

Untersuchungen zur Überprüfung des Luftporenanteils als Verdichtungsanforderung bei feinkörnigen Böden und bindigen Mischböden

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Straßenbau Heft S 105

bast

Untersuchungen zur Überprüfung des Luftporenanteils als Verdichtungsanforderung bei feinkörnigen Böden und bindigen Mischböden

von

Benedikt Lypp
Emanuel Birle
Dirk Heyer
Norbert Vogt

Lehrstuhl und Prüfamnt für Grundbau,
Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau
Technische Universität München

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 105

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M - Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Schünemann Verlag GmbH, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BAST-Archiv ELBA zur Verfügung.
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE-Nr. 05.158/2009/EGB:
Untersuchungen zur Überprüfung des Luftporenanteils als Verdichtungsanforderung bei feinkörnigen Böden und bindigen Mischböden

Fachbetreuung
Michael Bürger

Herausgeber
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

Redaktion
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag
Fachverlag NW in der
Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9323
ISBN 978-3-95606-294-0

Bergisch Gladbach, April 2017

Kurzfassung – Abstract

Untersuchungen zur Überprüfung des Luftporenanteils als Verdichtungsanforderung bei feinkörnigen Böden und bindigen Mischböden

Die bodenmechanischen Eigenschaften von feinkörnigen Böden und gemischtkörnigen Böden mit Feinkornanteilen über 15 M.-% werden maßgeblich von der Konsistenz und der Plastizität des Feinkorns bestimmt. Mittel- und langfristig können an Erdbauwerken, die aus diesen Bodenarten errichtet wurden, Schäden entstehen, wenn Wasserzutritte eine Verringerung der Konsistenz der feinkörnigen Anteile bewirken. Um eine verminderte Scherfestigkeit, Sackungen und Setzungen zu vermeiden, wurden in den ZTV E-StB 09 Verdichtungsanforderungen festgelegt, die neben dem Verdichtungsgrad auch den Luftporenanteil beinhalten.

Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit sollte untersucht werden, welchen Einfluss der Luftporenanteil auf das Verformungsverhalten der o. g. Böden hat und inwieweit eine Verschärfung der Anforderungen an den Luftporenanteil eine Verbesserung der dauerhaften Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit unter Berücksichtigung eines erhöhten Verdichtungsaufwandes bewirkt. Es wurde zunächst herausgearbeitet, welche Anforderungen hinsichtlich des Luftporenanteils bereits bestehen und inwieweit der Luftporenanteil als Verdichtungsanforderung geeignet ist. Der Luftporenanteil wird hierbei lediglich in Deutschland und Großbritannien als Verdichtungsanforderung genannt. Anhand von fünf Versuchsböden, die nach DIN 18196 den Bodengruppen UL, TM, TA, SU* und GU* zuzuordnen sind, wurde anschließend das Last-Verformungsverhalten bei oedometrischer Belastung und bei Wasserzutritt bei unterschiedlichen Spannungsniveaus untersucht. Die weiteren Laboruntersuchungen umfassten Triaxial- und Wasserdurchlässigkeitsversuche. An einem Probefeld wurden Feldversuche zur Entwicklung des Luftporenanteils bei einer zunehmenden Anzahl an Walzenübergängen durchgeführt.

Eindeutige Aussagen zum Einfluss des Luftporenanteils auf das Verformungsverhalten der untersuchten Böden waren anhand der Laboruntersuchungen nur schwer zu treffen. Die Streuung der Versuchsergebnisse ließ zumeist keine eindeutige Systematik hinsichtlich des Einflusses des Einbau-

zustandes erkennen. Überwiegend wiesen die Versuche, deren Einbaubedingungen innerhalb der nach ZTV E-StB 09 festgelegten Grenzen an Verdichtungsgrad, Wassergehalt und Luftporenanteil lagen, jedoch nur geringe Verformungen auf. Die Ergebnisse der Laboruntersuchungen belegen somit die Eignung der in den ZTV E-StB enthaltenen Verdichtungsanforderungen für Erdbaumaßnahmen. Die Notwendigkeit einer Anpassung bzw. Verschärfung der Anforderungen an den Luftporenanteil lässt sich aus den Laboruntersuchungen nicht ableiten.

Bei den Feldversuchen zeigte sich, dass mit den auf der Baustelle zur Verfügung stehenden Walzenzügen eine stetige, signifikante Erhöhung der Trockendichte und eine Verringerung der Luftporenanteile nur bis zu einem bestimmten Grad erreicht werden konnte, indem die Verdichtungsarbeit durch eine Erhöhung der Walzenübergänge gesteigert wurde. Teilweise bewirkten zusätzliche Walzenübergänge sogar eine Auflockerung des Bodens.

Investigations to examine the air-void ratio as a compaction requirement for fine-grained soils and cohesive mixed soils

The soil-mechanical properties of fine-grained soils and cohesive mixed soils with more than 15 w% of fines are significantly influenced by consistency and plasticity. In the medium and long term earthworks built from these soils may sustain damage if influx of water leads to a reduction in the consistency of the fines. In order to avoid stability problems due to a reduction of shear strength, collapse and settlements compaction requirements have been defined in the Supplementary Technical Contract Provisions and Guidelines for Earthworks in Road Construction (ZTV E-StB), which include the degree of compaction as well as the air void ratio.

This research aimed at analysing the influence of the air void ratio on the deformation properties of fine-grained soils and cohesive mixed soils with more than 15 w% of fines in order to demonstrate if or to what extent positive effects arise from a decreased air void ratio as a compaction requirement when building earthworks. At first studies on existing requirements regarding the air

void ratio and its suitability as a compaction requirement were conducted, which showed that the air void ratio is applied as a compaction requirement only in Germany and Great Britain. Five fine-grained and mixed-grained soils were selected, which according to DIN 18196 can be classified as UL, TM, TA, SU* and GU*. Investigations on the deformation properties of the soils were conducted as oedometer tests, with watering of the samples at different stress levels. Further laboratory investigations included triaxial and water permeability tests. In the field the development of the air void ratio under increasing compaction work was examined.

Based on the laboratory test results a clear assessment, to what extent the air void ratio influences the deformation behaviour of the investigated soils, is difficult to make. In most cases spreading of the test results impeded clear conclusions regarding the air void ratio and the identified soil properties. Most samples, whose initial conditions complied with the requirements of ZTV E-StB 09 regarding degree of compaction, water content and air void ratio, showed no significant collapse or swelling during saturation. The results of the laboratory tests therefore support the compaction requirements for earthworks contained in the ZTV E-StB 09. Thus an adjustment or an increase of the requirements on the air void ratio cannot be deduced from the results of the laboratory investigations.

Field tests showed that an increase in compaction energy accomplished by a higher number of roller passes lead to a reduction of air voids only to a certain degree.

Summary

Investigations to examine the air-void ratio as a compaction requirement for fine-grained soils and cohesive mixed soils

1 Task

The soil-mechanical properties of fine-grained soils and cohesive mixed soils with more than 15 w% of fines are significantly influenced by consistency and plasticity. In the medium and long term earthworks built from these soils may sustain damage if influx of water leads to a reduction in the consistency of the fines. In order to ensure permanent bearing capacity and serviceability of the earthworks reductions in shear strength, collapse and settlement have to be avoided. For this purpose compaction requirements have been defined in rules and standards. For the aforementioned soils a degree of compaction of 97% and an air void ratio of less than 12 vol% are required as stated in the Supplementary Technical Contract Provisions and Guidelines for Earthworks in Road Construction (ZTV E-StB 09).

By reducing the air void ratio during compaction water influx into earthworks is impeded. This reduction can be achieved by an increase either of the initial water content or the applied compaction. In both cases the hydraulic conductivity of the soil is lessened. Due to further developments of the construction equipment higher degrees of compaction and lower air void ratios can be achieved than those specified in the ZTV E-StB 09, supposedly leading to a reduction in the aforementioned damages and lower costs of maintenance. On the other hand higher costs due to the increased compaction effort are suspected.

This research examines and assesses the influence of the air void ratio on the deformation behaviour of compacted fine-grained soils and cohesive mixed soils. Based on the results further investigation is carried out to which extent stricter requirements regarding air voids bring about an improvement of the permanent bearing capacity and serviceability of earthworks. In addition an assessment of the possible improvements in relation to the increased compaction effort leading to lower air void ratios was conducted in order to

evaluate whether the positive effects of a higher compaction justify these higher efforts and whether the existing requirements stated in the ZTV E-StB 09 are to be revised according to the findings of this research.

2 Investigation methods

This research aimed at analysing the influence of the air void ratio on the deformation properties of fine-grained soils and cohesive mixed soils with more than 15 w% of fines in order to demonstrate if or to what extent positive effects arise from a decreased air void ratio as a compaction requirement when building earthworks. Five fine-grained and mixed-grained soils were selected for investigations. According to DIN 18196 these soils could be classified as a low plasticity silt (UL), a medium plasticity clay (TM), a high plasticity clay (TA), a cohesive sand (SU*) and a cohesive gravel (GU*). On these soils laboratory investigations were to be conducted covering five different initial conditions with degrees of compaction ranging from 95 to 100% and air void ratios between 4 and 12 vol%.

The basic properties of the soils were examined by soil classification and proctor tests. Hereby the determination of the compaction properties was significant for the following laboratory tests. Based on ZTV E-StB 09 and the modifications compared to its previous version ZTV E-StB 94/97 five initial conditions for further soil mechanical investigation were chosen ($D_{Pr} = 100\%$, $n_a = 8 \text{ vol}\%$ as well as $D_{Pr} = 97\%$, $n_a = 4 \text{ vol}\%$, $8 \text{ vol}\%$ and $12 \text{ vol}\%$ respectively as well as $D_{Pr} = 95\%$, $n_a = 8 \text{ vol}\%$). Later two further initial conditions were added to the laboratory program. One of these represented an initial condition permitted in the previous version ZTV E-StB 94/97 but not in ZTV E-StB 09 anymore ($D_{Pr} = 95\%$, $n_a = 12 \text{ vol}\%$), the other reflected a demanding initial condition ($D_{Pr} = 100\%$, $n_a = 4 \text{ vol}\%$). The five primary initial conditions were selected in a way to equally cover all initial conditions for these kinds of soils according to ZTV E-StB 09 and to facilitate the comparison of deformation properties at identical degrees of compaction and different air void ratios as well as identical air void ratios and different degrees of compaction.

The investigations on the deformation properties of the samples were conducted as oedometer tests

according to DIN 18135. If possible, each of the five soils was examined under the intended initial conditions. Soils UL, TM, TA and SU* were tested in oedometer cells with a diameter of 10 cm and a height of 2 cm. For each soil and initial condition a test series of four individual tests was carried out. Because of the maximum grain size of 32 mm soil GU* was examined in a large scale oedometer with specimen 30 cm in diameter and 6 cm in height. With less large scale oedometer cells being at disposal only three individual tests per initial conditions were carried out. Each test series was made up of one individual test without watering while loading and two (GU*) or three (UL, TM, TA, SU*) individual tests where the samples were watered at different stress levels.

Further investigations were to be conducted on soils reacting especially sensible to changes in water content during oedometer testing. Soils TM and TA were chosen and triaxial tests were conducted according to DIN 18137-2. Two initial conditions ($D_{Pr} = 100\%$, $n_a = 4 \text{ vol}\%$ and $D_{Pr} = 97\%$, $n_a = 12 \text{ vol}\%$) were investigated trying to cover all initial conditions according to ZTV E-StB 09 as good as possible. The aim of the triaxial tests was to examine the shear strength of the soils. Height and diameter of the samples were 9 cm and 3.6 cm respectively. Additionally a K_0 test was performed to simulate oedometric stress in the triaxial cell. The test was conducted on a sample of soil TM with a height of 6 cm and a diameter of 10 cm.

Furthermore, the hydraulic conductivity of the soils UL, TM, TA and SU* was examined in the laboratory in accordance to DIN 18130-1. The influence of the degree of compaction and the air void ratio on the flow of water through the samples was to be investigated. The test was carried out in pressure cells on samples of 10 cm in diameter and 5 cm in height.

Tests on soil stiffness and bearing capacity in the field were carried out at a construction site for the federal motorway BAB A3 southeast of Aschaffenburg. The investigations on a moulded claystone showed the development of degree of compaction, water content and air void ratio under increasing compaction work.

3 Investigation results

The literature study showed that only in Great Britain and Germany the air void ratio is applied as a compaction requirement. The ZTV E-StB 09 give a limit of 12 vol% air voids for the sub-construction of a dam made up of fine-grained soils or cohesive mixed-grained soils. If the soil is water sensitive, a limit of 8 vol% is given. In the case of rocks of non-durable strength, a limit of 6 vol% is recommended. Meanwhile in Great Britain an air void ratio of maximum 10 vol% is required.

MOKWA & FRIDLEIFSSON (2007) list advantages and disadvantages of the air void ratio as a compaction requirement. The former include the fast measurement with nuclear gauges, which allow the determination of the air void ratio. The possibility to reduce the air voids by an increase of the water content is regarded critically.

Based on the test results of the samples of soil UL no clear conclusions can be drawn about the influence of dry density and air void ratio on the stiffness of the samples. Highest stiffness values were mainly observed with samples UL09407 (094 for 94% of Proctor density, 07 for 7 vol% air voids) and UL09708, lowest stiffness values in contrast with samples UL09508 and UL09514. The samples without watering predominantly showed the highest stiffness values at mean stresses of 300 kN/m², while those samples with early watering at a stress level of 12,5 kN/m² possessed the lowest stiffness values in nearly all tests under different initial conditions. During the analysis of the stress-compression-curves the highest values for the compression s' (which is related to the initial height of the samples) exceeded 3% for the samples with low degrees of compaction ($D_{Pr} = 95\%$). The tests on samples with initial conditions in accordance with ZTV E-StB 09 showed no significant signs of collapse or swelling. Merely sample UL09514D, which was watered at a stress level of 200 kN/m², showed considerable deformation, namely collapsing 4.5% of its initial height.

Tendentially those samples of soil TM showed high stiffness values whose initial conditions comprised low air void ratios and high dry densities, although this observation is not without exemptions. The highest stiffness values at a mean stress of 300 kN/m² were mainly observed on samples without watering, the lowest were mostly determined for samples watered at low

(12,5 kN/m²) or medium stress levels (50 kN/m²). Analysis of the stress-compression-curves of soil TM showed no clear dependencies between compression and dry density or air voids. Both on samples with high and low air void ratios high and low s' -values were observed. However, predominantly those samples with the highest initial dry densities showed the lowest s' -values at the highest investigated stresses. During watering almost no stress independent deformations were measured. Only samples of the test series TM10004, TM09512 and TM09508 showed a significant swelling behaviour while watering especially at low and medium stress levels.

The relevance of the research project became apparent on the test series of the soil TM, during the manufacture of which dry and wet density had been confused. This resulted in samples with considerably low degrees of compaction ($D_{Pr} = 83\%$ and 86%) and very high air void ratios ($n_a = 18 \text{ vol}\%$ and $22 \text{ vol}\%$). Especially during watering at higher stress levels samples of both initial conditions showed considerable collapse up to 8% of the initial sample height.

In the stress-oedometer modulus-curves of soil TA no clear dependencies between air voids and the test results were obtained as samples with high as well as low air void ratios showed high and low stiffness values. From the analysis of the stress-compression-curves the tendency of samples with high initial dry densities or high initial air void ratios to show large increases in volume during saturation could be derived. This was especially the case with samples watered at low stress levels. During saturation at low and medium stresses swelling occurred on all samples, while only samples with degrees of compaction of 97% and more showed significant swelling during watering at a high stress level ($\sigma = 200 \text{ kN/m}^2$). In general it could be seen that the swelling potential decreased with rising stresses during saturation. Collapse was not observed on soil TA.

From the stress-compression-curves of soil SU* no clear conclusions could be drawn regarding the influence of dry density and air voids on the test results. Spread allowed no clear interpretation of test results. During saturation at low stress levels ($\sigma = 12.5 \text{ kN/m}^2$) swelling up to 0.2% of the sample height was observed, at medium stress levels ($\sigma = 50 \text{ kN/m}^2$) some of the samples collapsed slightly. Significant collapse however could

especially be measured on samples with high air void ratios when watered at high stress levels. Tendentially the highest stiffness values were obtained on samples with high dry densities and low air void ratios. Nevertheless, these results also showed a certain amount of spread. Yet the test results of those samples with initial conditions in accordance with ZTV E-StB 09 showed no considerable collapse or swelling.

Because of the spread of oedometer moduli obtained from the test results on soil GU* no clear dependencies could be drawn between the air voids and their influence on the deformation properties of the soil. With most test series highest stiffness values were observed on samples without watering and lowest stiffness values on samples saturated at low stress levels. Test series GU10004 and GU09712 showed significantly higher stiffness values than test series GU09704 and GU09508. Similar results were obtained from the analysis of the stress-compression-behaviour of the samples. Sample GU09712 swelled 0.2% of its initial height when saturated at a stress level of 12.5 kN/m². Apart from that no considerable swelling or collapse occurred. It could be noted that with all initial conditions, which are all in accordance with ZTV E-StB 09, no significant deformation had occurred.

From the results of the triaxial tests on soil TM the dependency of the friction angle and the cohesion on the water content could be determined. The friction angle increased with decreasing water content, while cohesion gained with increasing water content. Results on soil TA did not confirm these results. No clear tendency regarding the influence of the water content on the friction angle and cohesion was obvious.

Hydraulic conductivity tests predominantly acknowledged the results from literature study. For the most part tests on samples with high initial dry densities and low initial air void ratios showed the lowest hydraulic conductivities. A certain amount of spreading was recognized with differences in hydraulic conductivity being small between all initial conditions.

Field tests allowed investigations on the effect of compaction on the development of the air void ratio. The test results showed that an increase in compaction energy accomplished by a higher number of roller passes lead to a reduction of air voids only to a certain degree. One of the two test points showed an almost linear decrease of the air

void ratio with a rising number of roller passes, while at the other one compaction could hardly be increased after four passes, even being slightly reduced occasionally. The latter was also determined for the measured dry densities.

Analysis of compaction control results from the construction site, at which the field tests had been conducted, showed that the requirements for degree of compaction of at least 97% and for the air void ratio of equal or less than 8 vol% were achieved with the designated compaction work (6 roller passes). Admittedly, only a small number of data sets were available.

4 Practical implications

The results of the oedometer tests allow only limited conclusions regarding the influence of dry density and air void ratio on the deformation behaviour of the soils. However, it can be pointed out that no significant collapsing or swelling during saturation occurred when initial conditions of the soils comply with the requirements of ZTV E-StB 09. Tests on samples with significantly lower initial degrees of compaction or higher initial air void ratios showed considerable deformations. Particularly when being saturated at high stress levels these samples showed collapse of up to 8% of their initial height. The results of the laboratory tests therefore support the compaction requirements for earthworks contained in the ZTV E-StB 09.

Based on the laboratory test results an assessment, whether a reduction of the existing air void ratio limit can prevent damages on earthworks, is difficult. In most cases spreading of the test results impeded clear conclusions regarding the air void ratio and the identified soil properties. Partially, the assumption, that low air void ratios result in small deformations, could be confirmed. Yet consistent conclusions based on all tests could not be derived.

A combination of the results of the hydraulic conductivity tests, oedometer tests and strength tests supports strict requirements on degree of compaction and air void ratio. Samples with high initial degrees of compaction and low initial air void ratios predominantly showed the lowest hydraulic conductivities. At the same time the highest stiffness values were obtained for samples not saturated or watered at high stress levels.

Moreover, these samples showed the highest undrained shear strength according to the pocket penetrometer tests.

The results of the field tests show the difficulties that can arise during compaction and reduction of the air void ratio. Increasing the compaction work by a higher number of roller passes leads to a reduction in air voids only to a certain degree, especially without adding water. In the case investigated a raised compaction effort and consequently higher costs did not result in improved properties of the compacted soil. However, the required degree of compaction of 97% could always be achieved. A generally admitted cost-benefit analysis cannot be deduced from these results. Further field investigations covering different soil types, initial conditions and compaction equipment are necessary for this purpose.

Inhalt

Abkürzungen	11	6 Laboruntersuchungen	22
1 Einleitung	13	6.1 Laborprogramm	22
2 Forschungskonzept	13	6.1.1 Klassifizierungsversuche	22
2.1 Zielsetzung	13	6.1.2 Proctorversuch nach DIN 18127	22
2.2 Vorgehen	13	6.1.3 Mineralogische Untersuchungen	24
3 Bodenmechanische Grundlagen ...	13	6.1.4 Eindimensionaler Kompressionsversuch nach DIN 18135	24
4 Ergebnisse der Literaturrecherche	15	6.1.5 Taschenpenetrometerversuch	24
4.1 Verdichtung und Luftporenanteil	15	6.1.6 Triaxialversuch nach DIN 18137-2	24
4.2 Regelwerke	16	6.1.7 Wasserdurchlässigkeitsversuch nach DIN 18130-1	25
4.2.1 Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau (ZTV E-StB 09)	16	6.1.8 Durchgeführte Laborarbeiten	25
4.2.2 Entwicklung der Anforderungen in den ZTV E-StB seit 1959	17	6.2 Klassifizierungs- und Proctorversuche	26
4.2.3 Richtlinie 836 (Ril 836)	18	6.2.1 Leicht plastischer Schluff (UL)	26
4.3 Verdichtungsanforderungen und -kontrolle im Ausland und im Vergleich zu Deutschland	18	6.2.2 Mittelplastischer Ton (TM)	26
4.4 Verdichtung und Verdichtungsgeräte	19	6.2.3 Ausgeprägt plastischer Ton (TA)	26
4.4.1 Geschichtlicher Kurzüberblick	19	6.2.4 Stark schluffiger Sand (SU*)	27
4.4.2 Moderne Verdichtungsgeräte	19	6.2.5 Stark schluffiger Kies (GU*)	27
5 Versuchsböden für die Laboruntersuchungen	20	6.3 Mineralogische Untersuchungen	28
5.1 Herkunft der Versuchsböden	20	6.3.1 Leicht plastischer Schluff (UL)	28
5.2 Leicht plastischer Schluff (UL)	20	6.3.2 Mittelplastischer Ton (TM)	28
5.3 Mittelplastischer Ton (TM)	20	6.3.3 Ausgeprägt plastischer Ton (TA)	28
5.4 Ausgeprägt plastischer Ton (TA)	20	6.3.4 Feinkornanteil des stark schluffigen Sandes und Kieses (SU*/GU*)	28
5.5 Stark schluffiger Sand (SU*)	20	6.4 Eindimensionale Kompressionsversuche	28
5.6 Stark schluffiger Kies (GU*)	22	6.4.1 Festlegung des Versuchsprogramms	28
		6.4.2 Versuchsschema	29
		6.4.3 Oedometerversuchsstand	30
		6.4.4 Probenherstellung	31
		6.4.5 Versuchsdurchführung	32
		6.4.6 Probleme bei der Versuchsdurchführung	32

6.4.7	Versuchsauswertung	32	7.3	Vorausgehende Laboruntersuchungen	124
6.4.8	Versuchsergebnisse	33	7.3.1	Untersuchungen am Zentrum Geotechnik der Technischen Universität München	124
	Leicht plastischer Schluff (UL)	33	7.3.2	Laboruntersuchungen der örtlichen Bauüberwachung	125
	Mittelplastischer Ton (TM)	50	7.4	Untersuchungen am Probefeld	125
	Ausgeprägt plastischer Ton (TA)	71	7.4.1	Probefeldherstellung	125
	Stark schluffiger Sand (SU*)	89	7.4.2	Untersuchungen mit der Isotopsonde	126
6.5	Eindimensionale Kompressionsversuche im Großoedometer	105	7.4.3	Untersuchungsergebnisse	126
6.5.1	Festlegung des Versuchsprogramms	105	8	Ergebnisse von Erdbauarbeiten	129
6.5.2	Versuchsschema	106	9	Bewertung der Labor- und Felduntersuchungen im Hinblick auf die Verdichtungsanforderungen nach ZTV E-StB	129
6.5.3	Großoedometerzellen	106	10	Kosten-Nutzen-Analyse	130
6.5.4	Probenherstellung	106	11	Weiterer Forschungsbedarf	130
6.5.5	Versuchsdurchführung	107	12	Zusammenfassung	131
6.5.6	Versuchsergebnisse mit dem stark schluffigen Kies (GU*)	107	13	Literatur	133
6.6	Taschenpenetrometerversuche	115		Anlagen	
6.6.1	Versuchsdurchführung	115		Die Anlagen zum Bericht sind im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter:	
6.6.2	Versuchsergebnisse	115		http://bast.opus.hbz-nrw.de	
6.7	Triaxialversuche	119			
6.7.1	Versuchsprogramm	119			
6.7.2	Versuchsdurchführung	119			
6.7.3	Probenherstellung	119			
6.7.4	Versuchsergebnisse	119			
6.7.5	K ₀ -Triaxialversuch	120			
6.8	Wasserdurchlässigkeitsversuche	121			
6.8.1	Versuchsprogramm	121			
6.8.2	Probenherstellung	121			
6.8.3	Versuchsdurchführung	121			
6.8.4	Versuchsergebnisse	122			
6.8.5	Zusammenfassung der Ergebnisse der Wasserdurchlässigkeitsversuche	123			
7	Felduntersuchungen	123			
7.1	Projektübersicht	123			
7.2	Geografische und geologische Übersicht	123			

Abkürzungen

Abk.	Einheit	Bezeichnung			
			σ	kN/m ²	totale Spannung
c_u	kN/m ²	undrÄnierte Scherfestigkeit	σ_M	kN/m ²	mittlere totale Spannung
c'	kN/m ²	effektive KohÄsion	σ'	kN/m ²	effektive Spannung
D_{Pr}	%	Verdichtungsgrad	φ'	°	effektiver Winkel der inneren Reibung
e	-	Porenzahl			
E_s	MN/m ²	Steifemodul			
I_p	-	Plastizitätszahl			
k	m/s	Durchlässigkeitsbeiwert			
K_0	-	Erdruhedruckbeiwert			
n	-	Porenanteil			
n_a	-	Luftporenanteil			
n_w	-	wassergefüllter Porenanteil			
s'	%	bezogene Zusammen- drückung			
S_r	%	Sättigungszahl			
V_{Gl}	%	Glühverlust			
w	%	Wassergehalt			
w_L	%	Wassergehalt an der Fließ- grenze			
w_P	%	Wassergehalt an der Ausroll- grenze			
w_{Pr}	%	Wassergehalt am Proctor- Optimum			
γ	kN/m ³	Wichte			
ρ_d	kg/m ³	Trockendichte			
ρ_{Pr}	kg/m ³	Proctordichte beim optima- len Wassergehalt w_{Pr}			
ρ_s	kg/m ³	Korndichte			
ρ_w	kg/m ³	Dichte von Wasser			

1 Einleitung

Die bodenmechanischen Eigenschaften von feinkörnigen Böden und gemischtkörnigen Böden mit Feinkornanteilen über 15 M.-% werden maßgeblich von der Konsistenz und der Plastizität des Feinkorns bestimmt. Mittel- und langfristig können an Erdbauwerken, die aus diesen Bodenarten errichtet wurden, Schäden entstehen, wenn Wasserzutritte eine Verringerung der Konsistenz der feinkörnigen Anteile bewirken. Um dem entgegenzuwirken und somit eine dauerhafte Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit zu gewährleisten, müssen eine Verringerung der Scherfestigkeit sowie Sackungen und Setzungen vermieden werden. Dafür wurden in Regelwerken verschiedene Verdichtungsanforderungen festgelegt. Bei Verwendung oben genannter Böden in Dämmen und Einschnitten werden in den ZTV E-StB 09 je nach Bereich ein Verdichtungsgrad $D_{Pr} \geq 97 \%$ und ein Luftporenanteil $n_a \leq 12 \text{ Vol.-%}$ oder auch ein Verdichtungsgrad $D_{Pr} \geq 100 \%$ gefordert.

Durch eine Verringerung des Luftporenanteils bei der Verdichtung wird der Wasserzutritt in den verdichteten Unterbau bzw. den Untergrund erschwert. Möglich ist diese Reduzierung zum einen durch eine Erhöhung der Einbauwassergehalte, zum anderen durch eine stärkere Verdichtung. In beiden Fällen wird auch die Durchlässigkeit des Bodens vermindert. Durch die Weiterentwicklung der Baumaschinen ist es heute möglich, nach Verdichtung deutlich geringere Luftporenanteile als den in der ZTV E-StB 09 geforderten Wert von $n_a \leq 12 \text{ Vol.-%}$ zu erreichen. Hierdurch ist mit einer Minimierung der oben genannten Schäden und folglich mit einer Reduktion der Instandhaltungskosten während der Nutzungsdauer zu rechnen. Aus baupraktischer Sicht werden jedoch von den Baubeteiligten höhere Kosten infolge Bewässerung und ein erhöhter Verdichtungsaufwand befürchtet.

2 Forschungskonzept

2.1 Zielsetzung

In der vorliegenden Forschungsarbeit soll beurteilt werden, welchen Einfluss der Luftporenanteil auf das Verformungsverhalten o. g. verdichteter feinkörniger Böden besitzt. Aus den daraus resultierenden Erkenntnissen soll weitergehend untersucht werden, inwieweit eine Ver-

schärfung der Anforderungen an den Luftporenanteil eine Verbesserung der dauerhaften Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit von Erdbauwerken bewirkt. Zudem soll eine etwaige Verbesserung in Relation zu dem höheren Verdichtungsaufwand, der für eine Verminderung des Luftporenanteils benötigt wird, gesetzt werden und geklärt werden, ob die Vorteile aus der Verdichtung diesen höheren Aufwand rechtfertigen und die in den ZTV E-StB 09 bestehenden Anforderungen an die neuen Erkenntnisse angepasst werden sollten.

2.2 Vorgehen

Bei der Bearbeitung des Forschungsvorhabens wurde zunächst eine Literaturrecherche zu Anforderungen an den Luftporenanteil bei feinkörnigen und gemischtkörnigen Böden durchgeführt. In einem Laborprogramm wurde an fünf Böden, die nach DIN 18196:2011-05 den Bodengruppen UL, TM, TA, SU* und GU* zuzuordnen sind, das Spannungs-Verformungsverhalten bei oedometrischer Belastung und bei Wasserzutritt bei unterschiedlichen Spannungsniveaus untersucht. Die Wasserdurchlässigkeit der Versuchsböden UL, TM, TA und SU* wurde anschließend bei den gleichen Einbaubedingungen wie in den Oedometerversuchen im Labor ermittelt. Zudem wurden Triaxialversuche an den Böden TM und TA an jeweils zwei verschiedenen Einbaubedingungen durchgeführt, um das Scherverhalten der Böden zu untersuchen.

Im Rahmen der Erstellung eines Probefeldes wurden Feldversuche durchgeführt, bei denen der eingebaute Boden hinsichtlich seiner möglichen Verdichtung und der Entwicklung des Luftporenanteils bei unterschiedlicher Verdichtungsarbeit untersucht wurde. Die weiteren von der Baustelle zur Verfügung stehenden Daten zur Verdichtung wurden zudem hinsichtlich der erreichten Luftporenanteile und Verdichtungsgrade ausgewertet.

3 Bodenmechanische Grundlagen

Boden stellt im ungesättigten Zustand ein Dreiphasensystem dar (SOOS, 2008). Neben den festen Bodenpartikeln sind Wasser und Gas im Boden enthalten. Der Aufbau des Bodens hängt von seiner Entstehung und den Eigenschaften der festen Bodenkörper wie Korngröße und -form (bei

Grobschluffen und größeren Körnern) oder elektrischen Ladungen (bei Tonen und Fein-/Mittelschluff) ab. Bei der Ablagerung des Bodens bleiben aufgrund der genannten Faktoren Hohlräume erhalten. Der Porenanteil n beschreibt das Verhältnis dieses Porenvolumens zum gesamten Bodenvolumen, die Porenzahl e das Verhältnis von Porenvolumen zum Volumen der Festmasse (Gleichung 1). In einem Dreiphasensystem wird der Porenanteil n vom wassergefüllten Porenanteil n_w und dem Luftporenanteil n_a gebildet.

$$e = \frac{n}{n-1}; \quad n = \frac{e}{1+e}; \quad (Gl. 1)$$

$$n = n_w + n_a$$

Nach SOOS (2008) wird die bleibende Verminderung des Porenanteils n bzw. die bleibende Erhöhung der Trockendichte ρ_d als Verdichtung bezeichnet. Die Verdichtung des Bodens ist durch das Volumen des enthaltenen Wassers begrenzt, wobei jedoch eine Verdichtung bis zur Sättigung kaum zu realisieren ist. Folglich bleibt ein Teil gasgefüllter Poren vorhanden und die Sättigungslinie $S_r = 1,0$, an der keine gasgefüllten Poren mehr existieren, wird nicht erreicht. Trockendichten gleicher Sättigungszahlen bzw. gleicher Luftporenanteile können durch die folgende Beziehung beschrieben werden (Gleichung 2):

$$\rho_d = \frac{\rho_s}{1 + \frac{w \cdot \rho_s}{S_r \cdot \rho_w}} = \frac{\rho_s \cdot (1 - n_a)}{1 + w \frac{\rho_s}{\rho_w}} \quad (Gl. 2)$$

In Bild 1 ist diese Beziehung grafisch in Form von Kurvenscharen dargestellt.

Die Kennwerte für eine optimale Verdichtung werden im Proctorversuch nach DIN 18127:2012-09 ermittelt. Bei konstanter Verdichtungsarbeit wird die größte Verdichtung eines Bodens, also seine höchste erreichbare Trockendichte ρ_{Pr} , bei einem günstigsten Wassergehalt w_{Pr} erzielt (Bild 2). Bei zu niedrigem Wassergehalt $w < w_{Pr}$ verhindern Kapillarkräfte eine weitere Verdichtung, bei zu hohem Wassergehalt $w > w_{Pr}$ wird die Verdichtung durch das Porenwasser begrenzt. Als Auswirkungen falsch eingestellter Wassergehalte bei der Verdichtung von feinkörnigen Böden nennt SOOS (2008) eine große Schumpfneigung bei zu hohen Wassergehalten sowie eine hohe Wasserdurchlässigkeit und eine starke Schwellneigung bei zu geringen Wassergehalten. Außerdem besteht bei nachträglicher Sättigung von zu trocken verdichteten Böden die Gefahr von Sackungen.

Nach DIN 18135:2012-04 handelt es sich bei Sackungen um plötzliche Abnahmen der Probenhöhen ohne Änderungen der äußeren Belastungen. Bei Hebungen wird in Schwell- und Quellvorgänge unterschieden. Beim Schwellen nimmt die Probenhöhe aufgrund einer Abnahme der effektiven Spannungen zu. Quellen bezeichnet dagegen eine Zunahme der Probenhöhe aufgrund einer Wasseraufnahme in die Mineralstruktur, beispielsweise durch die Einlagerung von Wasser in Tonmineralen oder die Umwandlung von Anhydrit in Gips.

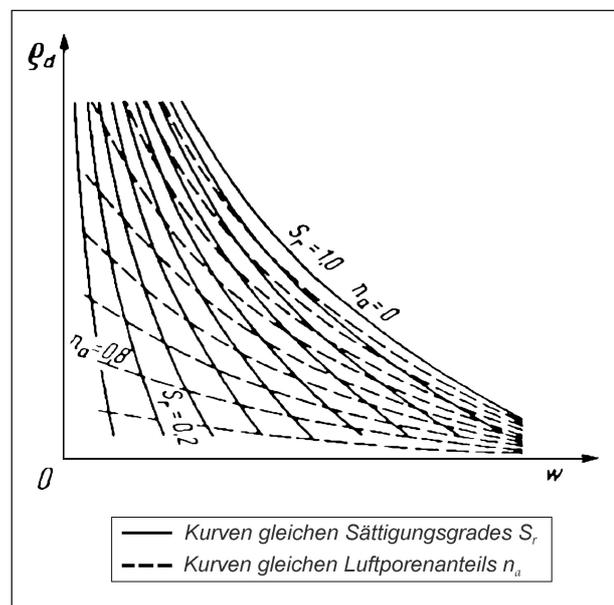


Bild 1: Kurvenscharen gleichen Sättigungsgrades S_r und Luftporenanteils n_a aus SOOS (2008)

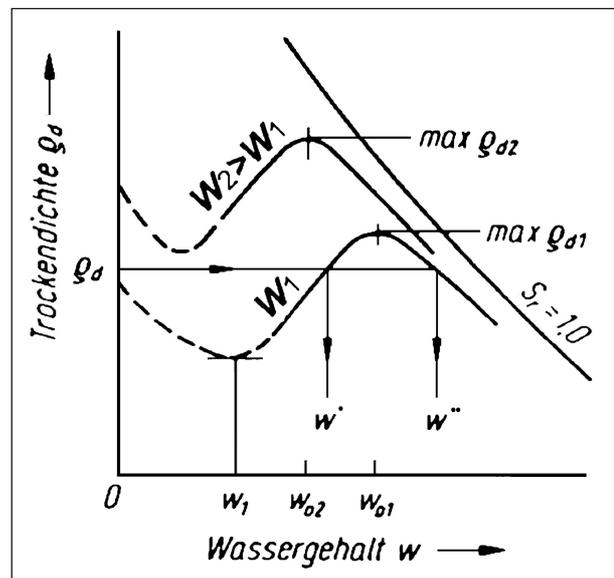


Bild 2: Verdichtungskurven bei gleicher Verdichtungsarbeit aus SOOS (2008)

4 Ergebnisse der Literaturrecherche

4.1 Verdichtung und Luftporenanteil

Der Einfluss der Verdichtung auf die Porengrößenverteilung wurde von THOM et al. (2007) untersucht. Die Untersuchungen von THOM et al. belegen, dass die Porenstruktur verdichteter feinkörniger Böden durch zwei Porensysteme, den Poren zwischen den Bodenaggregaten (Interaggregatporen) und den Poren innerhalb der Aggregate (Intraaggregatporen) geprägt wird. Anhand der Untersuchungen von THOM et al. zeigte sich, dass die bimodale Porengrößenverteilung von kleineren Intra-Aggregat-Poren (Mikroporen) mit Durchmessern von 0,3 bis 2 μm und größeren Inter-Aggregat-Poren (Makroporen) mit Durchmessern von 3 bis 20 μm bei der Verdichtung zwar erhalten bleibt, das Porenvolumen jedoch deutlich reduziert wird. Der Einfluss der Verdichtung auf Makro- und Mikroporen hängt dabei maßgeblich vom Wassergehalt bei der Verdichtung ab. Es konnte gezeigt werden, dass mit abnehmendem Wassergehalt bei der Verdichtung der prozentuale Anteil der Makroporen am Gesamtporenvolumen abnimmt. Des Weiteren beschreiben THOM et al. das Verhalten von ungesättigten Böden bei Wasseraufnahme bezogen auf die Porengrößenverteilung. Mit der Wasseraufnahme dehnen sich die Bodenpartikel in die Makroporen hinein aus und reduzieren somit das Porenvolumen. Mit zunehmendem Verdichtungsgrad wird diese Ausdehnung aufgrund des geringeren zur Verfügung stehenden Porenvolumens erschwert.

Die Bedeutung der Verdichtung des Erdbaumaterials zeigt RÜCKERT (1999) im Hinblick auf die Wasserdurchlässigkeit. Außerdem werden die Auswirkungen einer höheren Verdichtungsarbeit auf die Durchlässigkeit von bindigem Material untersucht. Für die Durchlässigkeiten wurden dabei mit steigender Verdichtungsarbeit deutlich abnehmende Werte erzielt. So nahm beispielsweise bei einem Wassergehalt von ca. 11 % die Durchlässigkeit des untersuchten bindigen Bodens von $5 \cdot 10^{-9}$ m/s bei einer Verdichtungsarbeit von 0,6 MNm/m³ auf $7 \cdot 10^{-11}$ m/s bei einer Verdichtungsarbeit von 1,2 MNm/m³ ab.

FERBER et al. (2009) untersuchten das Schwellpotenzial verdichteter ausgeprägt plastischer Tone und konnten dabei zeigen, dass dieses bei einem vorgegebenen Wassergehalt mit zunehmender Trockendichte anstieg (vgl. Kapitel 6.4.8). Der Ein-

bauwassergehalt spielte dabei eine wichtige Rolle. Bei hohen Wassergehalten während der Verdichtung verringerte sich das Schwellpotenzial bei Wasserzugabe. Ebenso zeigte sich, dass das Schwellpotenzial bei einer vorgegebenen Trockendichte mit einem abnehmenden Wassergehalt während der Verdichtung ebenfalls zunahm. Der Luftporenanteil nach der Verdichtung hatte somit große Auswirkungen auf das Schwellpotenzial der verdichteten Tone.

In FERBER et al. (2008) werden die unterschiedlichen Gründe für Verformungen von leicht- bis mittelplastischen sowie ausgeprägt plastischen Tönen behandelt. An den untersuchten ausgeprägt plastischen Tönen wurde festgestellt, dass der Porenraum bei Wasserzugabe bis zu Spannungen von 30 kPa zunahm, während er bei Spannungen größer als 400 kPa während der Wasserzugabe abnahm. Im Bereich von 30 kPa bis 400 kPa hing die Art der Verformung maßgeblich vom Anteil der Makroporen vor der Wasserzugabe ab. Über den gesamten Spannungsbereich konnte zudem ein linearer Zusammenhang zwischen dem Anteil an Makroporen vor der Wasserzugabe und dem Porenanteil nach Wasserzugabe festgestellt werden. Bei den untersuchten leicht- bis mittelplastischen Tönen konnte dieser lineare Zusammenhang nur bis Spannungen von ca. 100 kPa während der Sättigung nachgewiesen werden. Bei höheren Spannungen hing der Porenanteil nach der Sättigung nur von der vertikalen Spannung ab. Begründet wird dies von Ferber et al. dadurch, dass bei ausgeprägt plastischen Tönen Sand- und Schluffpartikel in einer Tonmatrix schwimmen und nicht miteinander interagieren können. Bei leicht- und mittelplastischen Tönen hingegen berühren sich die Sand- und Schluffpartikel und behindern so Setzungen der Tonpartikel.

MOKWA & FRIDLEIFSSON (2007) diskutieren die Messung des Luftporenanteils als Verdichtungskontrolle, die nach Angabe der Autoren erstmals von ALLEN (1942) erwähnt wurde. Die dafür notwendigen Messungen im Feld können u. a. mit radiometrischen Sonden durchgeführt und die Ergebnisse in ein Wassergehalts-Trockendichte-Diagramm eingetragen werden. Das Diagramm enthält eine Isolinie des geforderten Luftporenanteils. Je nachdem auf welcher Seite dieser Linie die Messung des Luftporenanteils zu liegen kommt, ist der Boden ausreichend oder unzureichend verdichtet. Die Ermittlung des Luftporenanteils erfolgt nach (Gleichung 3).

$$n_a = \left[1 - \frac{\rho_d}{\rho_w} \left(\frac{\rho_w}{\rho_s} + w \right) \right] \cdot 100 \% \quad (\text{Gl. 3})$$

Alternativ zur Dichte kann auch mit der Wichte gerechnet werden. MOKWA & FRIDLEIFSSON zeigen anhand von mehreren Versuchsmessungen mit unterschiedlichen Bodenarten, dass innerhalb eines Projekts die Schwankungen der Wichte im Vergleich zu denen der Proctordichte deutlich geringer sind. Als Vorteile werden des Weiteren die schnelle Durchführbarkeit und die Einfachheit der Methode genannt. Allerdings wird einschränkend hinzugefügt, dass diese Art der Messung für bestimmte Bodenarten, u. a. gleichkörnige, grobkörnige Böden, nicht geeignet, für andere, u. a. stark plastische Tone, nur bedingt geeignet ist. Als Grund hierfür wird v. a. die Möglichkeit genannt, dass durch eine Erhöhung des Wassergehalts der Luftporenanteil herabgesetzt werden kann.

