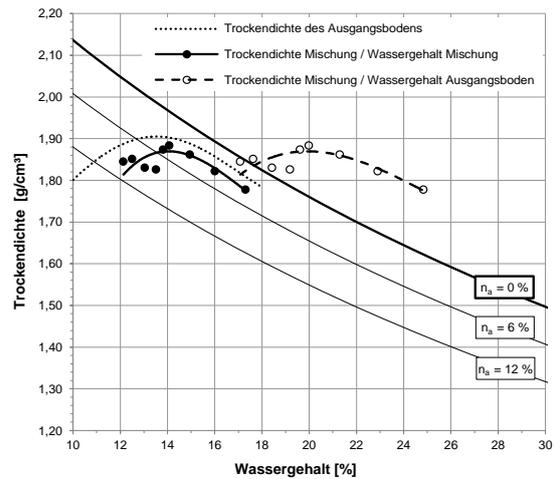
**Tab. 12.9:** Entwicklung der Luftporenanteile im Optimum der Mischungen in Versuchsreihe 1

Mischung \ Boden	TL1	TL2	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TA1
	Luftporenanteil $n_a$ im Verdichtungsoptimum der Mischung [%]								
100 % Boden + 30 % RC-Mix 0/4	4,6	3,5	4,5	-	4,7	5,3	-	-	6,8
100 % Boden + 50 % RC-Mix 0/4	4,9	4,3	6,6	-	8,8	7,8	-	-	7,7

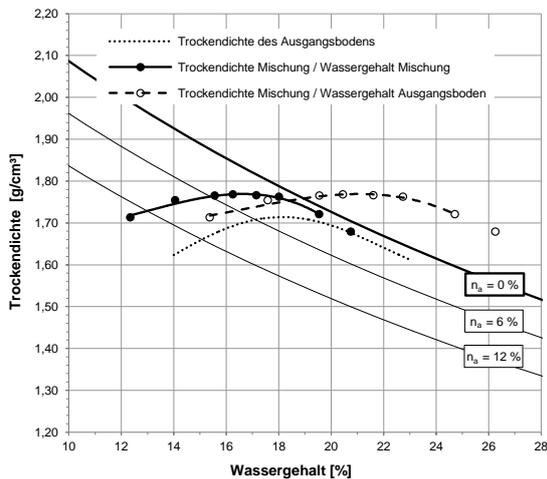
**A.2.1 Auswertung der Einzelversuche**



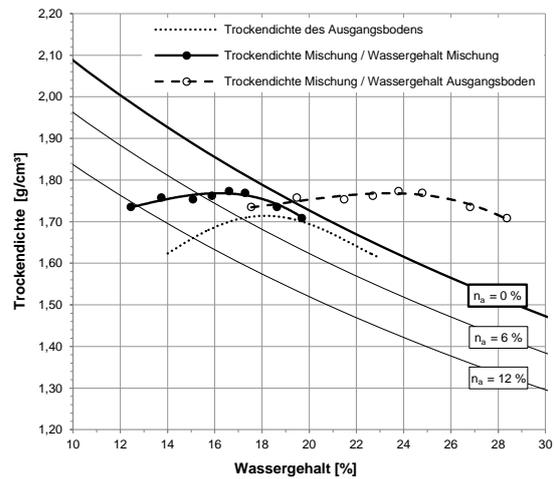
**Abb. 12.19:** VR1; TL1 + 30 % RC-Mix 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,2 \%$



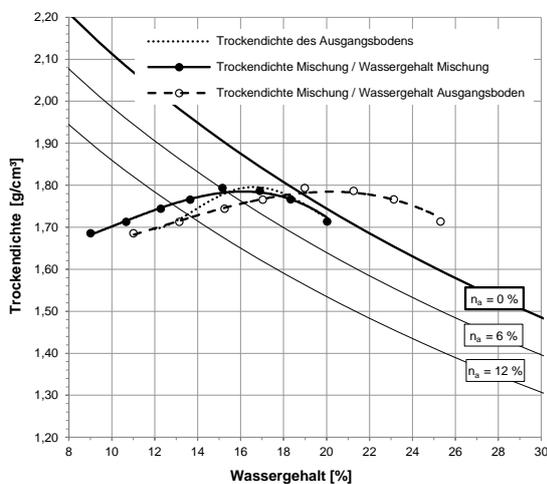
**Abb. 12.20:** VR1; TL1 + 50 % RC-Mix 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,2 \%$



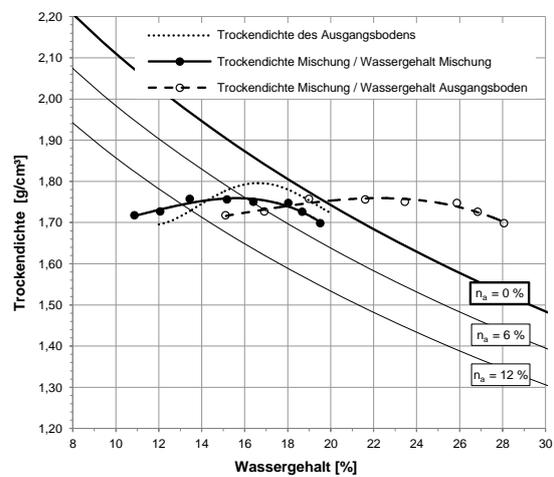
**Abb. 12.21:** VR1; TL2 + 30 % RC-Mix 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,3 \%$



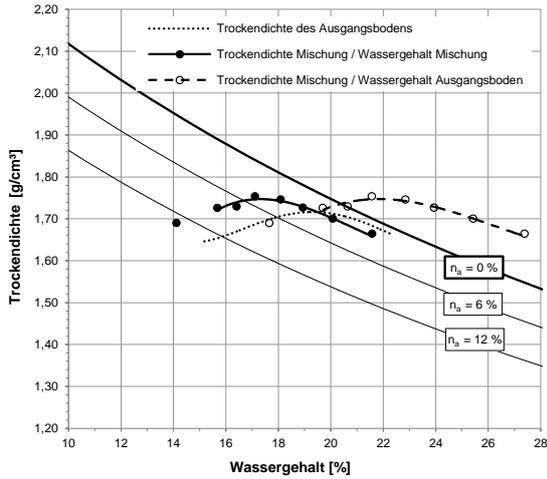
**Abb. 12.22:** VR1; TL2 + 50 % RC-Mix 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,3 \%$



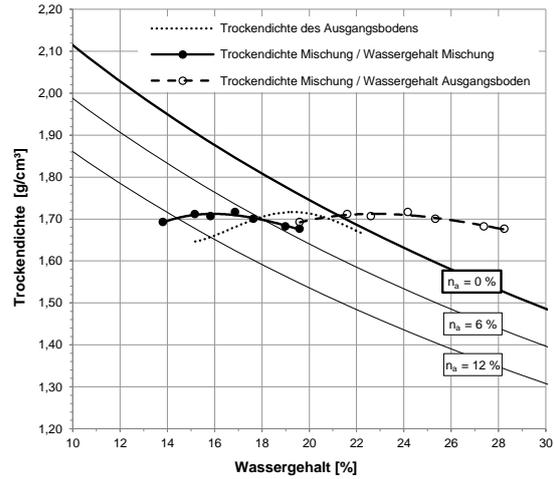
**Abb. 12.23:** VR1; TM1 + 30 % RC-Mix 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,4 \%$



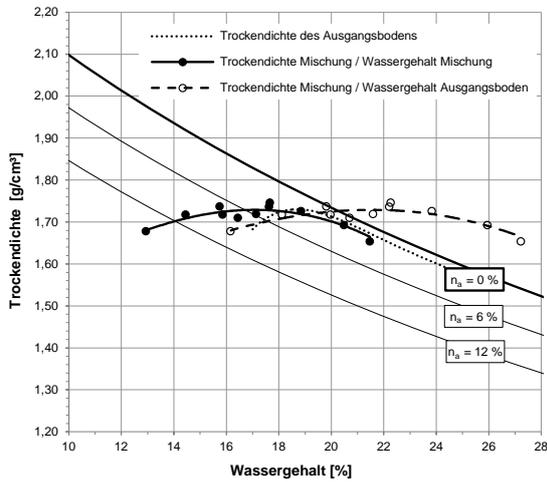
**Abb. 12.24:** VR1; TM1 + 50 % RC-Mix 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,4 \%$



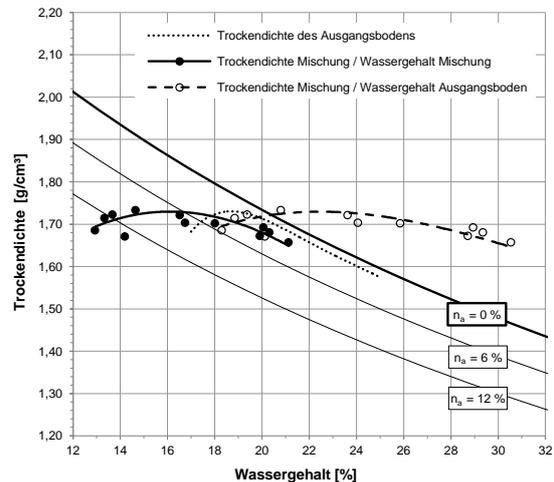
**Abb. 12.25:** VR1; TM3 + 30 % RC-Mix 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,2 \%$



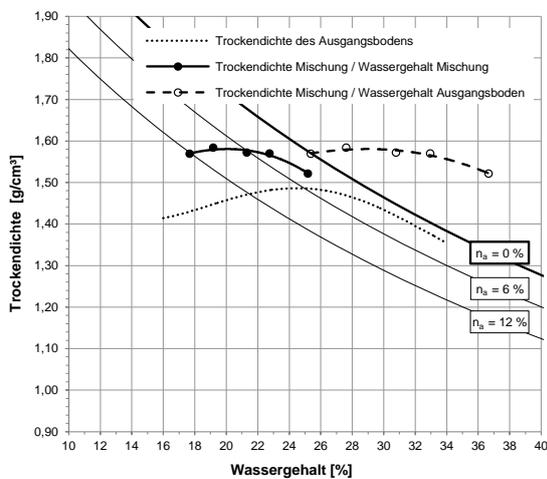
**Abb. 12.26:** VR1; TM3 + 50 % RC-Mix 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,2 \%$



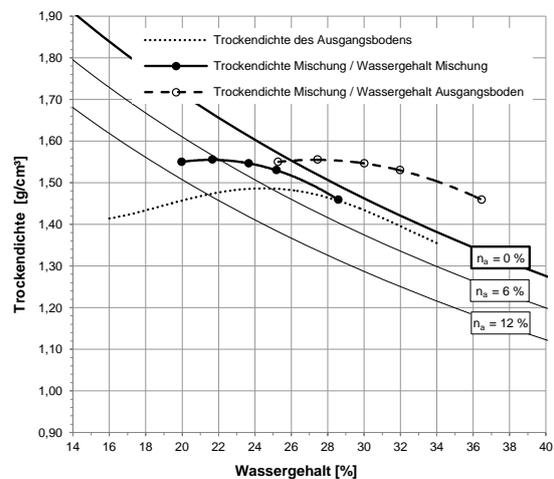
**Abb. 12.27:** VR1; TM4 + 30 % RC-Mix 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,3 \%$



**Abb. 12.28:** VR1; TM4 + 50 % RC-Mix 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,3 \%$



**Abb. 12.29:** VR1; TA1 + 30 % RC-Mix 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,3 \%$



**Abb. 12.30:** VR1; TA1 + 50 % RC-Mix 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,3 \%$



## A.3 Einzelversuchsergebnisse zu Versuchsreihe 2

### A.3.1 Grundlagen zur Auswertung

**Tab. 12.10:** Mittlerer Eigenwassergehalt der RC-Materialien in Versuchsreihe 2

Mischung	Boden	TL1	TL2	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TA1
	Mittlerer Wassergehalt des RC-Mix 0/4 vor Mischung $w_{z,0}$ [%]									
100 % Boden + 30 % RC-Mix 0/4		2,4	2,5	2,4	2,4	2,5	-	2,6	2,5	2,4
100 % Boden + 50 % RC-Mix 0/4		2,4	2,5	2,4	2,4	2,5	-	2,4	2,5	2,4

**Tab. 12.11:** Scheinbare Kornrohichte der RC-Materialien und Mischungen in Versuchsreihe 2

Mischung	Boden	TL1	TL2	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TA1
	Scheinbare Kornrohichte <sup>1)</sup> [g/cm <sup>3</sup> ]									
100 % Boden + 30 % RC-Mix 0/4		2,727 <sup>2)</sup>	2,637 <sup>2)</sup>	2,679 <sup>2)</sup>	2,633 <sup>2)</sup>	2,687 <sup>2)</sup>	-	2,698 <sup>2)</sup>	2,615 <sup>2)</sup>	2,606 <sup>2)</sup>
100 % Boden + 50 % RC-Mix 0/4		2,716 <sup>2)</sup>	2,638 <sup>2)</sup>	2,675 <sup>2)</sup>	2,635 <sup>2)</sup>	2,681 <sup>2)</sup>	-	2,691 <sup>2)</sup>	2,619 <sup>2)</sup>	2,611 <sup>2)</sup>

Anmerkung:  
 1) Begriff in Anlehnung an die Definition nach DIN EN 1097-6:2013 zu „Scheinbare Rohdichte“, siehe Pkt. 3.4.  
 2) Die Korndichten der Mischungen wurden aus jenen der Böden und RC-Materialien (siehe Pkt. 4.2) im entsprechenden Mischungsverhältnis berechnet.