4.2 Regelwerke

4.2.1 Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau (ZTV E-StB 09)

Die ZTV E-StB 09 enthalten Regelungen für das Lösen, Laden, Fördern, Einbauen und Verdichten von Boden und Fels sowie von sonstigen erdbau-technisch geeigneten Stoffen und beinhalten zudem Anforderungen an den Untergrund und den Unterbau von Erdbauwerken. U. a. sind mehrere Prüfverfahren zur Verdichtungskontrolle von Erdbauwerken genannt. Neben indirekten Verfahren wie dem statischen Plattendruckversuch nach DIN 18134:2012-04 und dem dynamischen Plattendruckversuch nach TP BF-StB Teil B 8.3 (FGSV 2012) können auch direkte Prüfverfahren angewandt werden. Hierzu zählt zum einen die Kon-

trolle des Verdichtungsgrads D_{Pr} nach DIN 18127:2012-09. Ist keine prüftechnisch zuverlässige Ermittlung der Proctordichte möglich, was u. a. bei veränderlich festen Gesteinen der Fall sein kann, können ersatzweise die Trockendichte ρ_d oder der Porenanteil n als Kenngrößen für die Verdichtung herangezogen werden. Zusätzlich kann auch der Luftporenanteil n_a als weitere Kenngröße festgelegt werden, der sich rechnerisch aus der Dichtemessung nach DIN 18125-1:2010-07 bzw. DIN 18125-2:2011-03 und der Wassergehaltsbestimmung nach DIN 18121-1:1998-04 bzw. DIN 18121-2:2012-02 ergibt.

Für den Dammunterbau gelten nach den ZTV E-StB 09 hinsichtlich Material und Abstand zum Planum unterschiedliche Anforderungen an das 10%-Mindestquantil des Verdichtungsgrades und an das 10%-Höchstquantil des Luftporenanteils (Tabelle 1).

Kiese und Sande sowie gemischtkörnige Böden mit bis zu 15 M.-% Feinkornanteil müssen bis zu einem Verdichtungsgrad $D_{Pr} = 98 \%$ bzw. 100% verdichtet werden, fein- und gemischtkörnige Böden mit einem Feinkornanteil von über 15 M.-% sowie organische Böden müssen einen Verdichtungsgrad von mindestens $D_{Pr} = 97 \%$ sowie einen Luftporenanteil von maximal $n_a = 12 \text{ Vol.-%}$ aufweisen. 10%-Mindest- bzw. 10%-Höchstquantil bedeutet dabei, dass maximal 10 % der Messwerte unterhalb bzw. oberhalb der festgelegten Anforderung liegen dürfen. Für wasserempfindliche gemischt- und feinkörnige Böden wird in den ZTV E-StB 09 empfohlen, ohne eine Verfestigung oder Verbesserung dieser Böden das 10%-Höchstquantil mit $n_a = 8 \text{ Vol.-%}$, für veränderlich feste Gesteine mit $n_a = 6 \text{ Vol.-%}$ festzulegen.

Die Verdichtungskontrolle kann nach drei Prüfmethoden erfolgen. Methode 1 basiert auf einer Vorgehensweise gemäß einem Prüfplan. Dabei wird

Bereich	Bodengruppe nach DIN 18196	D_{Pr} [%]	n_a [Vol.-%]
Planum bis 1,0 m Tiefe bei Dämmen und bis 0,5 m Tiefe bei Einschnitten	GW, GI, GE SW, SI, SE GU, GT, SU, ST	100	-
1,0 m unter Planum bis Dammsohle	GW, GI, GE SW, SI, SE GU, GT, SU, ST	98	-
Planum bis Dammsohle und bis 0,5 m Tiefe bei Einschnitten	GU*, GT*, SU*, ST* U, T, OU, OT	97	12

Tab. 1: Anforderungen an das 10%-Mindestquantil für den Verdichtungsgrad D_{Pr} bzw. das 10%-Höchstquantil für den Luftporenanteil n_a aus den ZTV E-StB 09

stichprobenartig innerhalb eines Prüfloses die Verdichtung kontrolliert. Auf Grundlage der Prüfergebnisse wird ein Prüflos angenommen oder zurückgewiesen.

Bei Methode 2 wird die Verdichtung flächendeckend mit dynamischen Messverfahren bestimmt. Über die Wechselwirkung zwischen der zur Verdichtung eingesetzten Walze und des Bodens wird hierbei ein Messwert ermittelt. Dieser korreliert mit der Steifigkeit und der Verdichtung des Bodens. Das für die Messung notwendige Messgerät wird an der Walze installiert.

Methode 3 beruht auf der Einhaltung eines Verdichtungsverfahrens, das sich vor Beginn der Baumaßnahme bei der Durchführung einer Probeverdichtung als geeignet erwiesen hat. Die Ausführung der Arbeiten wird dabei in einer Arbeitsanweisung festgehalten. Die Einhaltung dieser Anweisung muss vom Auftragnehmer durch Führen eines Protokolls nachgewiesen werden.

4.2.2 Entwicklung der Anforderungen in den ZTV E-StB seit 1959

1949 wurden erstmals die „Technischen Vorschriften für Erdarbeiten im Straßenbau“ herausgegeben (FLOSS 1997). Diese wurden 1959 durch die ersten ZTV E-StB ersetzt. In den Jahren 1965, 1976, 1994 und 2009 wurden jeweils überarbeitete Aus-

gaben eingeführt. Die jeweiligen Überarbeitungen der in den ZTV E-StB enthaltenen Vorgaben wurden aufgrund von Erfahrungen, technischen Entwicklungen, aber auch veränderten Anforderungen im Boden-, Grundwasser- und Umweltschutz notwendig.

Die Anforderungen an den Verdichtungsgrad feinst- und gemischtkörniger Böden wurden seit 1959 teilweise erhöht. In den ZTV E-StB 59 und 65 wurde für alle feinst- und gemischtkörnigen Böden, die in den obersten ca. 2 m eingebaut wurden, ein Verdichtungsgrad von $D_{Pr} = 97\%$ gefordert. Abhängig von der Bodenart wurden diese Anforderungen bis 2009 teilweise auf $D_{Pr} = 100\%$ bis in eine Tiefe von 1 m unter Planum bei Dämmen erhöht. Die Anforderungen an den Verdichtungsgrad der unter der obersten Schicht eingebauten Böden wurden ebenfalls verschärft. Die geforderten Verdichtungsgrade stiegen von $D_{Pr} = 92\%$ bzw. $D_{Pr} = 95\%$ (in Abhängigkeit von der Dammhöhe) in den ZTV E-StB 59 auf $D_{Pr} = 97\%$ bzw. $D_{Pr} = 98\%$ (in Abhängigkeit von der Bodenart) in den ZTV E-StB 09. Eine Übersicht über die veränderten Anforderungen an die Verdichtung beim Dammbau mit frostsicherem und frostempfindlichem Boden ist in Bild 3 gegeben.

Die Anforderungen an den Luftporenanteil blieben seit den ZTV E-StB 59 fast unverändert bei $n_a = 12\%$. In den ZTV E-StB 09 wird jedoch empfohlen, die Anforderungen an den Luftporen-

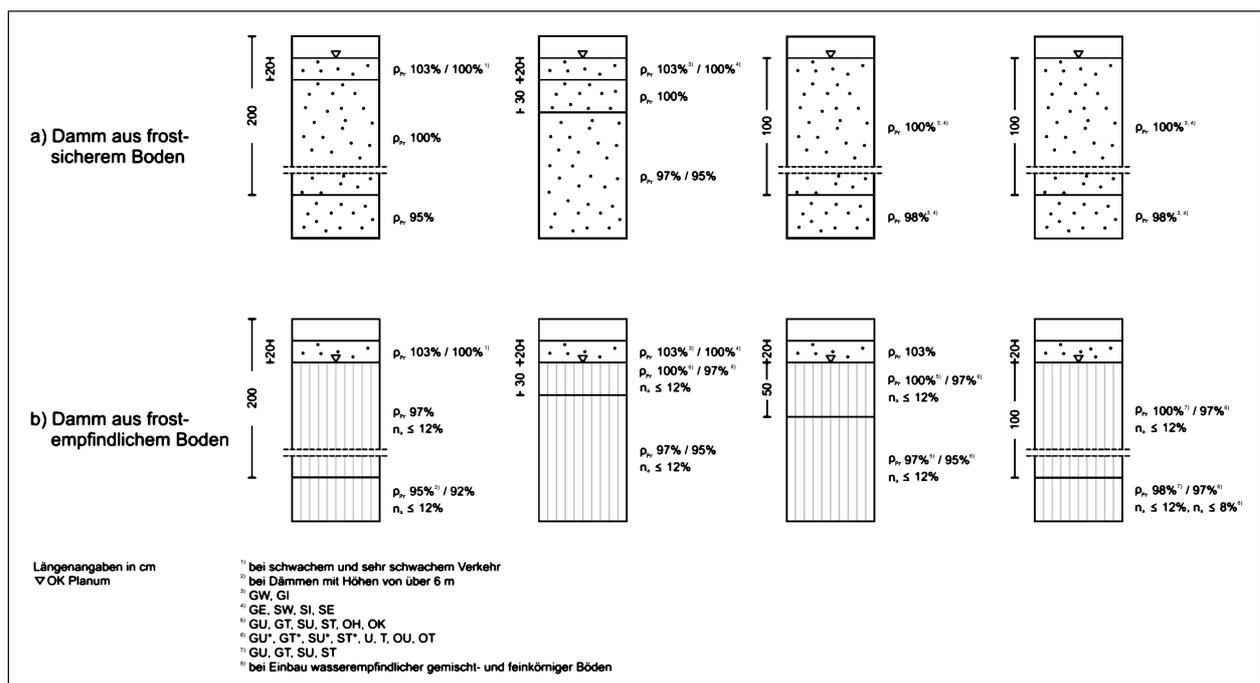


Bild 3: Entwicklung der Anforderungen an die Verdichtung bei Erdarbeiten (verändert nach FLOSS, 1997)

anteil beim Einbau wasserempfindlicher fein- und gemischtkörniger Böden auf $n_a = 8$ Vol.-% zu erhöhen, beim Einbau von veränderlich festen Gesteinen auf $n_a = 6$ Vol.-%.

4.2.3 Richtlinie 836 (Ril 836)

Die Richtlinie 836 (Ril 836) der DB Netz AG (2008) enthält Regelungen, die u. a. bei der Neuerstellung von Bauwerken oder bei der Erneuerung von bestehenden Bauwerken für den Schienenverkehr sowie für im Rahmen der entsprechenden Maßnahmen zugehörige Bauwerke anzuwenden sind.

Die Anforderungen an die Verdichtung des Unterbaus sind nach Ril 836 abhängig von der Art der Baumaßnahme, der Streckenkategorie, der Oberbauart, den zu verwendenden Bodenarten nach DIN 18196 und der Unterbausituation. Für das Planum sind Anforderungen an den Verformungsmodul (E_{V2} oder E_{Vd}) genannt, für die sog. Schutzschicht sind beim Neubau von Strecken Verdichtungsanforderungen von generell $D_{Pr} = 100$ %, bei der Ertüchtigung älterer Strecken von $D_{Pr} = 97$ % bzw. $D_{Pr} = 100$ % vorgegeben. Für die Herstellung des Erdplanums können sowohl grobkörnige als auch gemischt- und feinkörnige Böden verwendet werden. Im Fall der Schutzschicht und des Planums hängen die zu verwendenden Bodenarten von der Streckenkategorie ab. Generell werden hierbei jedoch an die Böden hohe Anforderungen bzgl. Wasserdurchlässigkeit und Frostsicherheit gestellt. Anforderungen an den Luftporenanteil sind in der Ril 836 nicht enthalten.

Die Ril 836 verweist bzgl. der Wahl der Prüfverfahren auf die ZTV E-StB 09. Bevorzugt sollen direkte Prüfverfahren zur Verdichtungskontrolle herangezogen werden. Zur Kontrolle der Gleichmäßigkeit der Verdichtung wird die flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) empfohlen. Bzgl. der Prüfmethoden wird ebenfalls auf die ZTV E-StB 09 verwiesen.

4.3 Verdichtungsanforderungen und -kontrolle im Ausland und im Vergleich zu Deutschland

Verschiedene Wege zur Sicherstellung der geforderten Verdichtung können unterschieden werden. In einigen Ländern werden Verdichtungsmethoden vorgegeben, während in anderen Ländern bestimmte Anforderungen an den verdichteten Körper

vorgeschrieben werden. Teilweise wird auch eine Kombination aus beiden Herangehensweisen angewandt.

KUDLA & HÖBELBARTH (2006) geben eine übersichtliche Zusammenstellung der Anforderungen an die jeweiligen Prüfmerkmale in Deutschland, Österreich, der Schweiz, Belgien, Frankreich, Spanien, Italien, Portugal, Großbritannien, Schweden, Norwegen, Estland, den USA, Kanada, Brasilien und Australien.

In allen genannten Ländern wird der Verdichtungsgrad als Verdichtungsanforderung genannt, wenn auch in Schweden nur für den Oberbau und nicht für den Unterbau von Dämmen. Die Anforderungen schwanken zwischen $D_{Pr} = 95$ % und 100 %. Je nach Land sind die Anforderungen vom eingebauten Material, dem Verkehrsaufkommen, der Lage der zu verdichtenden Schicht oder der Art der Straße abhängig.

Der Verformungsmodul wird hingegen in Großbritannien, Kanada, Brasilien, Australien und Estland nicht zur Verdichtungskontrolle herangezogen. Maßgeblich ist in Deutschland, Frankreich, Spanien, Schweden, Norwegen und den USA der E_{V2} -Modul, in Österreich hingegen der E_{V1} -Modul und in der Schweiz, in Belgien und Italien der Verformungsmodul M_E .

Das Verdichtungsverhältnis E_{V2}/E_{V1} wird nur in Österreich, Spanien und Norwegen als Anforderung auch im Unterbau angewandt, in Deutschland und Schweden lediglich im Oberbau.

In allen Ländern werden sowohl direkte als auch indirekte Prüfverfahren zur Verdichtungskontrolle angewendet. Die am weitesten verbreiteten Verfahren sind Volumenersatzverfahren (direkt) und der statische Plattendruckversuch (indirekt).

Die Verdichtungskontrolle mittels Stichproben, die der Methode M1 nach ZTV E-StB 09 entspricht, wird in allen genannten Ländern durchgeführt. Die in Methode M2 nach ZTV E-StB 09 erwähnte Überprüfung der Verdichtungsanforderungen mittels flächendeckender dynamischer Verdichtungskontrolle (FDVK) wird außer in Deutschland nur in Österreich, der Schweiz und Schweden durchgeführt. Probeverdichtungen nach Methode M3 (ZTV E-StB 09) kommen nur in Deutschland und Kanada zum Einsatz. In Frankreich wird zusätzlich noch eine ständige Kontrolle der Verdichtungsarbeiten durchgeführt.

Der Umfang der durchzuführenden Untersuchungen schwankt z. T. deutlich von Land zu Land.

Der Luftporenanteil wird außer in Deutschland lediglich in Großbritannien als Verdichtungsanforderung genannt. In Department For Transport Highways Agency (1998) sind verschiedenste Böden, die im Erdbau in Großbritannien auftreten können, genannt. Diesen Böden werden verschiedene Verdichtungsmethoden mit unterschiedlichen Verdichtungsanforderungen zugeordnet. Für mehrere dieser Methoden wird dabei ein maximaler Luftporenanteil von 10 % festgelegt. Diese Methoden kommen bei feinkörnigen Böden mit und ohne Anteile an Kalksteinen/Kreide zum Einsatz. Bei einigen Methoden wird ein Luftporenanteil von maximal 5 % gefordert. Diese Methoden werden bei Bitumengehalten der zu verdichtenden Materialien bis 50 % und bei Böden, denen Kalk oder Zement hinzugefügt wurde, angewendet.

In den südeuropäischen Staaten werden, wie die Arbeiten in der Working Group 3 des Technical Committee 396 des Europäischen Komitees für Normung (CEN) zeigen, Anforderungen an den Luftporenanteil diskutiert.

4.4 Verdichtung und Verdichtungsgeräte

4.4.1 Geschichtlicher Kurzüberblick

Die Anfänge der Verdichtung im Erdbau liegen im Wege- und Straßenbau (STRIEGLER & WERNER, 1973). Die ersten Straßenwalzen entstanden um 1800 (Hamm AG, 2008). Bei diesen handelte es sich um Walzen aus Stein oder Gusseisen, die von Pferden gezogen wurden. In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts wurden erste Dampfwalzen entwickelt (STRIEGLER & WERNER, 1973). Zu Beginn des 20. Jahrhunderts folgte dann der Einsatz erster motorgetriebener Walzen.

In PROCTOR (1933) werden Angaben zu Verdichtungsgeräten gemacht, wie sie zur Zeit, in der der Proctorversuch entwickelt wurde, gebräuchlich waren. Demnach wurden in den 1930er Jahren Anhänger-Walzen an Traktoren zur Verdichtung herangezogen, die Drücke bis zu 14 kg/cm² ausübten.

Etwa seit den 1930er Jahren wurden die ersten Kleingeräte zur Vibrationsverdichtung entwickelt. Die Einführung von Großgeräten zur dynamischen

Verdichtung erfolgte ungefähr in den 1950er bis 1960er Jahren.

4.4.2 Moderne Verdichtungsgeräte

Zwei Arten der Verdichtung können bei modernen Verdichtungsgeräten unterschieden werden FLOSS (2001).

Bei der statischen Verdichtung erfolgt die Reduktion des Porenraums im Boden durch den Druck, der durch das Eigengewicht einer Walze bei der Überfahrt auf den Boden ausgeübt wird. Maßgeblich für die mit einer Walze erzielbare Verdichtung ist deren statische Linienlast. Diese stellt den Quotienten aus der Achslast und der Bandagenbreite der Walze dar. Nachteil der statischen Verdichtung ist insbesondere die geringe Tiefenwirkung.

Über 90 % der heute eingesetzten Walzen verdichten heutzutage jedoch dynamisch (Hamm AG, 2008). Über Unwuchten in der Bandage werden bei der dynamischen Verdichtung Schwingungen erzeugt, die auf den Untergrund übertragen werden und zu einer Kornumlagerung führen. Im Vergleich zur statischen Verdichtung wird bei der dynamischen Verdichtung eine bessere Tiefenwirkung erreicht. Zudem wird nach Hamm AG (2008) für die gleiche Verdichtungsleistung bei der dynamischen gegenüber der statischen Verdichtung nur etwa ein Drittel der Energie benötigt. Die maßgeblichen Faktoren bei der dynamischen Verdichtung stellen insbesondere die statische Linienlast, die schwingende Masse sowie Zentrifugalkraft, Frequenz und Amplitude dar. Zudem spielt der Energietransfer von der Walze in den Boden eine wichtige Rolle.

Die Ermittlung der Verdichtungsleistung erfolgt aufgrund von Erfahrungswerten bzw., wenn diese fehlen, aufgrund von Probeverdichtungen. In Hamm AG (2008) werden beispielhaft ökonomische Arbeitstiefen für die Verdichtung von verschiedenen Erdbaumaterialien genannt. Für Sande und Kiese liegen diese in Abhängigkeit vom verwendeten Verdichtungsgerät bei maximal ca. 1,2 m, für Tone und Schluffe bei maximal ca. 0,45 m.

Die erzielbare Flächen- oder Volumenleistung kann auf Grundlage von Erfahrungswerten bzw. von Probeverdichtungen unter Berücksichtigung der Arbeitsbreite und -geschwindigkeit eines Verdichtungsgerätes sowie den notwendigen Übergängen abgeschätzt werden.

5 Versuchsböden für die Laboruntersuchungen

5.1 Herkunft der Versuchsböden

Für die Untersuchungen wurden fünf fein- und gemischtkörnige Bodenarten ausgewählt. Die bodenmechanischen Eigenschaften dieser Böden werden maßgeblich von der Konsistenz und der Plastizität der feinkörnigen Anteile bestimmt. Sie sind somit abhängig vom Wassergehalt.

Um das Spektrum dieser Böden weitgehend abzudecken, handelte es sich bei den ausgewählten Böden um je einen stark schluffigen Kies bzw. Sand, einen leicht plastischen Schluff sowie einen mittelplastischen und einen ausgeprägt plastischen Ton. Die Herkunft der Proben ist in Bild 4 dargestellt. Nach den ZTV E-StB 09 liegen die Anforderungen an das 10%-Mindestquantil des Verdichtungsgrades dieser Böden bei $D_{Pr} = 97 \%$, an das 10%-Höchstquantil des Luftporenanteils bei $n_a = 12 \text{ Vol.-%}$.

5.2 Leicht plastischer Schluff (UL)

Bei dem verwendeten Material handelt es sich um einen Schluff aus einer Baumaßnahme am ca. 10 bis 15 km nördlich von Northeim gelegenen

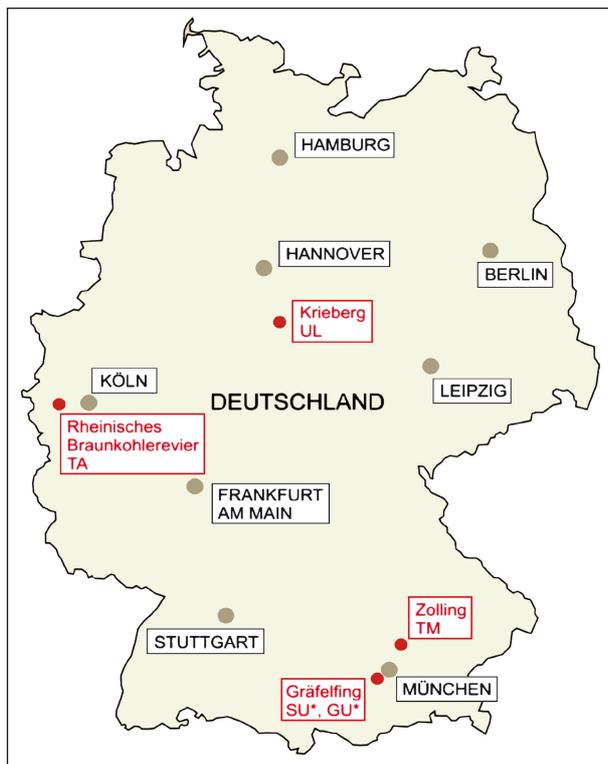


Bild 4: Übersichtskarte mit Herkunft der Proben (rote Markierungen)

Krieberg (Bild 4). Hier stehen quartäre Lößlehme an, die in einem tektonischen Graben im Scheiteltbereich einer auf Salztektonik zurückgehenden Aufwölbung aus Schichten des Buntsandsteins abgelagert wurden (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 1982).

5.3 Mittelplastischer Ton (TM)

Der mittelplastische Ton stammt aus einer Kiesgrube bei Zolling in der Nähe von Freising (Bild 4). In der Kiesgrube stehen obermiozäne bis altpliozäne Schichten der oberen Süßwassermolasse an, die von jungpleistozänen äolischen Sedimenten überlagert werden (BRUNNACKER, 1962). Bei den tertiären Schichten handelt es sich um Kiese, Sande, Tone und Mergel, bei dem untersuchten Ton um einen quartären Lößlehm.

5.4 Ausgeprägt plastischer Ton (TA)

Der ausgewählte ausgeprägt plastische Ton stammt aus dem rheinischen Braunkohlerevier (Bild 4). In diesem wird tertiäre Braunkohle aus einer das Tertiär und das Quartär umfassenden Schichtenfolge abgebaut. Die tertiäre Schichtenfolge umfasst neben den bis zu 70 m mächtigen Braunkohleflözen Flussablagerungen in Form von Kiesen und Sanden, Stillwasserablagerungen sowie durch wiederholten Anschluss an die Nordsee Meeressande und wird von quartären Fluss- und Stillwasserablagerungen sowie Lössen überlagert (Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen, 2011).

5.5 Stark schluffiger Sand (SU*)

Der stark schluffige Sand stammt aus einer Kiesgrube bei Gräfelfing südwestlich von München. Bei den dort abgelagerten Lockergesteinen handelt es sich um glaziofluviale Kiese der Würm- und der Risseiszeit, die von den Schmelzwässern des Isarvorlandgletschers abgelagert wurden. Die Kiese stammen ursprünglich größtenteils aus dem Kalkalpin und untergeordnet aus den Zentralalpen. Sie setzen sich dementsprechend überwiegend aus Kalcken und Dolomiten zusammen. Daneben enthalten sie zu einem deutlich geringeren Anteil Kalk- und Kiesel sandsteine sowie Kristallingerölle (JERZ, 1987).

Der stark schluffige Sand wurde als Mischung aus separaten Gesteinskörnungen hergestellt. Dafür wurden ein feinkiesiger Sand der Körnung 0/4

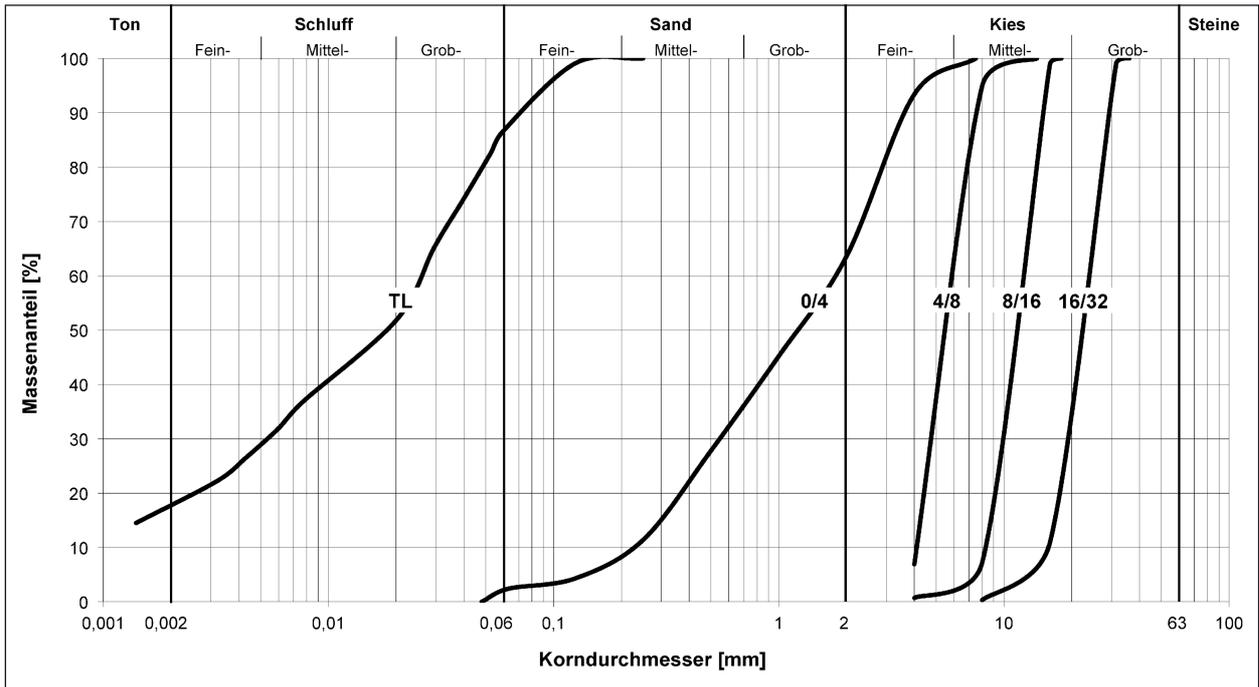


Bild 5: Körnungslinien der verwendeten Feinkorn-, Sand- und Kiesfraktionen nach DIN 18123

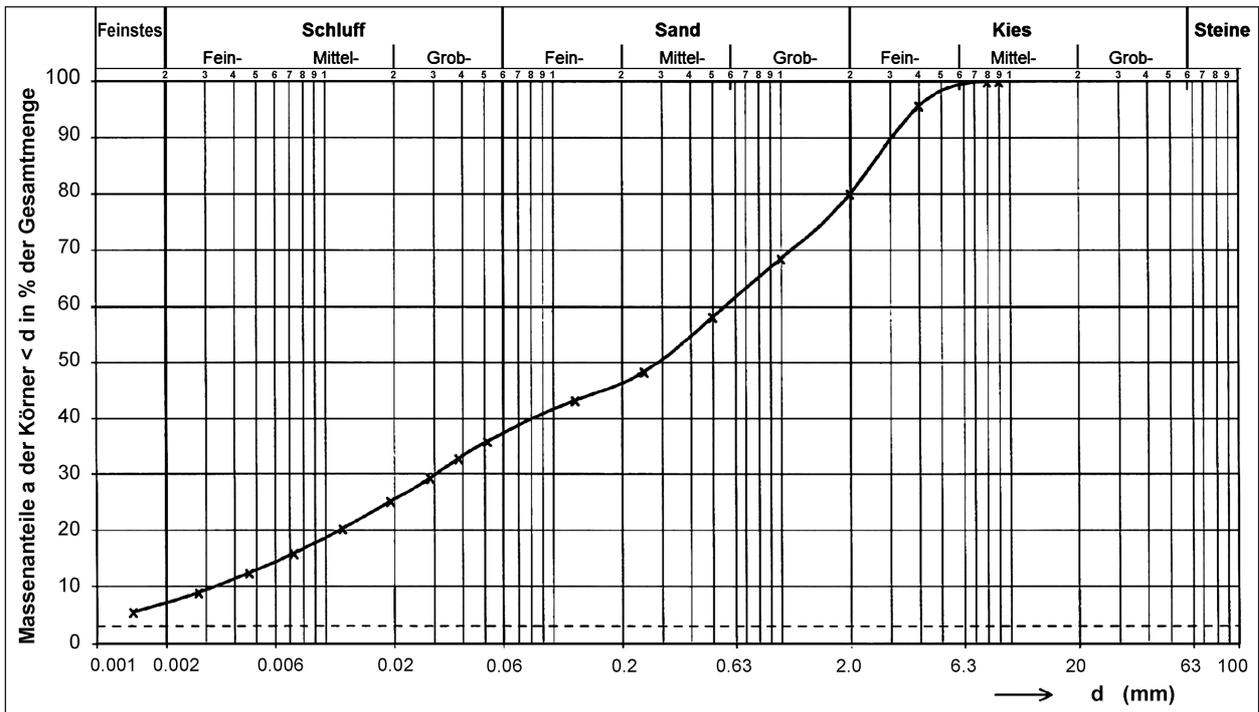


Bild 6: Aus den Kornverteilungen der Einzelfraktionen errechnete Siebkurve für den stark schluffigen Sand (SU*)

(0 bis 4 mm) herangezogen (Bild 5). Als Feinkorn wurde im Kies enthaltenes, überwiegend schluffiges Material verwendet, das beim Waschvorgang im Kieswerk abgetrennt und anschließend mit Kammerpressen entwässert worden war. Aus bodenmechanischer Sicht handelte es sich bei diesem Schluff um einen leicht plastischen Ton.

Die für die weiteren Untersuchungen zu verwendende Mischung wurde anhand einer aus den Ergebnissen der Siebungen und Schlämungen der Einzelfraktionen angefertigten Sieblinie hergestellt (Bild 6, Anlage 1.2).

5.6 Stark schluffiger Kies (GU*)

Für die Mischung des stark schluffigen Kieses wurden analog zum stark schluffigen Sand ebenfalls Gesteinskörnungen verwendet. Als Ausgangsmaterial dienten ebenso Schmelzwasserablagerungen des Isarvorlandgletschers aus einer Kiesgrube bei Gräfelfing.

Für die Herstellung der Mischung wurden ein Sand der Körnung 0/4 (0 bis 4 mm) sowie enggestufte Kiese der Körnungen 4/8, 8/16 und 16/32 verwendet (Bild 5). Als Feinkorn wurde im Kies enthaltenes, überwiegend schluffiges Material verwendet, das beim Waschvorgang im Kieswerk abgetrennt und anschließend mit Kammerpressen entwässert worden war. Aus bodenmechanischer Sicht handelt es sich bei diesem Schluff um einen leicht plastischen Ton.

Die für die weiteren Untersuchungen zu verwendende Mischung wurde anhand einer aus den Ergebnissen der Siebungen und Schlämungen der Einzelfractionen angefertigten Sieblinie hergestellt (Bild 7, Anlage 1.2). Analog zum Sand wurde der entwässerte Rückstand vom Waschvorgang im Kieswerk als Feinkorn herangezogen.

6 Laboruntersuchungen

6.1 Laborprogramm

6.1.1 Klassifizierungsversuche

Zur Beurteilung der Böden und zur grundlegenden Beschreibung ihrer bodenmechanischen Eigenschaften umfasst das Untersuchungsprogramm u. a. Klassifizierungsversuche. Diese beinhalten die Bestimmung der Korngrößenverteilung nach DIN 18123:2011-04, die Bestimmung der Konsistenzgrenzen nach DIN 18122-1:1997-07, die Bestimmung des Wassergehalts nach DIN 18121-1:1998-04 und die Bestimmung des Glühverlusts nach DIN 18128:2002-12.

6.1.2 Proctorversuch nach DIN 18127

Das Verdichtungsverhalten der Böden wird im Labor mit dem nach DIN 18127:2012-09 genormten Proctorversuch untersucht. In Abhängigkeit vom jeweiligen Größtkorn wird dabei der Boden in Versuchszylinder mit unterschiedlichen Durchmessern und Höhen lagenweise eingebaut und verdichtet. Für die feinkörnigen Böden und den Sand wird dabei ein Versuchszylinder mit einem Durchmesser

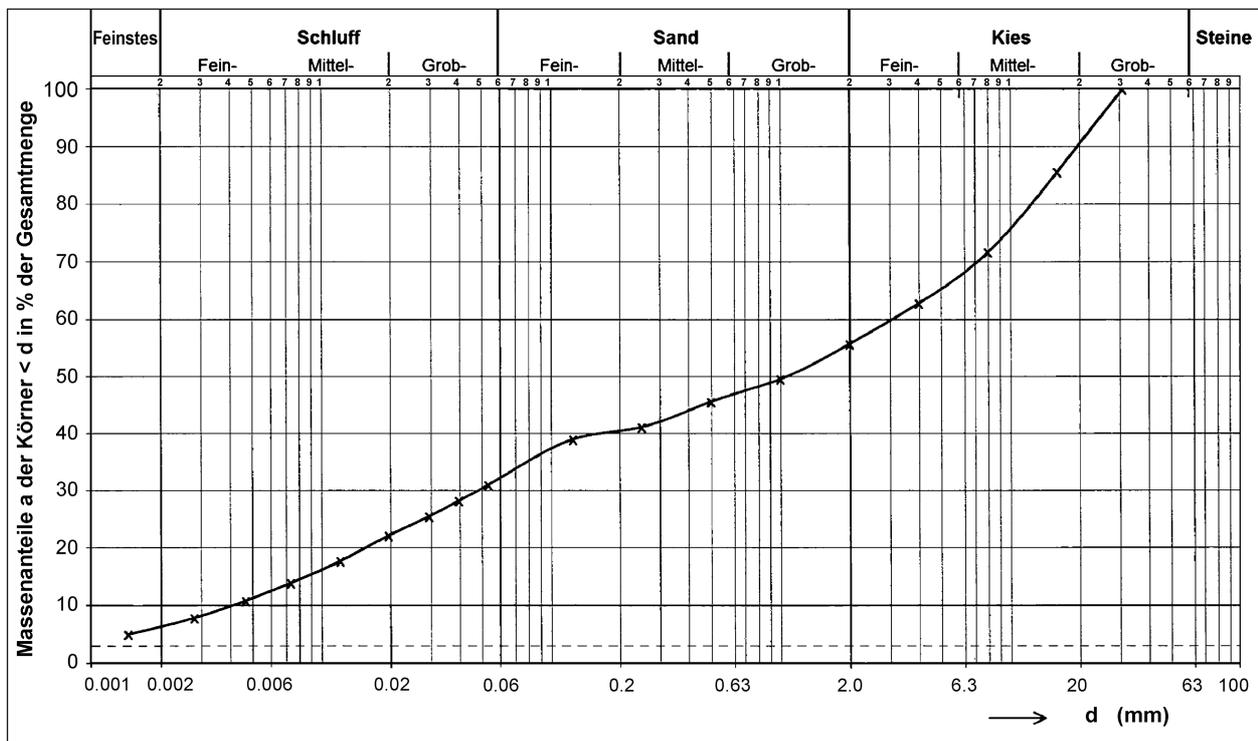


Bild 7: Aus den Kornverteilungen der Einzelfractionen errechnete Siebkurve für den stark schluffigen Kies (GU*)

Versuch	Bodengruppe DIN 18196	Durchmesser Prüfzylinder [cm]	Höhe Prüfzylinder [cm]	Fallgewicht [kg]	Fallhöhe [cm]	Anzahl der Schichten	Schläge je Schicht
Standard-Proctorversuch	UL/TM/TA	10	12	2,5	30	3	25
	SU*	10	12	2,5	30	3	25
	GU*	15	12,5	4,5	45	3	22

Tab. 2: Rahmenbedingungen für die Durchführung des Standard-Proctorversuchs nach DIN 18127 für die ausgewählten Böden

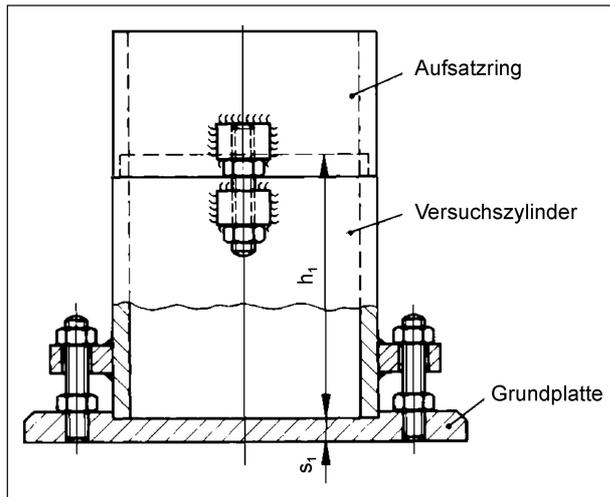


Bild 8: Proctoropf bestehend aus Versuchszylinder, Aufsatzring und Grundplatte aus DIN 18127

von 10 cm und einer Höhe von 12 cm (zzgl. der Höhe des ausschließlich für den Einbau erforderlichen Aufsatzrings) verwendet, für den Kies weist der Versuchszylinder einen Durchmesser von 15 cm und eine Höhe von 12,5 cm (zzgl. Aufsatzring) auf (Bild 8).

Zwei Versuchsdurchführungen können beim Proctorversuch unterschieden werden. Der Standard-Proctorversuch weist eine Verdichtungsarbeit von 0,6 MNm/m³ auf. Diese entspricht in etwa der Verdichtungsarbeit, die durch übliche Verdichtungsgeräte auf einer Baustelle erzielt wird. Um die Verdichtungsarbeit von schwereren Verdichtungsgeräten im Labor abzubilden, eignet sich der modifizierte Proctorversuch. Bei diesem wird eine Verdichtungsarbeit von 2,74 MNm/m³ erreicht. Bei den im Rahmen der Forschungsarbeit untersuchten Böden wurden lediglich Verdichtungsarbeiten entsprechend dem Standard-Proctorversuch angewandt.

Im Proctorversuch erfolgt die Verdichtung über ein genormtes Fallgewicht, das mit einer bestimmten Anzahl an Schlägen das lagenweise eingebaute

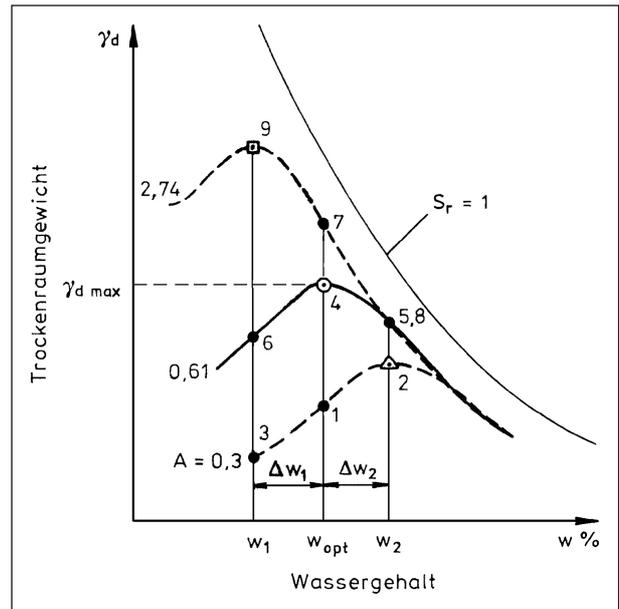


Bild 9: Proctorkurven eines Bodens für verschiedene Verdichtungsarbeiten (0,3 bzw. 0,61 bzw. 2,74 MNm/m³), aus LANG et al. (2011)

Material verdichtet. Im Standard-Proctorversuch unterscheiden sich die Durchführungen in Abhängigkeit vom jeweiligen Boden durch die Anzahl der Schläge pro Schicht und die Masse des Fallgewichts (Tabelle 2).

Der Versuch wird für jeden Boden mit fünf unterschiedlichen Wassergehalten durchgeführt. Die Bestimmung der nach der Verdichtung erreichten Trockendichte ρ_d für den jeweiligen Wassergehalt erfolgt über die Bestimmung der Feuchtmasse des eingebauten Bodens und die zugehörige Korndichte ρ_s . Die ermittelten Wertepaare werden anschließend im Trockendichte-Wassergehalts-Diagramm aufgetragen (Bild 9). Durch die Ermittlung einer Ausgleichskurve wird die Proctorkurve erzeugt, deren Scheitelpunkt die für die angewandte Verdichtungsarbeit beim optimalen Wassergehalt w_{Pr} erreichbare Trockendichte, die sog. Proctordichte ρ_{Pr} , kennzeichnet.

6.1.3 Mineralogische Untersuchungen

Art und Zusammensetzung der Bestandteile eines Bodens können mittels röntgenografischer Untersuchungen im Labor analysiert werden. Hierbei wird das Material gemahlen und anschließend Röntgenstrahlen ausgesetzt. Die Röntgenstrahlen werden dabei von den Atomen in den Kristallgittern der verschiedenen Minerale unterschiedlich gebeugt. Anhand der Beugungswinkel können sowohl qualitative als auch semiquantitative bis quantitative Auswertungen der Mineralzusammensetzung erfolgen.

6.1.4 Eindimensionaler Kompressionsversuch nach DIN 18135

Das Konsolidationsverhalten eines Bodens wird im Labor mit dem eindimensionalen Kompressionsversuch (auch als Oedometerversuch bezeichnet) nach DIN 18135:2012-04 untersucht. Hierbei wird eine Bodenprobe in einen Probenahmezylinder eingebaut und verdichtet. Der Zylinder unterbindet während der Versuchsdurchführung seitliche Verformungen. Nach dem Einbau des Probenahmezylinders in das Kompressionsgerät (Bild 10) wird die Probe stufenweise belastet, wobei vor einer weiteren Lasterhöhung zumindest die Primärsetzung abzuwarten ist. Die jeweiligen Laststufen richten sich nach der gewählten Endbelastung. Zusätzlich kann während des Versuchs eine Wasserzugabe erfolgen. Die Wasseraufnahme bzw. -abgabe erfolgt während des Versuchs nur in axialer Richtung nach oben und unten.

Die Auswertung des eindimensionalen Kompressionsversuchs kann zum einen als Spannungs-Zusammendrückungs-Diagramm oder Spannungs-Porenzahl-Diagramm erfolgen (Bild 11). Aus den

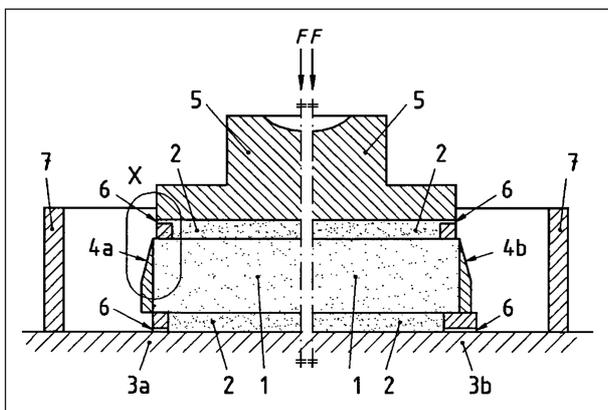


Bild 10: Kompressionsapparat mit Probekörper (1), Filterplatten (2), Fußplatte (3), Probenahmezylinder (4) und Kopfplatte (5) aus DIN 18135

Ergebnissen können mehrere Kennwerte wie der Steifemodul E_s , der Kompressionsbeiwert C_c , der Schwellbeiwert C_s oder die Vorkonsolidierungsspannung σ'_p abgeleitet werden. Zum anderen kann der Versuch auch als Zeit-Zusammendrückungs-Verlauf ausgewertet werden. Hieraus können die Konsolidierungszeit t des jeweiligen Konsolidierungsgrads U , der Konsolidationsbeiwert c_v sowie der Durchlässigkeitsbeiwert k bestimmt werden.

6.1.5 Taschenpenetrometerversuch

Mithilfe der Ergebnisse von Taschenpenetrometerversuchen kann die Konsistenz einer Bodenprobe abgeschätzt werden sowie eine grobe Einschätzung der Scherfestigkeit von feinkörnigen Böden erfolgen. Bei dem Versuch wird ein kleiner Druckstempel mit definiertem Durchmesser in den Boden gedrückt und die Kraft mittels einer Feder gemessen. Anhand der eingeleiteten Kraft während des Versuchs kann auf die einaxiale Druckfestigkeit der Probe geschlossen werden, die mit der Scherfestigkeit des Bodens korreliert.

6.1.6 Triaxialversuch nach DIN 18137-2

Im Triaxialversuch nach DIN 18137-2:2011-04 werden das Verformungs- und das Scherverhalten einer Bodenprobe bei dreiaxialer Beanspruchung untersucht. Dafür wird eine zylindrische, in eine Gummihülle eingefasste Bodenprobe in eine Druckzelle eingebaut (Bild 12). Die radiale Belastung erfolgt über eine Druckflüssigkeit, die axiale über einen Druckstempel.

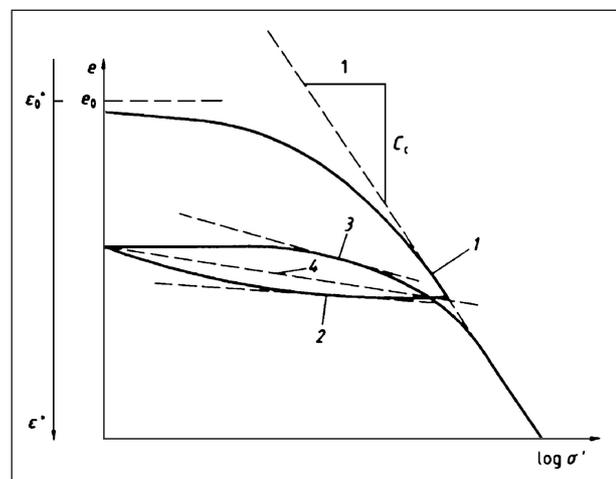


Bild 11: Spannungs-Porenzahl-Diagramm mit Erstbelastungsast (1), Entlastungsast (2), Wiederbelastungsast (3) aus DIN 18135

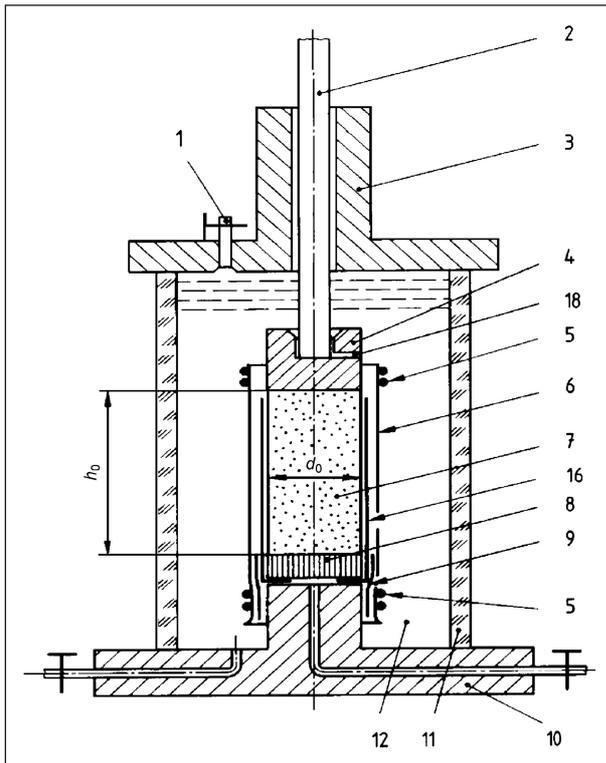


Bild 12: Aufbau einer Druckzelle für langgestreckte Probenkörper mit Druckstempel (2), Probenkörper (7), Zylinder (11) und Zellenflüssigkeit (12) aus DIN 18137-2

Der Triaxialversuch ermöglicht die Untersuchung des Abschervorgangs bei Bodenproben. Die verschiedenen möglichen Versuchsarten unterscheiden sich darin, ob vor dem Abschern der Probekörper konsolidiert wird und ob eine Entwässerung während des Abschervorgangs möglich ist. Je nach Versuchsart können aus den Messwerten die effektiven oder undrained Scherparameter errechnet werden.

6.1.7 Wasserdurchlässigkeitsversuch nach DIN 18130-1

Der in DIN 18130-1:1998-05 beschriebene Durchlässigkeitsversuch mit veränderlichem oder konstantem hydraulischem Gefälle wird zur Ermittlung

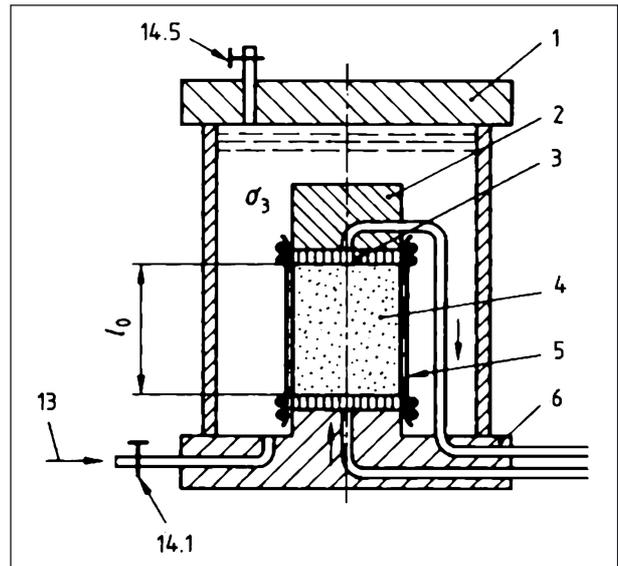


Bild 13: Versuchsanordnung (Ausschnitt) für den Durchlässigkeitsversuch in einer Druckzelle mit isotroper statischer Belastung (verändert nach DIN 18130-1)

der Wasserdurchlässigkeit herangezogen. Verschiedene Versuchsanordnungen können unterschieden werden. Für feinkörnige Böden eignen sich die Versuche in einem Kompressions-Durchlässigkeitsgerät, einer Druckzelle (Bild 13) oder in einem Versuchszylinder. Je nach Versuchsanordnung unterscheiden sich die Versuche dahingehend, ob ein Nachweis der Wassersättigung bzw. ein Nachweis der Strömung möglich ist. Aus den Messungen lässt sich nach Versuchsende der Durchlässigkeitsbeiwert k berechnen.

6.1.8 Durchgeführte Laborarbeiten

Eine Übersicht über die durchgeführten Klassifizierungsversuche ist in Tabelle 3 enthalten.

Tabelle 4 gibt einen Überblick über die durchgeführten Oedometer-, Triaxial- und Wasserdurchlässigkeitsversuche. Durchgeführte Versuche sind in der Tabelle durch grau hinterlegte Felder darge-

Versuch	UL	TM	TA	SU*	GU*
Korngrößenverteilung nach DIN 18123	x	x	x	x	x
Konsistenzgrenzen nach DIN 18122-1	x	x	x	x ¹	x ¹
Wassergehalt nach DIN 18121-1	x	x	x	x	x
Glühverlust nach DIN 18128	x	x	x	-	-
Proctorversuch nach DIN 18127	x	x	x	x	x
Mineralogische Untersuchungen	x	x	x	x ¹	x ¹

„x“ durchgeführt, „-“ nicht geplant; ¹ durchgeführt für den Feinkornanteil

Tab. 3: Übersicht über durchgeführte Klassifizierungsversuche

Einbaubedingung	UL	TM	TA	SU*	GU*
$D_{Pr} = 100 \%$, $n_a = 4 \text{ Vol.-%}$					
$D_{Pr} = 100 \%$, $n_a = 7 \text{ Vol.-%}$					
$D_{Pr} = 100 \%$, $n_a = 8 \text{ Vol.-%}$					
$D_{Pr} = 97 \%$, $n_a = 4 \text{ Vol.-%}$					
$D_{Pr} = 97 \%$, $n_a = 7 \text{ Vol.-%}$					
$D_{Pr} = 97 \%$, $n_a = 8 \text{ Vol.-%}$					
$D_{Pr} = 97 \%$, $n_a = 12 \text{ Vol.-%}$					
$D_{Pr} = 96 \%$, $n_a = 8 \text{ Vol.-%}$					
$D_{Pr} = 95 \%$, $n_a = 8 \text{ Vol.-%}$					
$D_{Pr} = 95 \%$, $n_a = 12 \text{ Vol.-%}$					
$D_{Pr} = 95 \%$, $n_a = 14 \text{ Vol.-%}$					
$D_{Pr} = 94 \%$, $n_a = 7 \text{ Vol.-%}$					
O = Oedometerversuch; T = Triaxialversuch; W = Wasserdurchlässigkeitsversuch Grau hinterlegt: Versuch durchgeführt Weiß hinterlegt: Versuch nicht durchgeführt					

Tab. 4: Übersicht über durchgeführte Oedometer-, Triaxial- und Wasserdurchlässigkeitsversuche

stellt. Beim Ausbau der Proben aus den Oedometerzellen wurden zudem bei den feinkörnigen Böden jeweils Taschenpenetrometerversuche durchgeführt.

6.2 Klassifizierungs- und Proctorversuche

6.2.1 Leicht plastischer Schluff (UL)

Die Untersuchungen an dem quartären Lösslehm aus Krieberg ergaben einen Schluff mit einem Sandgehalt von weniger als 15 M.-% und einem Tongehalt von unter 2 M.-% (Bild 14, Anlage 1.3). Der Ausgangswassergehalt des Lösslehms betrug

1,3 M.-%. Der niedrige Wassergehalt ergab sich durch die längere Lagerzeit des Bodens im Keller des Prüfamtes für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau der TU München. Aus bodenmechanischer Sicht kann das Material einem leicht plastischen Schluff zugeordnet werden (Bild 15, Anlage 2). Der Wassergehalt des Schluffs an der Ausrollgrenze beträgt $w_P = 18,1 \text{ M.-%}$, an der Fließgrenze $w_L = 21,9 \text{ M.-%}$. Daraus ergibt sich eine Plastizitätszahl von $I_P = 3,8 \%$. Der Anteil organischer Bestandteile des Bodens wurde als Glühverlust V_{GI} mit 1,6 M.-% bestimmt.

Der leicht plastische Schluff weist eine Proctordichte von $\rho_{Pr} = 1,84 \text{ g/cm}^3$ bei einem optimalen Wassergehalt von $w_{Pr} = 13,4 \text{ M.-%}$ auf. Die Korndichte liegt bei $\rho_s = 2,68 \text{ g/cm}^3$ (Anlage 3.3).

6.2.2 Mittelplastischer Ton (TM)

Bei dem bodenmechanisch als mittelplastischen Ton anzusprechenden Lösslehm aus Zolling handelt es sich um einen Schluff mit einem Sandanteil von ca. 20 M.-% und einem Tonanteil von ca. 15 M.-% (Bild 14, Anlagen 1.4). Der Wassergehalt an der Ausrollgrenze wurde mit $w_P = 16,1 \text{ M.-%}$ bestimmt, an der Fließgrenze mit $w_L = 36,9 \text{ M.-%}$ (Bild 15, Anlage 2). Hieraus folgt eine Plastizitätszahl von $I_P = 20,7 \%$. Der Anteil an organischen Anteilen wurde als Glühverlust mit $V_{GI} = 2,6 \text{ M.-%}$ bestimmt.

Die Proctordichte des Tons liegt bei $\rho_{Pr} = 1,811 \text{ g/cm}^3$ bei einem optimalen Wassergehalt von $w_{Pr} = 15,9 \text{ M.-%}$. Die Korndichte des Tons beträgt $\rho_s = 2,69 \text{ g/cm}^3$ (Anlage 3.4).

6.2.3 Ausgeprägt plastischer Ton (TA)

Der Ton aus dem rheinischen Braunkohlerevier weist einen Schluffanteil von ca. 20 M.-% und einen Sandanteil von unter 3 M.-% auf (Bild 14, Anlage 1.5). Aus bodenmechanischer Sicht handelt es sich um einen ausgeprägt plastischen Ton (Bild 15, Anlage 2). Der Wassergehalt an der Ausrollgrenze beträgt $w_P = 20,4 \text{ M.-%}$, an der Fließgrenze $w_L = 56,4 \text{ M.-%}$. Die Plastizitätszahl ergibt sich damit zu $I_P = 36,0 \%$. Der Ausgangswassergehalt des Materials liegt bei $w = 6,3 \text{ M.-%}$. Der Glühverlust wurde mit $V_{GI} = 6,9 \text{ M.-%}$ festgestellt.

Die Proctordichte des Tons beträgt $\rho_{Pr} = 1,60 \text{ g/cm}^3$ bei einem optimalen Wassergehalt von $w_{Pr} = 23,0 \text{ M.-%}$. Der Ton weist eine Korndichte von $\rho_s = 2,64 \text{ g/cm}^3$ auf (Anlage 3.5).

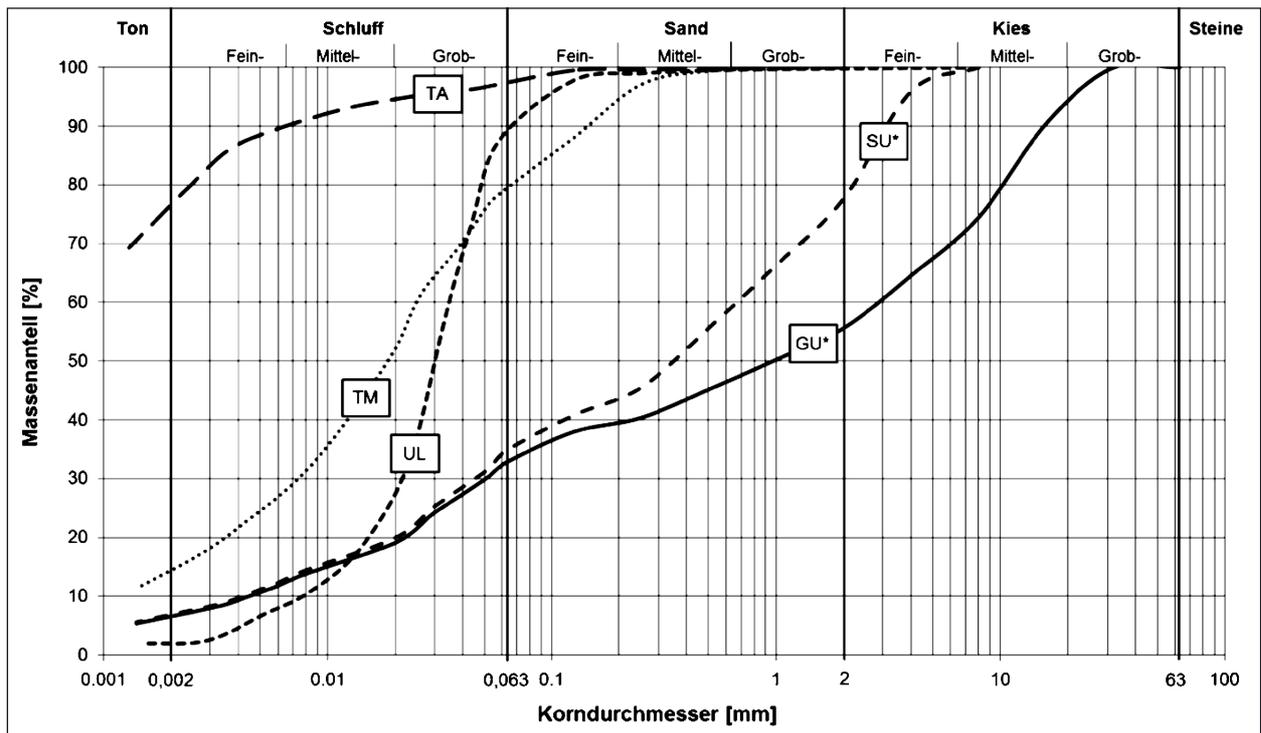


Bild 14: Kornverteilungen der untersuchten Böden nach DIN 18123

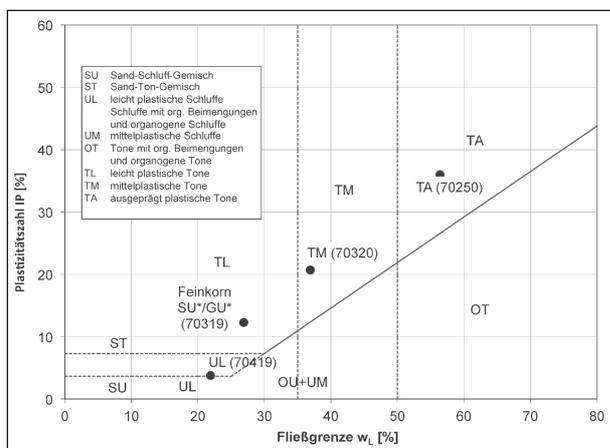


Bild 15: Plastizitätsdiagramm der untersuchten feinkörnigen Böden nach DIN 18196

6.2.4 Stark schluffiger Sand (SU*)

Der Sand wurde als Mischung aus Einzelkörnungen hergestellt. Den Feinkornanteil bildete der aus dem Waschvorgang im Kieswerk stammende Schluff. Dieser wurde mit einem Sand der Körnung 0/4 gemischt (Bild 14, Anlage 1.2).

Bei der Feinkornfraktion handelt es sich um einen Schluff mit einem Tonanteil von 17 M.-% und einem Sandanteil von ca. 13 M.-%. Bodenmechanisch wird der Schluff einem leicht plastischen Ton zugeordnet (Bild 15). Der Wassergehalt an der Ausrollgrenze beträgt $w_p = 14,6$ M.-%, an der Fließgrenze

$w_L = 26,9$ M.-%. Der Schluff weist eine Plastizitätszahl von $I_p = 12,3$ % auf. Der Ausgangswassergehalt des Materials liegt bei 5,8 M.-%.

Die Sandmischung wies einen Tonanteil von 7,2 M.-% und einen Schluffanteil von 30,3 M.-% auf. Der Feinkornanteil lag somit bei insgesamt 37,5 M.-%. Zudem enthält die Probe einen fast vollständig aus Feinkies zusammengesetzten Kiesanteil von 19,8 M.-%.

Die Proctordichte des Sandes liegt bei $\rho_{Pr} = 2,16$ g/cm³ bei einem optimalen Wassergehalt von $w_{Pr} = 8,6$ M.-%. Die Korndichte weist einen Wert von $\rho_s = 2,75$ g/cm³ auf (Anlage 3.2).

6.2.5 Stark schluffiger Kies (GU*)

Der Kies wurde ebenfalls als Mischung aus Einzelkörnungen hergestellt (Bild 14, Anlage 1.1). Bei den Einzelkörnungen handelte es sich um einen Sand mit Korngrößen zwischen 0 mm und 4 mm, bei den Kieskörnungen um Korngrößen zwischen 4 mm und 8 mm, 8 mm und 16 mm sowie 16 mm und 32 mm (Bild 5). Die bodenmechanischen Eigenschaften des Feinkornanteils sind bereits in Kapitel 6.2.4 dargelegt.

Der Kies weist eine Proctordichte von ca. $\rho_{Pr} = 2,23$ g/cm³ bei einem optimalen Wassergehalt

von $w_{Pr} = 6,9$ M.-%. Die Korndichte liegt bei $\rho_s = 2,75$ g/cm³ (Anlage 3.1).

6.3 Mineralogische Untersuchungen

Die mineralogischen Untersuchungen wurden vom Lehrstuhl für endogene Geodynamik der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg durchgeführt.

Es wurden sowohl eine Ganzgesteinsanalyse (Mineralanalyse der gesamten Probe) als auch eine Tonmineralanalyse an der Fraktion < 2 μ m durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den Anlagen 4.1 und 4.2 dargestellt.

6.3.1 Leicht plastischer Schluff (UL)

Die Ergebnisse der Ganzgesteinsanalyse (Anlage 4.1) zeigen, dass der leicht plastische Schluff zu einem überwiegenden Anteil aus Quarz besteht (59 %). Als Nebenbestandteile sind überwiegend Feldspat (14 %), Illit (10 %), Calcit (8 %) und Dolomit (5 %) enthalten.

Die Fraktion < 2 μ m enthält zu etwa ähnlichen Anteilen Smektit (41 %), Illite (30 %) und Kaolinit (29 %).

Die Quellfähigkeit des leicht plastischen Schluffs kann anhand der mineralogischen Untersuchungen als eher gering eingeschätzt werden. Die Hauptbestandteile sind nicht bzw. nur gering quellfähig. Die in der Feinfraktion enthaltenen Smektit machen nur einen geringen Anteil am Mineralbestand des Schluffs aus.

6.3.2 Mittelplastischer Ton (TM)

Der mittelplastische Ton besteht nach den Ergebnissen der Ganzgesteinsanalyse (Anlage 4.1) etwa zur Hälfte aus Quarz (53 %). Die andere Hälfte wird überwiegend aus Illit (21 %), Smektit (9 %), Feldspat (7 %) und Kaolinit/Nacrit (7 %) aufgebaut.

Die Fraktion < 2 μ m enthält zu etwa ähnlichen Anteilen Smektit (40 %), Kaolinit (33 %) und Illit (27 %).

Anhand der Mineralanalyse kann eine gewisse Quellneigung des mittelplastischen Tons nicht ausgeschlossen werden. Vor allem Smektit und zu einem geringeren Maße auch Illite können durch Aufnahme von Wasser quellen.

6.3.3 Ausgeprägt plastischer Ton (TA)

Die Ergebnisse der Ganzgesteinsanalyse (Anlage 4.1) zeigen, dass der ausgeprägt plastische Ton zu überwiegenden Anteilen aus Kaolinit/Nacrit (44 %), Quarz (31 %) und Illit (23 %) besteht.

Die Fraktion < 2 μ m besteht zu 60 % aus Kaolinit und 40 % aus Illit-Mineralen.

Anhand der Mineralanalyse weist der ausgeprägt plastische Ton ein relativ geringes Quellvermögen aufgrund der enthaltenen Illit-Mineralen auf.

6.3.4 Feinkornanteil des stark schluffigen Sandes und Kieses (SU*/GU*)

Das Feinkorn des stark schluffigen Sandes und des stark schluffigen Kieses besteht nach den Ergebnissen der Ganzgesteinsanalyse (Anlage 4.2) überwiegend aus Karbonaten (Dolomit 44 %, Calcit 27 %) und Quarz (20 %).

Die Fraktion < 2 μ m enthält überwiegend Chlorit (40 %) und Illit (40 %), untergeordnet auch Kaolinit (20 %).

Die Quellfähigkeit des Feinkornanteils des stark schluffigen Sandes sowie des stark schluffigen Kieses kann als eher gering erachtet werden. Lediglich der enthaltene Illit weist ein tendenziell geringes Quellvermögen auf.

6.4 Eindimensionale Kompressionsversuche

6.4.1 Festlegung des Versuchsprogramms

Die Versuchsböden wurden unter verschiedenen Einbaubedingungen im Kompressionsgerät (Oedometer) nach DIN 18135 untersucht. Folgende Einbaubedingungen wurden soweit möglich für die Böden UL, TM, TA und SU* gewählt (Bild 16):

- $D_{Pr} = 100$ %, $n_a = 4$ Vol.-%,
- $D_{Pr} = 100$ %, $n_a = 8$ Vol.-%,
- $D_{Pr} = 97$ %, $n_a = 4$ Vol.-%,
- $D_{Pr} = 97$ %, $n_a = 8$ Vol.-%,
- $D_{Pr} = 97$ %, $n_a = 12$ Vol.-%,
- $D_{Pr} = 95$ %, $n_a = 8$ Vol.-% und
- $D_{Pr} = 95$ %, $n_a = 12$ Vol.-%.

Diese Einbaubedingungen konnten nicht immer eingehalten werden. Abweichungen und deren Gründe werden u. a. in Kapitel 6.4.4 behandelt.

Die Auswahl der Einbaubedingungen erfolgte u. a. aufgrund der Vorgaben der ZTV E-StB 09 und der Veränderungen zwischen der derzeit gültigen und der Vorgängerversion aus dem Jahr 1994.

Mit der neuen ZTV E-StB 09 wurden die Anforderungen an feinkörnige und gemischtkörnige Böden mit hohem Feinkornanteil ($\leq 0,063$ mm), die bis zu 0,5 m unter Planum bis Dammsohle eingebaut werden sollen, erhöht, indem der zu erreichende Verdichtungsgrad von $D_{Pr} = 95$ % auf 97 % angehoben wurde. Das 10%-Höchstquantil des Luftporenanteils liegt hierbei unverändert bei 12 Vol. %. Die Untersuchung der Einbaubedingung $D_{Pr} = 95$ % und $n_a = 8$ Vol.-% sollte im Vergleich mit der Einbaubedingung $D_{Pr} = 97$ % und $n_a = 12$ Vol.-% zeigen, ob eine Erhöhung der Anforderungen an den Luftporenanteil ähnliche Auswirkungen auf das Last-Verformungsverhalten der Böden erzielt hätte wie die Erhöhung der zu erzielenden Trockendichte. Aufgrund der nur geringen Verformungen, die bei diesen Versuchsreihen beobachtet werden konnten, wurden die Böden zusätzlich noch bei einem Verdichtungsgrad von $D_{Pr} = 95$ % und einem Luftporenanteil von $n_a = 12$ Vol.-% untersucht. Dies entspricht den Anforderungen der nicht mehr gültigen ZTV E-StB 94.

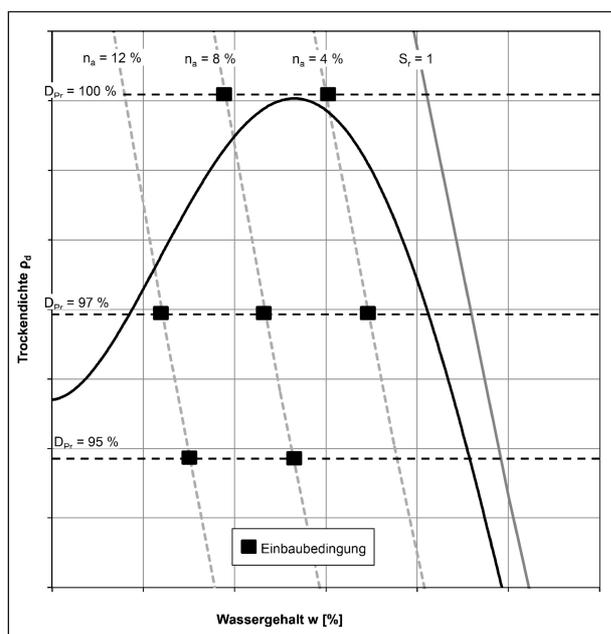


Bild 16: Übersicht über die Einbaubedingungen im Proctordiagramm

Mit den Versuchen mit einem Verdichtungsgrad von $D_{Pr} = 97$ % sollten die Auswirkungen eines verringerten Luftporenanteils bei gleichbleibender Trockendichte aufgezeigt werden. Hierfür wurde zum einen die Mindestanforderung der ZTV E-StB 09 untersucht ($n_a = 12$ Vol.-%), zum anderen auch die Empfehlung für wasserempfindliche Böden. Diese liegt bei $n_a = 8$ Vol.-%. Mit einem Luftporenanteil von $n_a = 4$ Vol.-% wurde zudem eine Einbaubedingung auf der nassen Seite der Proctorkurve betrachtet.

Die Versuche mit Verdichtungsgraden von $D_{Pr} = 100$ % dienen zum Vergleich der Mindestanforderungen der ZTV E-StB 09 mit den aufgrund der Entwicklungen in der Maschinenteknik mittlerweile erzielbaren Verdichtungsgraden. Dafür wurde neben einem Luftporenanteil von 8 Vol.-% auch noch eine Maximalanforderung von $n_a = 4$ Vol.-% untersucht.

Zur Beurteilung des Verhaltens der Böden bei Wasserzugabe wurden die Böden bei jeder Einbaubedingung bei unterschiedlichen Spannungen gesättigt.

6.4.2 Versuchsschema

Der Oedometerversuchsstand ermöglicht die zeitgleiche Untersuchung von acht Bodenproben. Um eine reibungslose Durchführung der Versuche zu ermöglichen, wurde ein Versuchsschema entwickelt, bei dem ein Boden mit gleichen Einbaubedingungen in jeweils vier Oedometergeräte eingebaut wird.

In Tabelle 5 ist das Schema zur Durchführung der Oedometerversuche ersichtlich, das auch für die Kompressionsversuche im Großoedometer (siehe

Tag	A/E	B/F	C/G	D/H
1	1. Lst.	1. Lst.	1. Lst.	1. Lst.
2	2. Lst.	Sättigung	2. Lst.	2. Lst.
3	3. Lst.	2. Lst.	3. Lst.	3. Lst.
4	4. Lst.	3. Lst.	Sättigung	4. Lst.
5	5. Lst.	4. Lst.	4. Lst.	5. Lst.
6	6. Lst.	5. Lst.	5. Lst.	Sättigung
7	4. Lst.	6. Lst.	6. Lst.	6. Lst.
8	2. Lst.	4. Lst.	4. Lst.	4. Lst.
9	Ausbau	2. Lst.	2. Lst.	2. Lst.
10		Ausbau	Ausbau	Ausbau

Tab. 5: Schema zur Durchführung der Oedometerversuche

Laststufe	Spannung [kN/m ²]
1	12,5
2	25
3	50
4	100
5	200
6	400

Tab. 6: Laststufen und zugehörige Spannungen für die Oedometerversuche

Kapitel 6.5) angewendet wurde. In die Geräte A bis D sowie E bis H wurden Proben mit zwei unterschiedlichen Einbaubedingungen eingebaut. Die Versuchsanordnung war hierbei jeweils für die Zellen A/E, B/F, C/G sowie D/H gleich. In den Geräten A und E wurden die Proben ohne Zugabe von Wasser belastet. In den restlichen Geräten erfolgte über 24 h eine Wassersättigung der Proben nach der 1. Laststufe (Geräte B und F), der 3. Laststufe (Geräte C und G) bzw. nach der 5. Laststufe (Geräte D und H).

Die Belastung der Geräte erfolgte in sechs Stufen, wobei von Laststufe zu Laststufe die auf die Probe wirkende Spannung verdoppelt wurde. Bei der Entlastung wurde die Last jeweils auf ein Viertel der vorhergehenden Laststufe reduziert. Die Laststufen sind in Tabelle 6 dargestellt.

Die maximale Last wurde mit 400 kN/m² festgelegt. Dies entspricht in etwa einer Dammhöhe von 20 m und spiegelt so einen Großteil der üblichen Schütthöhen von Dämmen wider.

6.4.3 Oedometerversuchsstand

Zur Durchführung der Oedometerversuche wurde ein vorhandener Versuchsstand modifiziert. Insbesondere wurde eine Vorrichtung zur Versorgung der einzelnen Proben mit Wasser angebracht (Bild 17).

Zur Ermittlung der Wassermengen, die von den in den Oedometergeräten eingebauten Proben während der Sättigung aufgenommen wurden, wurde eine Vorrichtung zur Wasserversorgung der Zellen am Versuchsstand angebracht (Bild 18). Mittels Absperrhähnen konnte der Zufluss zu den einzelnen Zellen gesteuert werden.

Zur Messung der verbrauchten Wassermenge gelangte das Wasser nicht direkt zu den Oedometern,



Bild 17: Versuchsstand mit Oedometerzellen und Vorrichtung zur Versorgung der einzelnen Zellen mit Wasser

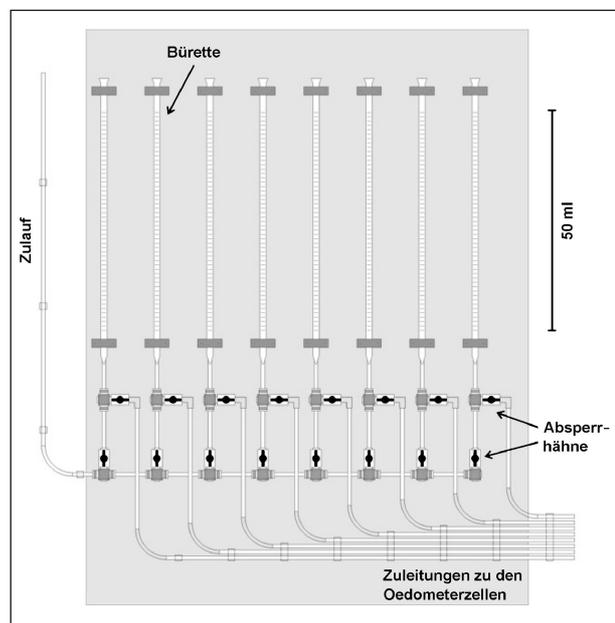


Bild 18: Schemaskizze der Vorrichtung zur Wasserversorgung der Oedometerzellen mit Zulauf (links), Absperrhähnen und Büretten

sondern wurde zunächst in Büretten zwischengespeichert. Über einen Absperrhahn konnte nach Befüllung der Bürette die Wasserversorgung unterbrochen werden. Mittels Öffnung eines weiteren Absperrhahns konnte dann Wasser dem gewünschten Oedometer zugeführt werden. Anhand der Skalierung der Büretten war es so möglich, die den Oedometern zugeflossene Wassermenge zu ermitteln.

Schwierigkeiten ergaben sich jedoch dadurch, dass das Wasser an der Oberseite der Oedometer wieder austreten konnte. Somit konnte die von der Probe aufgenommene Wassermenge nicht bestimmt werden.

6.4.4 Probenherstellung

Zur Herstellung der Proben wurde das Ausgangsmaterial – sofern notwendig – in einem ersten Schritt gebrochen, um verbackene Kornaggregate aufzubrechen, und anschließend mit einem 2-mm-Sieb gesiebt.

In einem zweiten Schritt wurde das gesiebte Material anschließend auf den gewünschten Wassergehalt gebracht. Die zu erzielenden Trockendichten und Wassergehalte wurden zuvor anhand der aus den Klassifizierungsversuchen erhaltenen Ergebnisse und der in Kapitel 6.4.1 gewählten Einbaubedingungen errechnet. Zur Gewährleistung einer ausreichenden Homogenisierung des Probenmaterials nach der Wasserzugabe, wurde das Material für mindestens 24 h, im Fall der feinkörnigen Böden teilweise auch mehrere Tage, luftdicht verschlossen gelagert.

Im letzten Schritt wurde die für den Einbau notwendige Probenmasse aus dem Volumen des Oedometerrings und der vorgegebenen Trockendichte ermittelt und mittels einer Presse in einem Zylinder auf die dem Oedometerring entsprechenden Abmessungen gepresst. Zuletzt wurde der Oedometerring über die Probe gedrückt.

Beim Boden UL ergaben sich aufgrund der schmalen Proctorkurve Abweichungen zum geplanten Versuchsprogramm. Für den Boden TM konnten zusätzlich zu den geplanten Versuchen jene mit zu geringer Einbaudichte ausgewertet werden (siehe Kapitel 6.4.6). Die erreichten Einbaubedingungen sind in Tabelle 7 aufgelistet.

Zur Erfüllung der Einbaubedingungen wurden Abweichungen von jeweils $\pm 1\%$ -Punkt für den Wassergehalt und die Trockendichte erlaubt.

Die Probenbezeichnung folgte einem achtstelligen Schema (z. B. TA09512B). Die Buchstaben an den ersten beiden Stellen bezeichneten die Probe entsprechend ihrer Klassifikation nach DIN 18196 (TA für den ausgeprägt plastischen Ton). Daran schlossen drei Ziffern an, die den Verdichtungsgrad D_{Pr} wiedergaben (095 für $D_{Pr} = 95\%$). Hierauf folgten wiederum zwei Ziffern, die dem Luftporenanteil der Proben entsprachen (12 für $n_a = 12\text{ Vol.-%}$). Abschließend folgte ein Buchstabe, der für die Oedometerzelle und folglich für den Zeitpunkt der Sättigung stand (B für Oedometerzelle B und Sättigung nach der ersten Laststufe).

Boden	Verdichtungsgrad D_{Pr} [%]	Trockendichte ρ_d [g/cm ³]	Luftporenanteil n_a [Vol.-%]	Wassergehalt w [M.-%]
UL	100	1.843	7	13.4
	97	1.788	7	14.9
			8	14.1
			12	11.9
	95	1.751	8	15.2
			12	12.9
14			11.9	
94	1.732	7	16.5	
TM	100	1.811	4	16.0
	97	1.757	8	13.8
			4	17.6
			8	15.4
	95	1.720	12	13.1
			8	16.5
	86	1.557	12	14.1
22			13.1	
18			17.5	
83	1.503	18	17.5	
		4	22.2	
TA	100	1.598	8	19.7
	97	1.550	4	24.1
			8	21.5
			12	18.9
	96	1.534	8	22.1
	95	1.518	8	22.7
			12	20.1
SU*	100	2.160	4	8.0
	97	2.095	8	6.2
			4	9.5
			8	7.5
	95	2.052	12	5.6
			8	8.5
12	6.5			
GU*	100	2.227	4	6.7
	97	2.160	4	8.1
			12	4.4
	95	2.116	8	7.1

Tab. 7: Übersicht über Böden und erreichte Einbaubedingungen

6.4.5 Versuchsdurchführung

Zur Vermeidung einer Wasseraufnahme der Proben vor der geplanten Sättigung wurden die Filterplatten trocken in die Oedometerzellen eingebaut. Anschließend erfolgte das Einsetzen der Proben in die Oedometerzelle (Kapitel 6.4.4) in die Zellen und das Aufsetzen der Kopfplatten. Um ein Austrocknen der Proben möglichst zu verhindern, wurden die Öffnungen an den Oberseiten der Kopfplatten mit Plastikstiften verschlossen.

Nach dem Einsetzen der Proben in die Zellen wurden die Zellen im Versuchsstand eingebaut und belastet. Die Messung der Setzungen und Hebungen erfolgte über Messuhren, die zur Messdatenerfassung an einen Computer angeschlossen waren. Die Aufzeichnung von Zeit, Last und Höhenänderung der Proben erfolgte in vorgegebenen Intervallen mit zunehmenden Zeitabständen zwischen den Messungen.

Nach 24 h wurden die Lasten verdoppelt bzw. im Fall der Wasserzugabe die Proben gesättigt (Kapitel 6.4.2). Nach dem Erreichen der maximalen Lasten wurden die Proben entlastet. Die Spannungen wurden dabei nach 24 h auf ein Viertel der Spannungen der vorausgegangenen Laststufe reduziert. Die Aufzeichnungen von Zeit, Last und Höhenänderung der Probenkörper erfolgte bei der Entlastung in einem vorgegebenen Intervall von 30 min.

Nach der letzten Entlastung wurden die Proben ohne Auflast für wenige Stunden entspannt und anschließend aus den Zellen ausgebaut. An den Proben der Versuchsböden TM und TA wurden im Rahmen des Ausbaus Taschenpenetrometerversuche durchgeführt. Alle Proben wurden anschließend gewogen. Zur visuellen Kontrolle der Sättigung der Proben wurden diese auseinandergelassen, um anhand von Farbunterschieden festzustellen, ob die Proben nur randlich aufgesättigt worden waren. Zur Bestimmung des Ausbauwassergehalts wurden die Proben zum Schluss getrocknet.

6.4.6 Probleme bei der Versuchsdurchführung

Nach Durchführung erster Versuchsreihen wurde eine fehlerhafte Einstellung der Belastungsvorrichtung festgestellt. Diese verhinderte die korrekte Übertragung der von den Belastungsgewichten stammenden Kräfte auf die Oedometerzellen.

Bei den anschließend durchgeführten Versuchen wurde Mitte August 2012 festgestellt, dass die Trockendichten der Böden falsch eingestellt worden waren und somit die zu erzielenden Verdichtungsgrade verfehlt wurden. Die durchgeführten Versuchsreihen wurden wiederholt. Soweit möglich wurden die Versuche mit den zu geringen Trockendichten ausgewertet.

Wenige Versuchsreihen wurden mit feuchten Filtersteinen eingebaut. Dabei wiesen auch die Proben nach dem Ausbau eine annähernd vollständige Sättigung auf, die im Versuchsverlauf nicht bewässert worden waren. Dies war auf eine Wasseraufnahme der Proben aus den feucht eingebauten Filtersteinen zurückzuführen. Die Versuchsreihen wurden wiederholt und die Filtersteine bei den restlichen Versuchsreihen trocken eingebaut.

Zur Gewährleistung einer verbesserten Sättigung wurden die Oedometer gegenüber den anfangs durchgeführten Versuchen modifiziert. Bei den ersten Versuchsreihen war festgestellt worden, dass vermutlich durch Wasserwegigkeiten zwischen dem eingepressten Bodenmaterial und dem Oedometerzelle bedingt Wasser an der Oberseite der Oedometerzelle ausgetreten war. Um ein Abfließen dieses Wassers zu verhindern und eine verbesserte Aufsättigung der Probenkörper zu erreichen, wurde ein 4 cm hoher Kunststoffring an der Oberseite der Oedometerzellen aufgeschraubt.

6.4.7 Versuchsauswertung

Die Steifemoduln der Proben wurden entsprechend der DIN 18135 als Sekantenmoduln für die jeweiligen Spannungsintervalle ausgewertet. Teilweise wurde dabei das erste Spannungsintervall nicht beachtet, da aufgrund von Kontaktproblemen zwischen Stempel und Probe während der ersten Laststufe Messfehler auftreten können.