### A.3.1 Tabellarische Auflistung der Ergebnisse

**Tab. 12.12:** Entwicklung der optimalen Wassergehalte in Versuchsreihe 2

Mischung	Boden	TL1	TL2	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TA1
	Optimaler Verdichtungswassergehalt des Bodens $w_{\text{Boden(Pr)}}$ [%]									
Boden ohne Zugabe-Material		13,5	18,2	16,6	19,1	19,3	18,7	17,9	20,1	24,4
Optimaler Verdichtungswassergehalt der Mischung $w_{\text{Mischung(Pr)}}$ [%]										
100 % Boden + 30 % RC-Mix 0/4		14,62	17,07	15,60	17,92	17,17	-	16,83	17,82	22,11
100 % Boden + 50 % RC-Mix 0/4		14,84	16,32	15,53	16,92	16,44	-	17,43	18,09	19,00
Optimaler Ausgangswassergehalt des Bodens $w_{\text{Boden(Pr),0}}$ [%]										
100 % Boden + 30 % RC-Mix 0/4		18,28	21,45	19,56	22,60	21,78	-	21,13	22,47	28,18
100 % Boden + 50 % RC-Mix 0/4		21,07	23,32	22,09	24,21	23,39	-	24,83	25,93	27,19

**Tab. 12.13:** Entwicklung der Trockendichten im Optimum der Mischungen in Versuchsreihe 2

Mischung	Boden	TL1	TL2	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TA1
	Trockendichte im Verdichtungs optimum des Bodens $\rho_{d,\text{Boden(Pr)}}$ [g/cm <sup>3</sup> ]									
Boden ohne Zugabe-Material		1,905	1,714	1,796	1,695	1,716	1,730	1,715	1,658	1,486
Trockendichte im Verdichtungs optimum Mischung $\rho_{d,\text{Mischung(Pr)}}$ [g/cm <sup>3</sup> ]										
100 % Boden + 30 % RC-Mix 0/4		1,869	1,768	1,792	1,713	1,743	-	1,751	1,683	1,553
100 % Boden + 50 % RC-Mix 0/4		1,844	1,763	1,780	1,694	1,723	-	1,735	1,694	1,578

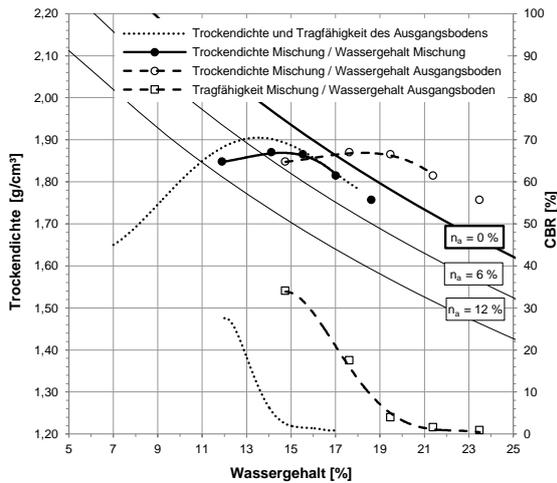
**Tab. 12.14:** Entwicklung der Tragfähigkeiten im Optimum der Mischungen in Versuchsreihe 2

Mischung	Boden	TL1	TL2	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TA1
	Tragfähigkeit $\text{CBR}_0$ im Verdichtungs optimum des Bodens [g/cm <sup>3</sup> ]									
Boden ohne Zugabe-Material		11,3	15,0	14,7	17,0	13,9	-	13,2	10,8	18,1
Tragfähigkeit $\text{CBR}_0$ im Verdichtungs optimum der Mischung [%]										
100 % Boden + 30 % RC-Mix 0/4		11,2	18,1	17,1	18,5	19,2	-	21,9	16,5	19,0
100 % Boden + 50 % RC-Mix 0/4		15,1	22,0	18,4	18,1	19,5	-	#NV	12,5	24,0

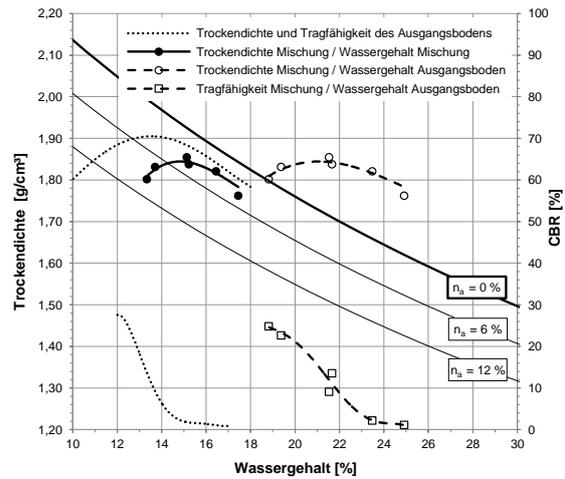
**Tab. 12.15:** Entwicklung der Luftporenanteile im Optimum der Mischungen in Versuchsreihe 2

Mischung	Boden	TL1	TL2	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TA1
	Luftporenanteil $n_a$ im Verdichtungs optimum der Mischung [%]									
100 % Boden + 30 % RC-Mix 0/4		4,2	2,8	5,2	4,3	5,2	-	5,6	5,6	6,1
100 % Boden + 50 % RC-Mix 0/4		4,7	4,4	5,8	7,1	7,4	-	5,3	4,7	9,6

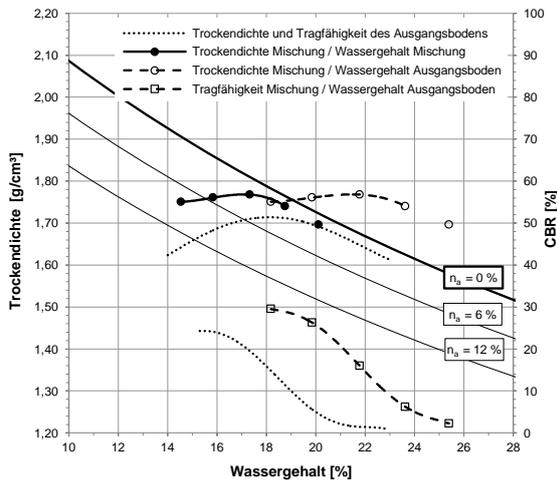
**A.3.1 Auswertung der Einzelversuche**



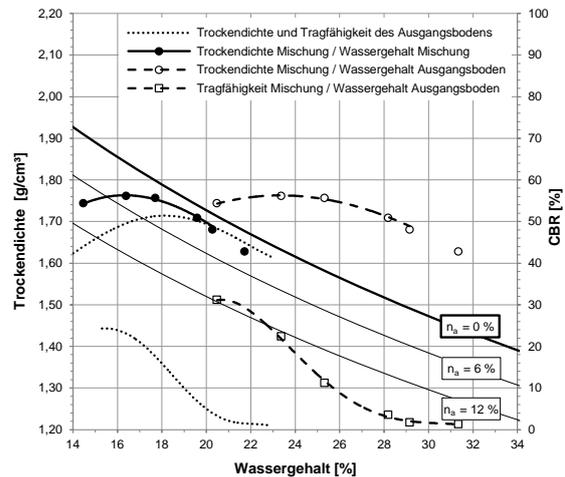
**Abb. 12.31:** VR2; TL1 + 30 % RC-Mix 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,4 \%$



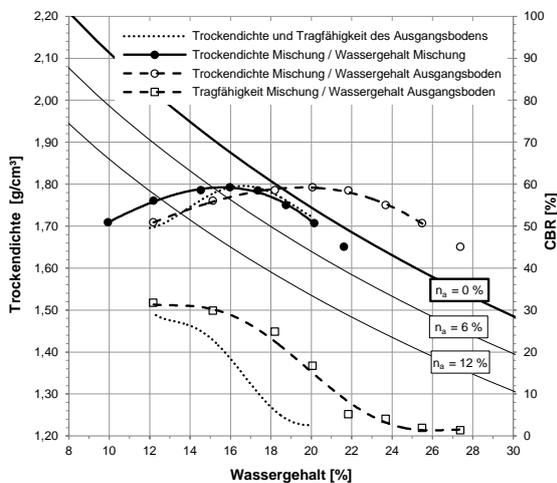
**Abb. 12.32:** VR2; TL1 + 50 % RC-Mix 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,4 \%$



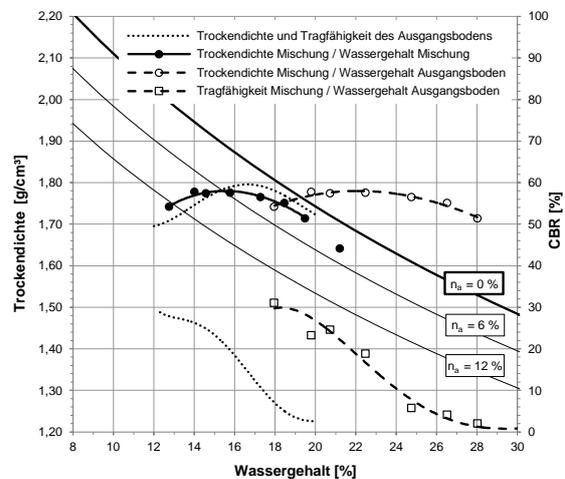
**Abb. 12.33:** VR2; TL2 + 30 % RC-Mix 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,5 \%$



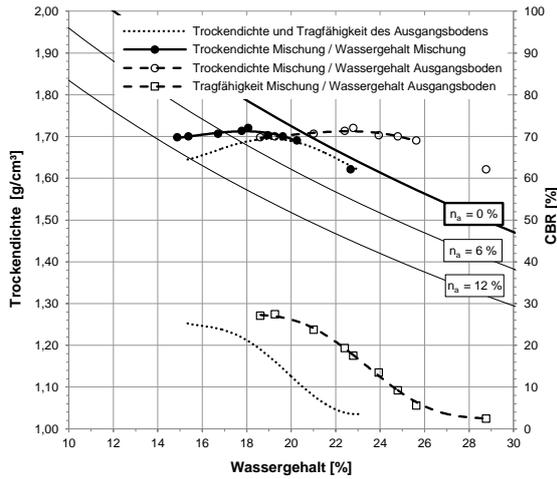
**Abb. 12.34:** VR2; TL2 + 50 % RC-Mix 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,5 \%$



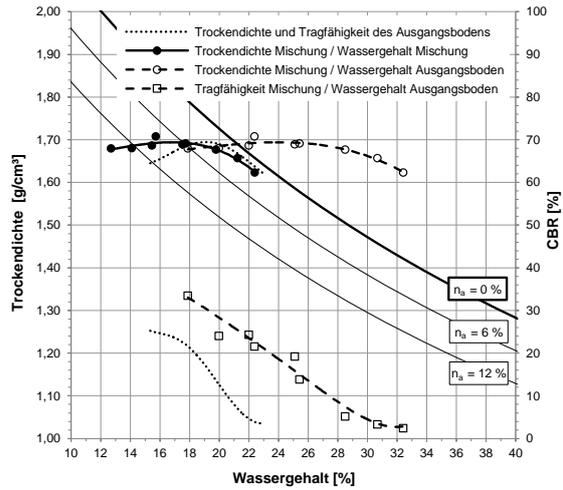
**Abb. 12.35:** VR2; TM1 + 30 % RC-Mix 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,4 \%$



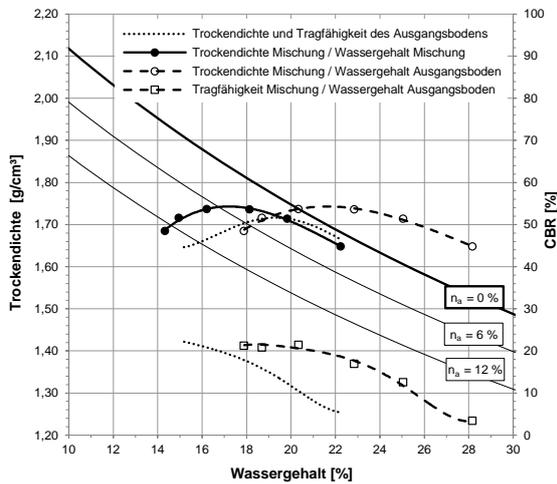
**Abb. 12.36:** VR2; TM1 + 50 % RC-Mix 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,4 \%$



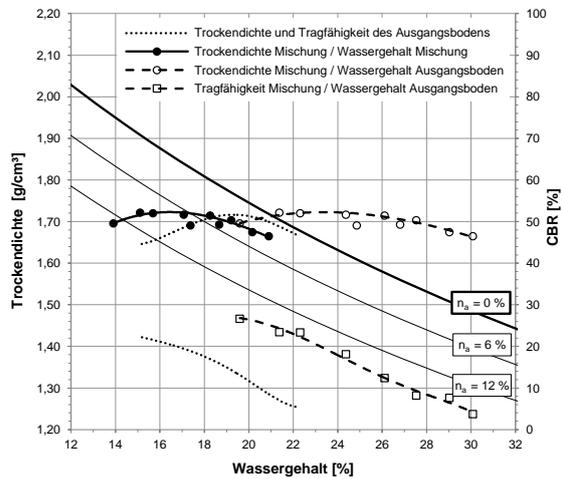
**Abb. 12.37:** VR2; TM2 + 30 % RC-Mix 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,4 \%$



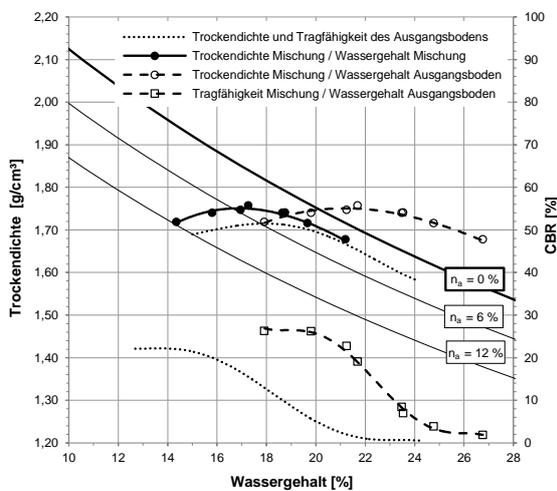
**Abb. 12.38:** VR2; TM2 + 50 % RC-Mix 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,4 \%$



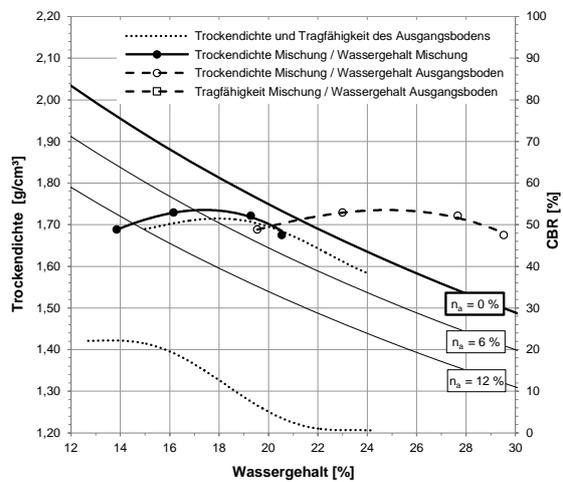
**Abb. 12.39:** VR2; TM3 + 30 % RC-Mix 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,5 \%$



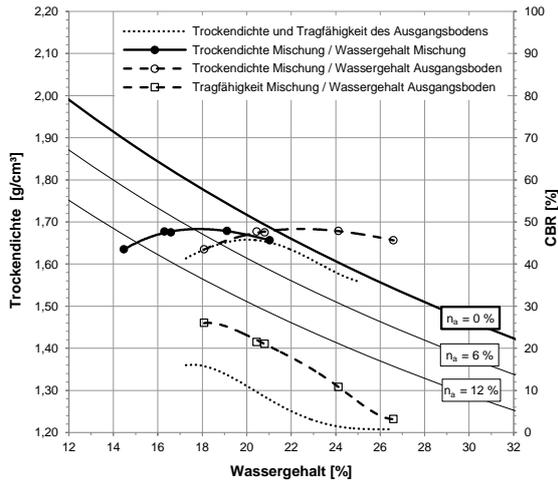
**Abb. 12.40:** VR2; TM3 + 50 % RC-Mix 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,5 \%$



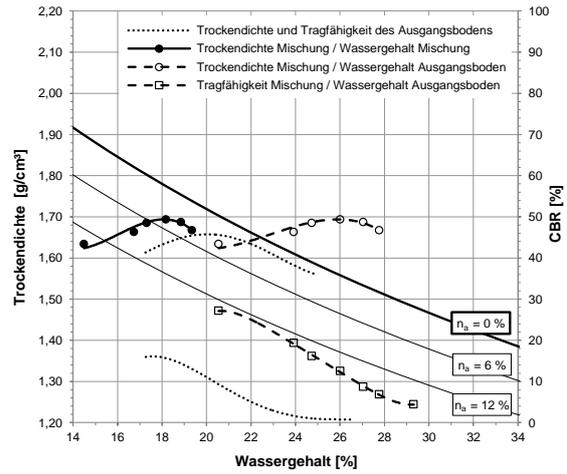
**Abb. 12.41:** VR2; TM5 + 30 % RC-Mix 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,6 \%$



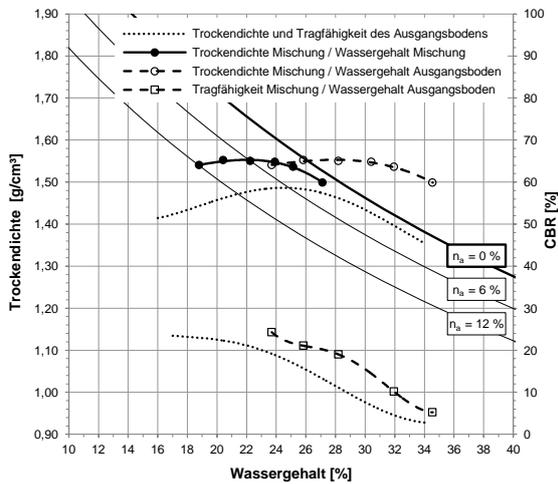
**Abb. 12.42:** VR2; TM5 + 50 % RC-Mix 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,4 \%$



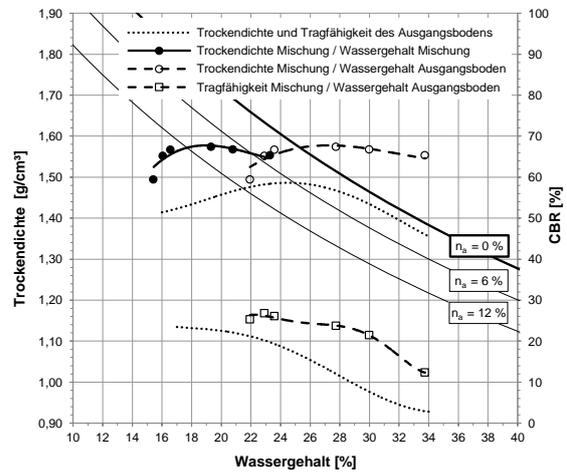
**Abb. 12.43:** VR2; TM6 + 30 % RC-Mix 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,5 \%$



**Abb. 12.44:** VR2; TM6 + 50 % RC-Mix 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,5 \%$



**Abb. 12.45:** VR2; TA1 + 30 % RC-Mix 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,4 \%$



**Abb. 12.46:** VR2; TA1 + 50 % RC-Mix 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,4 \%$

## A.4 Einzelversuchsergebnisse zu Versuchsreihe 3

### A.4.1 Grundlagen zur Auswertung

Angaben zum Eigenwassergehalt des Zugabe-Materials finden sich zum Beispiel in [Tab. 12.17](#).

**Tab. 12.16: Scheinbare Kornrohdichte der RC-Materialien und Mischungen in Versuchsreihe 4**

Mischung	Boden	TL1	TL2	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TA1
	Scheinbare Kornrohdichte <sup>1)</sup> [g/cm <sup>3</sup> ]									
100 % Boden + 30 % RC-Mix 0/4		2,727 <sup>2)</sup>	2,637 <sup>2)</sup>	-	-	2,687 <sup>2)</sup>	-	-	-	-
100 % Boden + 50 % RC-Mix 0/4		-	2,638 <sup>2)</sup>	-	-	2,681 <sup>2)</sup>	-	-	-	-

Anmerkung:  
 1) Begriff in Anlehnung an die Definition nach DIN EN 1097-6:2013 zu „Scheinbare Rohdichte“, siehe Pkt. 3.4.  
 2) Die Korndichten der Mischungen wurden aus jenen der Böden und RC-Materialien (siehe Pkt. 4.2) im entsprechenden Mischungsverhältnis berechnet.

### A.4.1 Tabellarische Auflistung der Ergebnisse

**Tab. 12.17: Entwicklung der optimalen Wassergehalte in Versuchsreihe 3**

Mischung	Boden	TL1	TL2	TM3
<b>Optimaler Verdichtungswassergehalt des Bodens <math>w_{\text{Boden(Pr)}}</math> [%]</b>				
Boden ohne Zugabe-Material		13,5	18,2	19,3
<b>Optimaler Verdichtungswassergehalt der Mischung <math>w_{\text{Mischung(Pr)}}</math> [%]</b>				
+ 30 % RC-Mix 0/4 (A) bei $w_{\text{ZM,0}} \approx 2,0$ bis 2,2 %		14,35	16,25	17,31
+ 30 % RC-Mix 0/4 (A) bei $w_{\text{ZM,0}} \approx 4,7$ bis 4,8 %		14,62	16,07	17,67
+ 30 % RC-Mix 0/4 (A) bei $w_{\text{ZM,0}} \approx 11,8$ bis 12,3 %		15,17	16,74	18,34
+ 50 % RC-Mix 0/4 (A) bei $w_{\text{ZM,0}} \approx 2,0$ bis 2,2 %		-	15,38	16,83
+ 50 % RC-Mix 0/4 (A) bei $w_{\text{ZM,0}} \approx 4,7$ bis 4,8 %		-	15,46	16,56
+ 50 % RC-Mix 0/4 (A) bei $w_{\text{ZM,0}} \approx 11,8$ bis 12,3 %		-	16,52	17,87
+ 30 % RC-Mix 0/4 (B) bei $w_{\text{ZM,0}} \approx 2,9$ %		15,01	-	-
+ 30 % RC-Mix 0/4 (B) bei $w_{\text{ZM,0}} \approx 7,6$ %		15,15	-	-
+ 30 % RC-Mix 0/4 (B) bei $w_{\text{ZM,0}} \approx 11,6$ %		15,01	-	-
<b>Optimaler Ausgangswassergehalt des Bodens <math>w_{\text{Boden(Pr),0}}</math> [%]</b>				
+ 30 % RC-Mix 0/4 (A) bei $w_{\text{ZM,0}} \approx 2,0$ bis 2,2 %		17,98	20,61	21,91
+ 30 % RC-Mix 0/4 (A) bei $w_{\text{ZM,0}} \approx 4,7$ bis 4,8 %		17,56	19,44	21,49
+ 30 % RC-Mix 0/4 (A) bei $w_{\text{ZM,0}} \approx 11,8$ bis 12,3 %		16,03	18,07	20,27
+ 50 % RC-Mix 0/4 (A) bei $w_{\text{ZM,0}} \approx 2,0$ bis 2,2 %		-	21,88	24,22
+ 50 % RC-Mix 0/4 (A) bei $w_{\text{ZM,0}} \approx 4,7$ bis 4,8 %		-	20,74	22,34
+ 50 % RC-Mix 0/4 (A) bei $w_{\text{ZM,0}} \approx 11,8$ bis 12,3 %		-	18,68	20,90
+ 30 % RC-Mix 0/4 (B) bei $w_{\text{ZM,0}} \approx 2,9$ %		18,60	-	-
+ 30 % RC-Mix 0/4 (B) bei $w_{\text{ZM,0}} \approx 7,6$ %		17,39	-	-
+ 30 % RC-Mix 0/4 (B) bei $w_{\text{ZM,0}} \approx 11,6$ %		16,11	-	-

**Tab. 12.18:** Entwicklung der Trockendichten im Optimum der Mischungen in Versuchsreihe 3

Mischung	Boden	TL1	TL2	TM3
<b>Trockendichte im Verdichtungsoptimum des Bodens <math>\rho_{d,Boden(Pr)}</math> [g/cm<sup>3</sup>]</b>				
Boden ohne Zugabe-Material		1,905	1,714	1,716
<b>Trockendichte im Verdichtungsoptimum Mischung <math>\rho_{d,Mischung(Pr)}</math> [g/cm<sup>3</sup>]</b>				
+ 30 % RC-Mix 0/4 (A) bei $w_{ZM,0} \approx 2,0$ bis 2,2 %		1,873	1,772	1,733
+ 30 % RC-Mix 0/4 (A) bei $w_{ZM,0} \approx 4,7$ bis 4,8 %		1,882	1,766	1,734
+ 30 % RC-Mix 0/4 (A) bei $w_{ZM,0} \approx 11,8$ bis 12,3 %		1,864	1,755	1,742
+ 50 % RC-Mix 0/4 (A) bei $w_{ZM,0} \approx 2,0$ bis 2,2 %		-	1,769	1,709
+ 50 % RC-Mix 0/4 (A) bei $w_{ZM,0} \approx 4,7$ bis 4,8 %		-	1,762	1,707
+ 50 % RC-Mix 0/4 (A) bei $w_{ZM,0} \approx 11,8$ bis 12,3 %		-	1,752	1,733
+ 30 % RC-Mix 0/4 (B) bei $w_{ZM,0} \approx 2,9$ %		1,854	-	-
+ 30 % RC-Mix 0/4 (B) bei $w_{ZM,0} \approx 7,6$ %		1,865	-	-
+ 30 % RC-Mix 0/4 (B) bei $w_{ZM,0} \approx 11,6$ %		1,857	-	-