Neben den Steifemoduln wurden die bezogene Zusammendrückung der Proben nach DIN 18135 ausgewertet, die das Verhältnis von Zusammendrückung zu Ausgangsprobenhöhe darstellt.

Verformungen bei gleichbleibender Last infolge der Wasserzugabe während des Versuchs wurden ebenso ausgewertet. Hierfür wurden die Unterschiede in der bezogenen Zusammendrückung der Proben unmittelbar vor Wasserzugabe und vor erneuter Lastaufbringung voneinander ermittelt.

6.4.8 Versuchsergebnisse

Allgemeines

Zur Erfüllung der Einbaubedingungen wurden Abweichungen von jeweils $\pm 1\%$ -Punkt für den Wassergehalt und die Trockendichte erlaubt. In den entsprechenden Diagrammen (z. B. Bild 20) sind diese Grenzen als rotes Rechteck dargestellt.

In den grafischen Darstellungen der Versuchsergebnisse ab Bild 20 sind die Versuche umso heller dargestellt, je früher die Proben gesättigt wurden. Die Versuche ohne Sättigung kennzeichnenden Symbole sind ohne Füllung gehalten.

Die Protokolle der Einzelversuche der Oedometerversuche an den Böden UL, TM, TA und SU* sind als Anlagen 5.1 bis 5.128 beigefügt.

Leicht plastischer Schluff (UL)

In Bild 19 bis Bild 26 sind die Einbau- und Ausbaupunkte der mit dem Kriberg-Schluff durchgeführten Versuche in Proctordiagrammen dargestellt. Enthalten sind dabei neben der Proctorkurve auch die Sättigungslinie ($S_r = 1$ bzw. $n_a = 0$ Vol.-%) und die Isolinien für Luftporenanteile von $n_a = 4$ Vol.-%, 8 Vol.-% und 12 Vol.-%. Die Einbaubedingungen gemäß dem geplanten Versuchsprogramm konnten beim Versuchsboden UL aufgrund seiner Verdichtungseigenschaften, die sich in einer steilen, schmalen Proctorkurve äußern, nicht vollständig umgesetzt werden. Bei mehreren Anläufen, Probekörper mit den geplanten Einbaubedingungen herzustellen, wurden die entsprechenden Verdichtungsgrade und Luftporenanteile verfehlt. Daraus ergaben sich die nicht geplanten Versuchsreihen UL09707 (Bild 20), UL09514 (Bild 25) und UL09407 (Bild 26).

Aus dem ursprünglich geplanten Programm wurden die Einbaubedingungen UL09708, UL09712, UL09508 und UL09512 erreicht. Die Einbautrockendichten und Einbauwassergehalte lagen dementsprechend im Sollbereich für die Einbaubedingungen (Bild 21 bis Bild 23). Lediglich die Probekörper für die Versuche der Reihe UL09512 wiesen etwas zu geringe Wassergehalte auf (Bild 24).

Entsprechend der steilen und sehr schmalen Proctorkurve wurde eine Verdichtung von $D_{Pr} = 100\%$ lediglich im Proctroptimum bei einem Luftporenanteil von $n_a = 7$ Vol.-% erreicht (Bild 19). Die Einbau-

bedingungen mit $D_{Pr} = 100\%$ sowie einem Luftporenanteil von $n_a = 4$ Vol.-% bzw. $n_a = 8$ Vol.-% konnten nicht realisiert werden, da sich die Probekörperherstellung mit diesen Einbaubedingungen als nicht möglich erwies. Ebenso wenig konnte der Boden UL mit einem Verdichtungsgrad von $D_{Pr} = 97\%$ und einem Luftporenanteil von $n_a = 4$ Vol.-% eingebaut werden.

Die bewässerten Proben wiesen nach dem Ausbau überwiegend eine nahezu vollständige Sättigung auf. Dies deutet auf einen im Versuch erfolgreichen Sättigungsvorgang hin. Die Proben der Reihen UL09512 und UL09407 wiesen nach Ausbau keine vollständige Sättigung auf, die Luftporenanteile lagen hier noch zwischen $n_a = 2$ Vol.-% und 8 Vol.-%. Es konnte zudem festgestellt werden, dass die Proben mit der späten Sättigung bei einer Last von 200 kN/m^2 im Allgemeinen etwas geringere Sättigungsgrade aufwiesen wie die Proben mit früherer Sättigung.

Teilweise lagen die erreichten Ausbaupunkte im Proctordiagramm oberhalb der Sättigungslinie (Bild 19, Bild 22, Bild 25). Dies ist vermutlich auf eine Entspannung und eine Wasseraufnahme der Proben im Zuge des Ausbaus zurückzuführen, während sich die berechnete Trockendichte auf

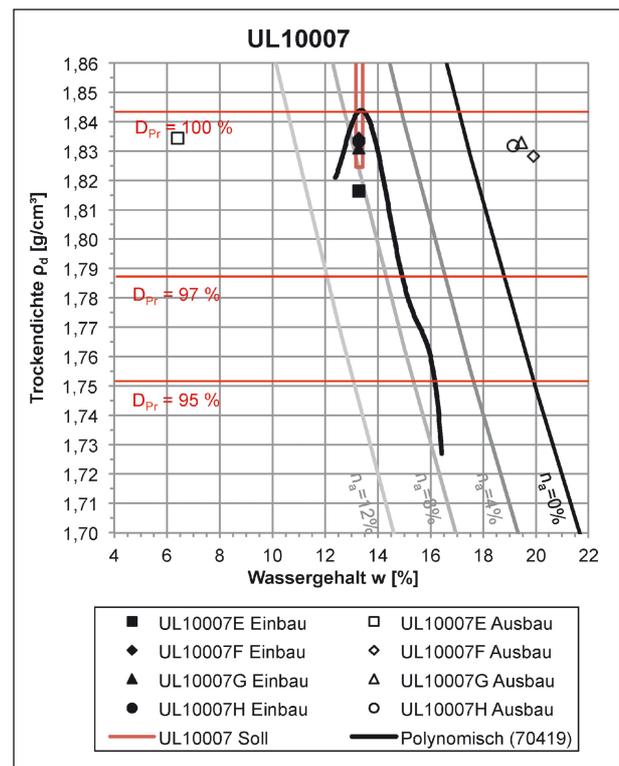


Bild 19: Erreichte Werte für Trockendichte und Wassergehalt bei Ein- und Ausbau der Proben UL10007

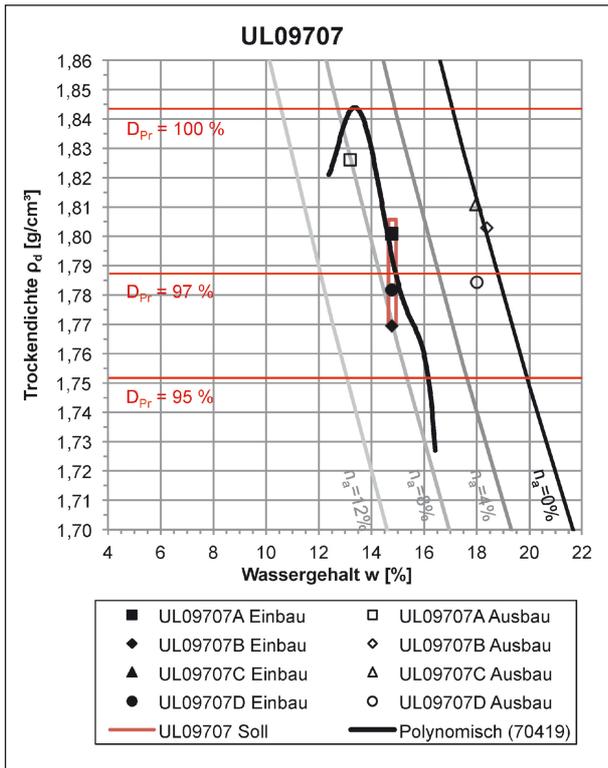


Bild 20: Erreichte Werte für Trockendichte und Wassergehalt bei Ein- und Ausbau der Proben UL09707

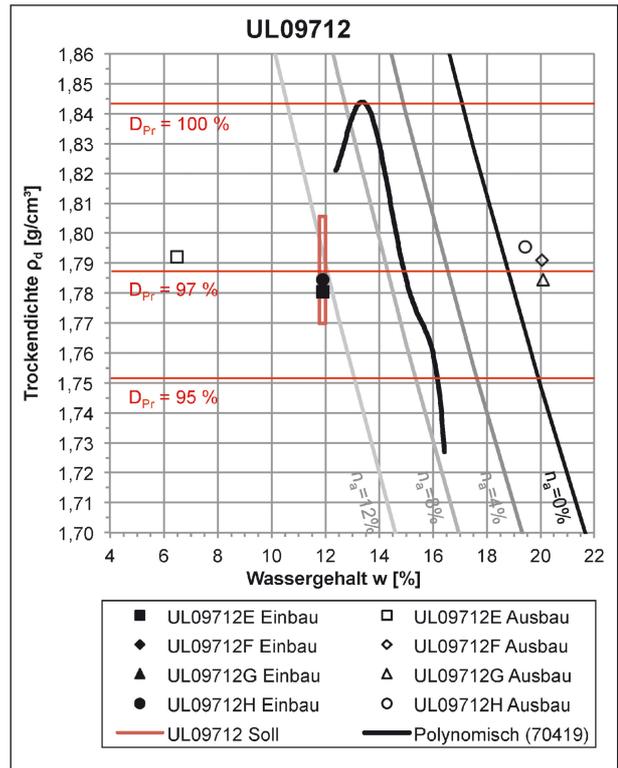


Bild 22: Erreichte Werte für Trockendichte und Wassergehalt bei Ein- und Ausbau der Proben UL09712

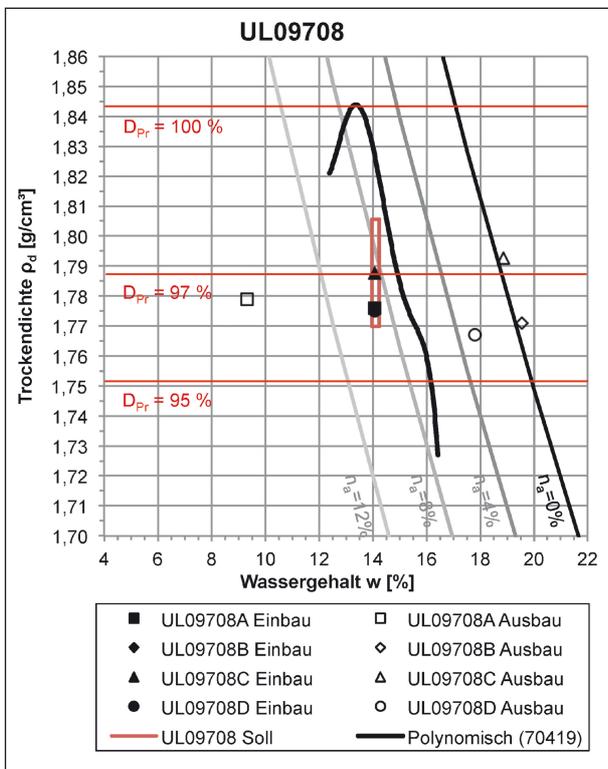


Bild 21: Erreichte Werte für Trockendichte und Wassergehalt bei Ein- und Ausbau der Proben UL09708

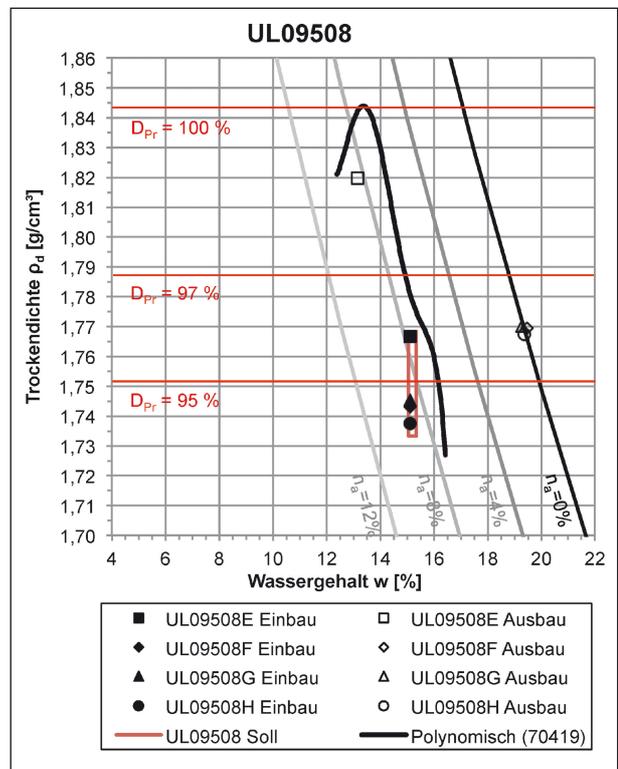


Bild 23: Erreichte Werte für Trockendichte und Wassergehalt bei Ein- und Ausbau der Proben UL09508

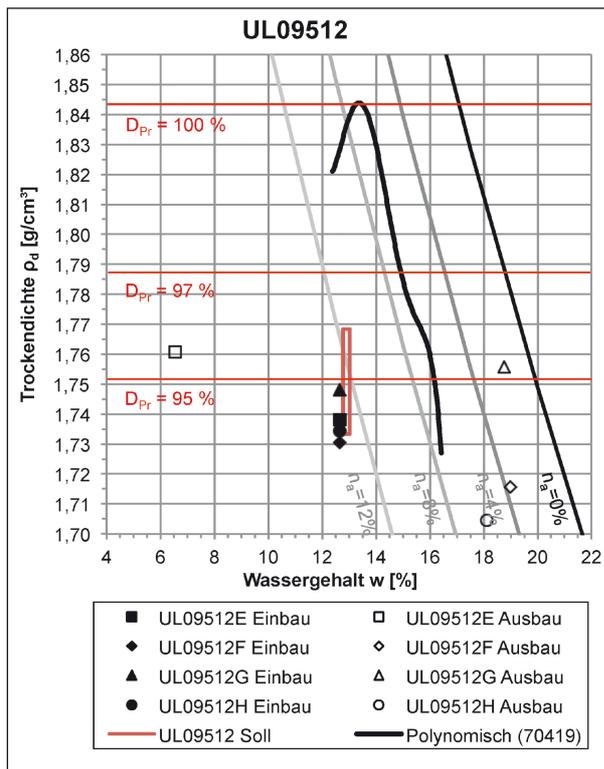


Bild 24: Erreichte Werte für Trockendichte und Wassergehalt bei Ein- und Ausbau der Proben UL09512

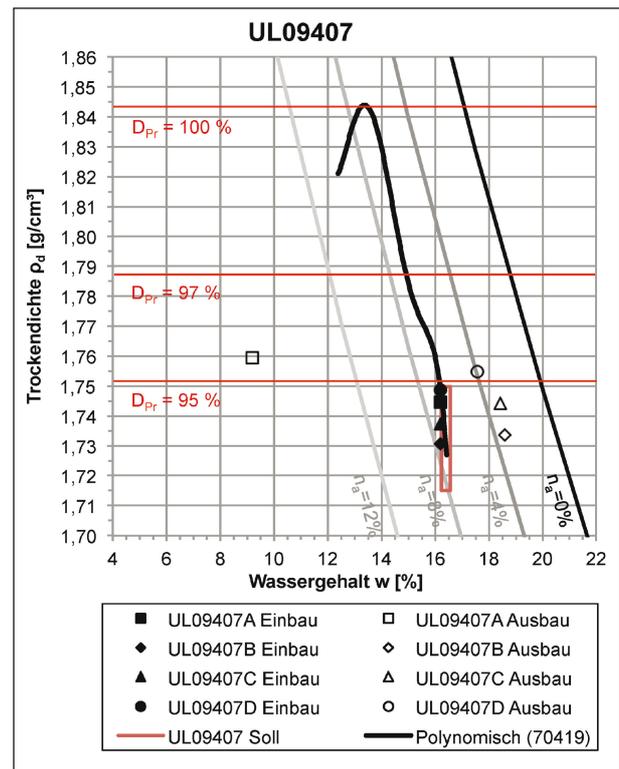


Bild 26: Erreichte Werte für Trockendichte und Wassergehalt bei Ein- und Ausbau der Proben UL09407

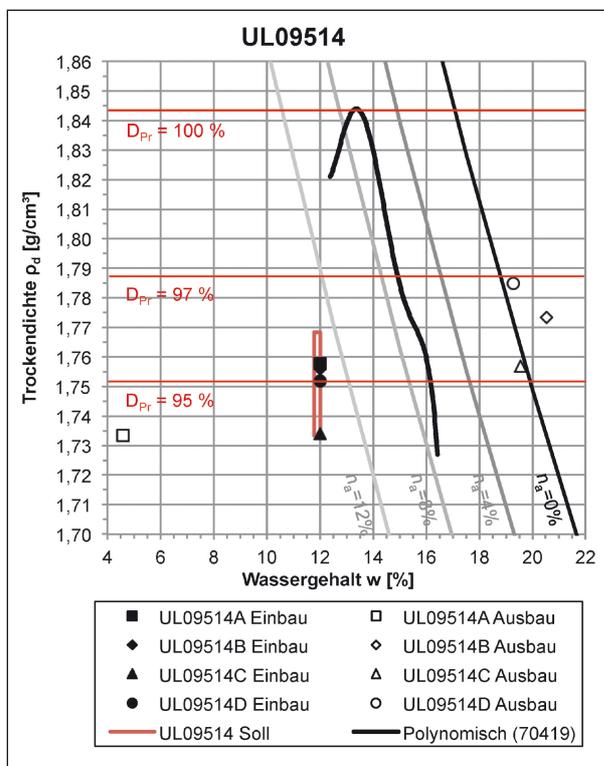


Bild 25: Erreichte Werte für Trockendichte und Wassergehalt bei Ein- und Ausbau der Proben UL09514

die während des Versuchs zuletzt gemessene Probenhöhe bezieht. Eine weitere Möglichkeit sind zudem Anhaftungen von Wasser an die Proben.

Bei der überwiegenden Anzahl der Versuche konnte beim Vergleich der Ausgangs- und Endpunkte eine Konsolidation und somit eine Zunahme der Dichte festgestellt werden. Diese lag bei maximal 0,05 g/cm³. Bei einigen Versuchen nahm vermutlich infolge von Quellerscheinungen die Trockendichte um maximal 0,03 g/cm³ ab.

Die Protokolle der einzelnen Versuche sind in den Anlagen 5.1 bis 5.32 enthalten.

In Bild 27 bis Bild 34 sind die Spannungs-Steifemodul-Diagramme der mit dem leichtplastischen Schluff durchgeführten Versuchsreihen dargestellt. Die Ermittlung der Steifemoduln erfolgte als Sekantenmoduln von zwei aufeinanderfolgenden Laststufen. Die in den Diagrammen angegebenen mittleren Spannungen stellen jeweils die Mittelwerte der Spannungen dieser beiden Laststufen dar.

Alle Versuchsreihen weisen ähnliche Verläufe in den Spannungs-Steifemodul-Diagrammen auf. Ins-

besondere die spannungsabhängige Zunahme der Steifigkeiten ist aus allen Versuchsverläufen ersichtlich. So liegen die Steifigkeiten bei einer mittleren Spannung von $\sigma_M = 37,5 \text{ kN/m}^2$ zwischen ca. $E_s = 3,7 \text{ MN/m}^2$ (Bild 31) und $16,1 \text{ MN/m}^2$ (Bild 34). Bis zu einer mittleren Spannung von $\sigma_M = 300 \text{ kN/m}^2$ stiegen die Steifigkeiten der Proben auf Werte zwischen $E_s = 16,9 \text{ MN/m}^2$ (Bild 33) und $55,5 \text{ MN/m}^2$ (Bild 29) an.

Die höchsten Steifigkeiten wurden überwiegend an den Proben UL09407 und UL09708 ermittelt. Die niedrigsten Steifigkeiten wurden hingegen an den Versuchen der Reihen UL09508 und UL09514 gemessen. Eindeutige Aussagen über den Einfluss von Trockendichte und Luftporengehalt auf die Steifigkeit ergaben sich aus den Versuchsergebnissen nicht. Mögliche Ursachen hierfür könnten Einflüsse bei der Probeherstellung und der Versuchsdurchführung sein. Womöglich waren aber auch die

Unterschiede in den Einbaubedingungen zu gering, um deutlichere Unterschiede in den Versuchsergebnissen verschiedener Einbaubedingungen feststellen zu können.

Tendenziell wurden im Vergleich der Versuche einer Versuchsreihe die höchsten Steifigkeiten an den Versuchen ohne Sättigung gemessen, gefolgt von den Versuchen mit einer späten Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 200 \text{ MN/m}^2$. Die Versuche mit der frühen Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 12,5 \text{ MN/m}^2$ wiesen im Allgemeinen die niedrigsten Steifigkeitswerte auf.

Zu Beginn der Versuche ist bei vereinzelt Versuchen eine Abnahme der Steifigkeiten zu beobachten (z. B. Bild 27). Dies ist vermutlich auf eine Vorbelastung der Proben während der Herstellung der Probekörper zurückzuführen.

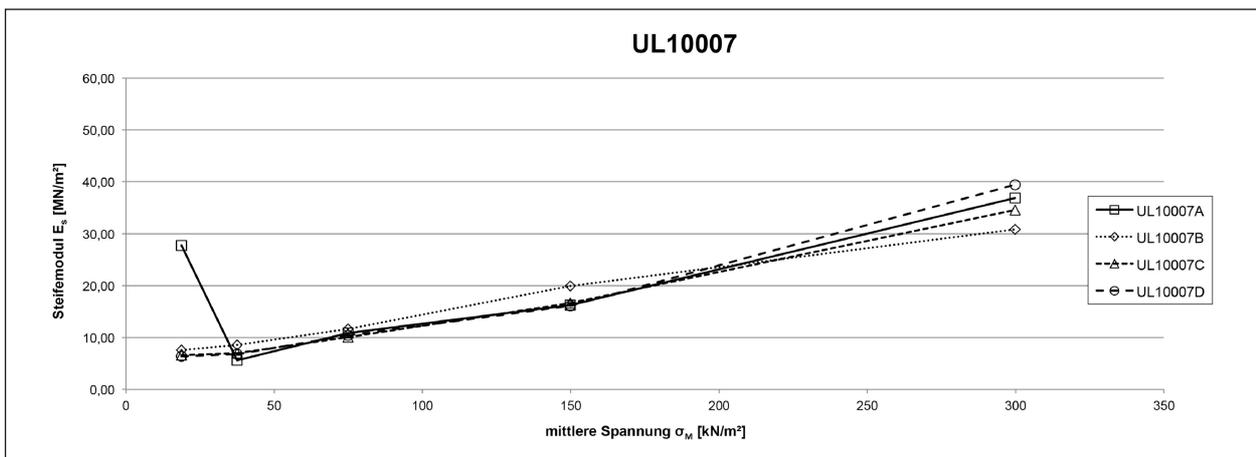


Bild 27: Spannungs-Steifemodul-Diagramm der Versuchsreihe UL10007

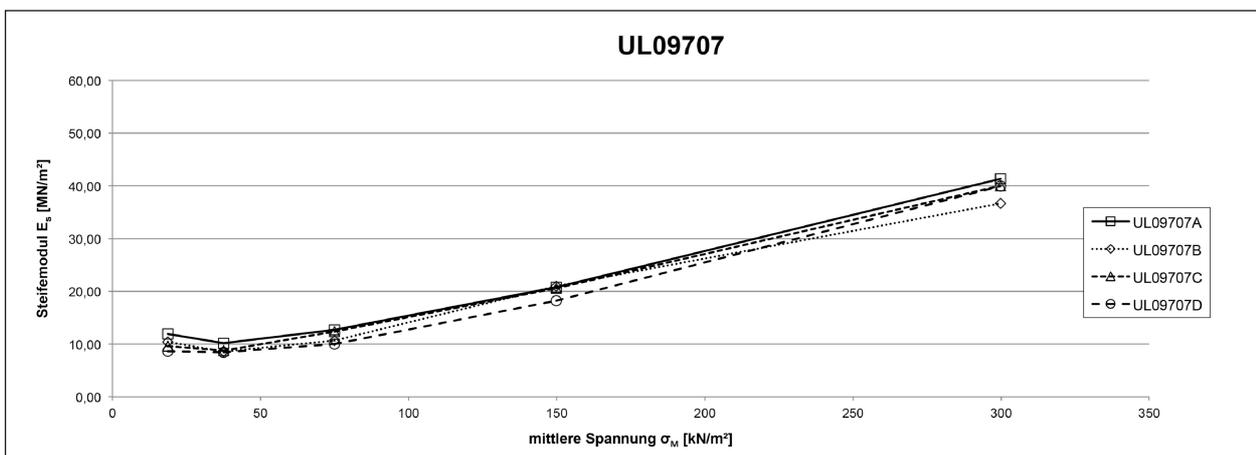


Bild 28: Spannungs-Steifemodul-Diagramm der Versuchsreihe UL09707

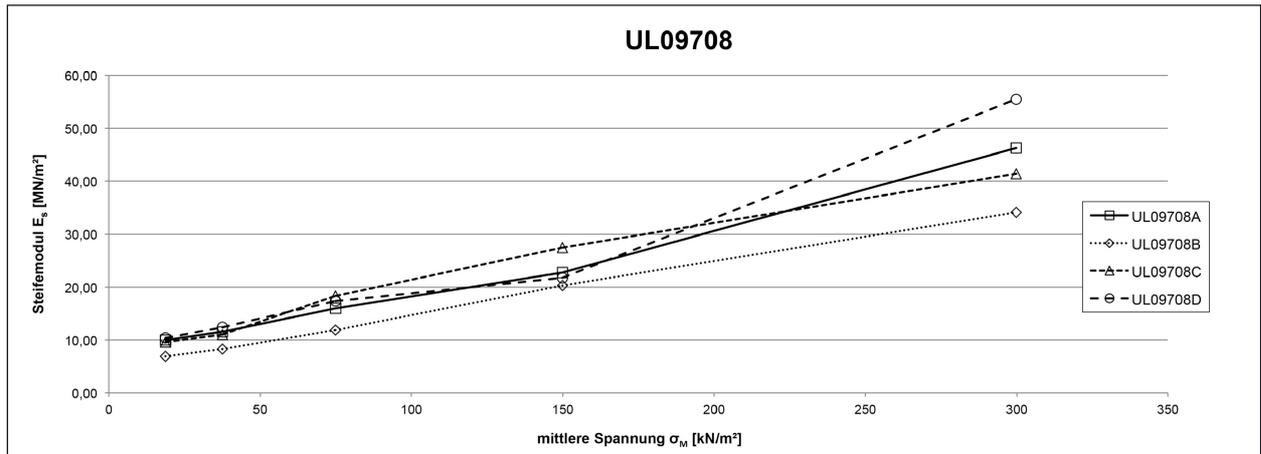


Bild 29: Spannungs-Stifemodul-Diagramm der Versuchsreihe UL09708

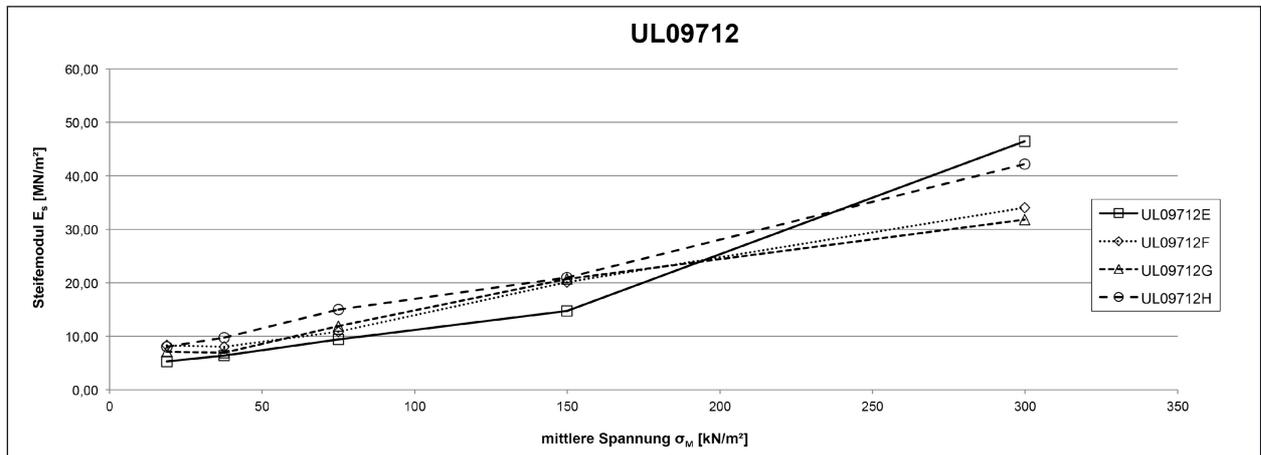


Bild 30: Spannungs-Stifemodul-Diagramm der Versuchsreihe UL09712

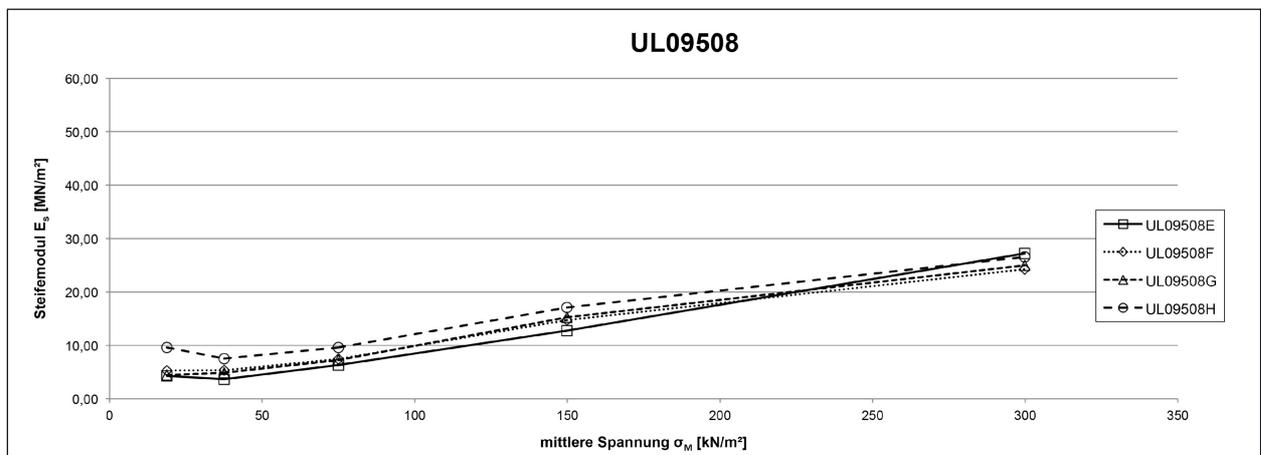


Bild 31: Spannungs-Stifemodul-Diagramm der Versuchsreihe UL09508

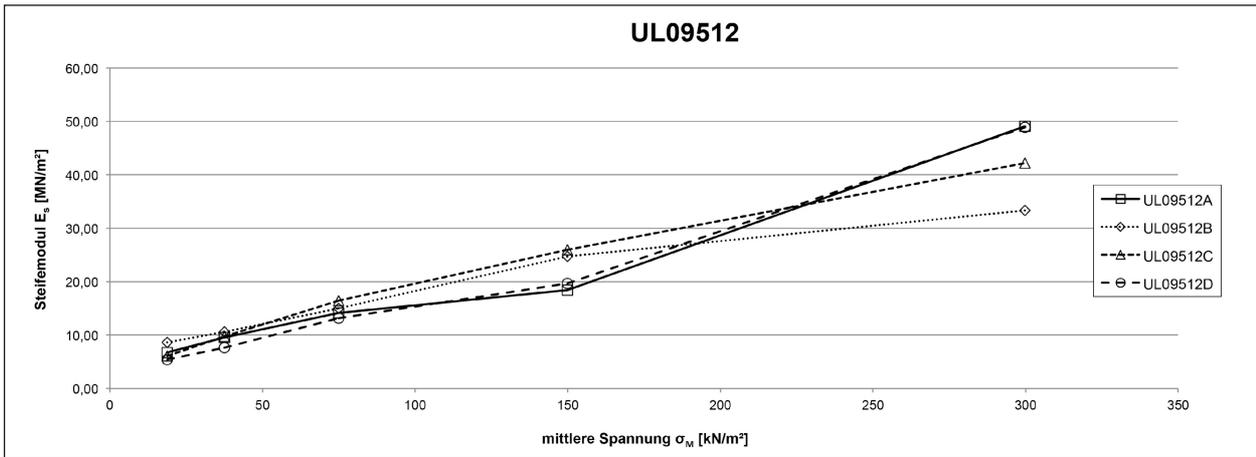


Bild 32: Spannungs-Steifemodul-Diagramm der Versuchsreihe UL09512

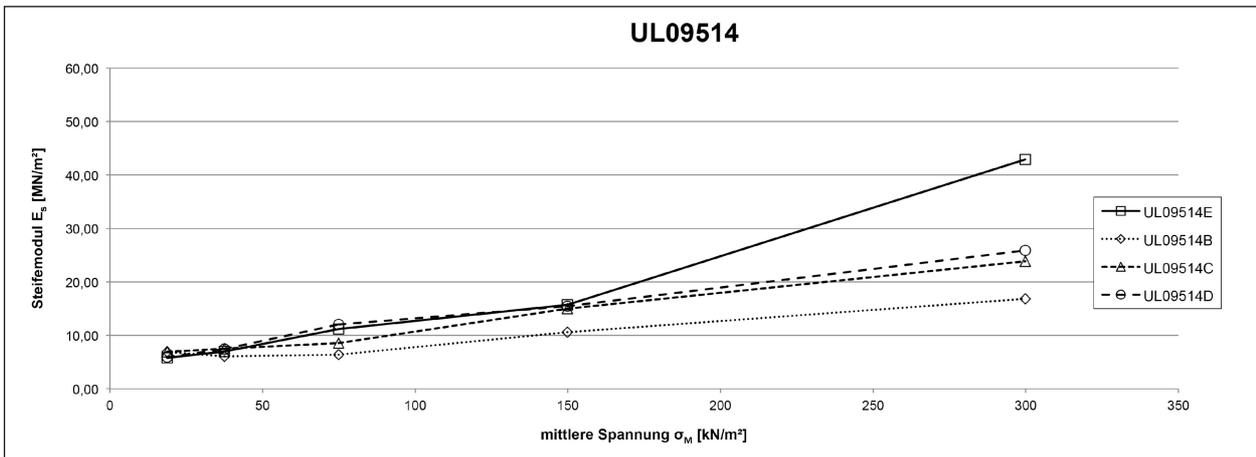


Bild 33: Spannungs-Steifemodul-Diagramm der Versuchsreihe UL09514

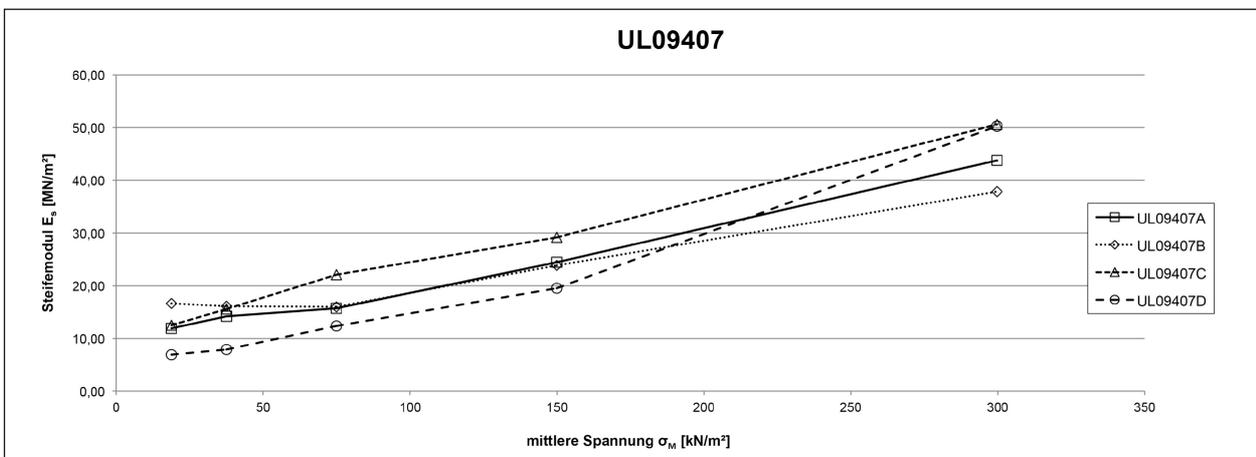


Bild 34: Spannungs-Steifemodul-Diagramm der Versuchsreihe UL09407

In Bild 35 bis Bild 38 sind die Versuche der verschiedenen Versuchsreihen mit dem Boden UL miteinander verglichen, die nicht bzw. bei gleicher Laststufe gesättigt wurden. Dementsprechend sind in Bild 35 die Versuche mit den Endungen A und E dargestellt, in Bild 36 die Versuche B und F, in Bild 37 die Versuche C sowie G und in Bild 38 die Versuche D und H.

Die Versuche ohne Sättigung wiesen überwiegend sehr ähnliche Versuchsverläufe auf (Bild 35). Mit zunehmenden Spannungen stieg der Steifemodul an. Bei den maximalen mittleren Spannungen von $\sigma_M = 300 \text{ kN/m}^2$ lagen die ermittelten Steifigkeiten überwiegend zwischen $E_s = 36,9 \text{ MN/m}^2$ und $49,1 \text{ MN/m}^2$. Lediglich die Probe UL09508E wies mit ca. $E_s = 27,2 \text{ MN/m}^2$ einen im Vergleich zu den restlichen Proben deutlich geringeren Steifigkeitswert auf. Vereinzelt konnte zu Beginn des Versuchs eine Abnahme der Steifigkeiten festgestellt werden (z. B. UL10007A), die vermutlich auf eine Vorbelastung der Proben im Zuge der Probekörperherstellung zurückzuführen ist. Eine weitere Auffälligkeit waren die starken Anstiege in den Steifigkeiten der Proben UL09512A und UL09712E gegen Ende des Versuchs.

Abgesehen von der Probe UL09407B mit einer Steifigkeit von $E_s = 16,7 \text{ MN/m}^2$ wiesen bei den Versuchen mit Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 12,5 \text{ kN/m}^2$ alle Proben zu Beginn des Versuchs ähnliche Steifigkeiten zwischen $E_s = 5,3 \text{ MN/m}^2$ und $10,4 \text{ MN/m}^2$ auf (Bild 36). Mit zunehmenden Spannungen stiegen die Steifigkeiten an. Bei einer mittleren Spannung von $\sigma_M = 300 \text{ kN/m}^2$ lagen die Steifemoduln überwiegend zwischen $E_s = 30,8 \text{ MN/m}^2$

und $37,9 \text{ MN/m}^2$. Die Steifemoduln der Proben UL09508F und UL09514B wiesen einen geringeren Anstieg der Steifigkeiten auf und wiesen bei einer mittleren Spannung von $\sigma_M = 300 \text{ kN/m}^2$ Steifemoduln von $E_s = 16,9 \text{ MN/m}^2$ bzw. $24,3 \text{ MN/m}^2$ auf.

Zu Beginn der Versuche mit einer Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 50 \text{ kN/m}^2$ wiesen die Proben ähnliche Werte für die Steifemoduln zwischen $E_s = 4,5 \text{ MN/m}^2$ und $12,5 \text{ MN/m}^2$ auf. Mit zunehmender Spannung stiegen die Steifemoduln unterschiedlich stark an. Dementsprechend wiesen die Steifemoduln bei einer mittleren Spannung von $\sigma_M = 300 \text{ kN/m}^2$ deutliche Unterschiede auf. Der kleinste Steifemodul wurde mit $E_s = 23,8 \text{ MN/m}^2$ für UL09512C ermittelt, der größte mit $E_s = 50,6 \text{ MN/m}^2$ für UL09407C.

Auch die Proben der Versuche D und H des Versuchsbodens UL mit einer Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 200 \text{ kN/m}^2$ wiesen zu Beginn sehr ähnliche Steifemoduln auf. Diese lagen zwischen $E_s = 5,4 \text{ MN/m}^2$ und $10,4 \text{ MN/m}^2$. Bis zu einer mittleren Spannung von $\sigma_M = 150 \text{ kN/m}^2$ wiesen die Proben einen überwiegend ähnlichen Anstieg der Steifigkeiten mit zunehmender Spannung auf. Nach der Sättigung zeigten sich jedoch deutliche Unterschiede im weiteren Anstieg der Steifemoduln. Die Versuche UL09514D und UL09508H wiesen nur eine geringe Zunahme der Steifigkeiten von $E_s = 15,5 \text{ MN/m}^2$ bzw. $17,1 \text{ MN/m}^2$ bis auf $E_s = 25,9 \text{ MN/m}^2$ bzw. $26,6 \text{ MN/m}^2$ auf. Bei den restlichen Versuchen stiegen die Steifemoduln von Werten zwischen $E_s = 16,1 \text{ MN/m}^2$ und $21,7 \text{ MN/m}^2$ bis auf Werte zwischen $E_s = 39,5 \text{ MN/m}^2$ und $55,5 \text{ MN/m}^2$.