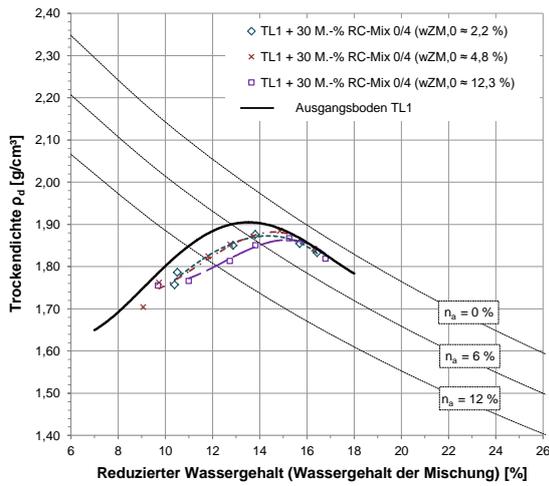
**Tab. 12.19:** Entwicklung der Tragfähigkeiten im Optimum der Mischungen in Versuchsreihe 3

Mischung	Boden	TL1	TL2	TM3
<b>Tragfähigkeit <math>CBR_0</math> im Verdichtungsoptimum des Bodens [g/cm<sup>3</sup>]</b>				
Boden ohne Zugabe-Material		11,3	15,0	13,9
<b>Tragfähigkeit <math>CBR_0</math> im Verdichtungsoptimum der Mischung [%]</b>				
+ 30 % RC-Mix 0/4 (B) bei $w_{ZM,0} \approx 2,9$ %		15,1	-	-
+ 30 % RC-Mix 0/4 (B) bei $w_{ZM,0} \approx 7,6$ %		12,7	-	-
+ 30 % RC-Mix 0/4 (B) bei $w_{ZM,0} \approx 11,6$ %		16,6	-	-

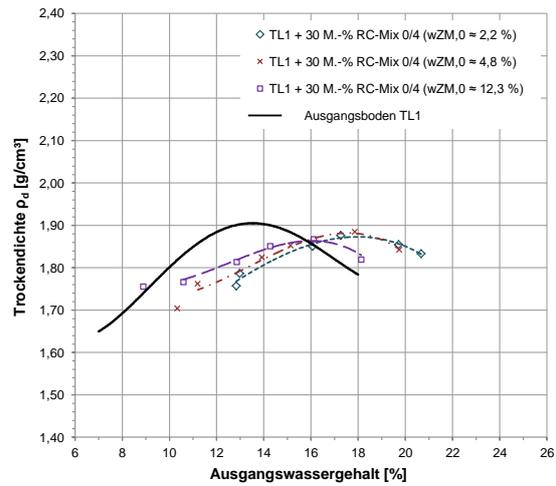
**Tab. 12.20:** Entwicklung der Luftporenanteile im Optimum der Mischungen in Versuchsreihe 3

Mischung	Boden	TL1	TL2	TM3
<b>Luftporenanteil <math>n_a</math> im Verdichtungsoptimum der Mischung [%]</b>				
+ 30 % RC-Mix 0/4 (A) bei $w_{ZM,0} \approx 2,0$ bis 2,2 %		4,4	4,0	5,5
+ 30 % RC-Mix 0/4 (A) bei $w_{ZM,0} \approx 4,7$ bis 4,8 %		3,5	4,7	4,8
+ 30 % RC-Mix 0/4 (A) bei $w_{ZM,0} \approx 11,8$ bis 12,3 %		3,4	4,1	3,2
+ 50 % RC-Mix 0/4 (A) bei $w_{ZM,0} \approx 2,0$ bis 2,2 %		-	5,7	7,5
+ 50 % RC-Mix 0/4 (A) bei $w_{ZM,0} \approx 4,7$ bis 4,8 %		-	6,0	8,1
+ 50 % RC-Mix 0/4 (A) bei $w_{ZM,0} \approx 12,3$ %		-	4,7	4,4
+ 30 % RC-Mix 0/4 (B) bei $w_{ZM,0} \approx 2,9$ %		4,2	-	-
+ 30 % RC-Mix 0/4 (B) bei $w_{ZM,0} \approx 7,6$ %		3,3	-	-
+ 30 % RC-Mix 0/4 (B) bei $w_{ZM,0} \approx 11,6$ %		4,0	-	-

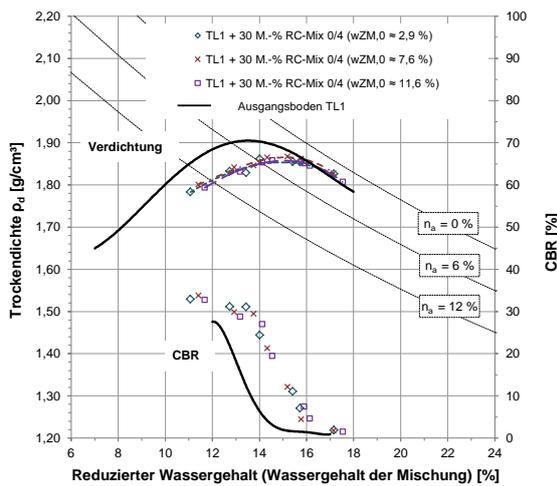
**A.4.1 Auswertung der Einzelversuche**



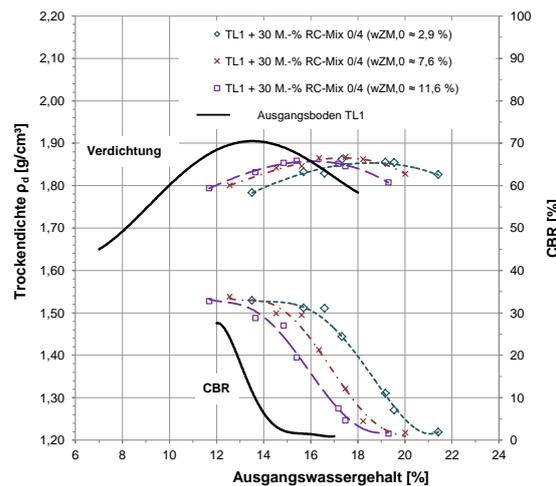
**Abb. 12.47:** VR3; TL1 + 30 % RC-Mix 0/4 (A), Trockendichte bezogen auf den reduzierten Wassergehalt



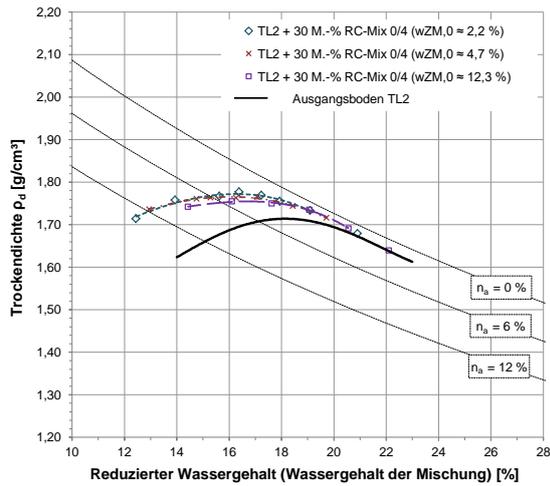
**Abb. 12.48:** VR3; TL1 + 30 % RC-Mix 0/4 (A), Trockendichte bezogen auf den Ausgangswassergehalt des Bodens



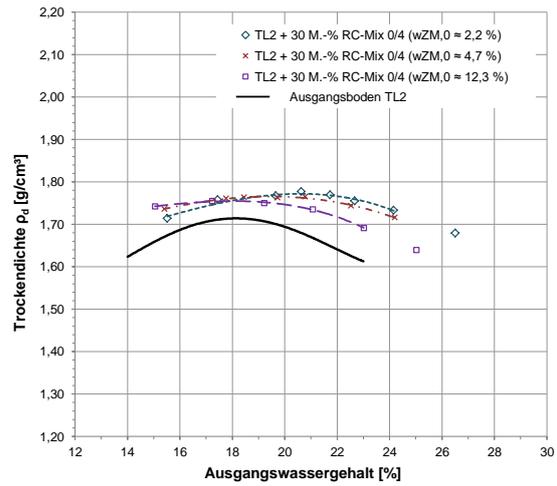
**Abb. 12.49:** VR3; TL1 + 30 % RC-Mix 0/4 (B), Trockendichte bezogen auf den reduzierten Wassergehalt



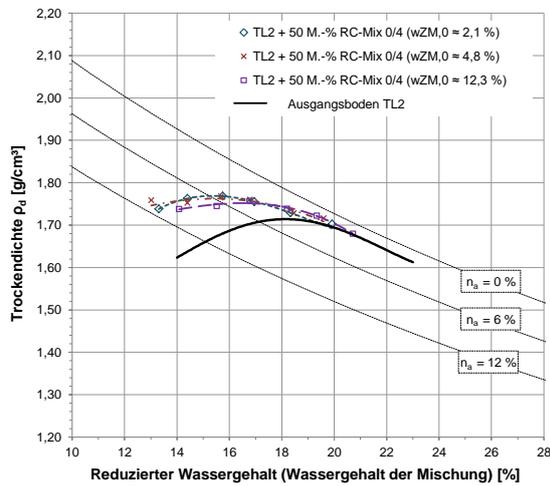
**Abb. 12.50:** VR3; TL1 + 30 % RC-Mix 0/4 (B), Trockendichte bezogen auf den Ausgangswassergehalt des Bodens



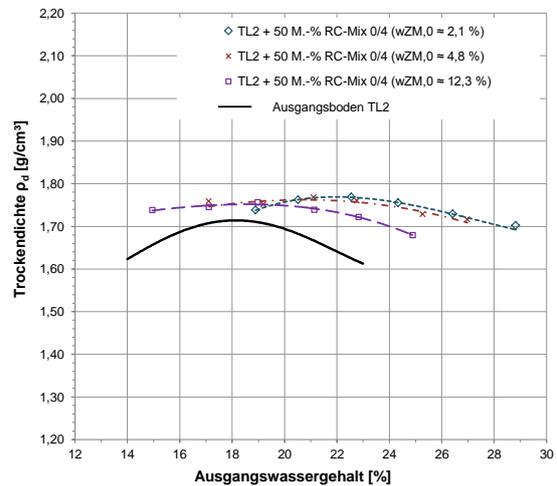
**Abb. 12.51:** VR3; TL2 + 30 % RC-Mix 0/4 (A), Trockendichte bezogen auf den reduzierten Wassergehalt



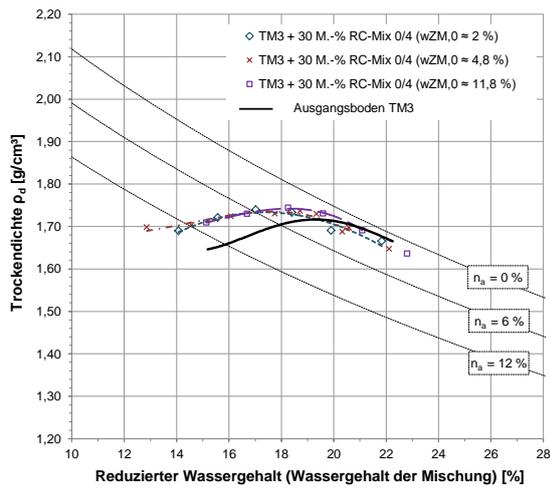
**Abb. 12.52:** VR3; TL2 + 30 % RC-Mix 0/4 (A), Trockendichte bezogen auf den Ausgangswassergehalt des Bodens



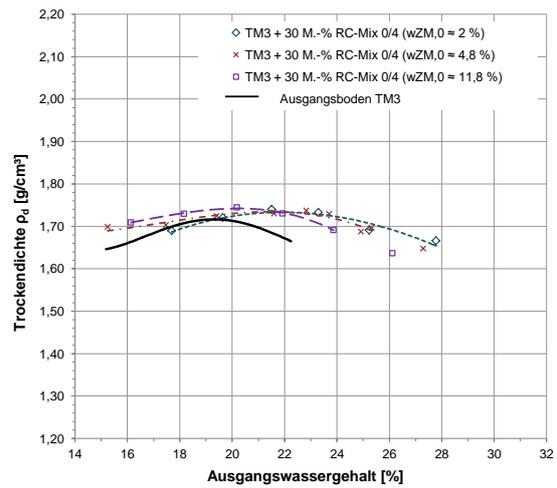
**Abb. 12.53:** VR3; TL2 + 50 % RC-Mix 0/4 (A), Trockendichte bezogen auf den reduzierten Wassergehalt



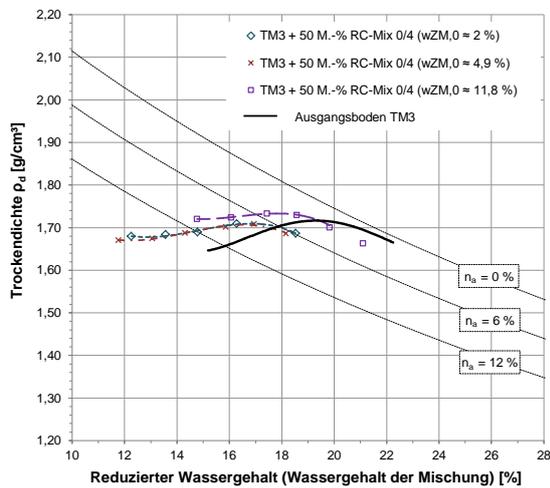
**Abb. 12.54:** VR3; TL2 + 50 % RC-Mix 0/4 (A), Trockendichte bezogen auf den Ausgangswassergehalt des Bodens