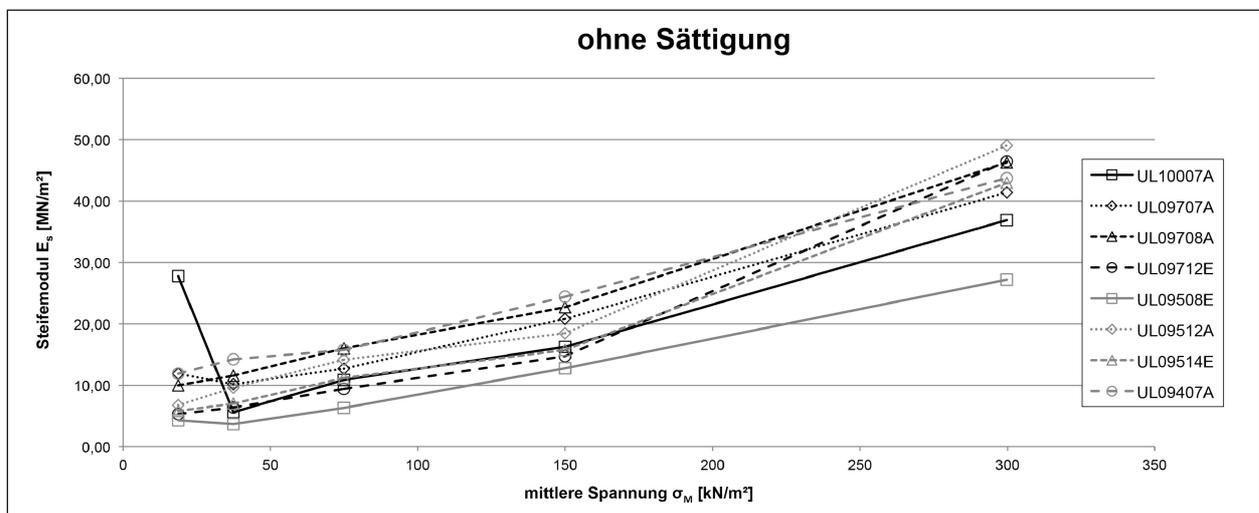


Bild 35: Spannungs-Steifemodul-Diagramm der Versuche ohne Sättigung

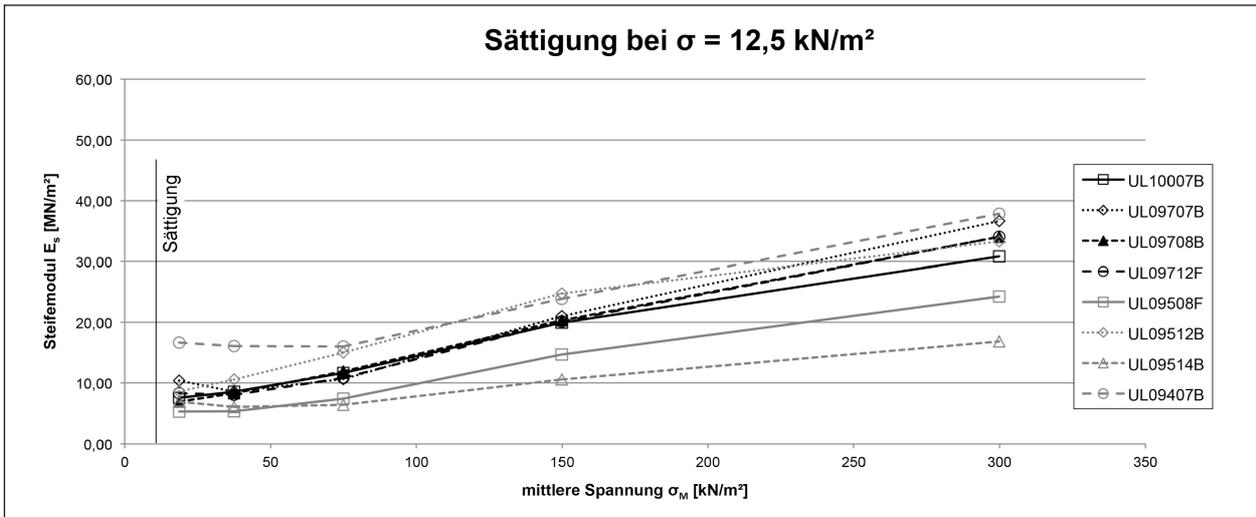


Bild 36: Spannungs-Steifemodul-Diagramm der Versuche mit Sättigung bei einer mittleren Spannung von 12,5 kN/m²

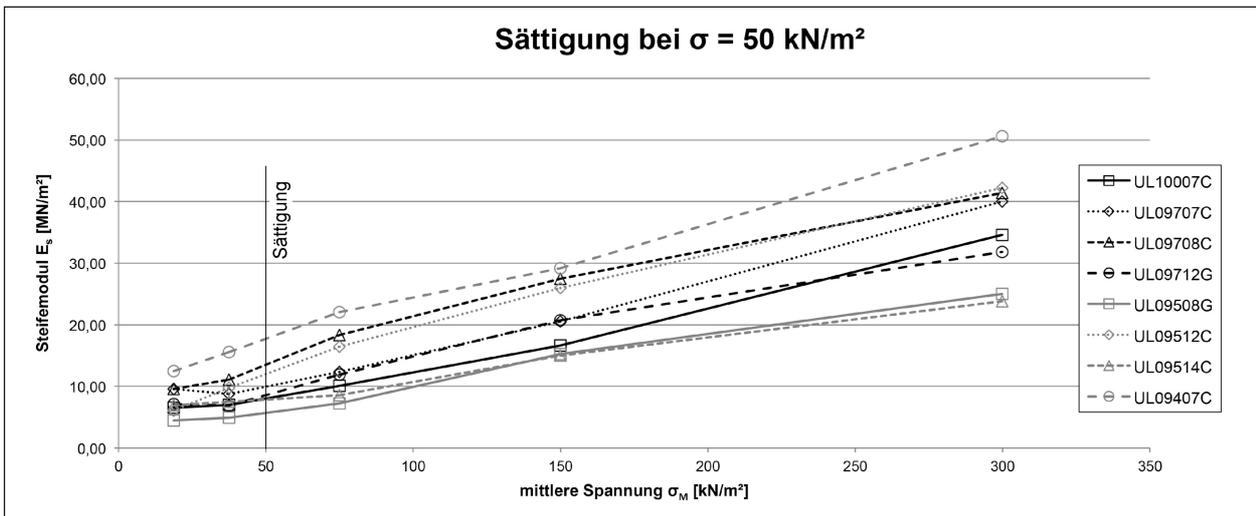


Bild 37: Spannungs-Steifemodul-Diagramm der Versuche mit Sättigung bei einer mittleren Spannung von 50 kN/m²

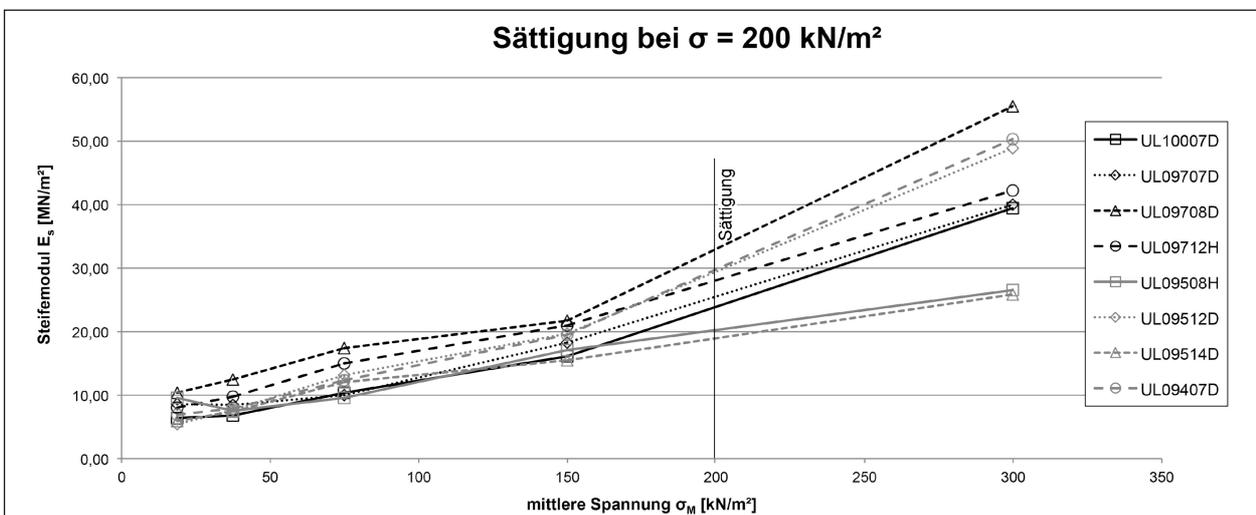


Bild 38: Spannungs-Steifemodul-Diagramm der Versuche mit Sättigung bei einer mittleren Spannung von 200 kN/m²

In Bild 39 bis Bild 54 sind die Spannungs-Zusammendrückungsdiagramme für die verschiedenen Versuchsreihen aufgetragen. Hierbei wurde die bezogene Zusammendrückung, also das Verhältnis der Zusammendrückung der Probe zur Einbauprobenhöhe, am Ende einer Laststufe gegen die bei der Laststufe wirkende Spannung sowohl für die Belastung als auch für die Entlastung aufgetragen. Zur Gewährleistung der Übersichtlichkeit sind lediglich jeweils zwei Versuche in einem Diagramm dargestellt. Zunächst werden jeweils die Versuche ohne Sättigung und mit einer Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 200 \text{ kN/m}^2$ verglichen, anschließend die Versuche mit einer Sättigung bei Spannungen von $\sigma = 12,5 \text{ kN/m}^2$ bzw. 50 kN/m^2 . Somit werden jeweils Versuche mit einem möglichst ähnlichen Versuchsverlauf verglichen, nämlich jene ohne Sättigung mit denen mit später Sättigung bzw. solche mit einer Wasserzugabe bei niedrigen und mittleren Spannungen.

Die Verläufe der einzelnen Versuchsreihen ähneln sich. Mit zunehmender Last verflacht sich bei allen Versuchen die Spannungs-Zusammendrückungskurve. Dies bedeutet, dass die bezogene Zusammendrückung mit steigender Spannung weniger stark zunimmt, die Proben also steifer reagieren. Unterschiede zwischen den Kurven der einzelnen Einbauzustände sind jedoch bei der Änderung der Zusammendrückung und somit der Steigung der Kurven ersichtlich.

Bei der höchsten aufgetragenen Spannung von $\sigma = 400 \text{ kN/m}^2$ wurde mit $s' = 3,5 \%$ für die Probe UL09514F (Bild 52) die maximale bezogene Zusammendrückung aller Proben des Versuchsbodens UL ermittelt. Der kleinste Wert wurde bei dieser Spannung mit $s' = 1,2 \%$ an der Probe UL09407C (Bild 54) festgestellt.

Bei den Proben, die gesättigt wurden, sind Hebungs- und Sackungsvorgänge durch Änderungen der bezogenen Setzung bei gleichbleibender Spannung als senkrechte Linien ersichtlich (z. B. Kurve UL09514H in Bild 51). In den überwiegenden Fällen waren die durch die Sättigung hervorgerufenen, spannungsunabhängigen Verformungen so gering, dass sie in den Diagrammen nicht erkennbar sind.

Die Entlastungsäste wiesen zunächst bei allen Versuchen nur geringe Steigungen auf. Mit zunehmender Entlastung nahm die bezogene Zusammendrückung jedoch ab bzw. die Steigung der Kurven zu. Da die Verformungen aber nicht vollständig elastisch waren, wurde die Ausgangsprobenhöhe bei den Versuchen üblicherweise nicht wieder erreicht.

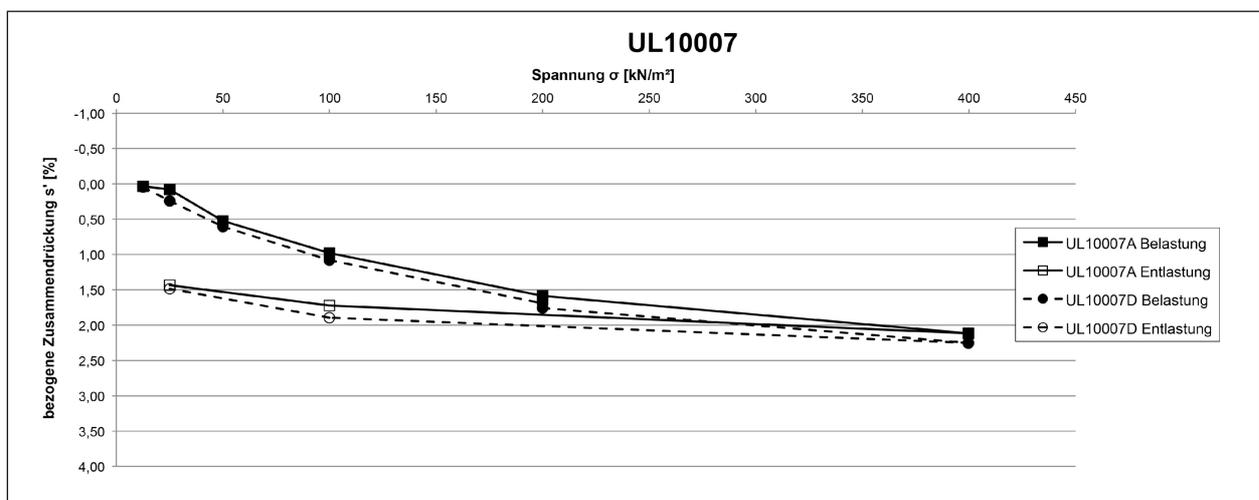


Bild 39: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche UL10007A und UL10007D

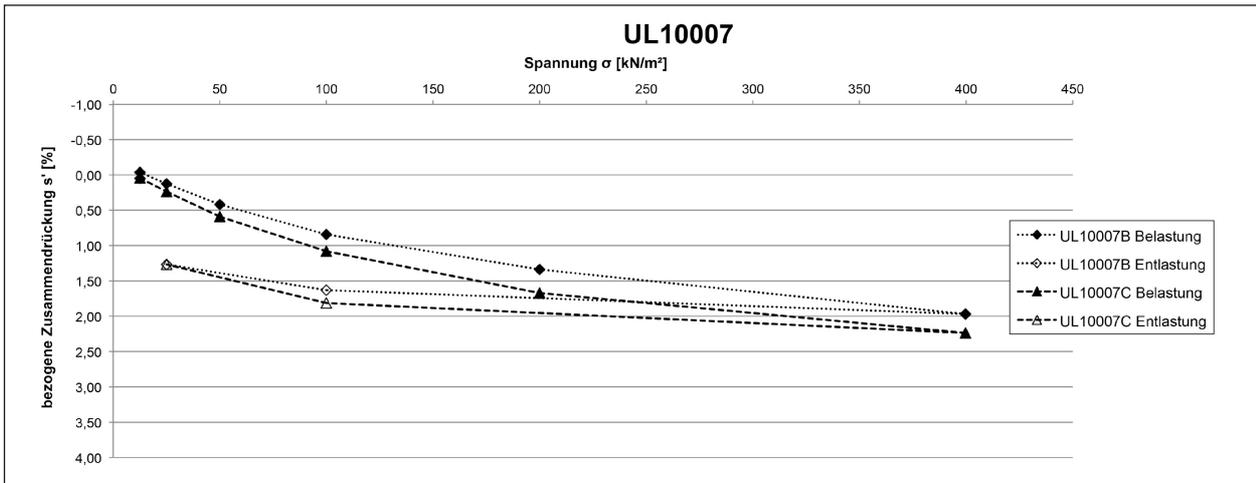


Bild 40: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche UL10007B und UL10007C

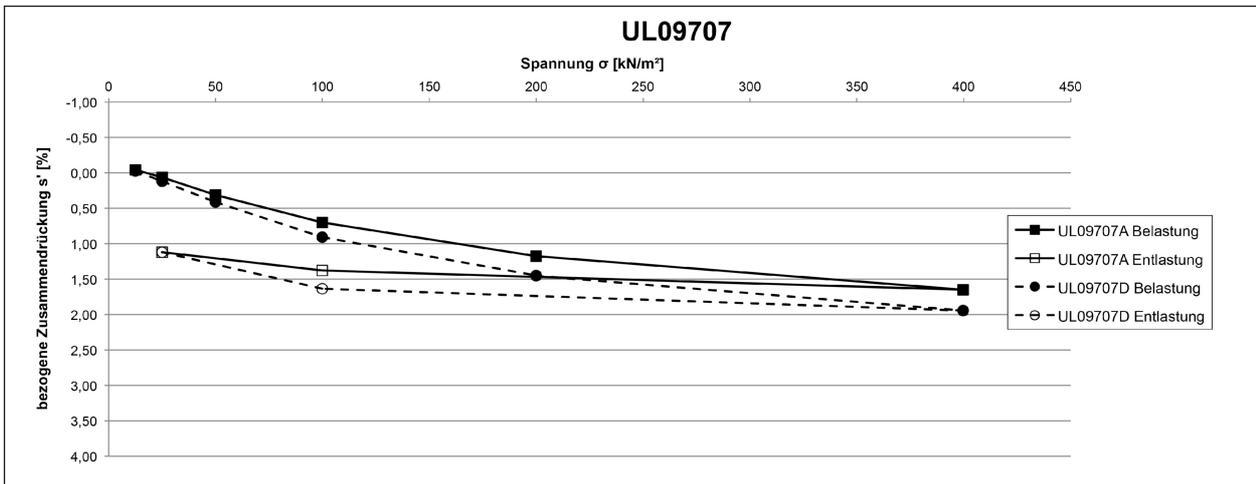


Bild 41: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche UL09707A und UL09707D

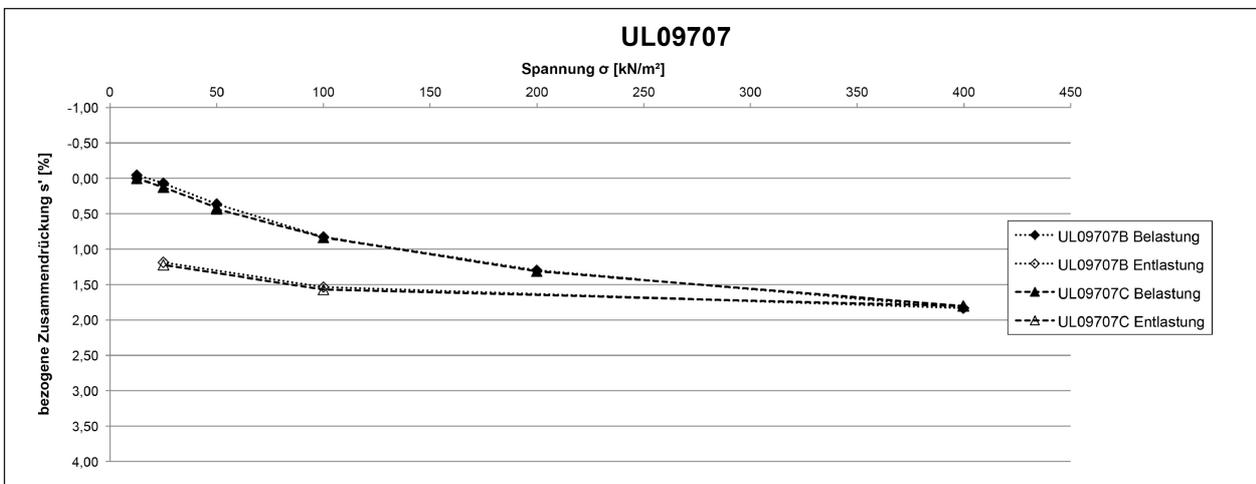


Bild 42: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche UL09707B und UL09707C

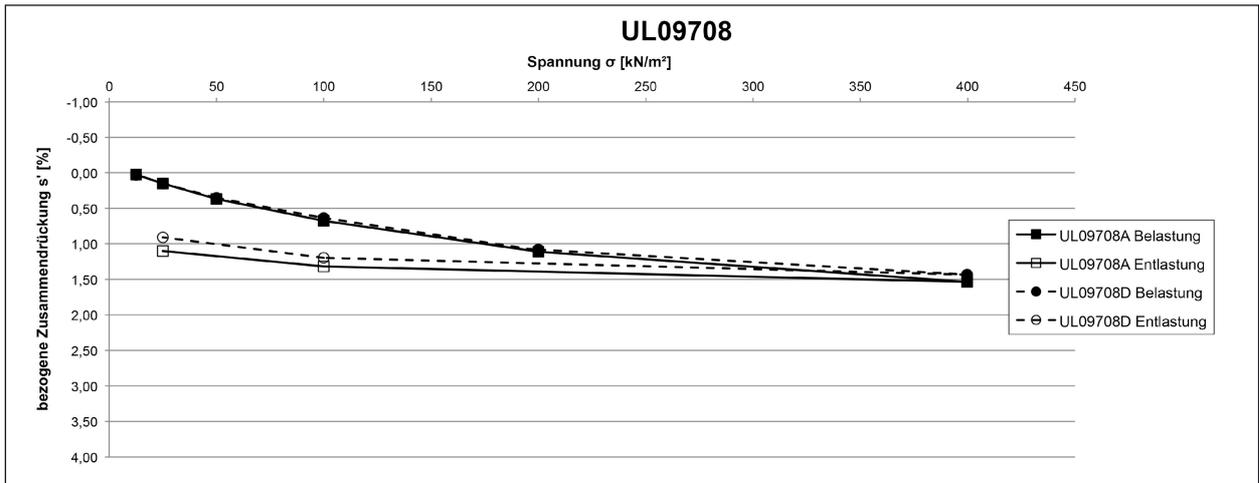


Bild 43: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche UL09708A und UL09708D

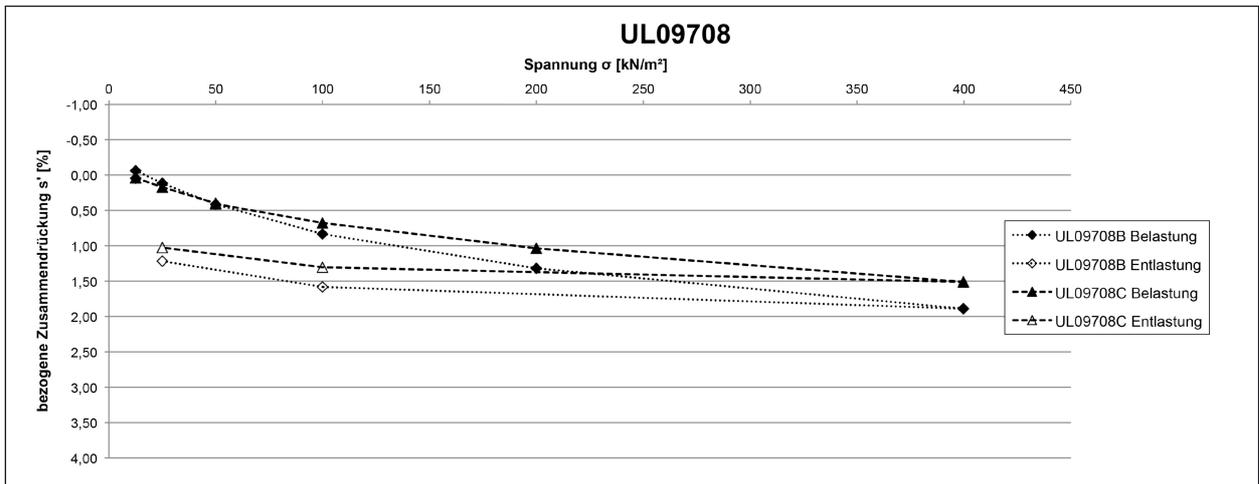


Bild 44: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche UL09708B und UL09708C

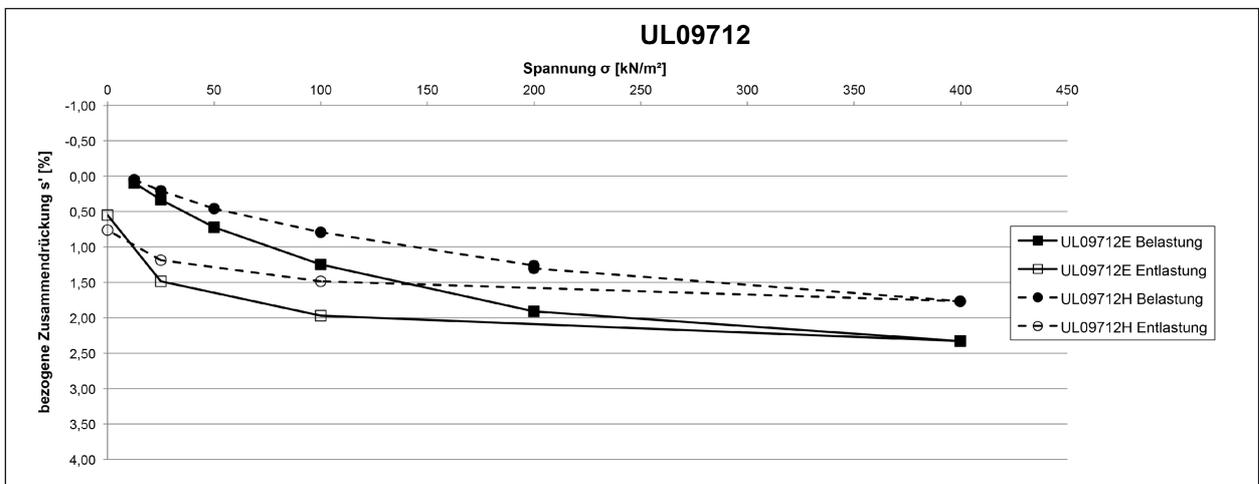


Bild 45: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche UL09712E und UL09712H

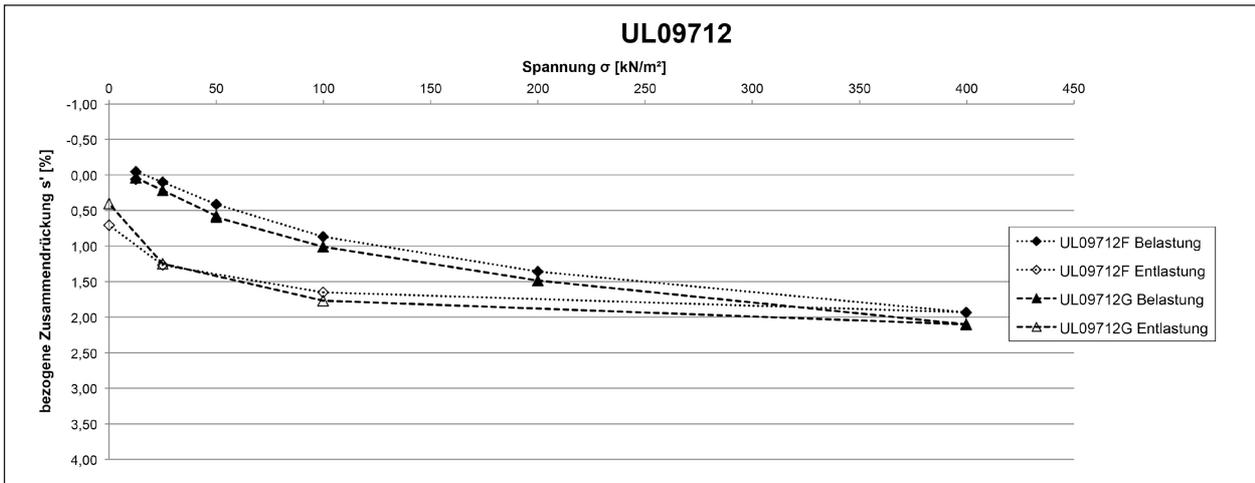


Bild 46: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche UL09712F und UL09712G

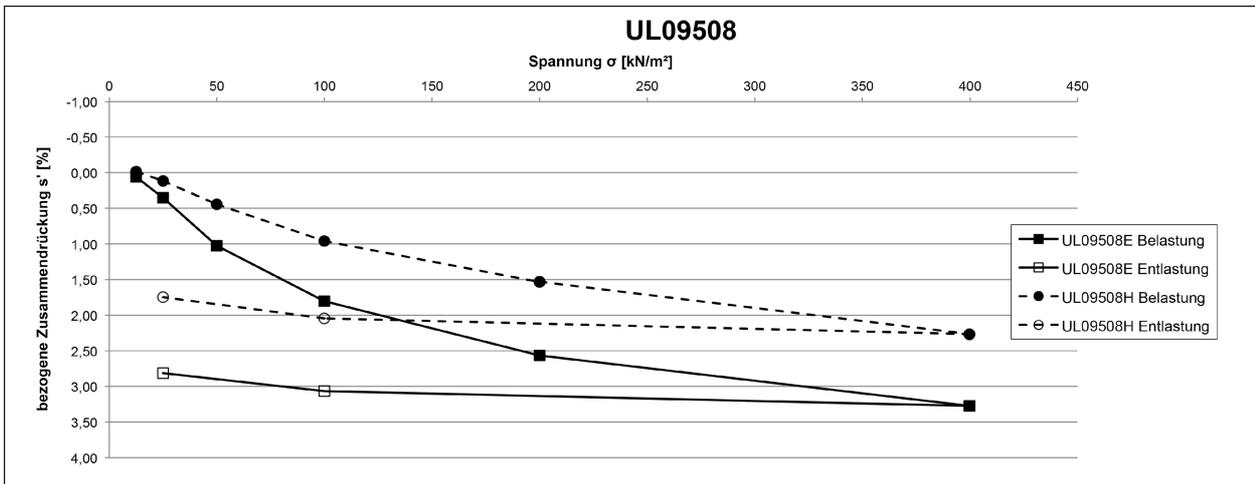


Bild 47: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche UL09508E und UL09508H

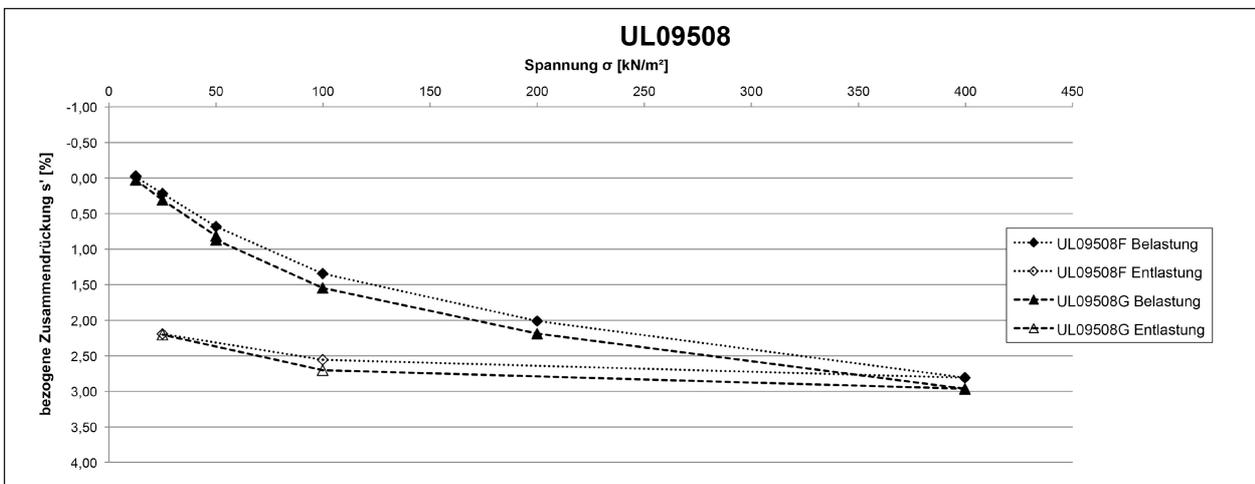


Bild 48: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche UL09508F und UL09508G

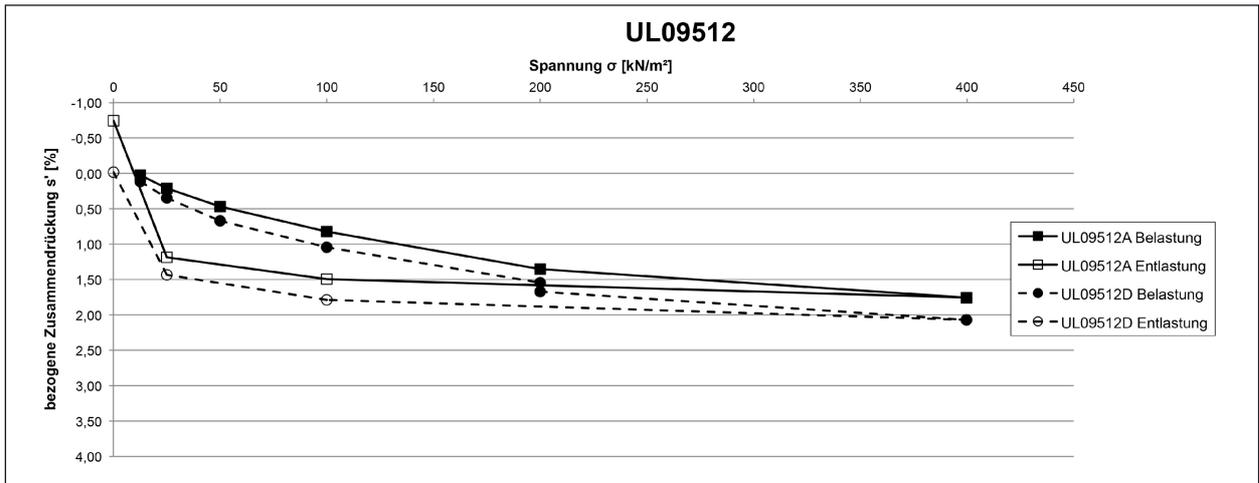


Bild 49: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche UL09512E und UL09512H

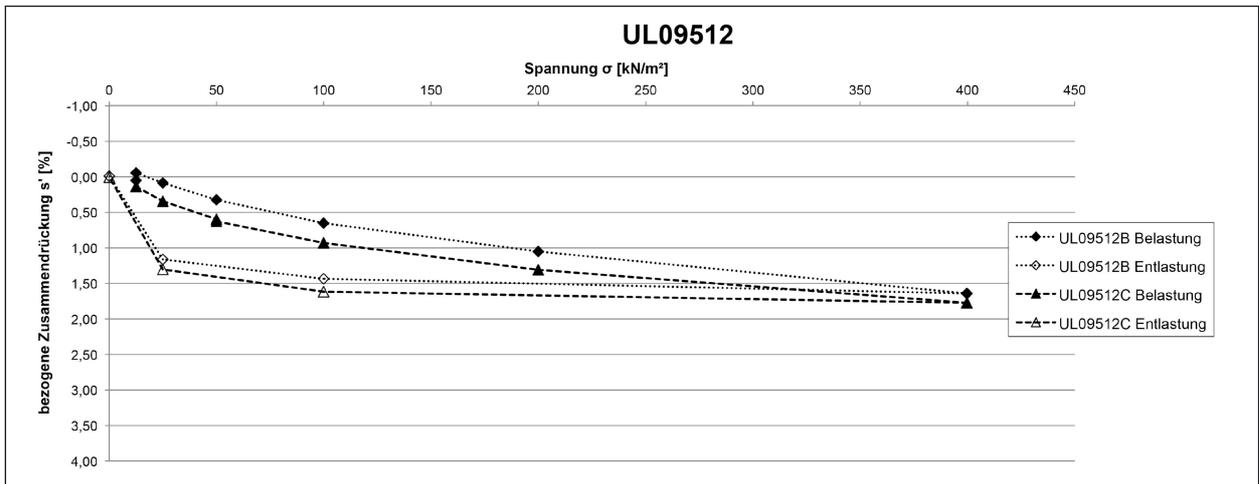


Bild 50: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche UL09512F und UL09512G

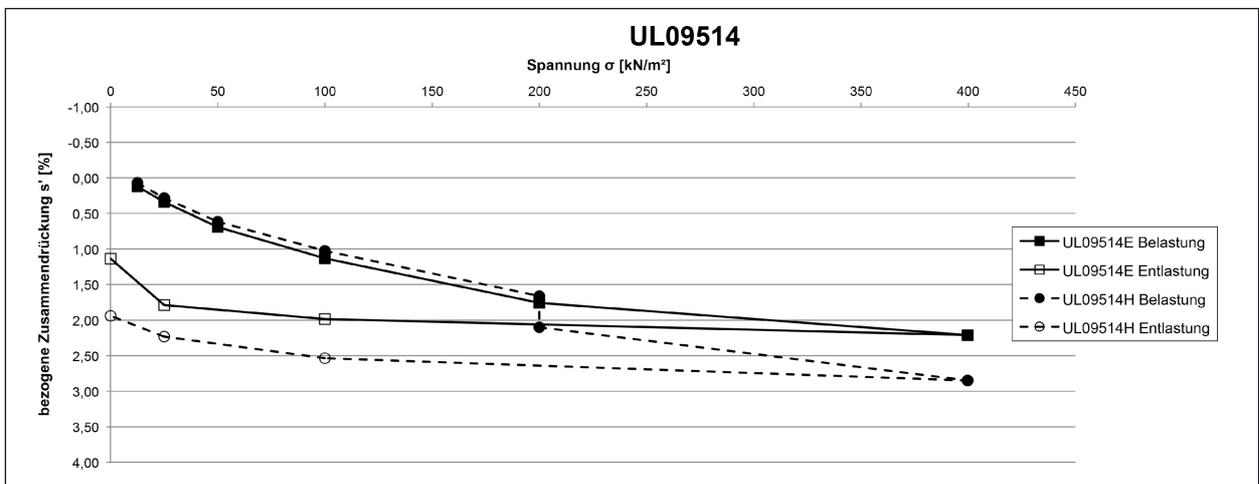


Bild 51: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche UL09514E und UL09514H

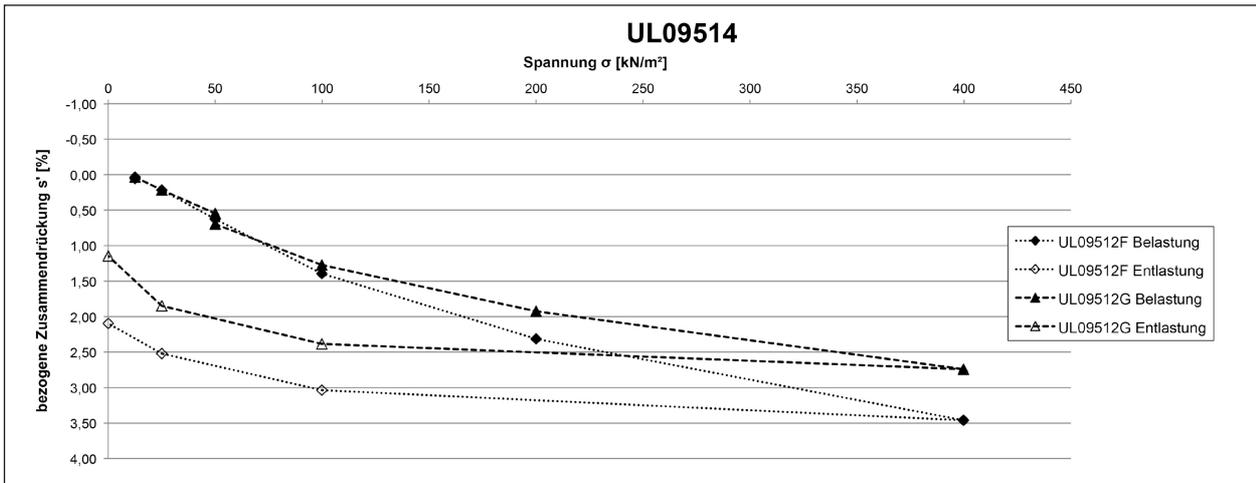


Bild 52: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche UL09514F und UL09514G

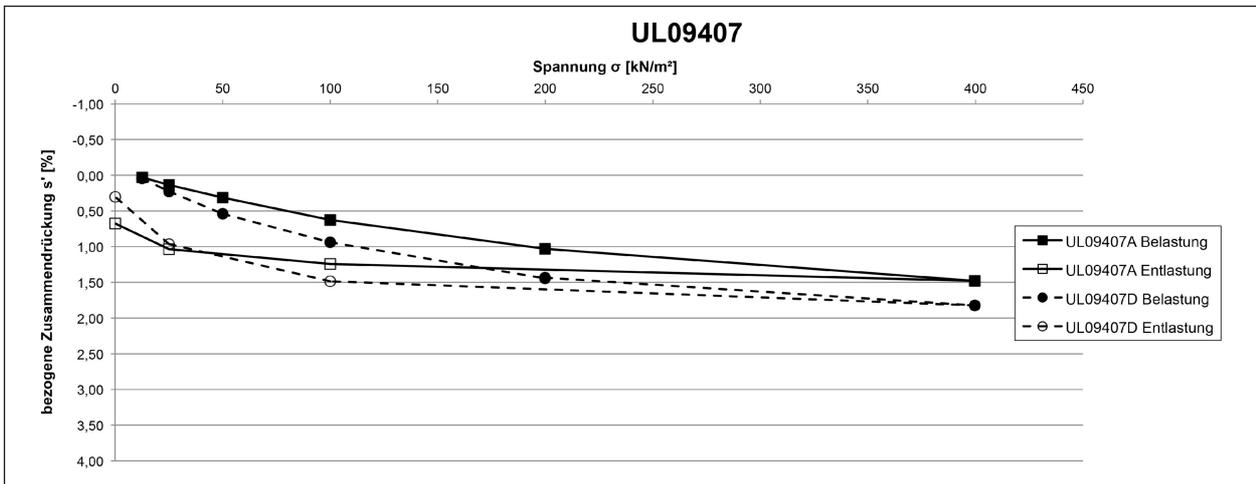


Bild 53: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche UL09407A und UL09407D

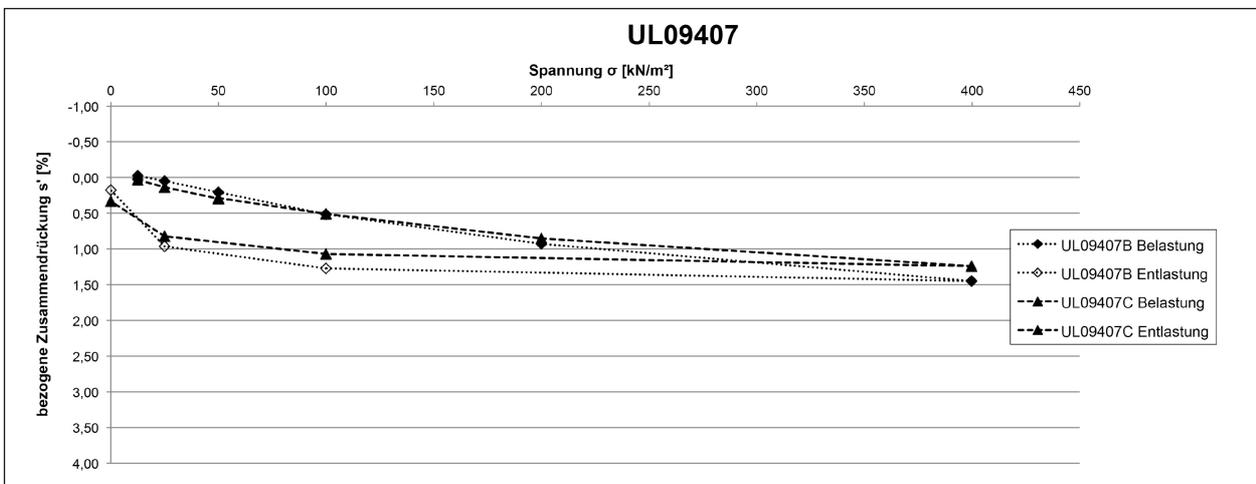


Bild 54: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche UL09407B und UL09407C

In Bild 55 bis Bild 62 werden die Versuche der verschiedenen Versuchsreihen hinsichtlich ihres Spannungs-Zusammendrückungsverhaltens miteinander verglichen, die nicht bzw. bei gleicher Laststufe gesättigt wurden. Aus den Bildern ist ersichtlich, dass alle Versuchsreihen einen ähnlichen Versuchsverlauf aufweisen. Erneut ist während der Belastung mit steigender Spannung eine Abnahme der Steigung der Spannungs-Zusammendrückungskurve ersichtlich. Der Entlastungsast weist anschließend ebenfalls höhere Steigungen mit abnehmender Spannung, also zunehmender Entlastung, auf.

Bei den Versuchen ohne Sättigung lag die bezogene Zusammendrückung der Proben bei der höchsten untersuchten Spannung zwischen $s' = 1,5\%$ und $3,5\%$ (Bild 55, Bild 56). Die geringsten Verformungen wiesen die Proben UL09707A, UL09708A,

UL09512A und UL09512A auf. Die größten Verformungen wurden bei der Probe UL09508E gemessen.

Während der Versuche mit Proben, die bei einer Spannung von $\sigma = 12,5\text{ kN/m}^2$ gesättigt wurden, konnten bei einer maximalen Spannung von $\sigma = 400\text{ kN/m}^2$ ebenfalls bezogene Zusammendrückungen zwischen $s' = 1,5\%$ und $3,5\%$ festgestellt werden (Bild 57, Bild 58). Die größten Verformungen wurden bei den Proben UL09508F und UL09514F gemessen, die geringsten Verformungen wies die Probe UL09407B auf. Die restlichen Proben wiesen Verformungen auf, die geringfügig größer waren als die der Probe UL09407B.