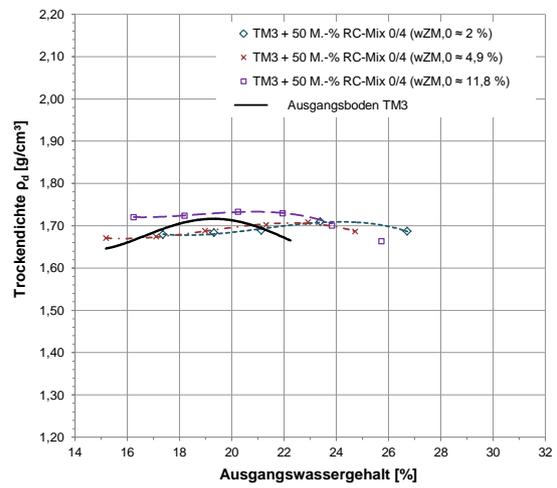
**Abb. 12.55:** VR3; TM3 + 30 % RC-Mix 0/4 (A), Trockendichte bezogen auf den reduzierten Wassergehalt



**Abb. 12.56:** VR3; TM3 + 30 % RC-Mix 0/4 (A), Trockendichte bezogen auf den Ausgangswassergehalt des Bodens



**Abb. 12.57:** VR3; TM3 + 50 % RC-Mix 0/4 (A), Trockendichte bezogen auf den reduzierten Wassergehalt



**Abb. 12.58:** VR3; TM3 + 50 % RC-Mix 0/4 (A), Trockendichte bezogen auf den Ausgangswassergehalt des Bodens



## A.5 Einzelversuchsergebnisse zu Versuchsreihe 4

### A.5.1 Grundlagen zur Auswertung

**Tab. 12.21:** Mittlerer Eigenwassergehalt der RC-Materialien in Versuchsreihe 4

Mischung	Boden	TL1	TL2	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TA1
		Mittlerer Wassergehalt des RC-Materials vor Mischung $w_{ZM,0}$ [%]								
Boden + RC-Mix 0/4		2,8	-	-	-	-	-	-	-	2,3
Boden + RC-Mix 0/32		3,0	-	-	-	-	-	-	-	2,2
Boden + RC-Beton 0/4		3,7/5,5	-	-	-	-	-	-	-	-
Boden + RC-Ziegel 0/4		2,6	-	-	-	-	-	-	-	-

**Tab. 12.22:** Scheinbare Kornrohddichte der RC-Materialien und Mischungen in Versuchsreihe 4

Mischung	Boden + 20 % RC	Boden + 30 % RC	Boden + 40 % RC	Boden + 50 % RC	Boden + 70 % RC
<b>Materialien</b>					
<b>Boden TL1</b>	<b>Scheinbare Kornrohddichte<sup>1)</sup> [g/cm<sup>3</sup>]</b>				
RC-Mix 0/4	2,734 <sup>2)</sup>	2,727 <sup>2)</sup>	2,722 <sup>2)</sup>	2,716 <sup>2)</sup>	-
RC-Mix 0/32	2,735 <sup>2)</sup>	2,728 <sup>2)</sup>	2,722 <sup>2)</sup>	2,717 <sup>2)</sup>	-
RC-Beton 0/4	-	2,715 <sup>2)</sup>	-	2,699 <sup>2)</sup>	2,686 <sup>2)</sup>
RC-Ziegel 0/4	-	2,741 <sup>2)</sup>	-	2,737 <sup>2)</sup>	-
<b>Boden TA1</b>	<b>Scheinbare Kornrohddichte<sup>1)</sup> [g/cm<sup>3</sup>]</b>				
RC-Mix 0/4	-	2,606 <sup>2)</sup>	-	2,611 <sup>2)</sup>	-
RC-Mix 0/32	-	2,606 <sup>2)</sup>	-	2,612 <sup>2)</sup>	-
Anmerkung:					
1) Begriff in Anlehnung an die Definition nach DIN EN 1097-6:2013 zu „Scheinbare Rohddichte“, siehe Pkt. 3.4.					
2) Die Korndichten der Mischungen wurden aus jenen der Böden und RC-Materialien (siehe Pkt. 4.2) im entsprechenden Mischungsverhältnis berechnet.					

### A.5.1 Tabellarische Auflistung der Ergebnisse

**Tab. 12.23:** Entwicklung der optimalen Wassergehalte in Versuchsreihe 4

Mischung	Boden + 20 % RC	Boden + 30 % RC	Boden + 40 % RC	Boden + 50 % RC	Boden + 70 % RC
<b>Materialien</b>					
<b>Boden ohne Zugabe-Material</b>	<b>Optimaler Verdichtungswassergehalt des Bodens <math>w_{Boden(Pr)}</math> [%]</b>				
Boden TL1	13,52				
Boden TA1	24,42				
<b>Boden TL1</b>	<b>Optimaler Verdichtungswassergehalt der Mischung <math>w_{Mischung(Pr)}</math> [%]</b>				
RC-Mix 0/4	15,81	17,82	18,81	19,51	-
RC-Mix 0/32	14,76	15,54	16,65	17,36	-
RC-Beton 0/4 ( $w_{ZM,0} \approx 3,7\%$ )	-	17,09	-	18,69	-
RC-Beton 0/4 ( $w_{ZM,0} \approx 5,5\%$ )	14,48	16,61	17,42	17,55	19,82
RC-Ziegel 0/4	15,33	17,28	18,48	20,14	-
<b>Boden TL1</b>	<b>Optimaler Ausgangswassergehalt des Bodens <math>w_{Boden(Pr),0}</math> [%]</b>				
RC-Mix 0/4	13,64	14,39	14,22	13,86	-
RC-Mix 0/32	12,79	12,66	12,77	12,58	-
RC-Beton 0/4 ( $w_{ZM,0} \approx 3,7\%$ )	-	14,04	-	13,70	-
RC-Beton 0/4 ( $w_{ZM,0} \approx 5,5\%$ )	12,95	14,05	14,02	13,54	13,92
RC-Ziegel 0/4	13,37	13,82	13,94	14,28	-
<b>Boden TA1</b>	<b>Optimaler Verdichtungswassergehalt der Mischung <math>w_{Mischung(Pr)}</math> [%]</b>				
RC-Mix 0/4	-	27,32	-	27,24	-
RC-Mix 0/32	-	27,01	-	25,68	-
<b>Boden TA1</b>	<b>Optimaler Ausgangswassergehalt des Bodens <math>w_{Boden(Pr),0}</math> [%]</b>				
RC-Mix 0/4	-	21,41	-	18,91	-
RC-Mix 0/32	-	21,27	-	17,94	-

**Tab. 12.24:** Entwicklung der Trockendichten im Optimum der Mischungen in Versuchsreihe 4

Mischung	Boden + 20 % RC	Boden + 30 % RC	Boden + 40 % RC	Boden + 50 % RC	Boden + 70 % RC
<b>Materialien</b>					
<b>Boden ohne Zugabe-Material</b>	<b>Trockendichte im Verdichtungs optimum des Bodens <math>\rho_{d,Boden(Pr)}</math> [g/cm<sup>3</sup>]</b>				
Boden TL1	1,905				
Boden TA1	1,486				
<b>Boden TL1</b>	<b>Trockendichte im Verdichtungs optimum Mischung <math>\rho_{d,Mischung(Pr)}</math> [g/cm<sup>3</sup>]</b>				
RC-Mix 0/4	1,917	1,896	1,889	1,875	-
RC-Mix 0/32	1,935	1,939	1,942	1,936	-
RC-Beton 0/4 ( $w_{ZM,0} \approx 3,7\%$ )	-	1,908	-	1,888	-
RC-Beton 0/4 ( $w_{ZM,0} \approx 5,5\%$ )	1,916	1,902	1,898	1,916	1,895
RC-Ziegel 0/4	1,897	1,871	1,857	1,848	-
<b>Boden TA1</b>	<b>Trockendichte im Verdichtungs optimum Mischung <math>\rho_{d,Mischung(Pr)}</math> [g/cm<sup>3</sup>]</b>				
RC-Mix 0/4	-	1,570	-	1,582	-
RC-Mix 0/32	-	1,590	-	1,635	-

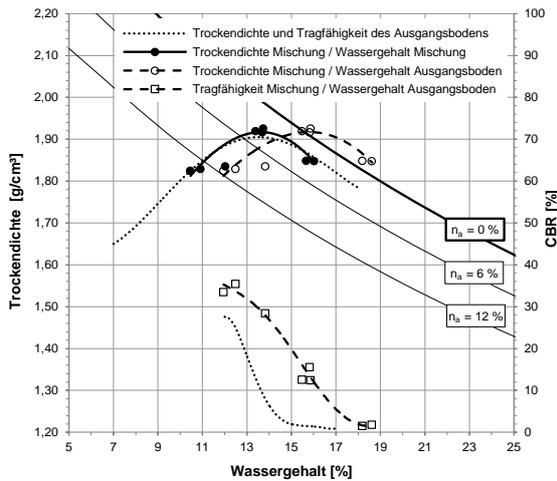
**Tab. 12.25:** Entwicklung der Tragfähigkeiten im Optimum der Mischungen in Versuchsreihe 4

Mischung	Boden + 20 % RC	Boden + 30 % RC	Boden + 40 % RC	Boden + 50 % RC	Boden + 70 % RC
<b>Materialien</b>					
<b>Boden ohne Zugabe-Material</b>	<b>Tragfähigkeit CBR<sub>0</sub> im Verdichtungs optimum des Bodens [g/cm<sup>3</sup>]</b>				
Boden TL1					
Boden TA1					
<b>Boden TL1</b>	<b>Tragfähigkeit CBR<sub>0</sub> im Verdichtungs optimum der Mischung [%]</b>				
RC-Mix 0/4	13,6	10,3	10,7	14,9	-
RC-Mix 0/32	14,2	15,1	11,5	12,7	-
RC-Beton 0/4 ( $w_{ZM,0} \approx 3,7\%$ )	-	11,5	-	17,5	-
RC-Beton 0/4 ( $w_{ZM,0} \approx 5,5\%$ )	-	-	-	-	-
RC-Ziegel 0/4	16,8	11,7	18,1	11,2	-
<b>Boden TA1</b>	<b>Tragfähigkeit CBR<sub>0</sub> im Verdichtungs optimum der Mischung [%]</b>				
RC-Mix 0/4	-	20,5	-	24,2	-
RC-Mix 0/32	-	21,7	-	26,1	-

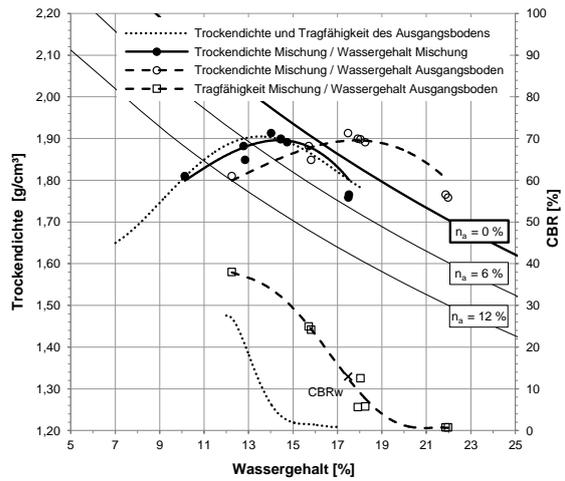
**Tab. 12.26:** Entwicklung der Luftporenanteile im Optimum der Mischungen in Versuchsreihe 4

Mischung	Boden + 20 % RC	Boden + 30 % RC	Boden + 40 % RC	Boden + 50 % RC	Boden + 70 % RC
<b>Materialien</b>					
<b>Boden TL1</b>	<b>Luftporenanteil <math>n_a</math> im Verdichtungs optimum der Mischung [%]</b>				
RC-Mix 0/4	3,8	3,2	4,0	5,3	-
RC-Mix 0/32	4,5	4,4	3,9	4,4	-
RC-Beton 0/4 ( $w_{ZM,0} \approx 3,7\%$ )	-	2,9	-	4,2	-
RC-Beton 0/4 ( $w_{ZM,0} \approx 5,5\%$ )	4,9	3,2	3,2	3,0	3,1
RC-Ziegel 0/4	5,4	5,8	6,2	5,9	-
<b>Boden TA1</b>	<b>Luftporenanteil <math>n_a</math> im Verdichtungs optimum der Mischung [%]</b>				
RC-Mix 0/4	-	6,1	-	9,5	-
RC-Mix 0/32	-	5,2	-	8,1	-