Bei den Versuchen mit Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 50\text{ kN/m}^2$ wurden bei der maximalen

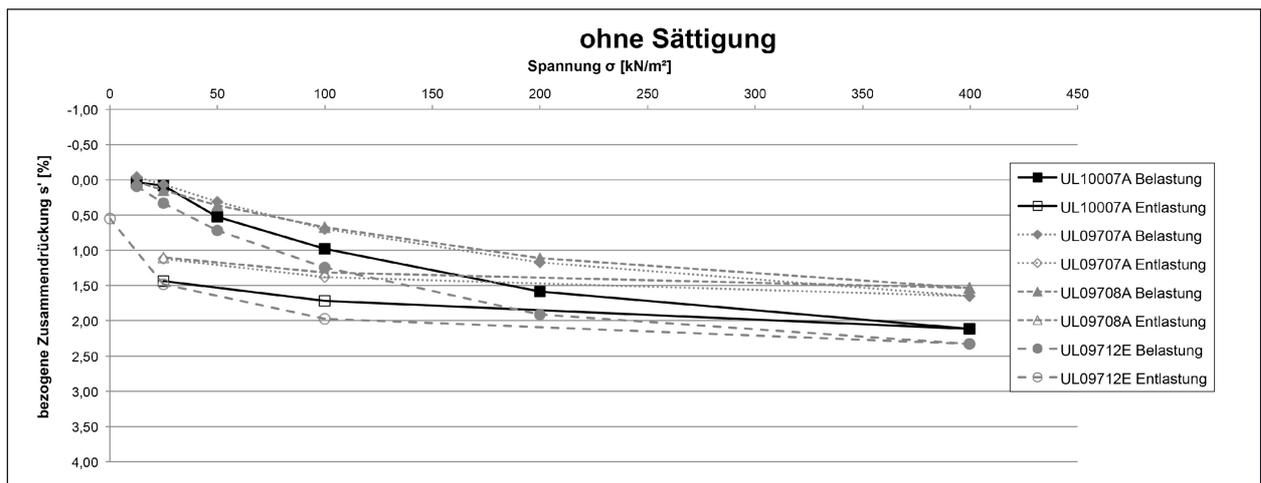


Bild 55: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche UL10007A, UL09707A, UL09708A und UL09712E (ohne Sättigung)

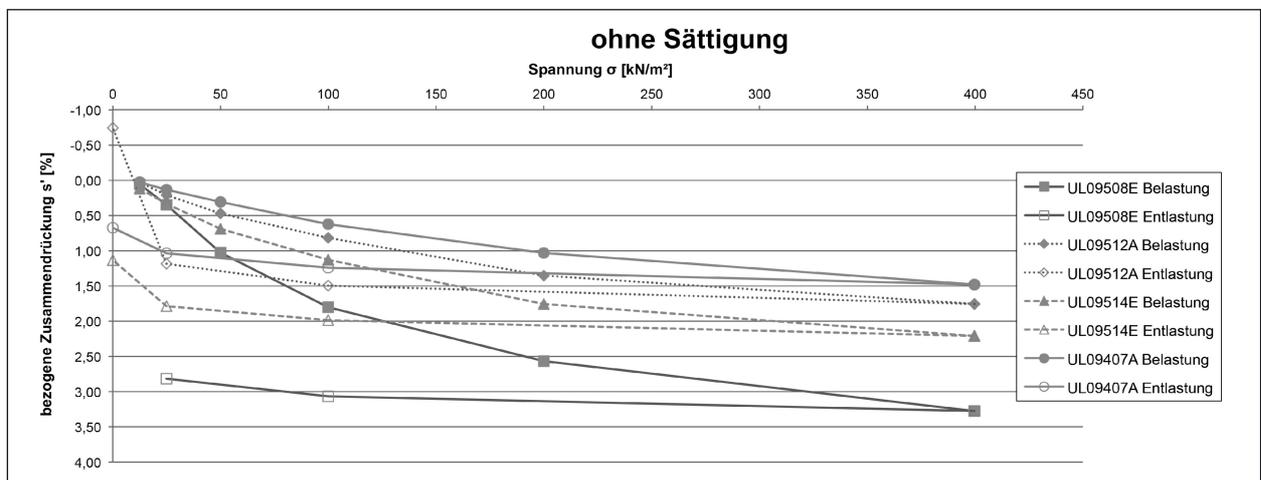


Bild 56: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche UL09508E, UL09512A, UL09514E und UL09407A (ohne Sättigung)

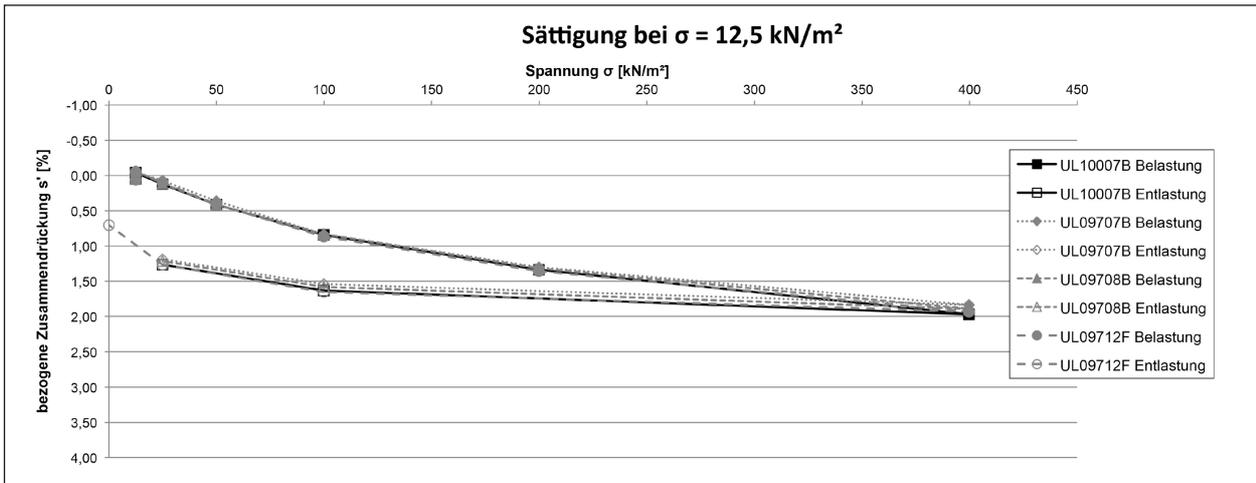


Bild 57: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche UL10007B, UL09707B, UL09708B und UL09712F (Sättigung bei einer mittleren Spannung von 12,5 kN/m²)

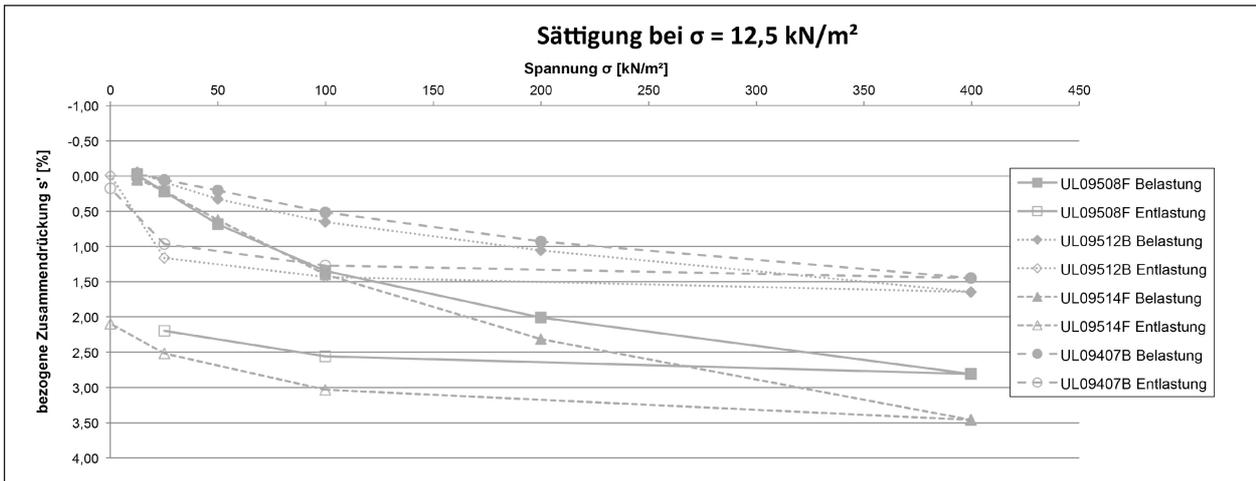


Bild 58: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche UL09508F, UL09512B, UL09514F und UL09407B (Sättigung bei einer mittleren Spannung von 12,5 kN/m²)

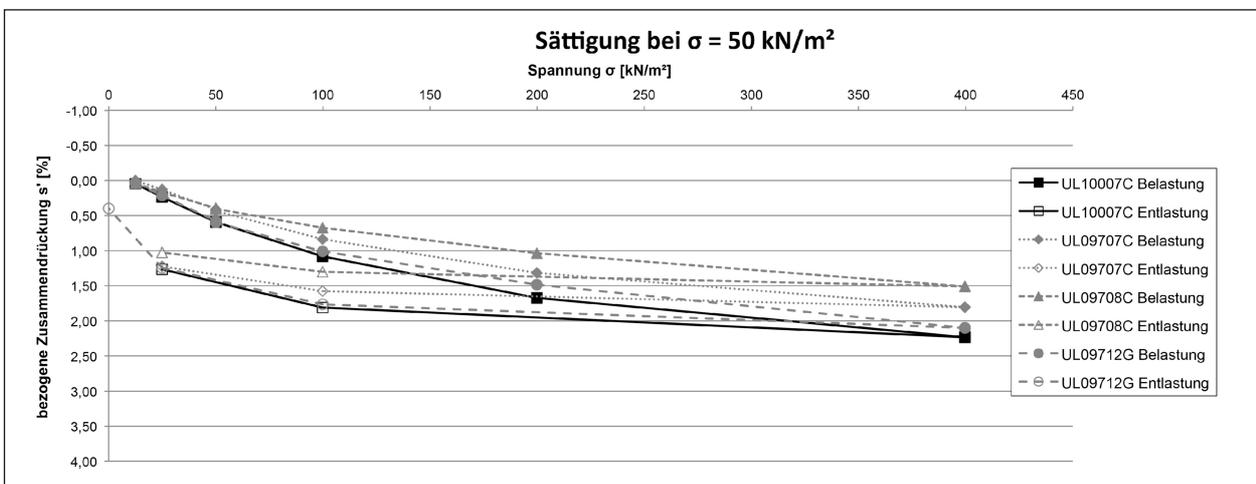


Bild 59: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche UL10007C, UL09707C, UL09708C und UL09712G (Sättigung bei einer mittleren Spannung von 50 kN/m²)

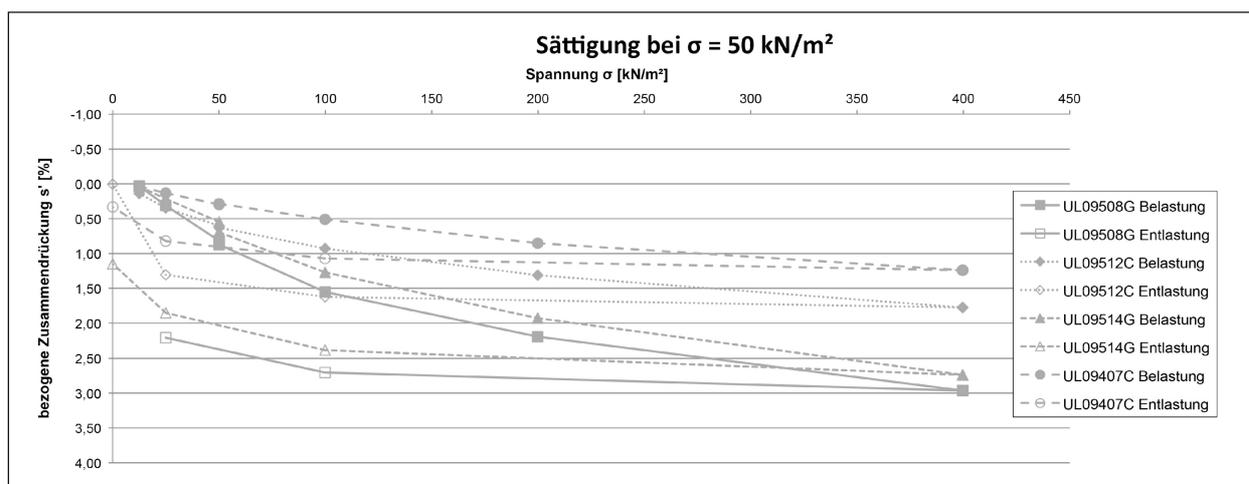


Bild 60: Spannungs-Zusammendrücksungsdiagramm der UL09508G, UL09512C, UL09514G und UL09407C (Sättigung bei einer mittleren Spannung von 50 kN/m^2)

Spannung bezogene Zusammendrückungen von $s' = 1,2 \%$ bis $3,0 \%$ ermittelt (Bild 59, Bild 60). Die Probe UL09407C wies erneut die geringsten Verformungen auf, die Proben UL09508G und UL09514G die größten. Die restlichen Proben zeigten Werte zwischen $s' = 1,5 \%$ und $2,2 \%$.

Die Proben, die bei einer Spannung von $\sigma = 200 \text{ kN/m}^2$ gesättigt wurden, wiesen bei der höchsten untersuchten Spannung bezogene Zusammendrückungen zwischen $s' = 1,5 \%$ und $2,9 \%$ auf (Bild 61, Bild 62). Die größten Verformungen wurden erneut an der Probe der Reihe UL09514 gemessen, die geringsten wies die Probe UL09708D auf.

Zweifelsfreie Aussagen über den Einfluss von Trockendichte oder Luftporenanteil konnten anhand der Auswertung der Spannungs-Zusammendrücksungskurven der Versuche mit dem Boden UL nicht getroffen werden. Die festgestellte Streuung der Ergebnisse ließ in dieser Hinsicht keine eindeutige Interpretation der Ergebnisse zu. Bei den Ergebnissen der Versuche, die nach ZTV E-StB 09 zulässige Einbaubedingungen aufwiesen, konnten jedoch keine auffälligen Sackungs- oder Hebungerscheinungen und daraus resultierende deutliche Änderungen hinsichtlich der bezogenen Zusammendrückung festgestellt werden.

Bei Spannungen von $\sigma = 12,5 \text{ kN/m}^2$, 50 kN/m^2 bzw. 200 kN/m^2 wurden drei der vier Probekörper einer Einbaubedingung des Bodens UL für 24 h gesättigt (Versuche B, C, D bzw. F, G, H). In Bild 63 sind die allein durch die Wasserzugabe hervorgeru-

fenen Änderungen der bezogenen Zusammendrückung gegen die jeweiligen Spannungen, bei denen die Sättigung erfolgte, aufgetragen. Für die Auswertung hinsichtlich Hebungen und Sackungen wurde jeweils die Differenz der bezogenen Zusammendrückung s' direkt vor und am Ende der Wasserzugabe nach 24 h gebildet.

Bei der überwiegenden Anzahl von Versuchen konnten bei einer Spannung von $\sigma = 12,5 \text{ kN/m}^2$ geringe Hebungen von maximal ca. $0,1 \%$ der Probenhöhe beobachtet werden. Lediglich der Versuch UL09508F zeigte sehr geringe Sackungen.

Während der Sättigung der Proben bei einer Spannung von $\sigma = 50 \text{ kN/m}^2$ traten bei der überwiegenden Anzahl der Probekörper geringe Sackungen bis $0,05 \%$ der Probenhöhe auf. Eine deutlichere Sackung wies jedoch die Probe UL09514G auf. Die Sackungen betragen bei dieser Probe $0,15 \%$ der Probenhöhe.

Deutliche Sackungen konnten bei mehreren Proben während der Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 200 \text{ kN/m}^2$ beobachtet werden. Hierbei handelte es sich um die Reihen UL09514, UL09512, UL10007 und UL09712, die eher hohe Luftporengehalte und niedrige Einbaudichten aufweisen. Diese Proben erfuhren Stauchungen zwischen $0,04 \%$ und $0,44 \%$ ihrer Probenhöhe. Die maximale Stauchung wurde bei der Probe UL09514H ermittelt. Nach den ZTV E-StB 09 handelt es sich hierbei um eine nicht zulässige Einbaubedingung. Bei den restlichen Proben wurden lediglich minimale Sackungen und Hebungen registriert.

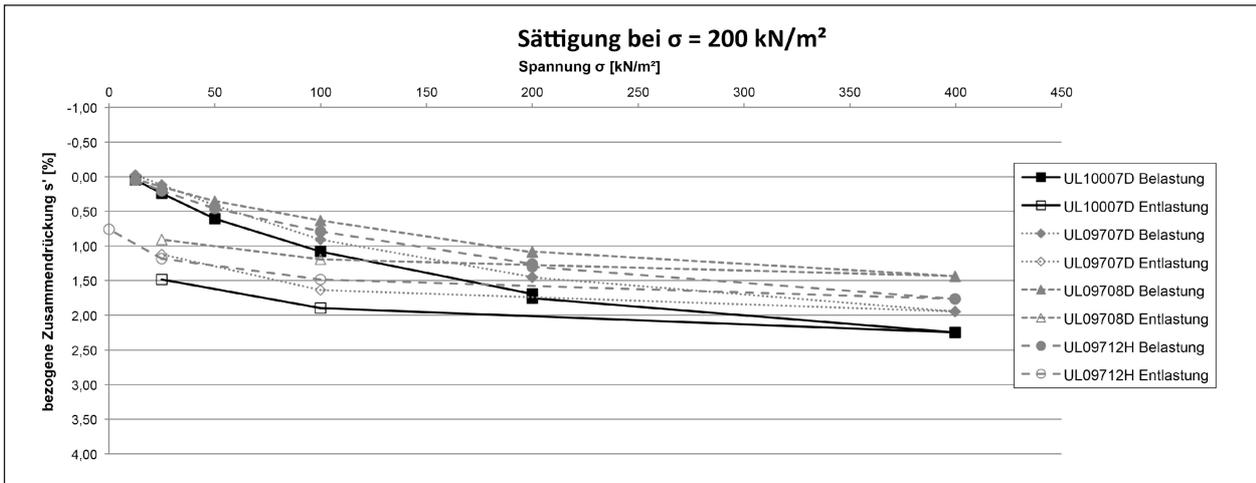


Bild 61: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche UL10007D, UL09707D, UL09708D und UL09712H (Sättigung bei einer mittleren Spannung von 200 kN/m²)

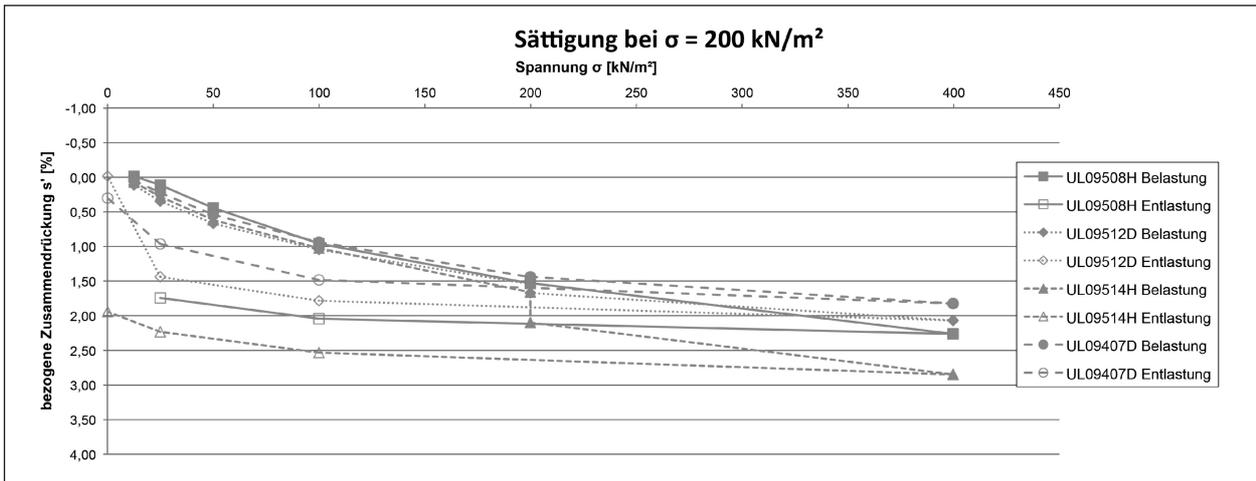


Bild 62: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche UL09508H, UL09512D, UL09514H und UL09407D (Sättigung bei einer mittleren Spannung von 200 kN/m²)

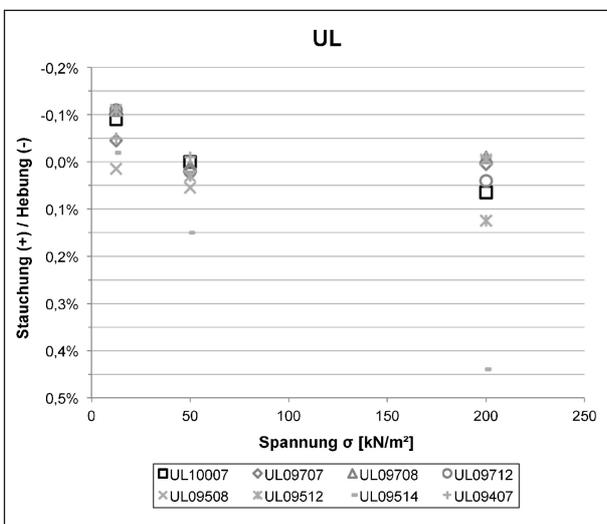


Bild 63: Auswertung der durch Wasserzugabe bei unterschiedlichen Spannungen verursachten Stauchungen und Hebungen

Mittelplastischer Ton (TM)

In Bild 64 bis Bild 70 sind die Einbau- und Ausbaupunkte der mit dem aus Zolling stammenden Lößlehm durchgeführten Versuche in Proctordiagrammen dargestellt. Enthalten sind dabei neben der Proctorkurve auch die Sättigungslinie ($S_r = 1$ bzw. $n_a = 0$ Vol.-%) und die Isolinien für Luftporenanteile von $n_a = 4$ Vol.-%, 8 Vol.-% und 12 Vol.-%. Die Einbaubedingungen gemäß dem gewählten Versuchsprogramm wurden beim Großteil der Proben des Versuchsbodens TM erreicht. Bei der Versuchsreihe TM09708 (Bild 67) konnten Abweichungen vom geplanten Sollinbauwassergehalt festgestellt werden, die geringfügig jenseits der 1%-Punkt-Grenze lagen. Vereinzelt wurden zudem die geplanten Einbautrockendichten geringfügig überschritten. Die überwiegende Anzahl der Versuche

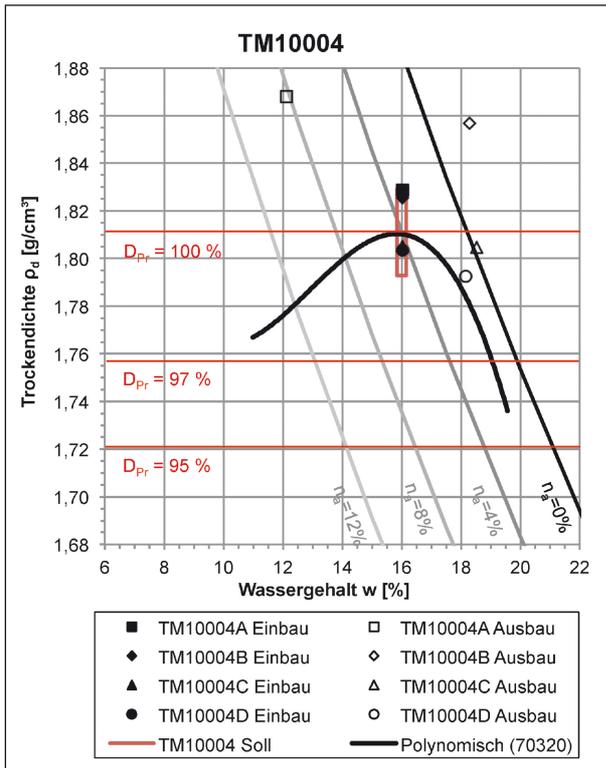


Bild 64: Erreichte Werte für Trockendichte und Wassergehalt bei Ein- und Ausbau der Proben TM10004

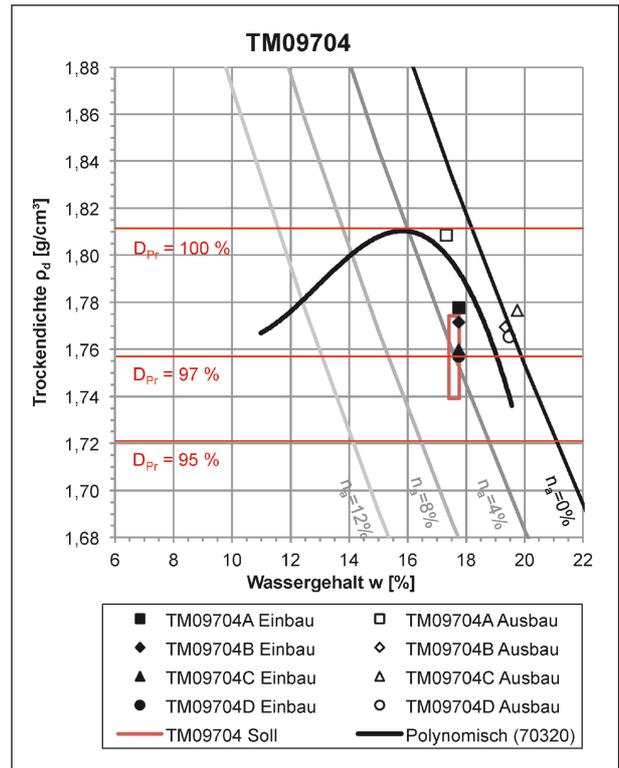


Bild 66: Erreichte Werte für Trockendichte und Wassergehalt bei Ein- und Ausbau der Proben TM09704

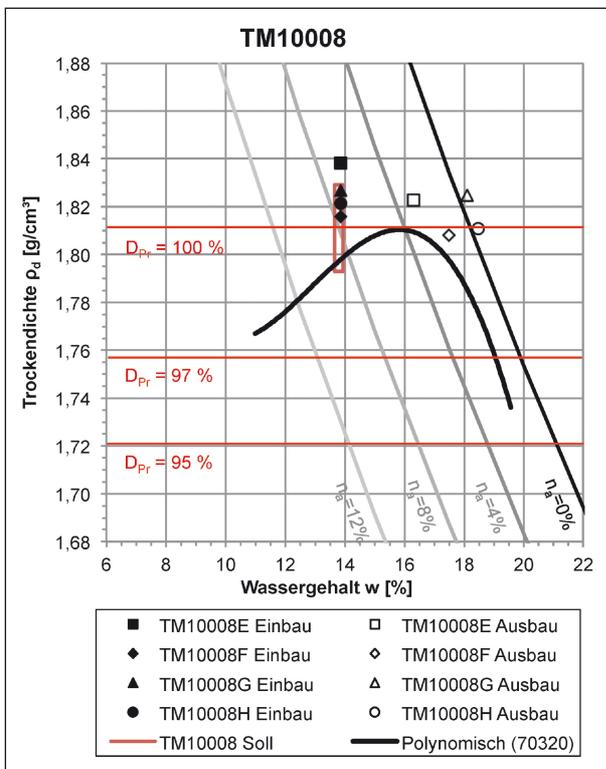


Bild 65: Erreichte Werte für Trockendichte und Wassergehalt bei Ein- und Ausbau der Proben TM10008

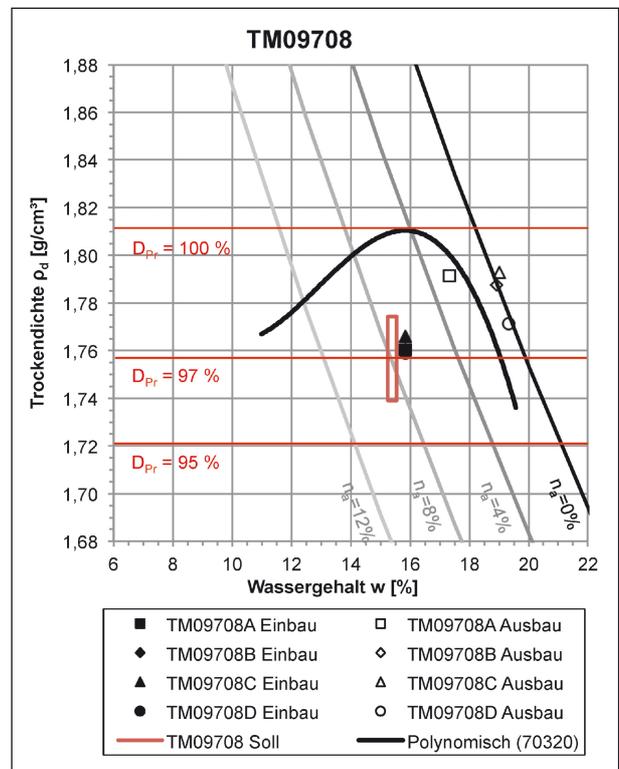


Bild 67: Erreichte Werte für Trockendichte und Wassergehalt bei Ein- und Ausbau der Proben TM09708

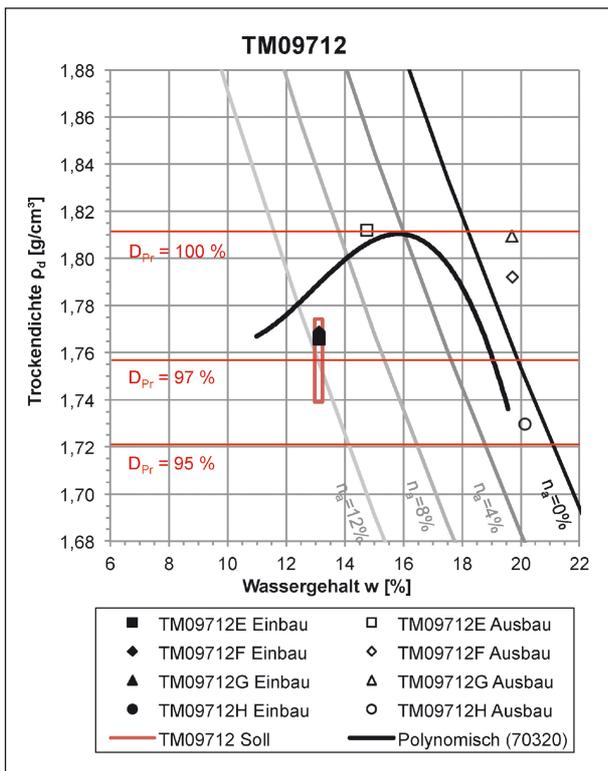


Bild 68: Erreichte Werte für Trockendichte und Wassergehalt bei Ein- und Ausbau der Proben TM09712

lag jedoch innerhalb des Sollbereichs für die Einbaubedingungen.

Die Versuche mit Wasserzugabe wiesen nach Ausbau alle eine vollständige bis nahezu vollständige Sättigung auf. Somit kann von einem erfolgreichen Sättigungsvorgang während der Versuche ausgegangen werden. Die Ausbaupunkte liegen vereinzelt im Proctordiagramm oberhalb der Sättigungslinie (Bild 64 bis Bild 69). Möglicherweise ist dies auf eine Entspannung und eine Wasseraufnahme der Proben im Zuge des Ausbaus zurückzuführen, während sich die berechnete Trockendichte auf die während des Versuchs zuletzt gemessene Probenhöhe bezieht. Anhaftungen von Wasser an die Proben und Messungenauigkeiten sind jedoch auch nicht auszuschließen.

Bei den Einbauzuständen TM10008 (Bild 65), TM09708 (Bild 67) und TM09712 (Bild 68) wiesen die Proben, denen kein Wasser zugegeben wurde (Proben A und E), nach Ausbau höhere Wassergehalte als zu Versuchsbeginn auf. Dies ist vermutlich auf Messungenauigkeiten oder eine Wasseraufnahme der Proben aus den evtl. nicht komplett trocken eingebauten Filtersteinen zurückzuführen.

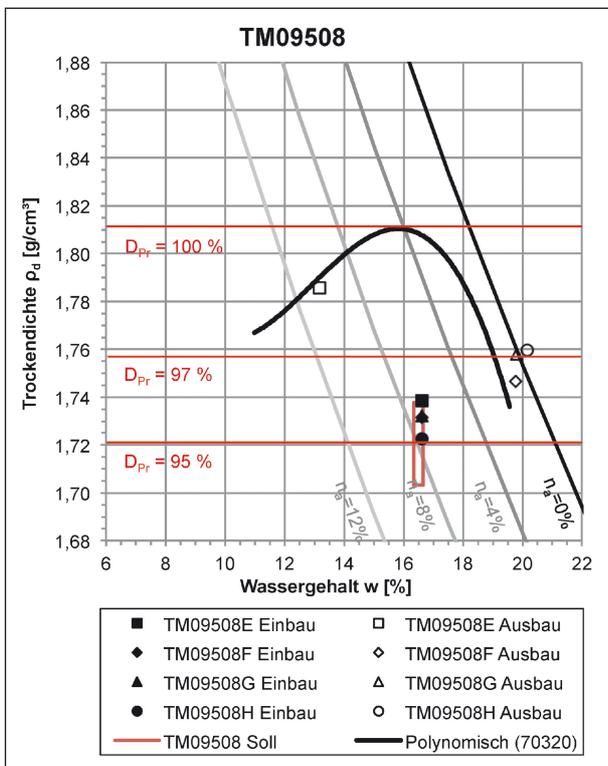


Bild 69: Erreichte Werte für Trockendichte und Wassergehalt bei Ein- und Ausbau der Proben TM09508

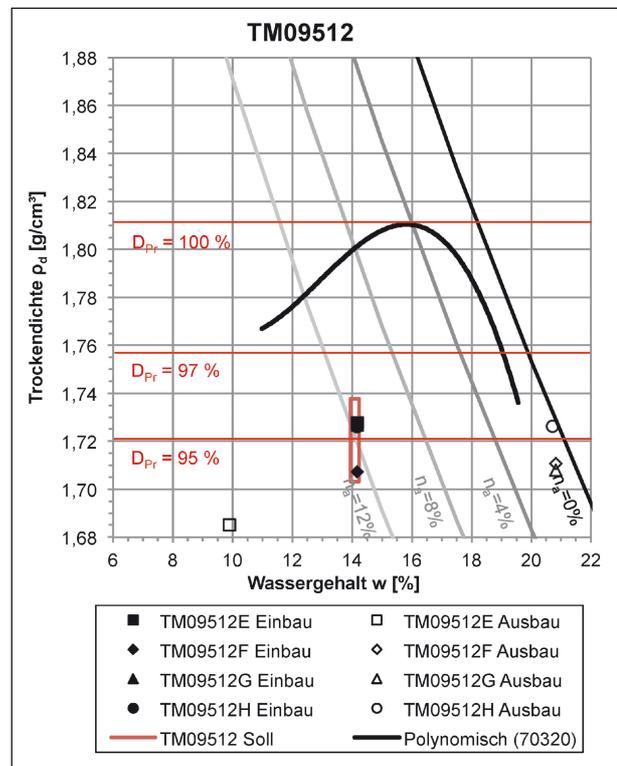


Bild 70: Erreichte Werte für Trockendichte und Wassergehalt bei Ein- und Ausbau der Proben TM09512

Bei den restlichen Versuchen ohne Sättigung wurde eine Abnahme des Wassergehalts von ein bis vier Prozentpunkten durch Austrocknung der Probekörper beobachtet.

Im Großteil der Fälle konnte beim Vergleich der Einbau- und Ausbau-Verdichtungspunkte eine Konsolidation und somit eine Zunahme der Dichte festgestellt werden, die maximal $0,05 \text{ g/cm}^3$ betrug. In einigen Fällen, v. a. bei Versuchen mit hohen Einbaudichten, kam es aufgrund von Quellvorgängen bei der Wasserzugabe zu geringfügigen Verringerungen der Dichten.

Die Protokolle der einzelnen Versuche am Boden TM, die dem erweiterten geplanten Versuchsprogramm entsprechen, sind in den Anlagen 5.33 bis 5.60 enthalten. Hinsichtlich weiterer Versuche am Boden TM wird auf das Ende dieses Kapitels verwiesen.

In Bild 71 bis Bild 77 sind die Spannungs-Steifemodul-Diagramme der mit dem mittelplastischen Ton durchgeführten Versuchsreihen dargestellt. Die Ermittlung der Steifemoduln erfolgte analog zu Versuchsboden UL als Sekantenmoduln von zwei aufeinanderfolgenden Laststufen.

Die Versuchsreihen weisen teilweise ähnliche Verläufe der Spannungs-Steifemodul-Kurven auf. Eine spannungsabhängige Zunahme der Steifemoduln konnte nicht bei allen Versuchen beobachtet werden (u. a. Bild 76). Bei vielen Versuchen konnte auch nur eine geringe Zunahme der Steifigkeiten mit zunehmender Spannung festgestellt werden (u. a. Bild 73, Bild 74). Vereinzelt wurden auch nach Sättigung geringere Steifigkeiten bei höheren Spannungen gemessen (Bild 76).

Die höchsten Steifigkeiten wurden überwiegend an den Proben der Reihen TM10008, TM09704 und TM09512 gemessen. Die niedrigsten Steifigkeiten wurden dagegen überwiegend an den Versuchen der Reihen TM09708 und TM09712 ermittelt. Bei der höchsten mittleren Spannung von $\sigma_M = 300 \text{ kN/m}^2$ ergaben sich Steifemoduln zwischen $E_s = 6,2 \text{ MN/m}^2$ und $57,6 \text{ MN/m}^2$. Tendenziell wurden die geringeren Steifigkeiten an den Proben mit niedrigen Einbautrockendichten und hohen Luftporengehalten festgestellt. Eindeutige Aussagen ergaben sich aus den Versuchsergebnissen jedoch nicht.

Beim Vergleich der Versuche einer Einbaubedingung konnten die höchsten Steifigkeiten überwiegend an den Versuchen ohne Sättigung festgestellt werden, insbesondere bei den höheren mittleren Spannungen. Darauf folgten zumeist die Versuche mit einer späten Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 200 \text{ MN/m}^2$. Die niedrigsten Steifigkeiten wiesen in der Regel die Versuche mit einer Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 12,5 \text{ MN/m}^2$ bzw. $\sigma = 50 \text{ MN/m}^2$ auf.

Bei den Versuchsreihen TM10008, TM09704, TM09708 und TM09712 konnte zu Versuchsbeginn eine deutliche Abnahme der Steifigkeit bei allen Proben festgestellt werden (Bild 72 bis Bild 75). Bei den restlichen Versuchsreihen wurde dies vereinzelt ebenfalls beobachtet. Vermutlich ist die Abnahme der Steifemoduln auf eine Vorbelastung der Proben bei der Probekörperherstellung zurückzuführen. Bei den Versuchen der Reihen B und F ist hingegen wahrscheinlich die frühe Sättigung hierfür verantwortlich (Bild 71, Bild 76, Bild 77).