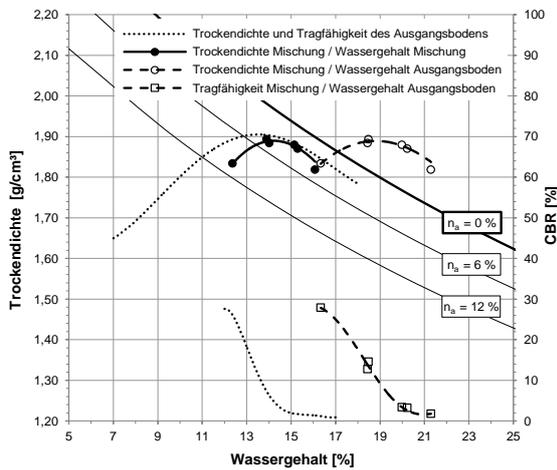
**A.5.1 Auswertung der Einzelversuche**



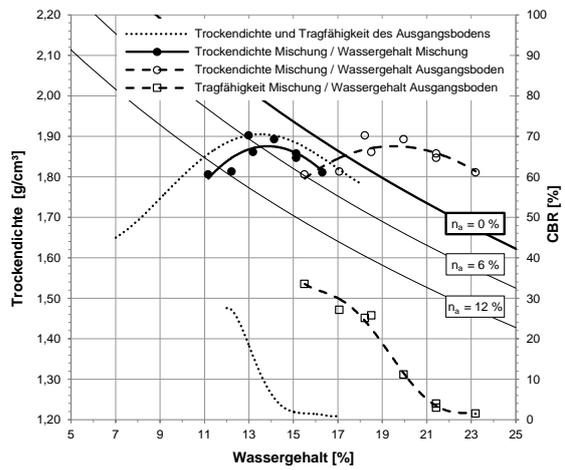
**Abb. 12.59:** VR4; TL1 + 20 % RC-Mix 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,8 \%$



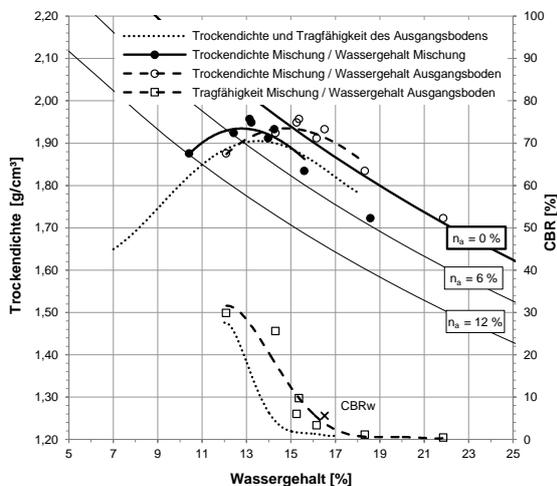
**Abb. 12.60:** VR4; TL1 + 30 % RC-Mix 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,8 \%$



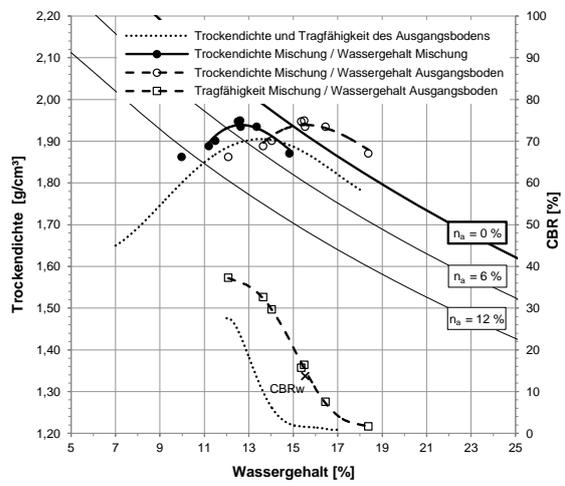
**Abb. 12.61:** VR4; TL1 + 30 % RC-Mix 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,8 \%$



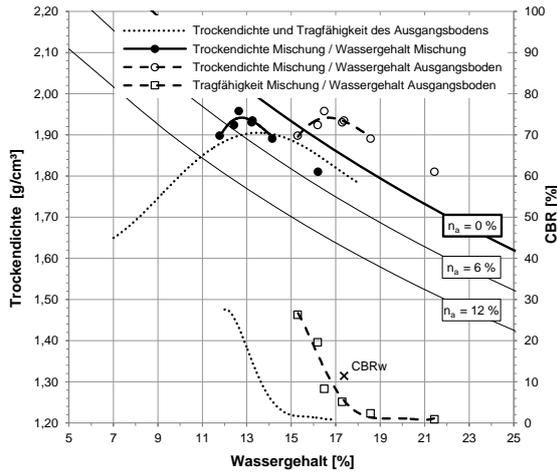
**Abb. 12.62:** VR4; TL1 + 50 % RC-Mix 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,8 \%$



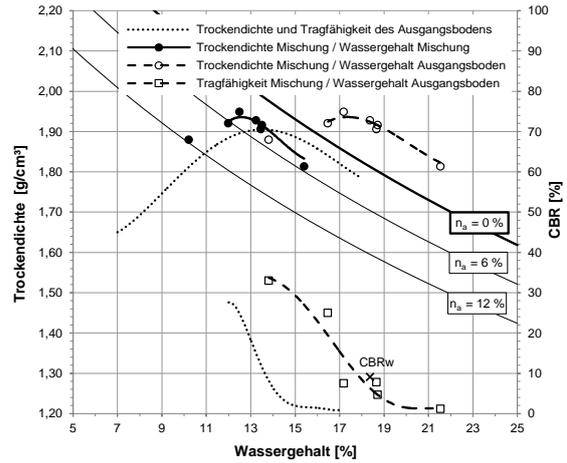
**Abb. 12.63:** VR4; TL1 + 20 % RC-Mix 0/32 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 3,0 \%$



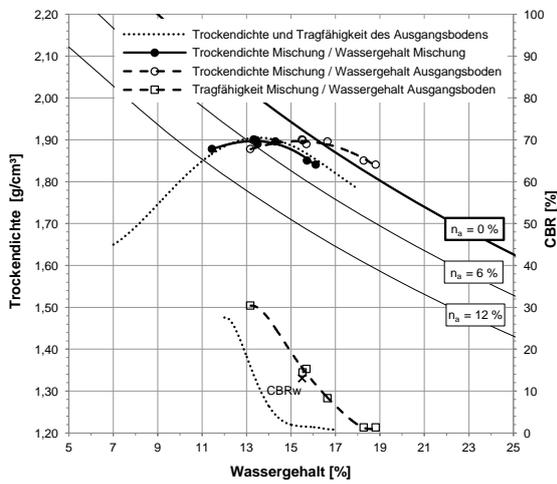
**Abb. 12.64:** VR4; TL1 + 30 % RC-Mix 0/32 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,8 \%$



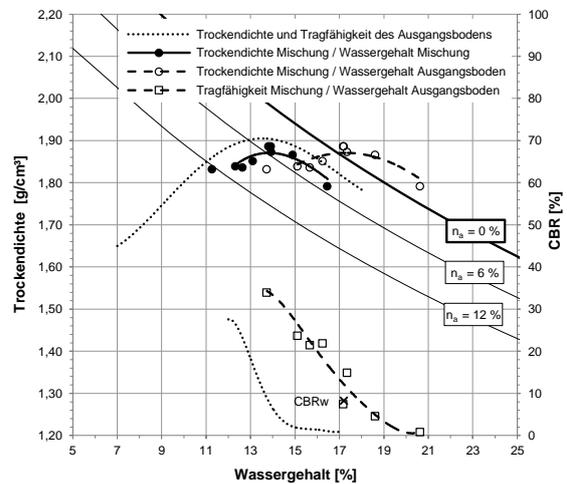
**Abb. 12.65:** VR4, TL1 + 40 % RC-Mix 0/32 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,9 \%$



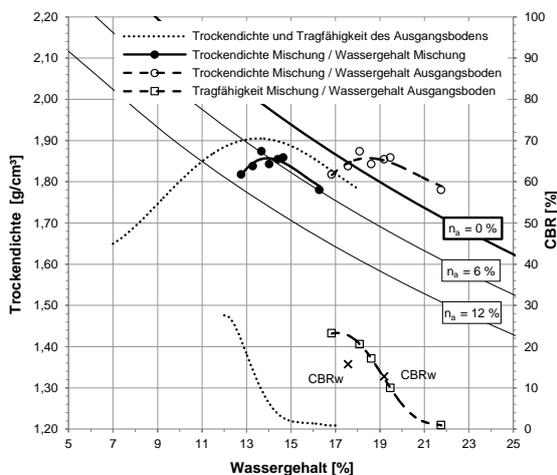
**Abb. 12.66:** VR4; TL1 mit 50 % RC-Mix 0/32 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,5 \%$



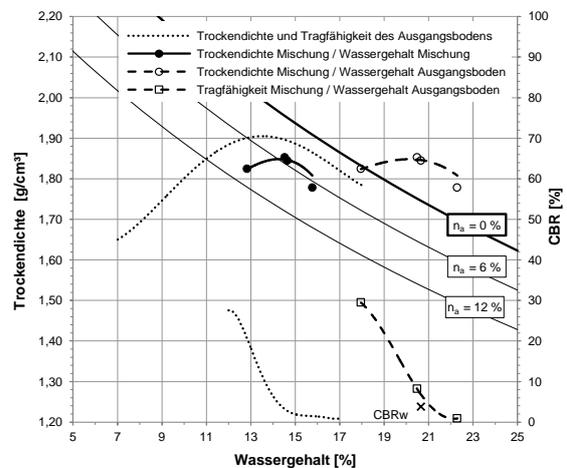
**Abb. 12.67:** VR4; TL1 + 20 % RC-Ziegel 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,7 \%$



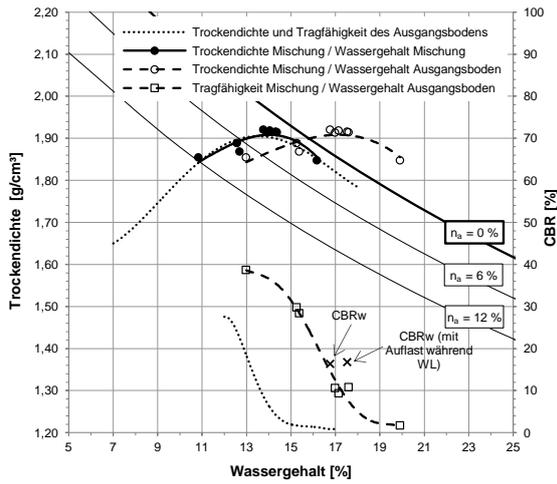
**Abb. 12.68:** VR4; TL1 + 30 % RC-Ziegel 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,6 \%$



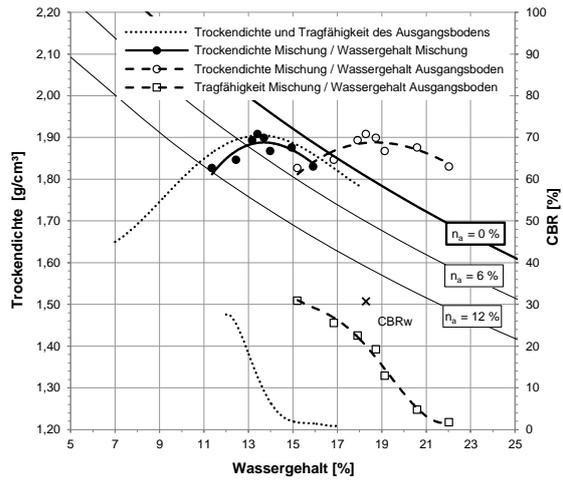
**Abb. 12.69:** VR4; TL1 + 40 % RC-Ziegel 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,6 \%$



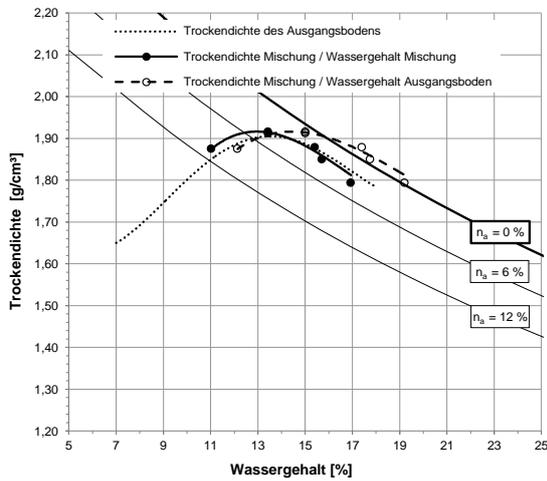
**Abb. 12.70:** VR4; TL1 + 50 % RC-Ziegel 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,6 \%$



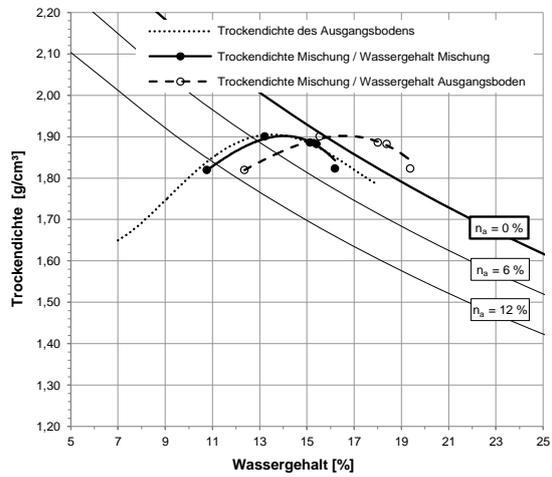
**Abb. 12.71:** VR4; TL1 + 30 % RC-Beton 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 3,7\%$