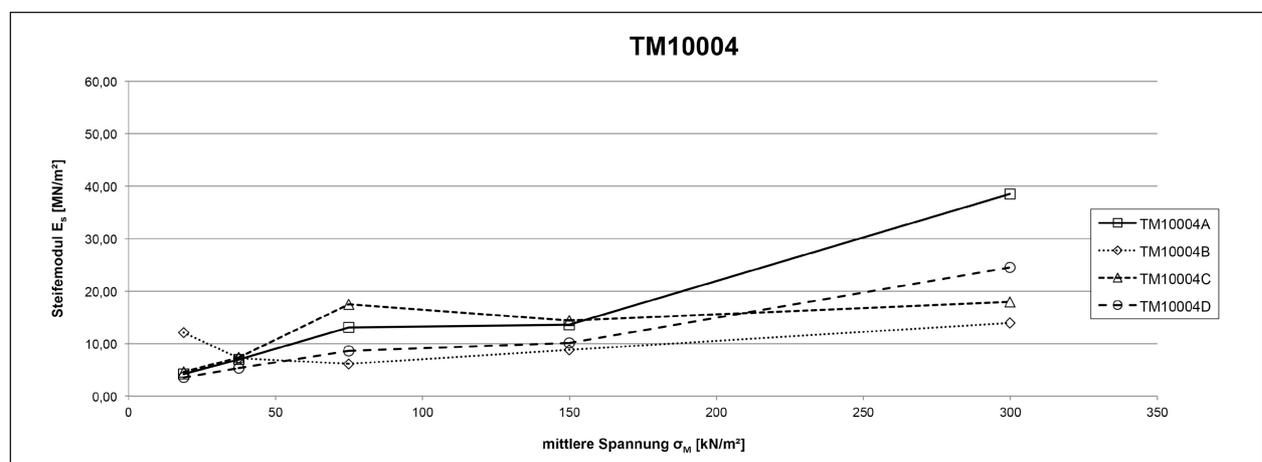


Bild 71: Spannungs-Steifemodul-Diagramm der Versuchsreihe TM10004

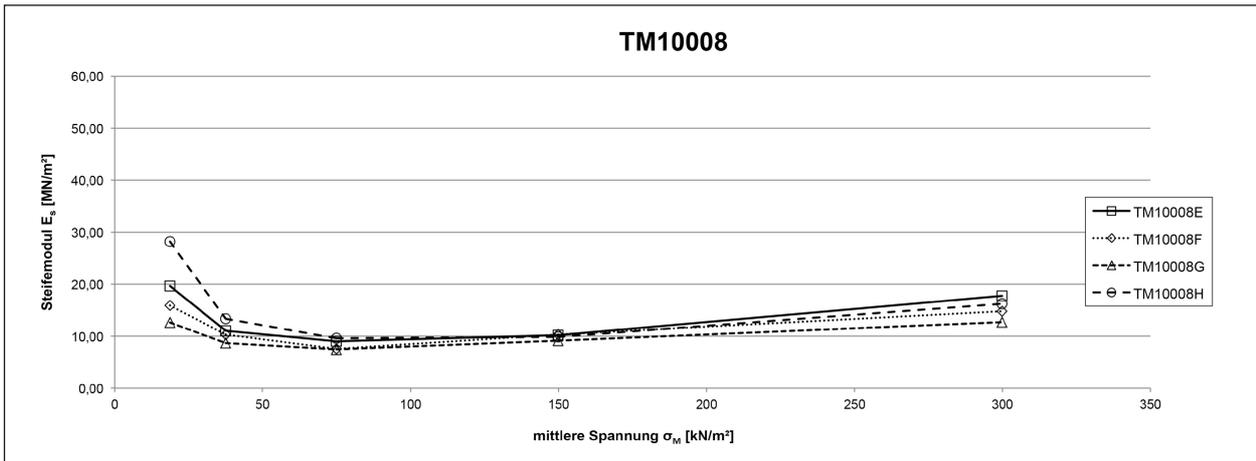


Bild 72: Spannungs-Steifemodul-Diagramm der Versuchsreihe TM10008

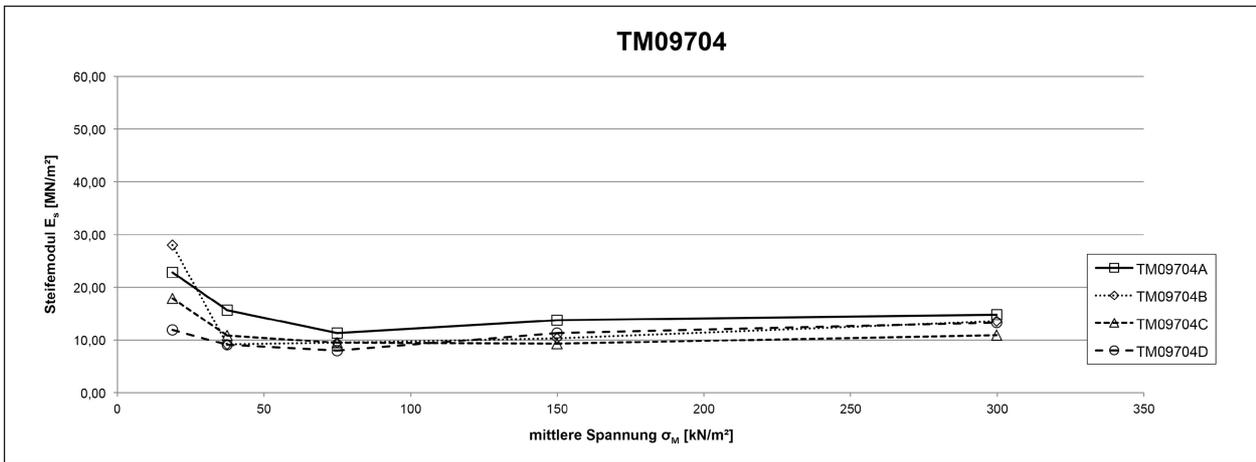


Bild 73: Spannungs-Steifemodul-Diagramm der Versuchsreihe TM09704

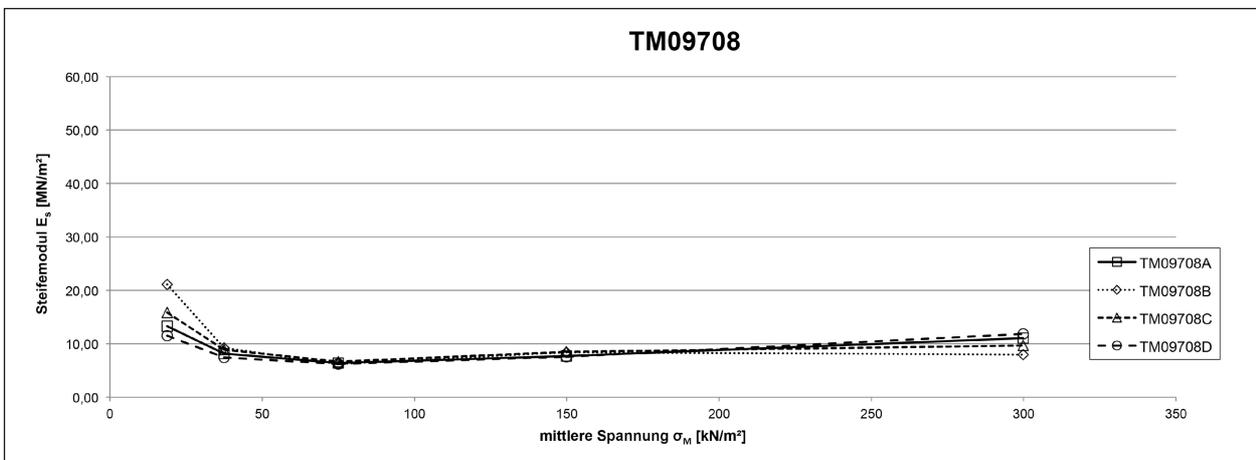


Bild 74: Spannungs-Steifemodul-Diagramm der Versuchsreihe TM09708

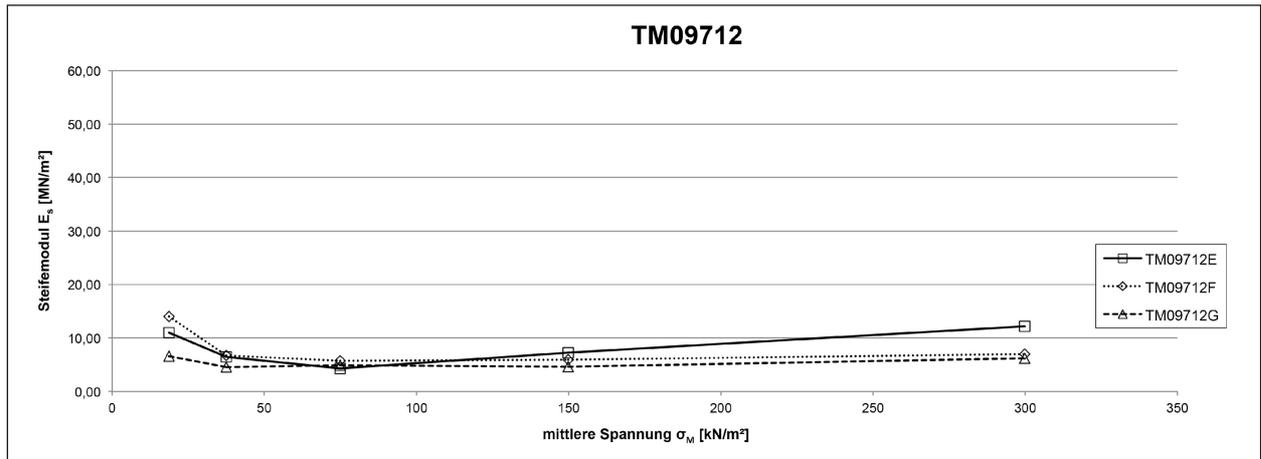


Bild 75: Spannungs-Steifemodul-Diagramm der Versuchsreihe TM09712

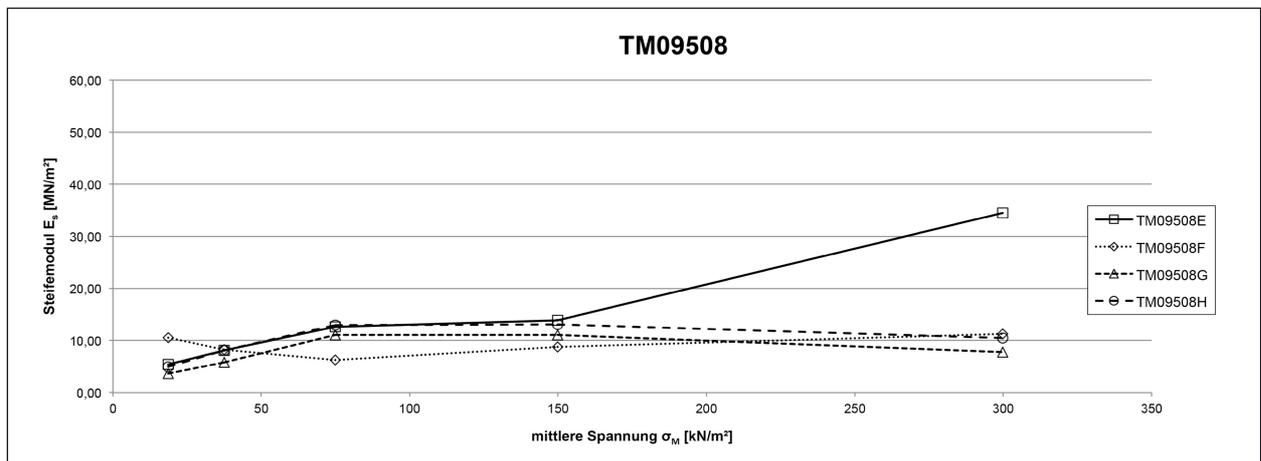


Bild 76: Spannungs-Steifemodul-Diagramm der Versuchsreihe TM09508

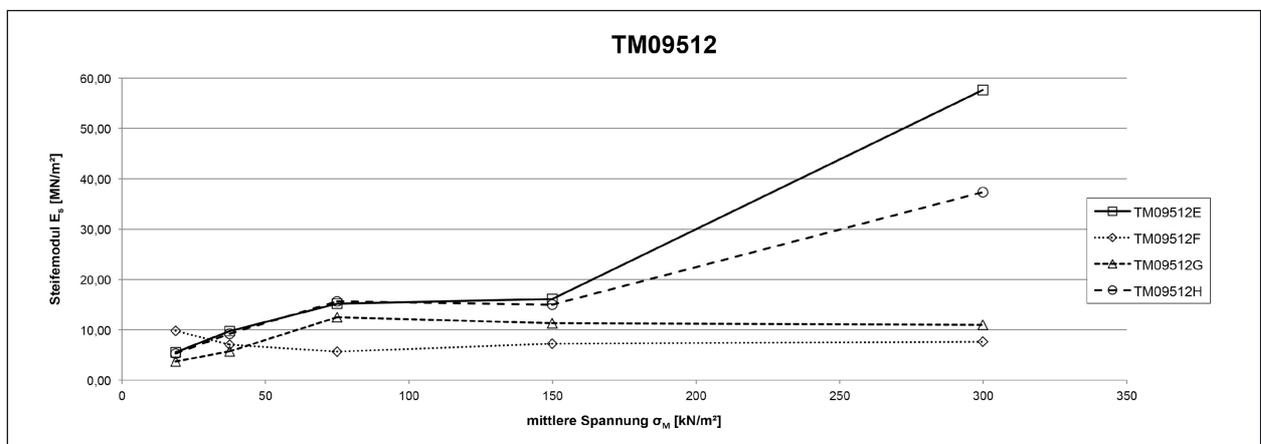


Bild 77: Spannungs-Steifemodul-Diagramm der Versuchsreihe TM09512

In Bild 78 bis Bild 81 sind die Spannungs-Steifemodul-Diagramme der mit dem TM durchgeführten Versuche mit gleichem Versuchsablauf dargestellt. In Bild 78 werden die Versuche ohne Sättigung miteinander verglichen, in Bild 79 die mit einer Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 12,5 \text{ kN/m}^2$, in Bild 80 die mit einer Wasserzugabe bei einer Spannung von $\sigma = 50 \text{ kN/m}^2$ und in Bild 81 die mit einer Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 200 \text{ kN/m}^2$.

Bei den Versuchen ohne Sättigung konnten im Versuchsablauf teilweise deutliche Unterschiede festgestellt werden (Bild 78). In vier von sieben Fällen wurde zu Versuchsbeginn eine Abnahme der Steifigkeiten festgestellt. Vermutlich ist dies auf eine Vorbelastung der Proben während der Probekörperherstellung zurückzuführen. Bei mittleren Spannungen von $\sigma_M = 37,5 \text{ kN/m}^2$ bis 150 kN/m^2 wiesen die Proben eher geringe Unterschiede in den Steifigkeiten auf. Die Steifemoduln lagen bei diesen mittleren Spannungen zwischen $E_s = 4,3 \text{ MN/m}^2$ und $16,1 \text{ MN/m}^2$. Größere Unterschiede wiesen die Proben allerdings bei einer mittleren Spannung von $\sigma_M = 300 \text{ kN/m}^2$ auf. Bei den Proben TM10008E, TM09704A, TM09708A und TM09712E konnten eine nur geringe Zunahme der Steifigkeiten festgestellt werden. Die Proben TM10004A, TM09508E und TM09512E verhielten sich hingegen bei den höheren Spannungen deutlich steifer als zuvor.

Bei allen Proben, die bei einer Spannung von $\sigma = 12,5 \text{ kN/m}^2$ gesättigt wurden, konnte bis zu einer mittleren Spannung von $\sigma_M = 75 \text{ kN/m}^2$ eine Abnahme der Steifigkeiten beobachtet werden. Eine Ausnahme bildete hier nur die Probe TM09704B (Bild 79), die bei einer mittleren Spannung von $\sigma_M = 75 \text{ kN/m}^2$ eine geringfügig höhere

Steifigkeit aufwies als bei einer mittleren Spannung von $\sigma_M = 37,5 \text{ kN/m}^2$. Mit der Zunahme der mittleren Spannung auf $\sigma_M = 150 \text{ kN/m}^2$ stiegen die Steifemoduln generell nur sehr geringfügig an. Bei den mittleren Spannungen von $\sigma_M = 37,5 \text{ kN/m}^2$ bis 150 kN/m^2 blieben die Werte für die Steifemoduln zwischen $E_s = 5,7 \text{ MN/m}^2$ und $10,4 \text{ MN/m}^2$. Bei einer mittleren Spannung von $\sigma_M = 300 \text{ kN/m}^2$ konnte erneut nur eine geringe Zunahme der Steifigkeiten festgestellt werden. Diese lagen zwischen $E_s = 7,0 \text{ MN/m}^2$ und $14,8 \text{ MN/m}^2$. Die höchsten Werte wiesen dabei die Proben TM10004B, TM10008F und TM09704B auf, die niedrigsten die Proben TM09708B, TM09712F und TM09512F.

Bei den Versuchen mit einer Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 50 \text{ kN/m}^2$ wiesen erneut mehrere Proben (TM10008G, TM09704C, TM09708C) eine Abnahme der Steifigkeiten zu Beginn des Versuchs bis zu einer mittleren Spannung von $\sigma_M = 75 \text{ kN/m}^2$ auf (Bild 80). Die Proben TM10004C, TM09508G und TM09512G zeigten derweil eine deutliche Zunahme ihrer Steifigkeiten mit zunehmender Spannung. Während der Zunahme der mittleren Spannung auf $\sigma_M = 150 \text{ kN/m}^2$ blieben die Steifemoduln in etwa konstant. Mit der Steigerung der mittleren Spannung auf $\sigma_M = 300 \text{ kN/m}^2$ stiegen die Steifemoduln überwiegend geringfügig an. Lediglich die Proben TM09508G und TM09512G wiesen bei der höheren Spannung geringere Steifemoduln auf. Der höchste Steifemodul konnte hierbei an der Probe TM10004C mit $E_s = 18,0 \text{ MN/m}^2$ ermittelt werden. Die niedrigsten Steifemoduln wiesen die Proben TM09712G und TM09508G auf.

Auch bei den Versuchen mit einer Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 200 \text{ kN/m}^2$ konnte zu Be-

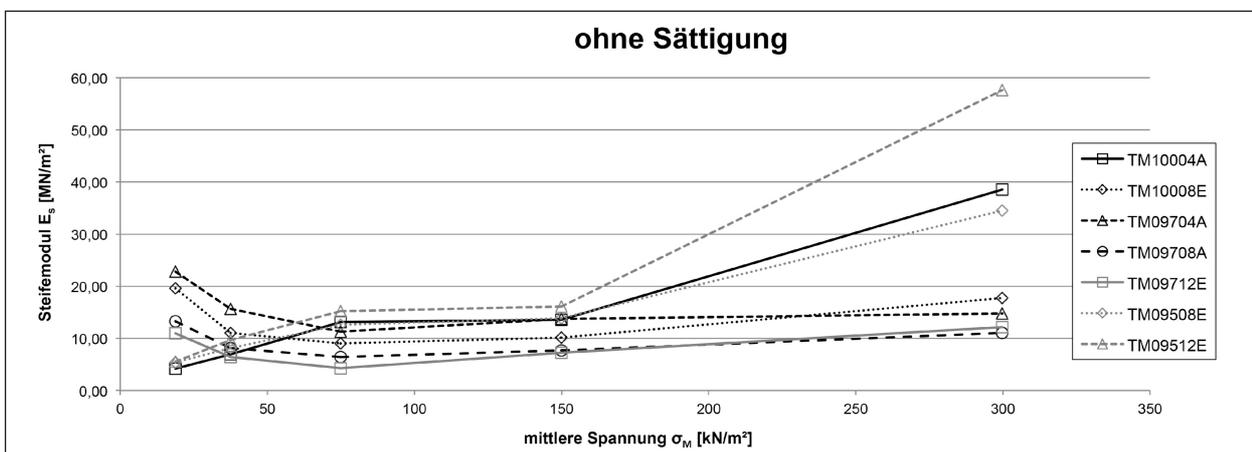


Bild 78: Spannungs-Steifemodul-Diagramm der Versuche ohne Sättigung

ginn des Versuchs bis zu einer mittleren Spannung von $\sigma_M = 75 \text{ kN/m}^2$ eine Abnahme der Steifigkeiten bei drei Proben beobachtet werden (TM10008H, TM09704D, TM09708D). Es handelte sich um Proben der gleichen Versuchsreihen, die auch schon zuvor Abnahmen der Steifigkeit zu Versuchsbeginn

aufgezeigt hatten. Die restlichen Proben TM10004D, TM09508H und TM09512H wiesen zu Beginn einen deutlichen Anstieg in den Steifigkeiten auf. Der Versuch der Reihe TM09712 konnte aufgrund eines Ausfalls der Messuhr nicht ausgewertet werden. Mit Zunahme der mittleren Span-

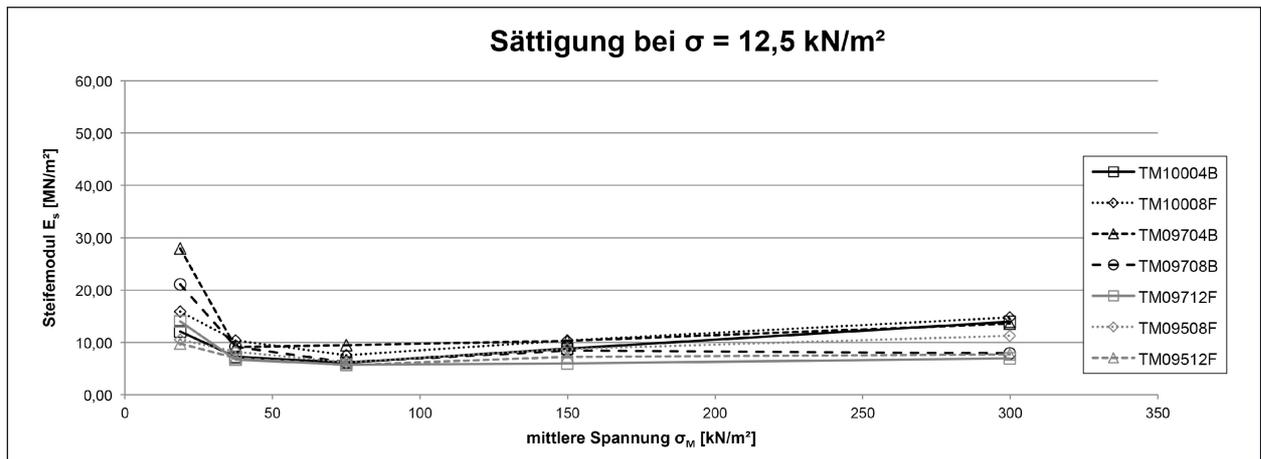


Bild 79: Spannungs-Steifemodul-Diagramm der Versuche mit Sättigung bei einer mittleren Spannung von $12,5 \text{ kN/m}^2$

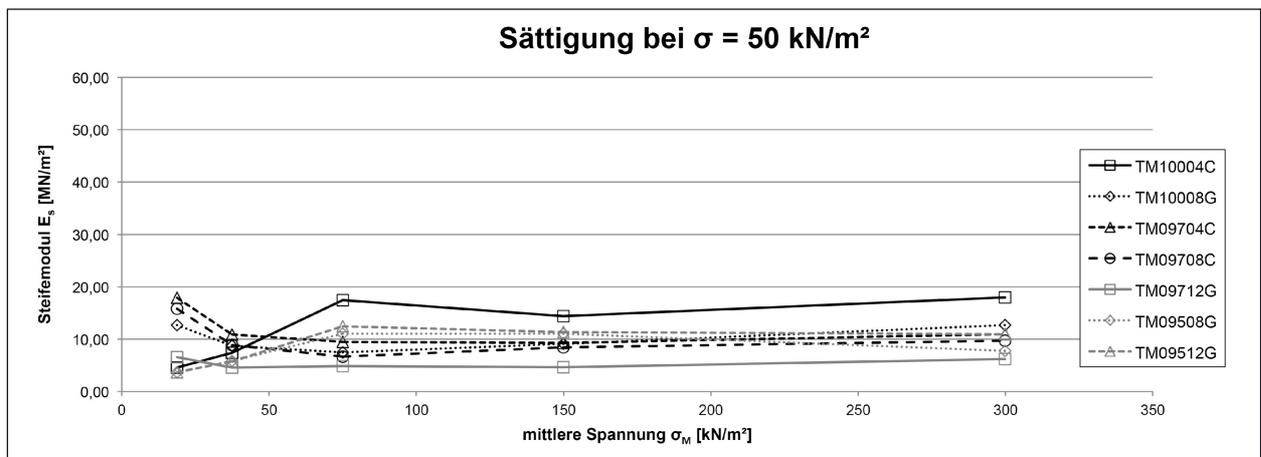


Bild 80: Spannungs-Steifemodul-Diagramm der Versuche mit Sättigung bei einer mittleren Spannung von 50 kN/m^2

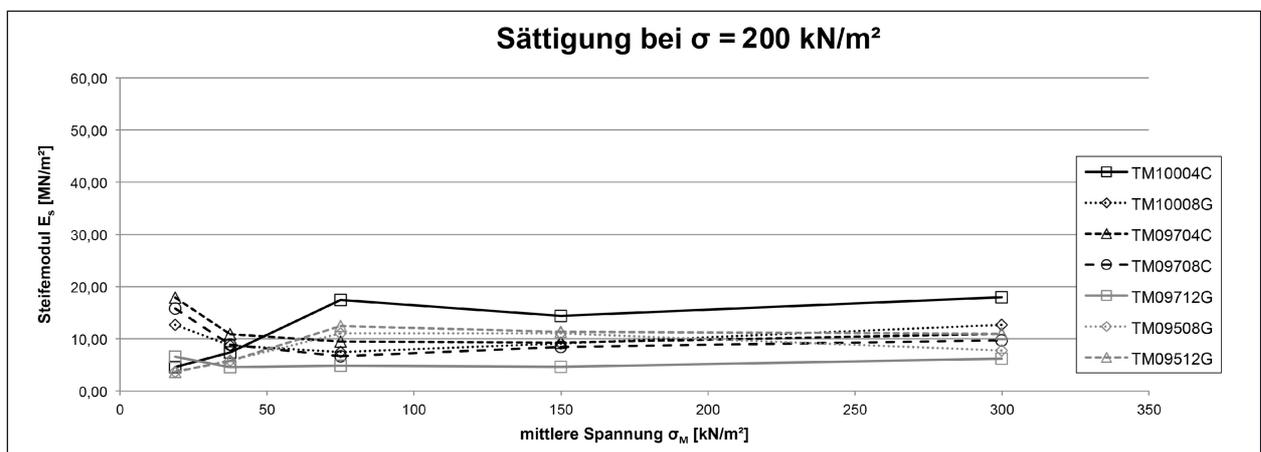


Bild 81: Spannungs-Steifemodul-Diagramm der Versuche mit Sättigung bei einer mittleren Spannung von 200 kN/m^2

nung auf $\sigma_M = 150 \text{ kN/m}^2$ wurden nur geringe Veränderungen der Steifigkeiten registriert. Im weiteren Versuchsverlauf konnten bei einer mittleren Spannung von $\sigma_M = 300 \text{ kN/m}^2$ schwache bis deutliche Zunahmen der Steifigkeiten auf Werte zwischen $E_s = 11,9 \text{ MN/m}^2$ bis $37,3 \text{ MN/m}^2$ festgestellt werden. Lediglich die Probe TM09508H zeigte hierbei einen Rückgang in der Steifigkeit von $E_s = 13,1 \text{ MN/m}^2$ auf $10,5 \text{ MN/m}^2$.

In Bild 82 bis Bild 95 sind die Spannungs-Zusammendrückungsdiagramme der einzelnen Versuchsreihen mit dem Versuchsboden TM dargestellt. Dargestellt ist die bezogene Zusammendrückung am Ende einer Laststufe gegen die jeweilige Spannung bei dieser Laststufe. Zur besseren Lesbarkeit sind jeweils nur zwei Versuchskurven in einem Diagramm dargestellt. Zunächst werden jeweils die Versuche ohne Sättigung und mit Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 200 \text{ kN/m}^2$ miteinander verglichen, anschließend die Versuche mit Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 12,5 \text{ kN/m}^2$ und 50 kN/m^2 .

Die Versuche weisen ähnliche Verläufe auf. Mit zunehmender Last verflacht sich bei der überwiegenden Anzahl der Versuche die Spannungs-Zusammendrückungskurve, teilweise verläuft sie auch mit einer annähernd konstanten Steigung. Der Entlastungsast steigt mit abnehmender Last stärker an,

die Ausgangsprobehöhen werden jedoch zumeist nicht erreicht. Eine Ausnahme bildet hierbei der Versuch TM10004D (Bild 82).

Der höchste Werte für die bezogene Zusammendrückung beim Versuchsboden TM wurde bei einer Spannung von $\sigma = 400 \text{ kN/m}^2$ an der Probe TM09712G mit $s' = 6,1 \%$ gemessen (Bild 91). Der kleinste Wert bei dieser Spannung wurde an der Probe TM10008E mit $s' = 0,8 \%$ ermittelt (Bild 84).

Bei Proben, die während des Versuchs bewässert wurden, sind Hebungs- und Sackungserscheinungen als senkrechte Linien in den Spannungs-Zusammendrückungsdiagrammen ersichtlich. Deutliche Hebungen wurden insbesondere bei den Versuchen der Reihen TM10004 (Bild 83), TM09508 (Bild 93) und TM09512 (Bild 95) festgestellt, die bei Spannungen von $\sigma = 12,5 \text{ kN/m}^2$ bzw. 50 kN/m^2 gesättigt wurden. Bei der überwiegenden Anzahl von Versuchen waren die Auswirkungen der Wasserzugabe jedoch so gering, dass keine lastunabhängigen Verformungen auftraten bzw. die hervorgerufenen Sackungen und Hebungen so gering ausfielen, dass diese in den Diagrammen nicht ersichtlich sind. Der Versuch mit Probe TM09712H konnte aufgrund von technischen Schwierigkeiten mit der Messuhr nicht vollständig ausgewertet werden und fehlt dementsprechend in Bild 90.

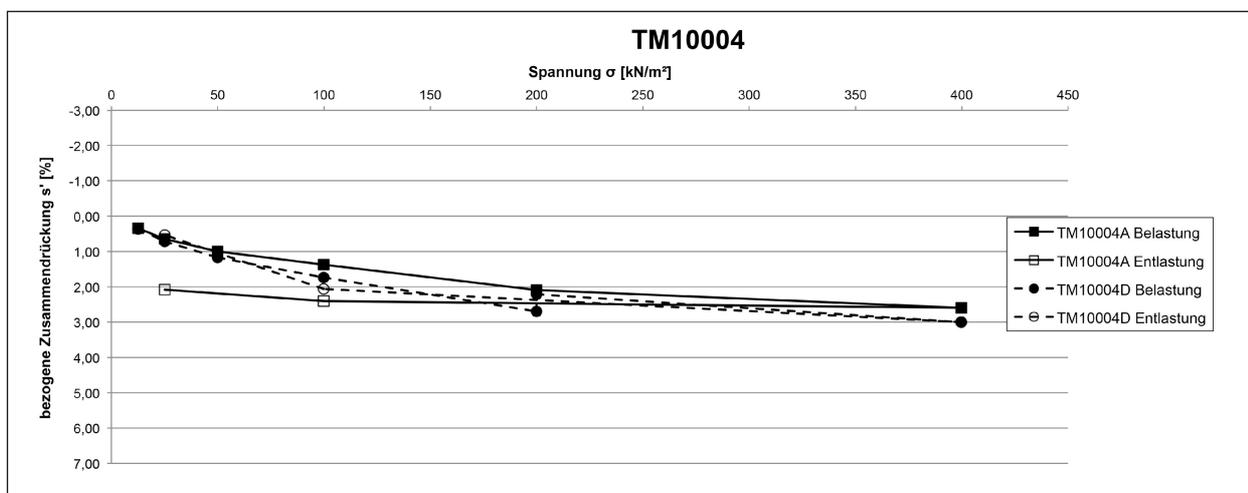


Bild 82: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche TM10004A und TM10004D

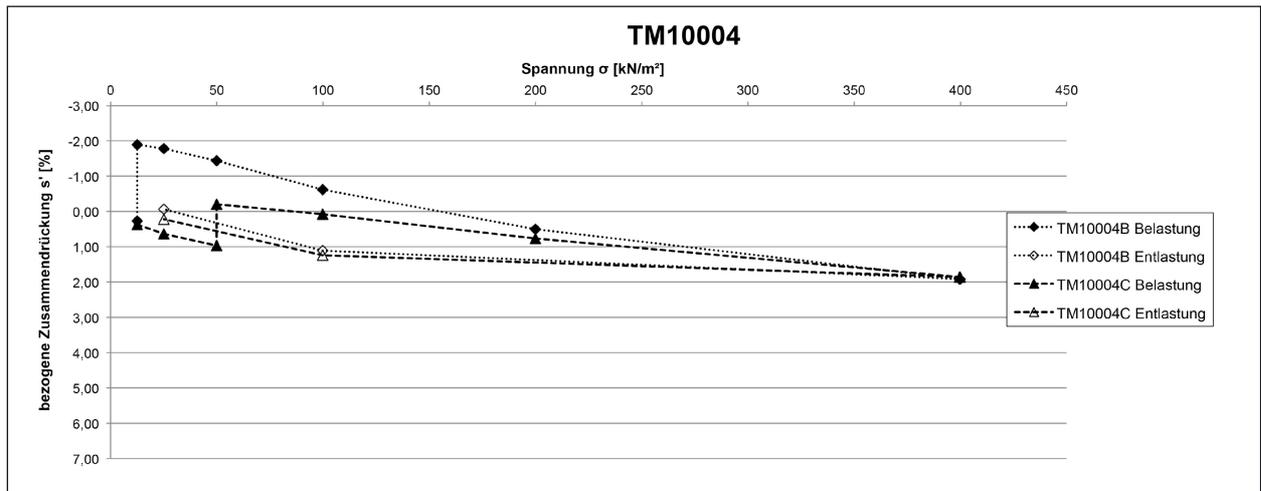


Bild 83: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche TM10004B und TM10004C

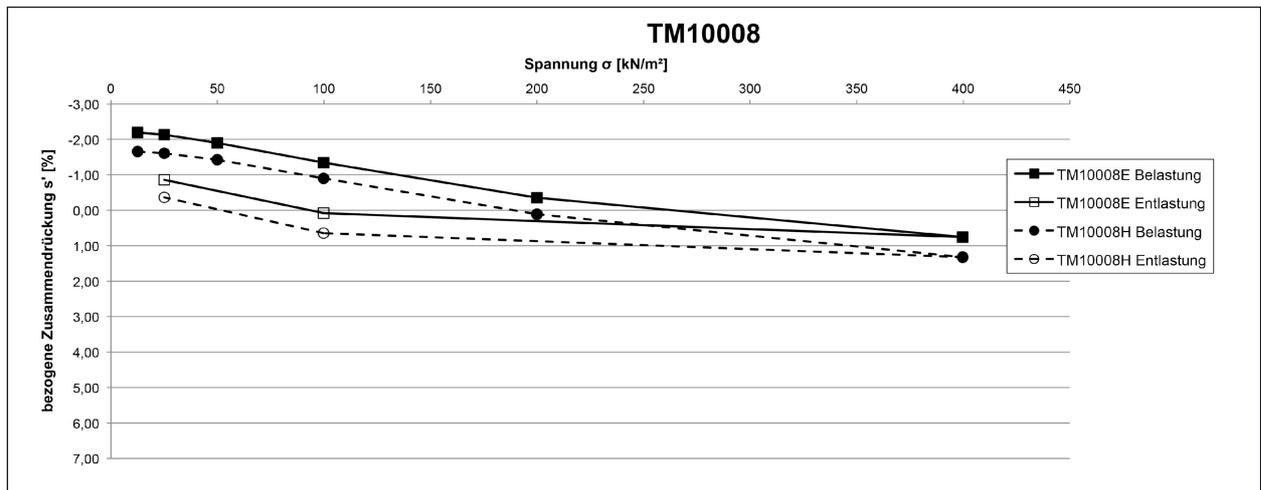


Bild 84: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche TM10008E und TM10008H

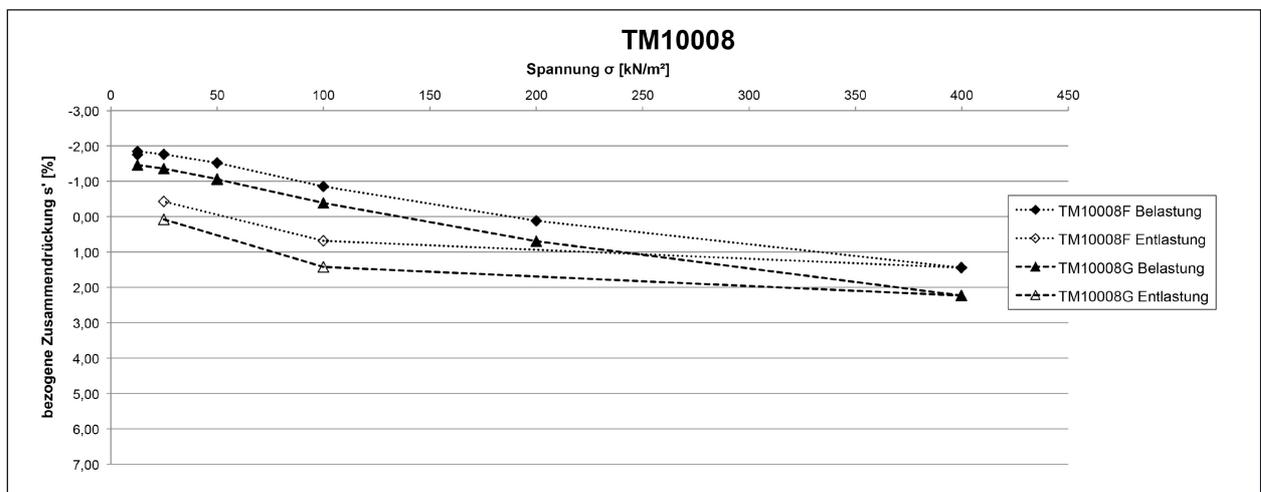


Bild 85: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche TM10008F und TM10008G

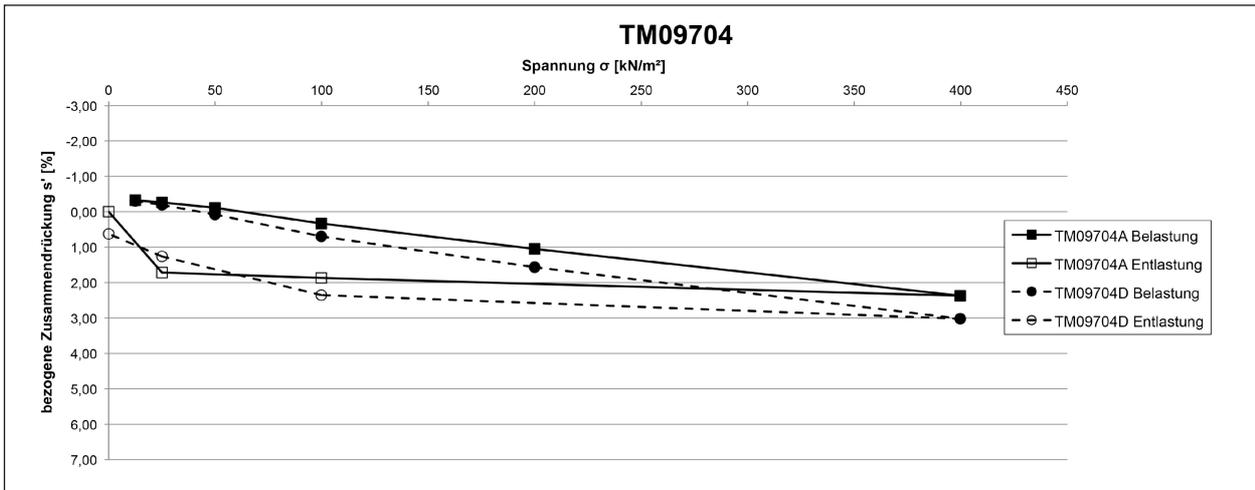


Bild 86: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche TM09704A und TM09704D

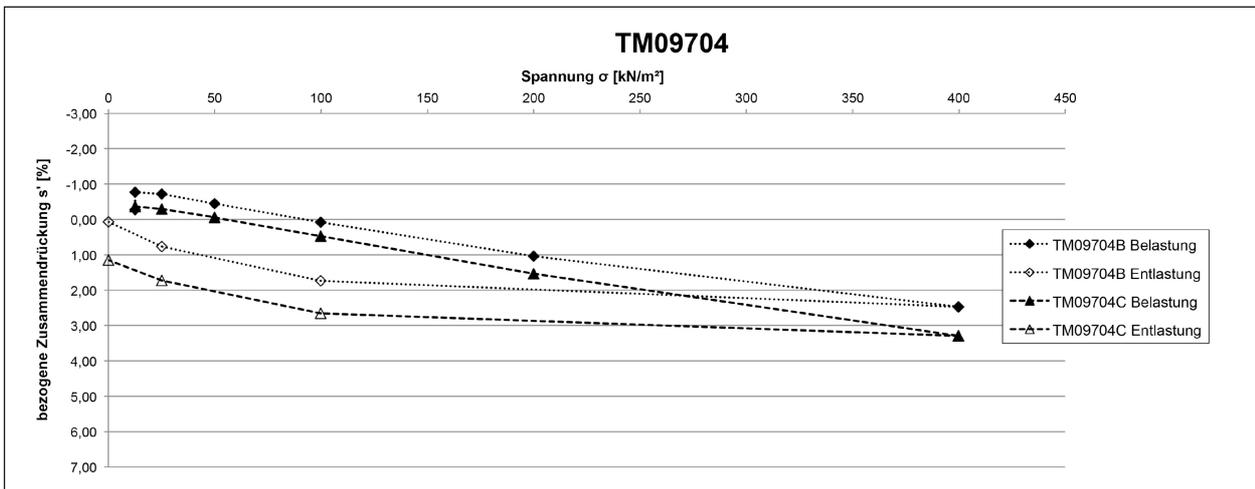


Bild 87: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche TM09704B und TM09704C

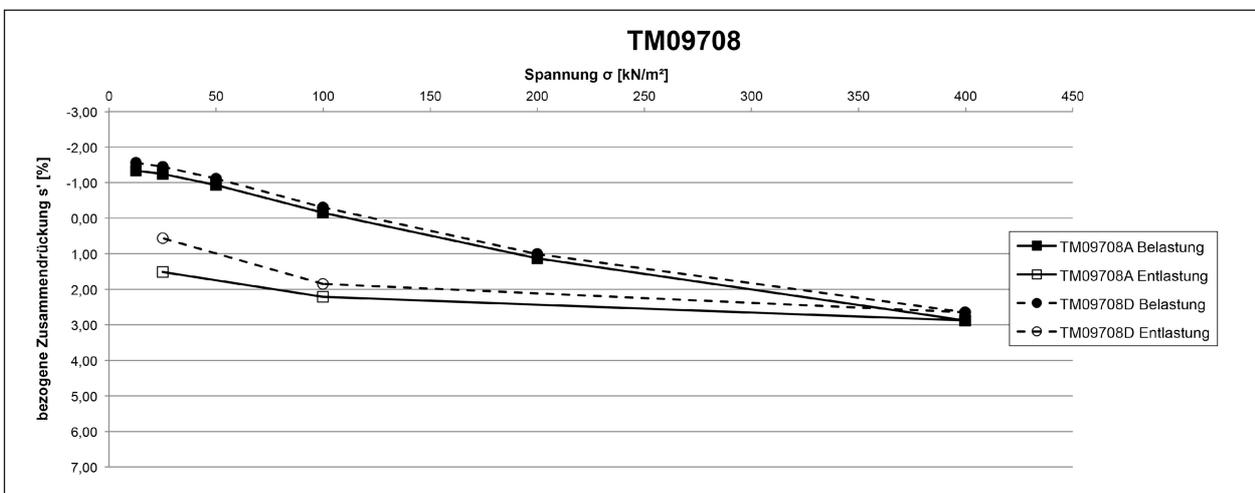


Bild 88: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche TM09708A und TM09708D

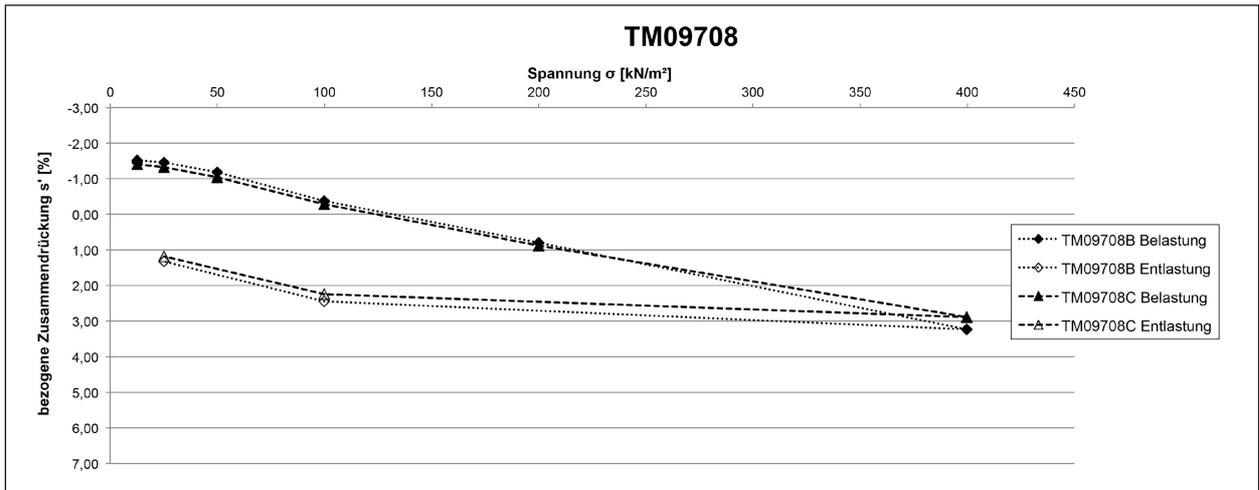


Bild 89: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche TM09708B und TM09708C

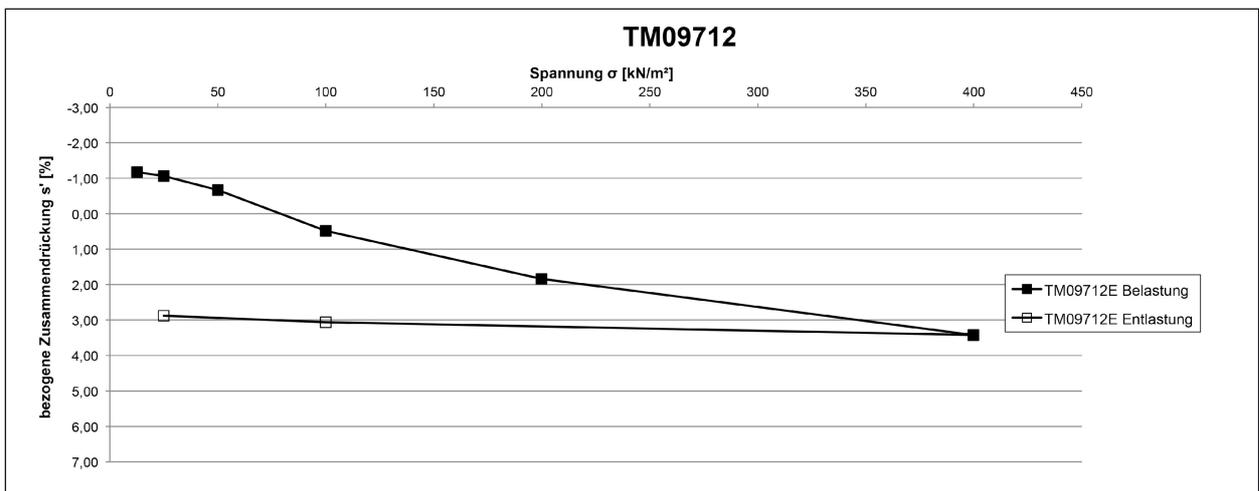


Bild 90: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm des Versuchs TM09712E