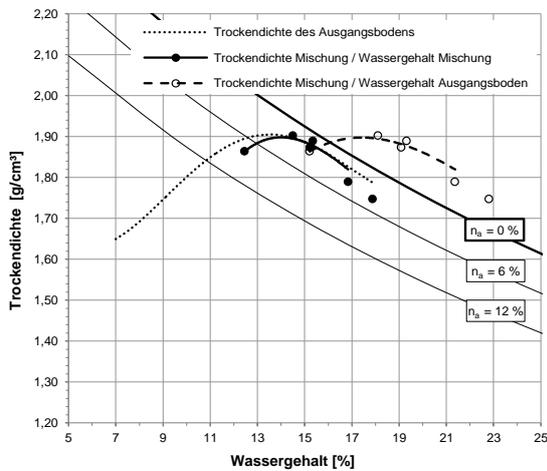
**Abb. 12.72:** VR4; TL1 + 50 % RC-Beton 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 3,7\%$



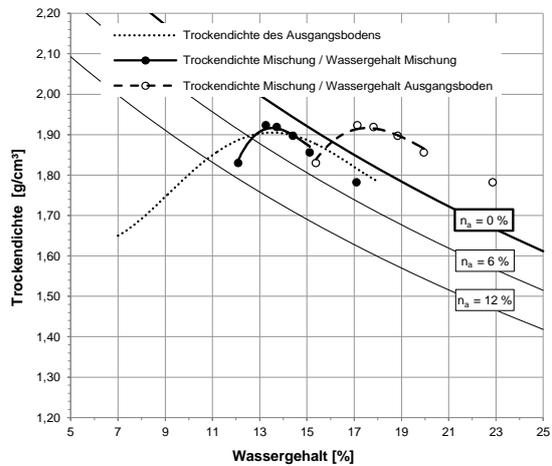
**Abb. 12.73:** Boden TL1 + 20 % RC-Beton 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 5,5\%$



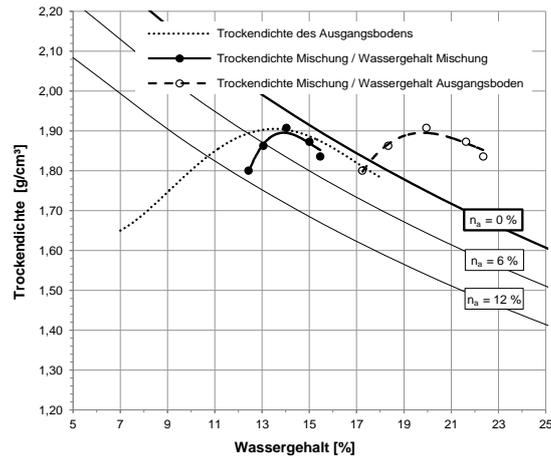
**Abb. 12.74:** Boden TL1 + 30 % RC-Beton 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 5,5\%$



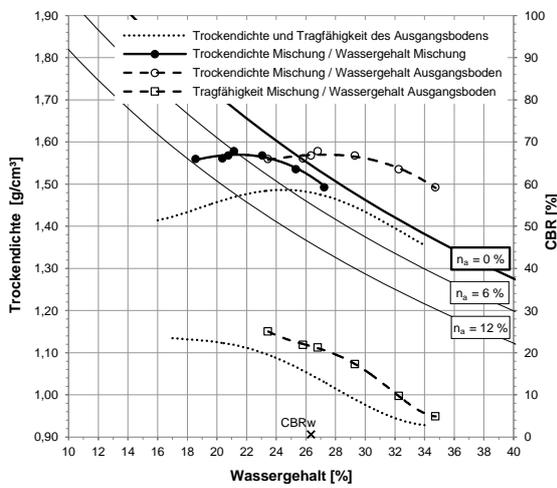
**Abb. 12.75:** Boden TL1 + 40 % RC-Beton 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 5,5\%$



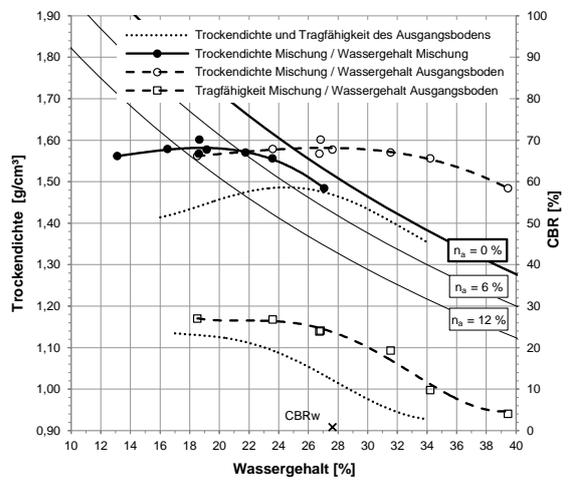
**Abb. 12.76:** Boden TL1 + 50 % RC-Beton 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 5,5\%$



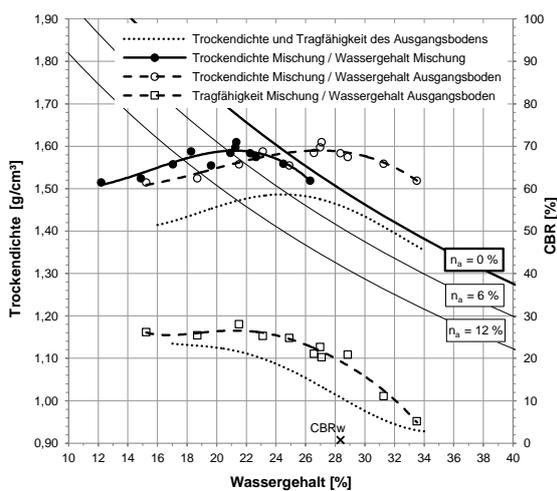
**Abb. 12.77:** Boden TL1 + 70 % RC-Beton 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 5,5\%$



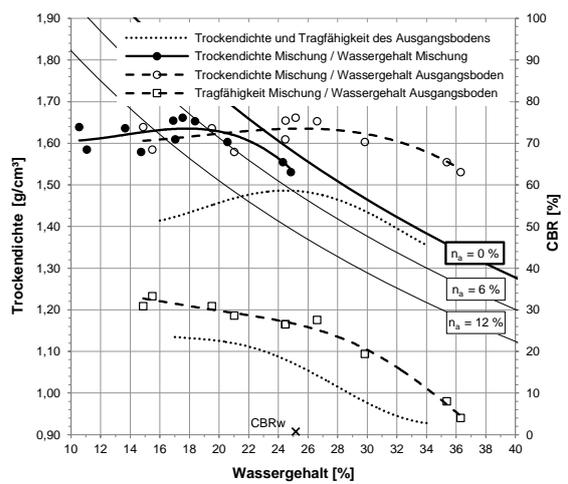
**Abb. 12.78:** VR4; TA1 + 30 % RC-Mix 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,3\%$



**Abb. 12.79:** VR4; TA1; + 50 % RC-Mix 0/4 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,3\%$



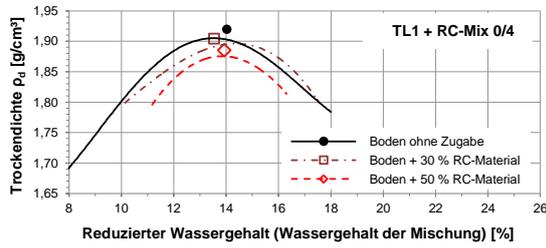
**Abb. 12.80:** VR4; TA1 + 30 % RC-Mix 0/32 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,2\%$



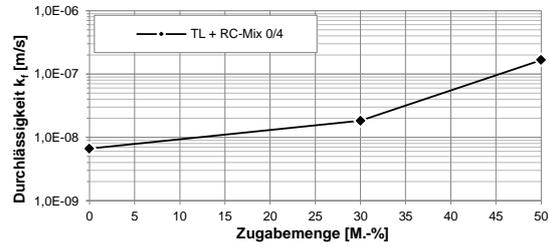
**Abb. 12.81:** VR4; TA1 + 50 % RC-Mix 0/32 mit Eigenwassergehalt  $w_{ZM,0} \approx 2,2\%$

**A.6 Einzelversuchsergebnisse zu Versuchsreihe 5**

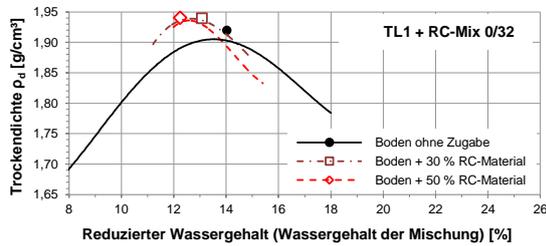
**A.6.1 Durchlässigkeit**



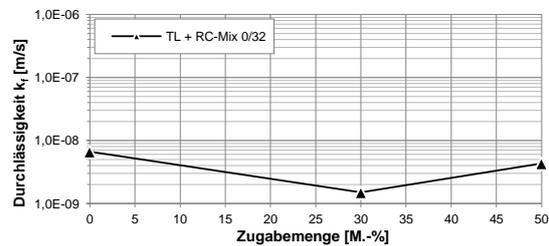
**Abb. 12.82:** VR5; Einbau-bedingungen zur Bestimmung der Durchlässigkeit an Mischungen des Bodens TL1 mit RC-Mix 0/4



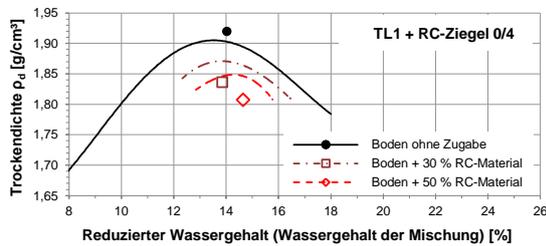
**Abb. 12.83:** VR5; Durchlässigkeit von Mischungen aus Boden TL1 mit RC-Mix 0/4



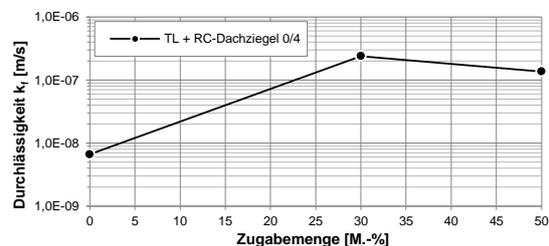
**Abb. 12.84:** VR5; Einbaubedingungen zur Bestimmung der Durchlässigkeit an Mischungen des Bodens TL1 mit RC-Mix 0/32



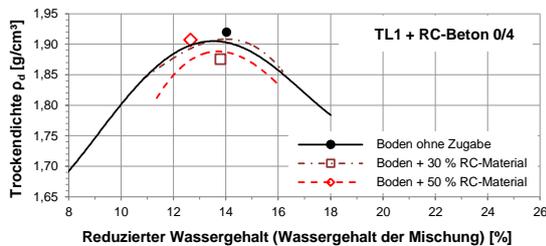
**Abb. 12.85:** VR5; Durchlässigkeit von Mischungen aus Boden TL1 mit RC-Mix 0/32



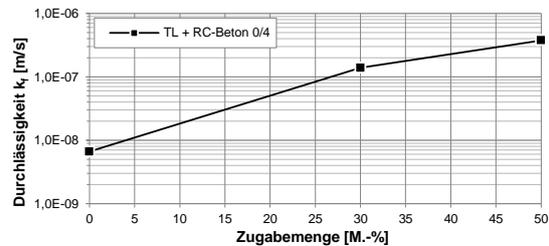
**Abb. 12.86:** VR5; Einbaubedingungen zur Bestimmung der Durchlässigkeit an Mischungen des Bodens TL1 mit RC-Ziegel 0/4



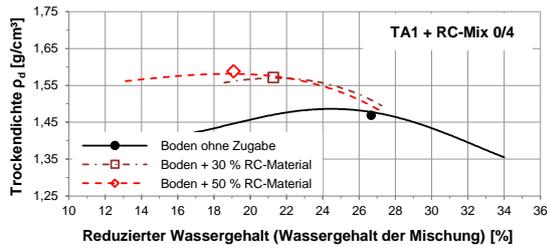
**Abb. 12.87:** VR5; Durchlässigkeit von Mischungen aus Boden TL1 mit RC-Ziegel 0/4



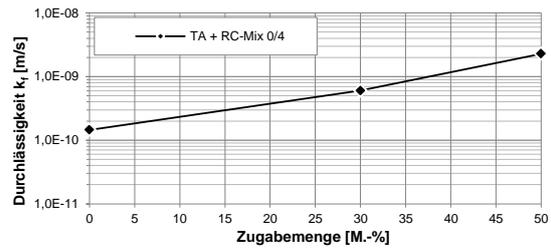
**Abb. 12.88:** VR5; Einbaubedingungen zur Bestimmung der Durchlässigkeit an Mischungen des Bodens TL1 mit RC-Beton 0/4



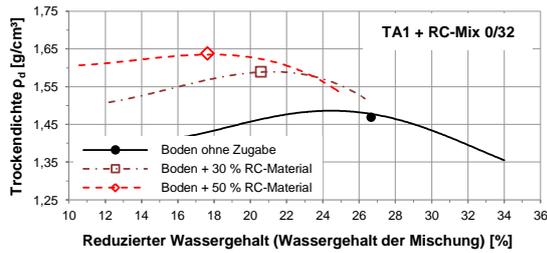
**Abb. 12.89:** VR5; Durchlässigkeit von Mischungen aus Boden TL1 mit RC-Beton 0/4



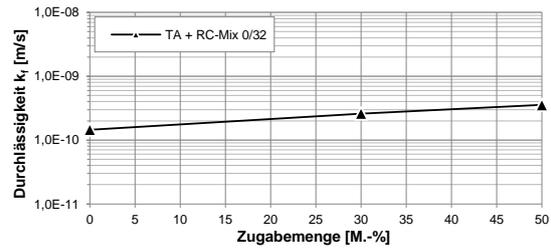
**Abb. 12.90:** VR5; Einbaubedingungen zur Bestimmung der Durchlässigkeit an Mischungen des Bodens TA1 mit RC-Mix 0/4



**Abb. 12.91:** VR5; Durchlässigkeit von Mischungen aus Boden TA1 mit RC-Mix 0/4

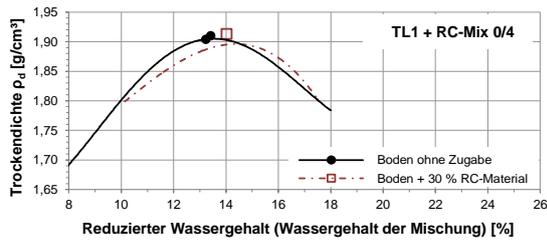


**Abb. 12.92:** VR5; Einbaubedingungen zur Bestimmung der Durchlässigkeit an Mischungen des Bodens TA1 mit RC-Mix 0/32

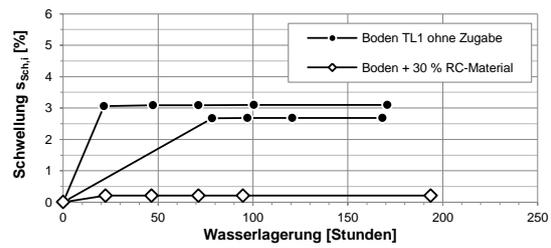


**Abb. 12.93:** VR5; Durchlässigkeit von Mischungen aus Boden TA1 mit RC-Mix 0/32

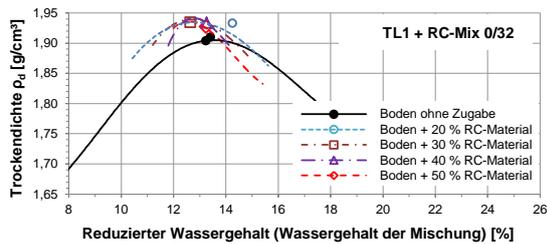
**A.6.2 Schwellverhalten im CBR-Topf und Tragfähigkeit nach Wasserlagerung**



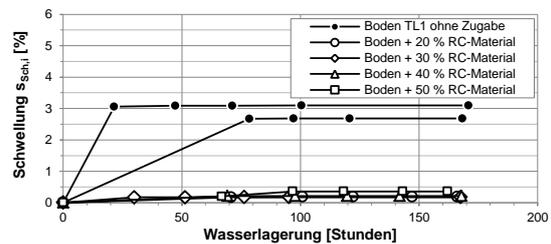
**Abb. 12.94:** VR5; Einbaubedingungen zur Bestimmung des Schwellverhaltens an Mischungen des Bodens TL1 mit RC-Mix 0/4



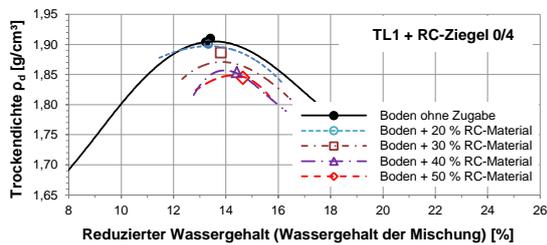
**Abb. 12.95:** VR5; Schwellverhalten von Mischungen aus Boden TL1 mit RC-Mix 0/4



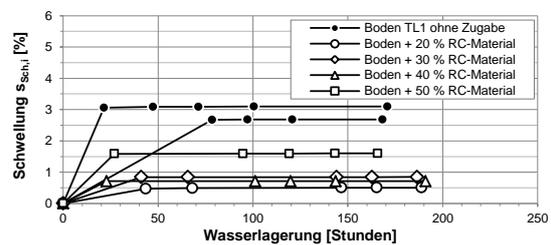
**Abb. 12.96:** VR5; Einbaubedingungen zur Bestimmung des Schwellverhaltens an Mischungen des Bodens TL1 mit RC-Mix 0/32



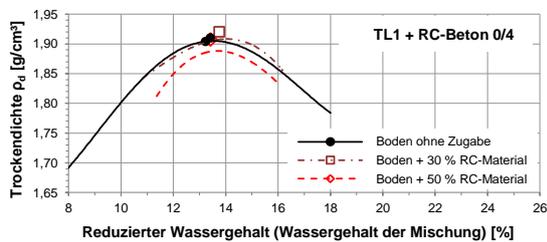
**Abb. 12.97:** VR5; Schwellverhalten von Mischungen aus Boden TL1 mit RC-Mix 0/32



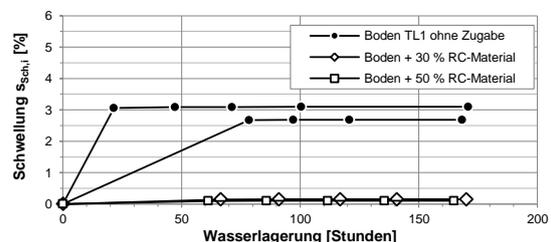
**Abb. 12.98:** VR5; Einbaubedingungen zur Bestimmung des Schwellverhaltens an Mischungen des Bodens TL1 mit RC-Ziegel 0/4



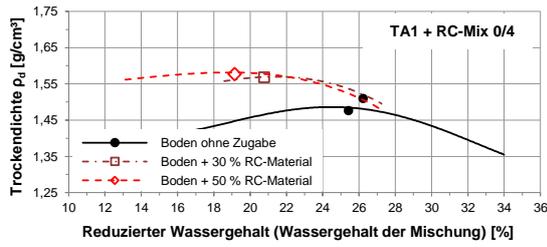
**Abb. 12.99:** VR5; Schwellverhalten von Mischungen aus Boden TL1 mit RC-Ziegel 0/4



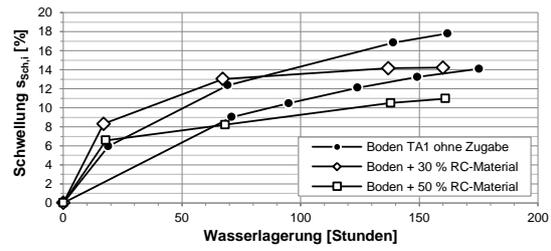
**Abb. 12.100:** VR5; Einbaubedingungen zur Bestimmung des Schwellverhaltens an Mischungen des Bodens TL1 mit RC-Beton 0/4



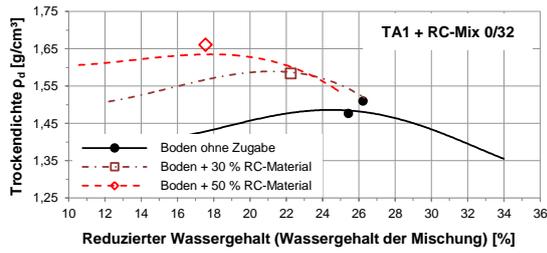
**Abb. 12.101:** VR5; Schwellverhalten von Mischungen aus Boden TL1 mit RC-Beton 0/4



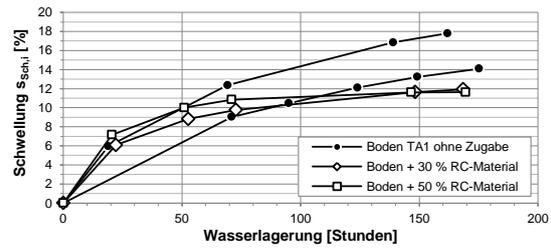
**Abb. 12.102:** VR5; Einbaubedingungen zur Bestimmung des Schwellverhaltens an Mischungen des Bodens TA1 mit RC-Mix 0/4



**Abb. 12.103:** VR5; Schwellverhalten von Mischungen aus Boden TA1 mit RC-Mix 0/4

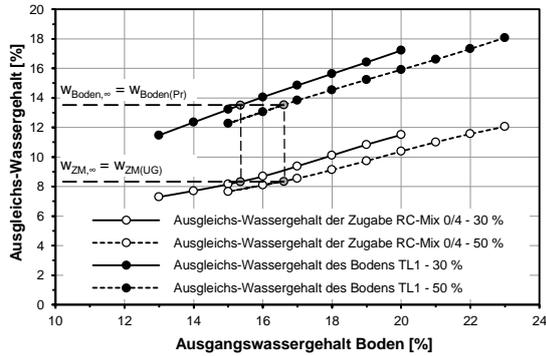


**Abb. 12.104:** VR5; Einbaubedingungen zur Bestimmung des Schwellverhaltens an Mischungen des Bodens TA1 mit RC-Mix 0/32

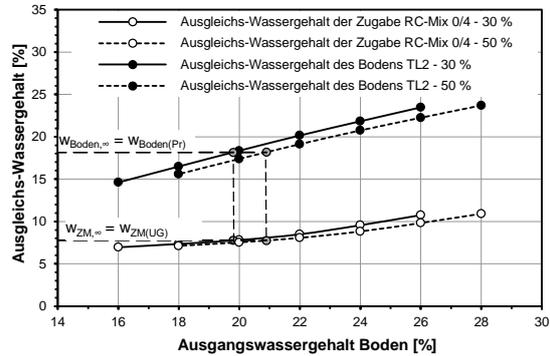


**Abb. 12.105:** VR5; Schwellverhalten von Mischungen aus Boden TA1 mit RC-Mix 0/32

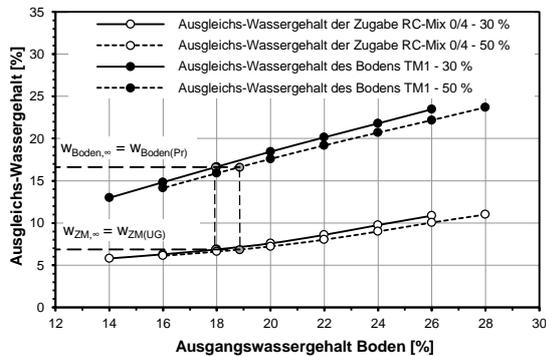
**A.7 Ausgleichs-Wassergehalte bei der Ausgleichs-Saugspannung**



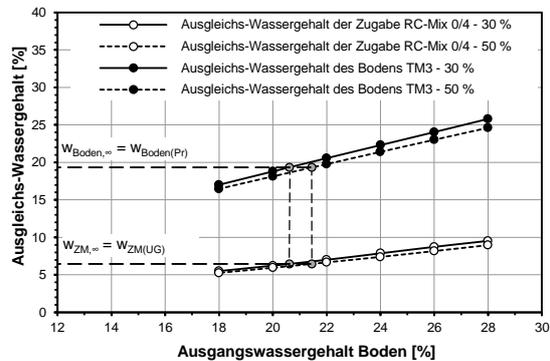
**Abb. 12.106:** VR1; Ausgleichs-Wassergehalt bei der Ausgleichs-Saugspannung ( $w_{ZM,0} \approx 2,2$  %) für Boden TL1



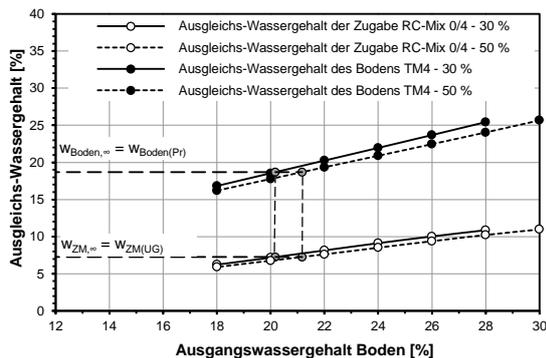
**Abb. 12.107:** VR1; Ausgleichs-Wassergehalt bei der Ausgleichs-Saugspannung ( $w_{ZM,0} \approx 2,3$  %) für Boden TL2



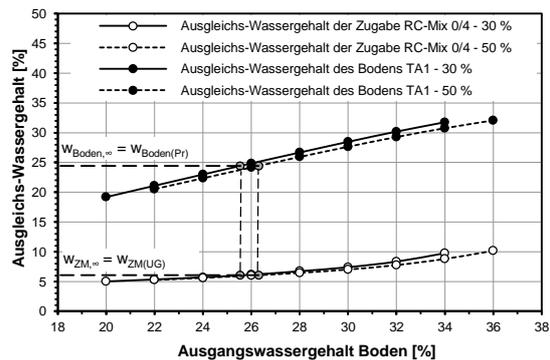
**Abb. 12.108:** VR1; Ausgleichs-Wassergehalt bei der Ausgleichs-Saugspannung ( $w_{ZM,0} \approx 2,4$  %) für Boden TM1



**Abb. 12.109:** VR1; Ausgleichs-Wassergehalt bei der Ausgleichs-Saugspannung ( $w_{ZM,0} \approx 2,2$  %) für Boden TM3



**Abb. 12.110:** VR1; Ausgleichs-Wassergehalt bei der Ausgleichs-Saugspannung ( $w_{ZM,0} \approx 2,3$  %) für Boden TM4



**Abb. 12.111:** VR1; Ausgleichs-Wassergehalt bei der Ausgleichs-Saugspannung ( $w_{ZM,0} \approx 2,3$  %) für Boden TA1