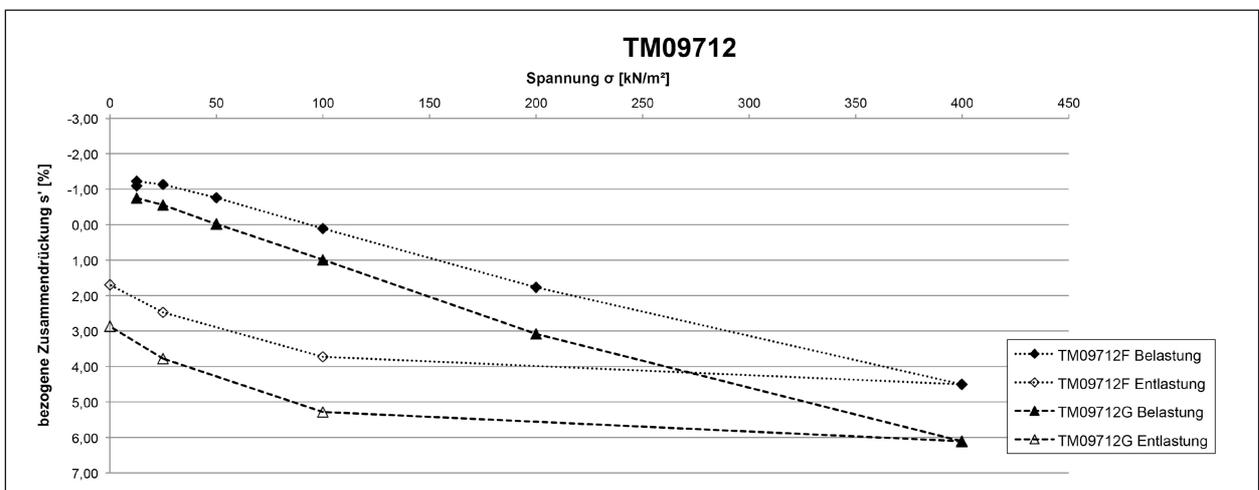


Bild 91: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche TM09712F und TM09712G

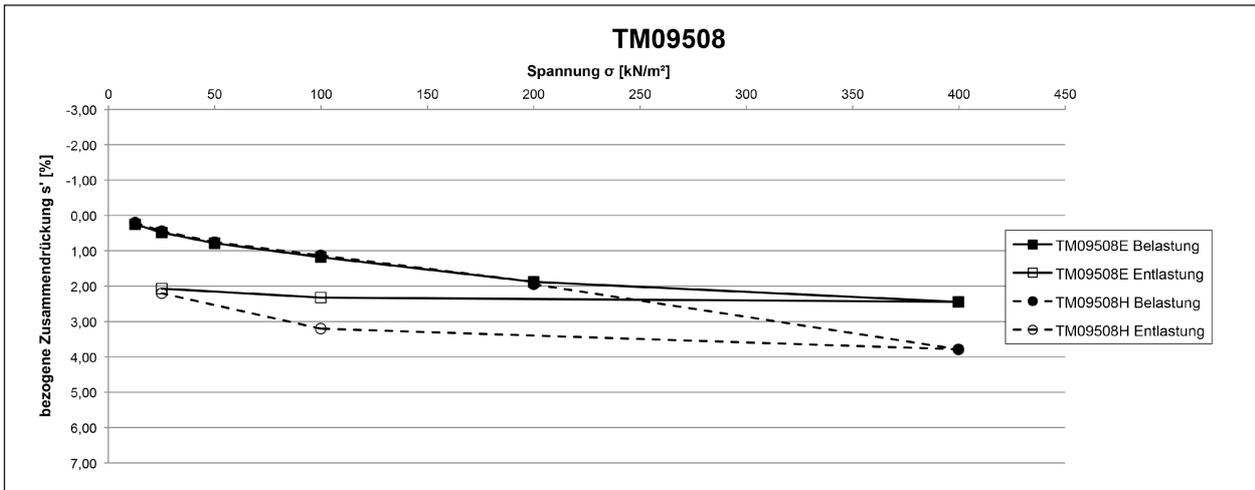


Bild 92: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche TM09508E und TM09508H

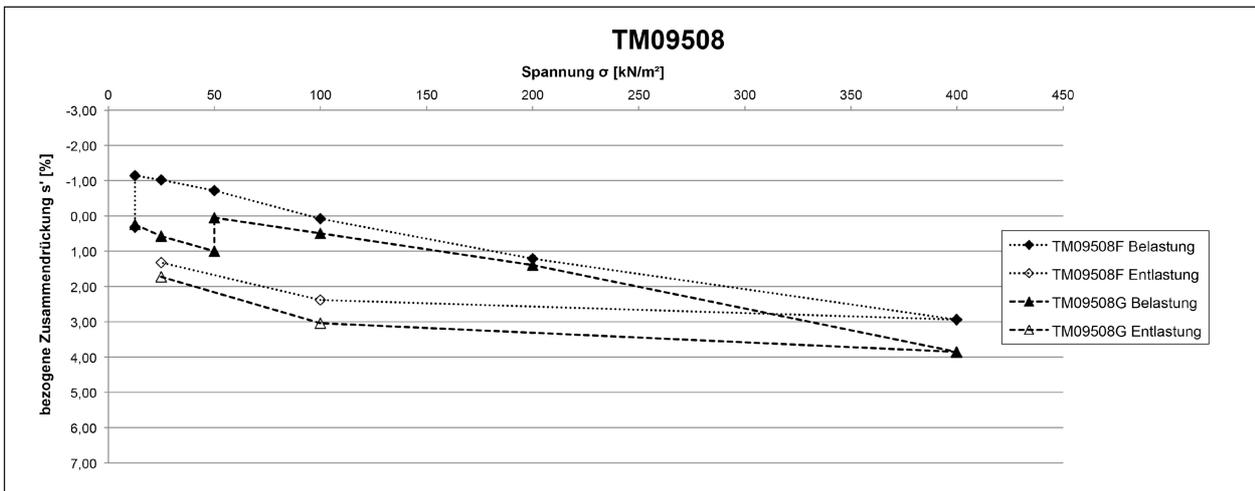


Bild 93: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche TM09508F und TM09508G

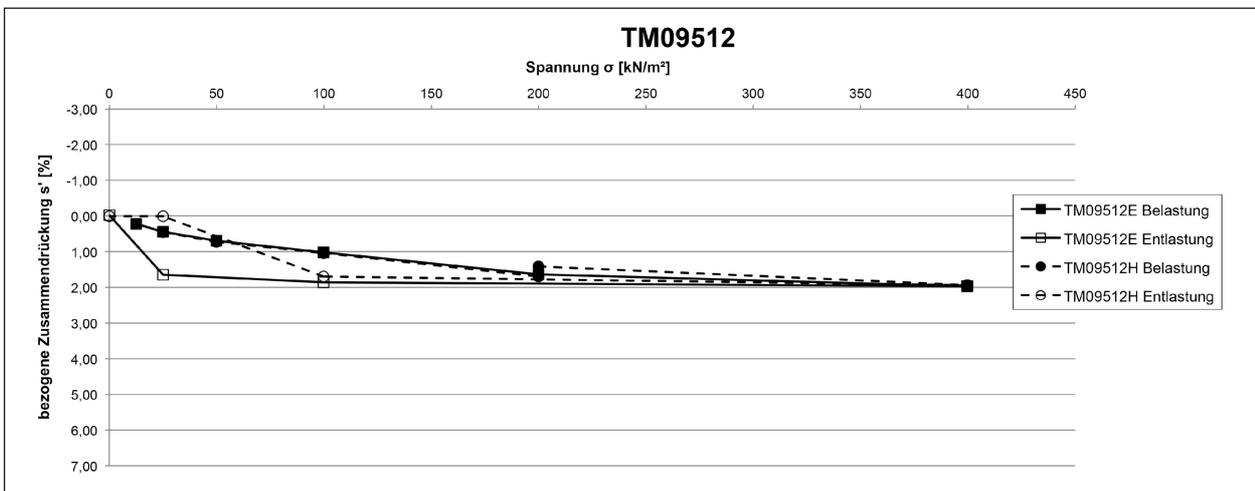


Bild 94: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche TM09512E und TM09512H

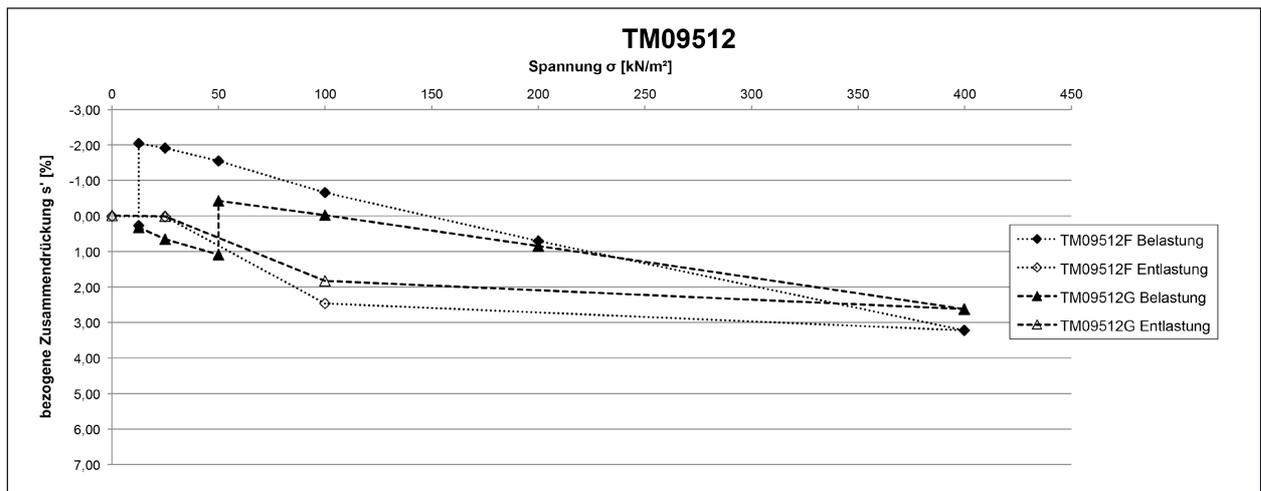


Bild 95: Spannungs-Zusammendrücksdiagramm der Versuche TM09512F und TM09512G

In Bild 96 bis Bild 103 sind die Spannungs-Zusammendrücksdiagramme der mit dem TM durchgeführten Versuche mit gleichem Versuchsablauf (ohne Sättigung, Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 12,5 \text{ kN/m}^2$, 50 kN/m^2 und 200 kN/m^2) dargestellt. Zur Gewährleistung der Lesbarkeit der Diagramme werden zunächst die Versuche mit eher hohen Einbautrockendichten und tendenziell niedrigen Luftporengehalten verglichen, im Anschluss jene Versuche mit niedrigeren Einbautrockendichten und höheren Luftporenanteilen.

Bei den Versuchen mit den Proben A und E ohne Sättigung wurden bei der maximalen untersuchten Spannung von $\sigma = 400 \text{ kN/m}^2$ für die bezogene Zusammendrücksung Werte zwischen $s' = 0,8 \text{ %}$ und $3,4 \text{ %}$ ermittelt (Bild 96, Bild 97). Die geringsten Verformungen wies dabei die Probe TM10008E auf, die höchsten die Probe TM09712E. Für die restlichen Proben wurden Werte zwischen $s' = 2,0 \text{ %}$ und $2,9 \text{ %}$ ermittelt.

Die Versuche, die bei einer Spannung von $\sigma = 12,5 \text{ kN/m}^2$ gesättigt wurden, wiesen bei der maximalen Spannung von $\sigma = 400 \text{ kN/m}^2$ bezogene Zusammendrücksungen zwischen $s' = 1,4 \text{ %}$ (TM10008E) und $4,5 \text{ %}$ (TM09712E) auf (Bild 98, Bild 99). Die anderen Proben wiesen ähnliche Werte wie bei den Versuchen ohne Sättigung auf. Die Werte für die bezogene Zusammendrücksung bei einer Spannung von $\sigma = 400 \text{ kN/m}^2$ lagen bei $s' = 1,9 \text{ %}$ bis $3,2 \text{ %}$.

Die maximal ermittelte bezogene Zusammendrücksung für die Versuche mit einer Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 50 \text{ kN/m}^2$ (Bild 100, Bild 101) wurde an der Probe TM09712G bei der maximalen untersuchten Spannung von $\sigma = 400 \text{ kN/m}^2$ gemessen und betrug $s' = 6,1 \text{ %}$. Der niedrigste Wert wurde an der Probe TM10004C mit $s' = 1,9 \text{ %}$ ermittelt.

Die Proben, die bei einer Spannung von $\sigma = 200 \text{ kN/m}^2$ gesättigt wurden, wiesen bei der höchsten untersuchten Spannung bezogene Zusammendrücksungen zwischen $s' = 1,3 \text{ %}$ (TM10008H) und $3,8 \text{ %}$ (TM09508H) auf (Bild 102, Bild 103). Aufgrund eines Sensorausfalls konnte für die Probe TM09712H kein Wert ermittelt werden.

Die Auswertung der Spannungs-Zusammendrücksdiagramme des Versuchsbodens TM lässt keine eindeutige Aussage über den Einfluss der Einbautrockendichte und des Luftporengehalts zu. Sowohl bei Proben mit hohen als auch bei solchen mit niedrigen Luftporengehalten wurden eher niedrige als auch eher hohe Werte für die bezogene Zusammendrücksung ermittelt. Tendenziell konnten jedoch bei den maximalen untersuchten Spannungen an den Proben die geringsten bezogenen Zusammendrücksungen festgestellt werden, die die höchsten Einbautrockendichten aufwiesen.

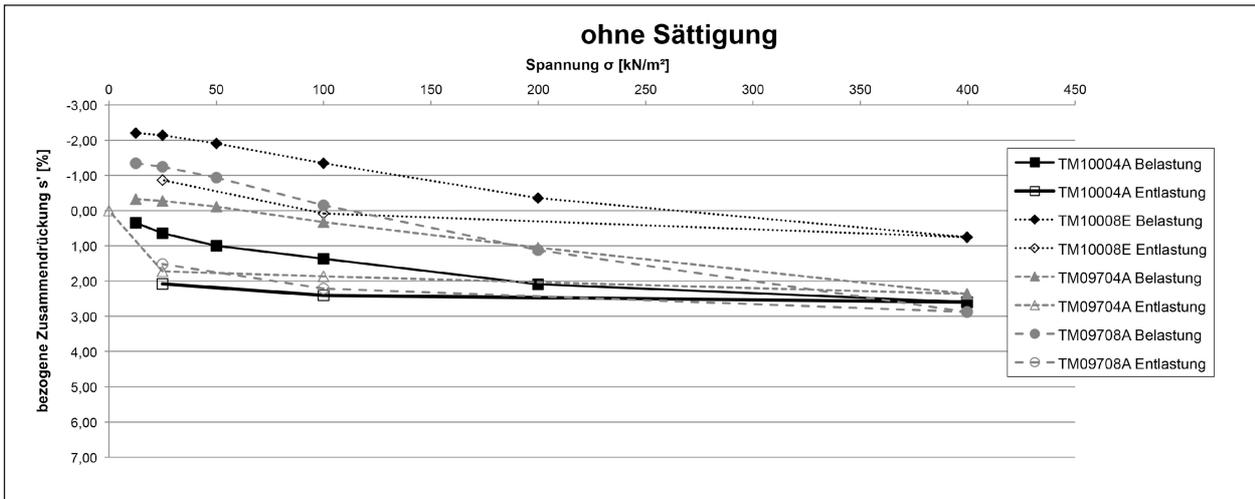


Bild 96: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche TM10004A, TM10008E, TM09704A und TM09708A (ohne Sättigung)

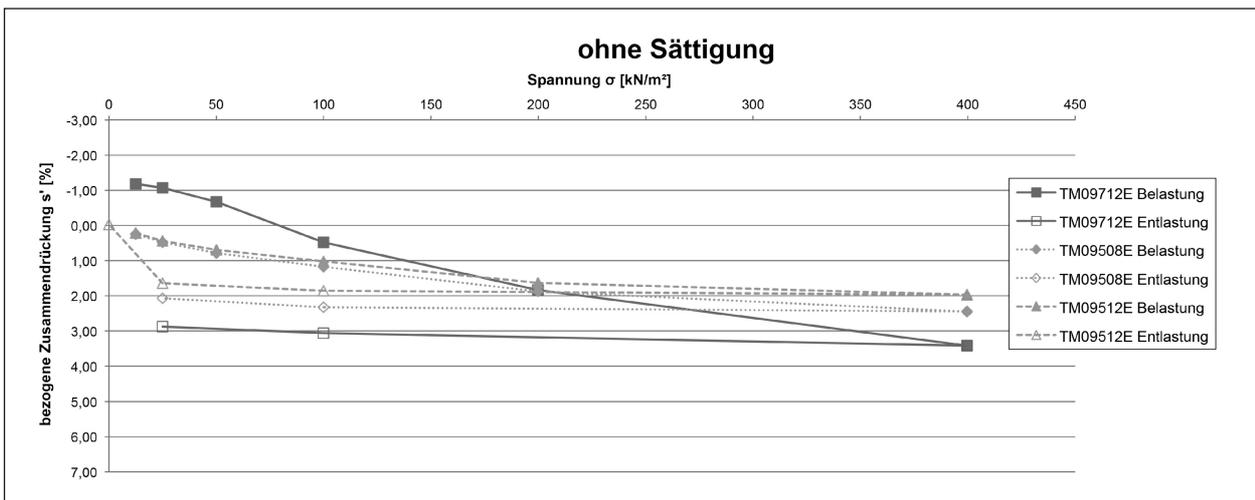


Bild 97: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche TM09712E, TM09508E und TM09512E (ohne Sättigung)

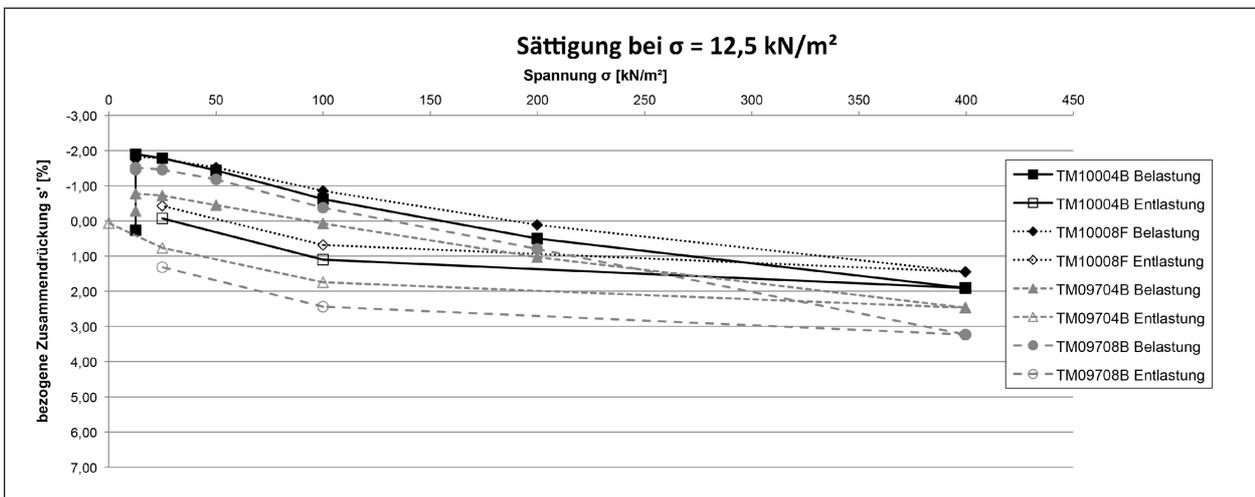


Bild 98: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche TM10004B, TM10008F, TM09704B und TM09708B (Sättigung bei einer mittleren Spannung von 12,5 kN/m²)

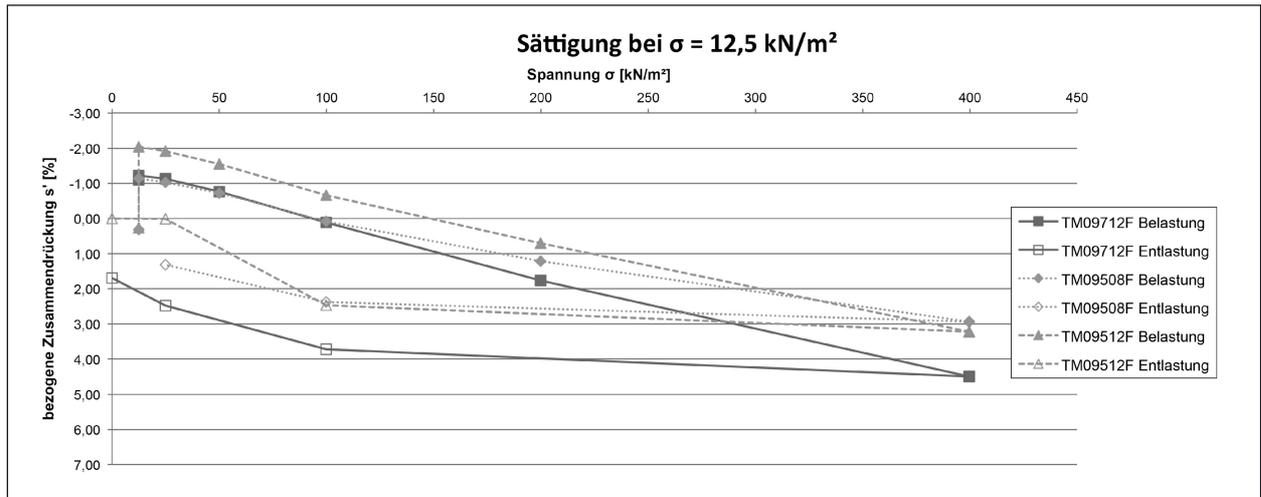


Bild 99: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche TM09712F, TM09508F und TM09512F (Sättigung bei einer mittleren Spannung von $12,5 \text{ kN/m}^2$)

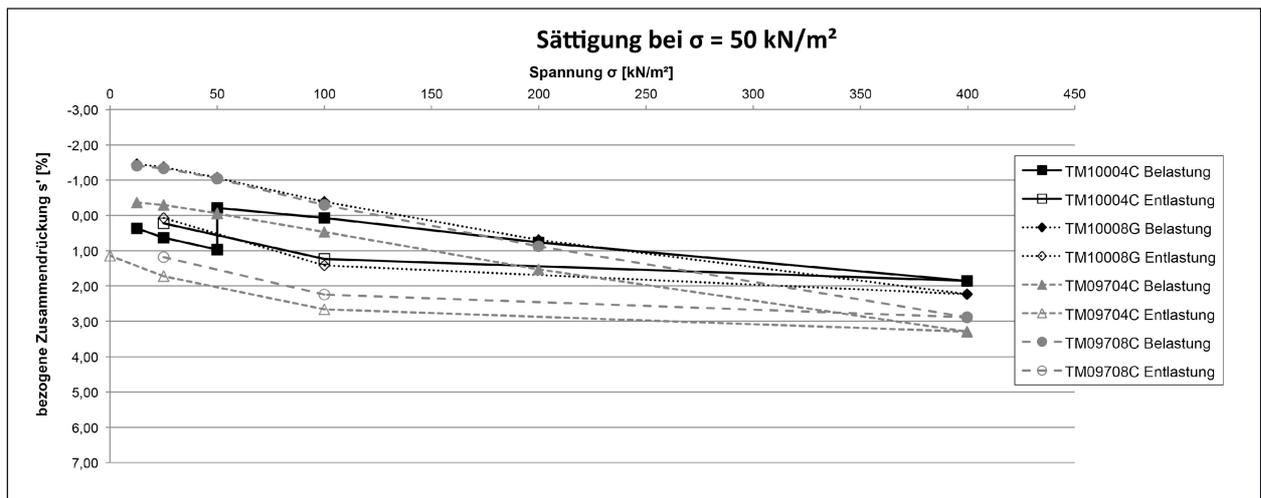


Bild 100: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche TM10004C, TM10008G, TM09704C und TM09708C (Sättigung bei einer mittleren Spannung von 50 kN/m^2)

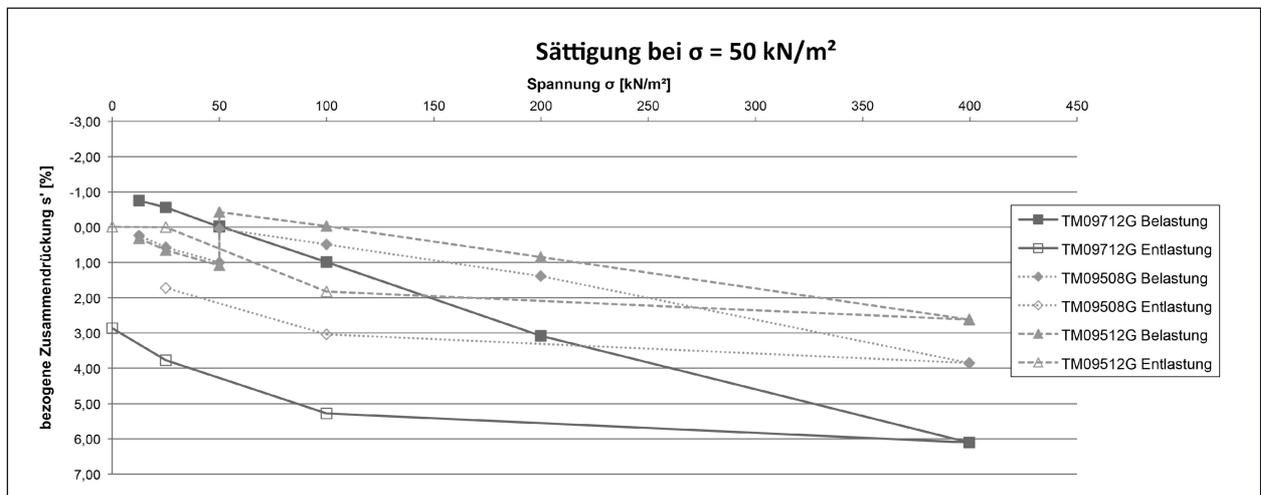


Bild 101: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche TM09712G, TM09508G und TM09512G (Sättigung bei einer mittleren Spannung von 50 kN/m^2)

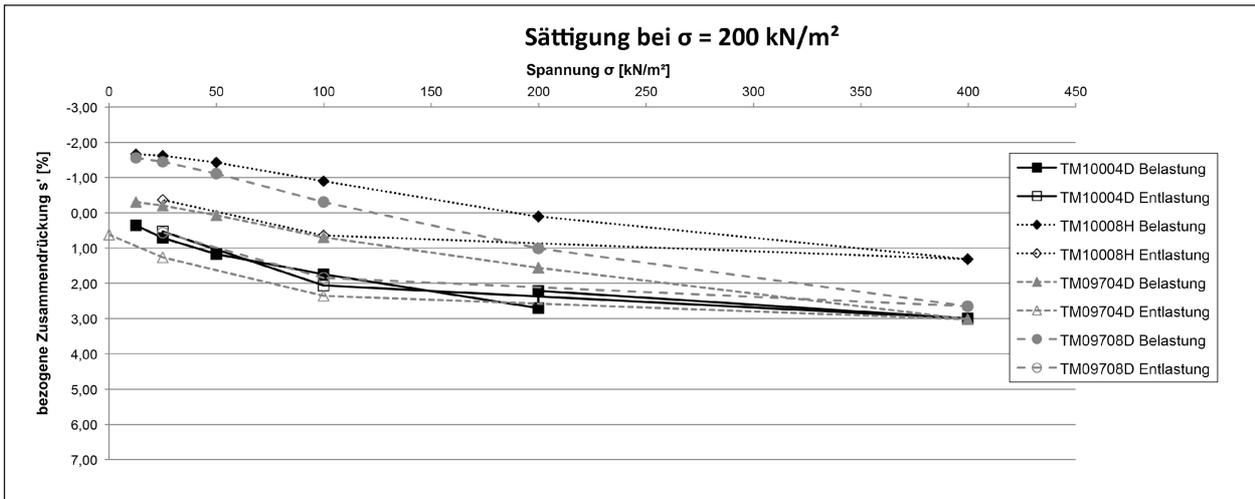


Bild 102: Spannungs-Zusammendrücksdiagramm der Versuche TM10004D, TM10008H, TM09704D und TM09708D (Sättigung bei einer mittleren Spannung von 200 kN/m²)

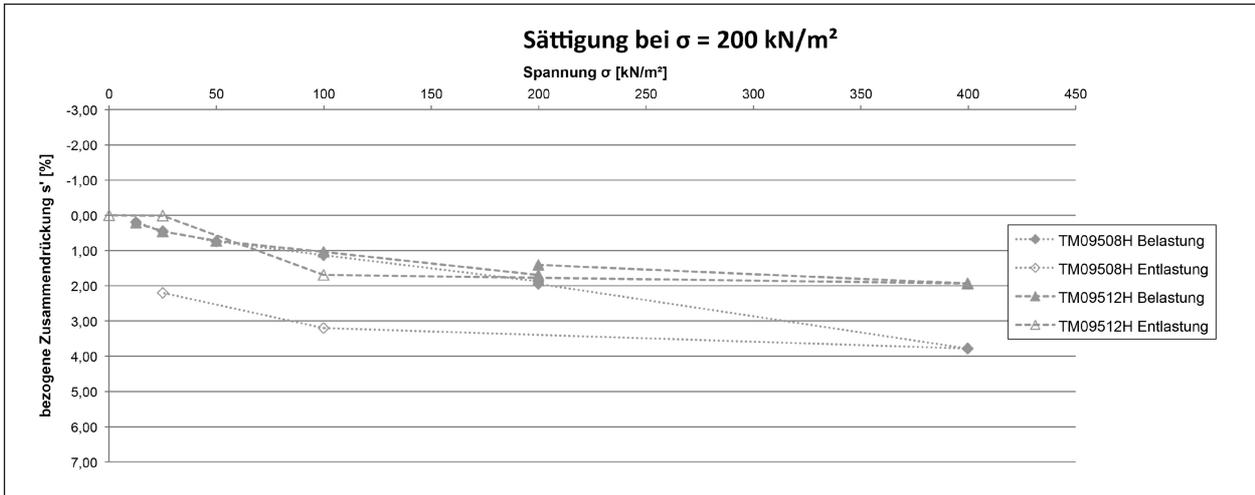


Bild 103: Spannungs-Zusammendrücksdiagramm der Versuche TM09508H und TM09512H (Sättigung bei einer mittleren Spannung von 200 kN/m²)

In Bild 104 sind die allein durch die Wasserzugabe hervorgerufenen Änderungen der bezogenen Zusammendrückung gegen die jeweiligen Spannungen, bei denen die Sättigung erfolgte, aufgetragen. Für die Auswertung hinsichtlich Hebungen und Sackungen wurde jeweils die Differenz der bezogenen Zusammendrückung s' direkt vor und am Ende der Wasserzugabe nach 24 h gebildet.

Bei den Versuchen mit dem Versuchsboden TM konnten bei einer Spannung von $\sigma = 12,5$ kN/m² einerseits bei den Versuchen TM10008F, TM09704B, TM09708B und TM09712F nur geringe Hebungen von maximal ca. 0,5 % der Probenhöhe beobachtet werden. Andererseits wiesen die Versuche TM10004B, TM09508F und TM09512F deutliche Hebungen zwischen 1,5 % und 2,3 % ihrer Probenhöhe auf.

Während der Sättigung der Proben bei einer Spannung von $\sigma = 50$ kN/m² zeigten sich ähnliche Ergebnisse wie bei der geringeren Spannung zuvor. Bei den Versuchen der Reihen TM10004, TM09508 und TM09512 zeigten sich deutliche Hebungen zwischen 1,0 % und 1,5 % der Probenhöhe. Die restlichen Proben hingegen wiesen nur sehr geringe Änderungen der Probenhöhen durch Sackungen oder Hebungen auf.

Deutliche Hebungen konnten erneut bei den Proben TM10004 und TM09512 während der Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 200$ kN/m² beobachtet werden. Die einzig nennenswerte Sackung bei allen Versuchen wies die Probe TM09508H auf, die um ca. 0,07 % ihrer Probenhöhe gestaucht wurde. Die restlichen Proben wiesen wiederholt nur minimale Sackungen und Hebungen auf.

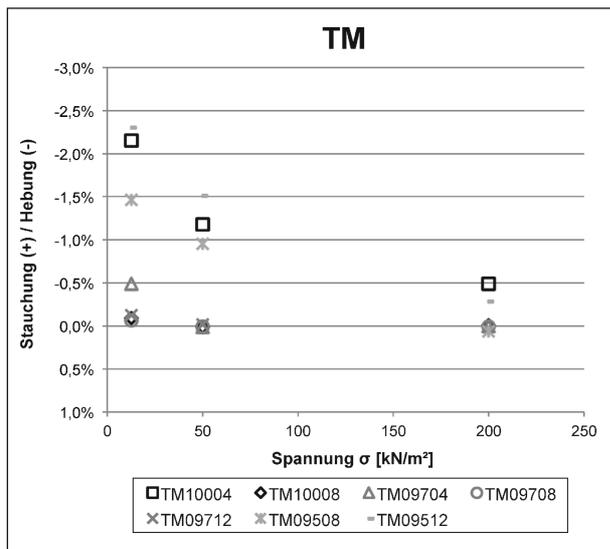


Bild 104: Auswertung der durch Wasserzugabe bei unterschiedlichen Spannungen verursachten Stauchungen und Hebungen

Von den vor Mitte August 2012 durchgeführten Oedometerversuchen, bei denen festgestellt worden war, dass die Einbautrockendichten deutlich zu gering waren, konnten zwei Versuchsreihen ausgewertet werden. Die restlichen Versuchsreihen waren mit feuchten Filtersteinen eingebaut worden und wurden deshalb nicht weiter berücksichtigt.

In Bild 105 und Bild 106 sind die Einbau- und Ausbaupunkte der beiden Versuchsreihen in Proctordiagrammen dargestellt. Enthalten sind dabei neben der Proctorkurve auch die Sättigungslinie ($S_r = 1$ bzw. $n_a = 0$ Vol.-%) und die Isolinien für Luftporenanteile von $n_a = 5$ Vol.-%, 10 Vol.-%, 15 Vol.-%, 20 Vol.-% und 25 Vol.-%.

Die Versuche mit Wasserzugabe wiesen nach dem Ausbau alle eine zumindest nahezu vollständige Sättigung auf. Somit kann von einem erfolgreichen Sättigungsvorgang während der Versuche ausgegangen werden. Beim Versuch TM08622 lagen die Ausbaupunkte knapp oberhalb der Sättigungslinie. Dies ist womöglich auf Messungenauigkeiten, Anhaftungen von Wasser oder einer Wasseraufnahme der Proben beim Ausbau geschuldet. Bei den Proben ohne Sättigung konnte eine deutliche Abnahme der Wassergehalte während der Versuche festgestellt werden, was auf eine Austrocknung während der Versuchsdurchführung zurückzuführen ist.

Bei allen Proben konnte eine deutliche Zunahme der Ausbautrockendichten gegenüber den Einbautrockendichten festgestellt werden. Die Trockendichten der Proben ohne Sättigung stiegen

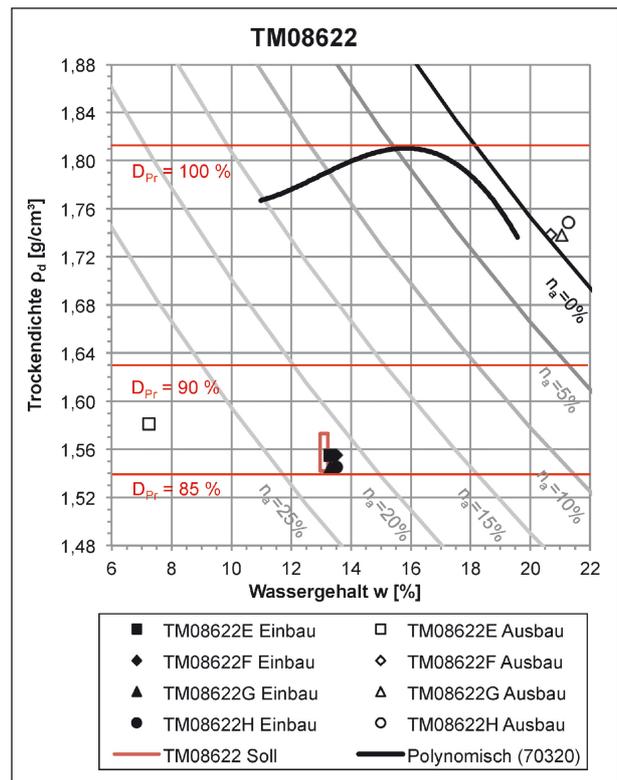


Bild 105: Erreichte Werte für Trockendichte und Wassergehalt bei Ein- und Ausbau der Proben TM08622

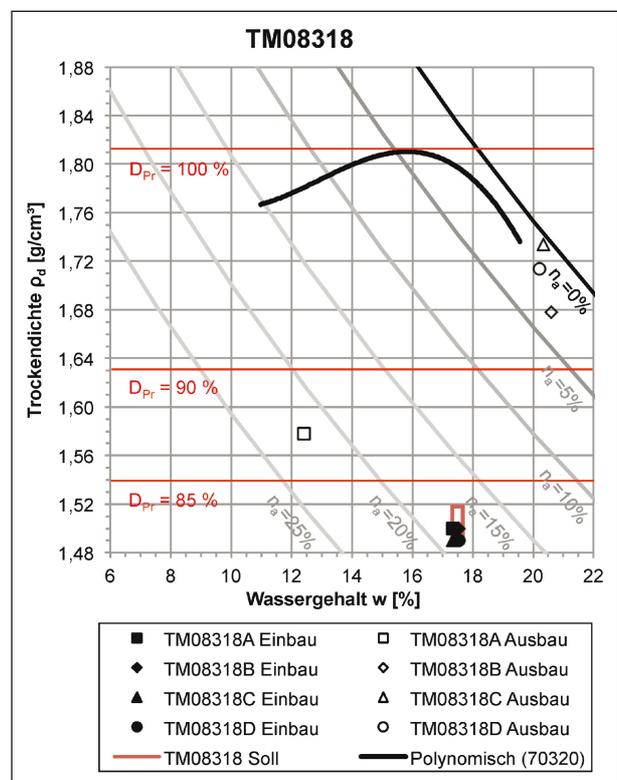


Bild 106: Erreichte Werte für Trockendichte und Wassergehalt bei Ein- und Ausbau der Proben TM08318

um $0,03 \text{ g/cm}^3$ (TM08622E) bzw. $0,08 \text{ g/cm}^3$ (TM08318A). Deutlich stärker stiegen die der

Proben mit Sättigung. Bei den Versuchen der Reihe TM08622 erhöhten sich die Trockendichten um Werte von 0,19 g/cm³ bis 0,20 g/cm³, bei denen der Reihe TM08318 sogar um Werte zwischen 0,18 g/cm³ und 0,24 g/cm³.

Die Protokolle der einzelnen Versuche sind in den Anlagen 5.61 bis 5.68 enthalten.

In Bild 107 und Bild 108 sind die Spannungs-Steifemodul-Diagramme der mit den Versuchsreihen TM08622 und TM08318 durchgeführten Versuchen dargestellt. Die Ermittlung der Steifemoduln erfolgte als Sekantenmodul von zwei aufeinanderfolgenden Laststufen.

Die Versuche der Reihe TM08622 wiesen zu Versuchsbeginn Steifemoduln von $E_s = 3,0 \text{ MN/m}^2$ bis $3,8 \text{ MN/m}^2$ auf (Bild 107). Die Proben E und H verliefen zu Beginn annähernd deckungsgleich und wiesen nach einer minimalen Abnahme der Steifig-

keiten zu Beginn bis zu einer mittleren Spannung von $\sigma_M = 150 \text{ kN/m}^2$ eine deutliche Zunahme der Steifigkeiten auf Werte von $E_s = 17,1 \text{ MN/m}^2$ bis $18,8 \text{ MN/m}^2$ auf. Durch die Sättigung der Probe H nahm deren Steifigkeit im Folgenden auf $E_s = 4,1 \text{ MN/m}^2$ ab, während der Steifemodul der Probe E ohne Sättigung auf den Maximalwert von $E_s = 28,7 \text{ MN/m}^2$ stieg. Die Versuche mit einer Sättigung bei $\sigma = 12,5 \text{ kN/m}^2$ bzw. 50 kN/m^2 wiesen bis zu einer mittleren Spannung von $\sigma_M = 150 \text{ kN/m}^2$ sehr geringe Werte auf, die Werte der Steifemoduln nahmen bis hierhin überwiegend ab. Bis zur mittleren Spannung von $\sigma_M = 300 \text{ kN/m}^2$ stiegen die Steifemoduln dann auf einen Wert von $E_s = 3,9 \text{ MN/m}^2$ an.

Bei der Versuchsreihe TM08318 konnte an der Probe B zu Versuchsbeginn aufgrund der frühen Sättigung eine Abnahme der Steifigkeit beobachtet werden (Bild 108). Die Versuchskurven der rest-

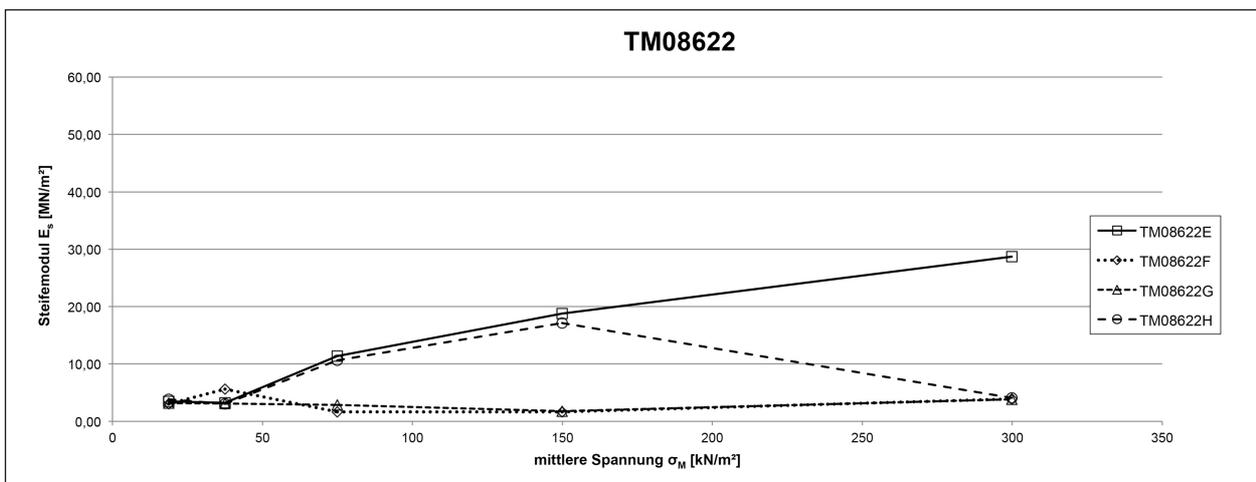


Bild 107: Spannungs-Steifemodul-Diagramm der Versuchsreihe TM08622

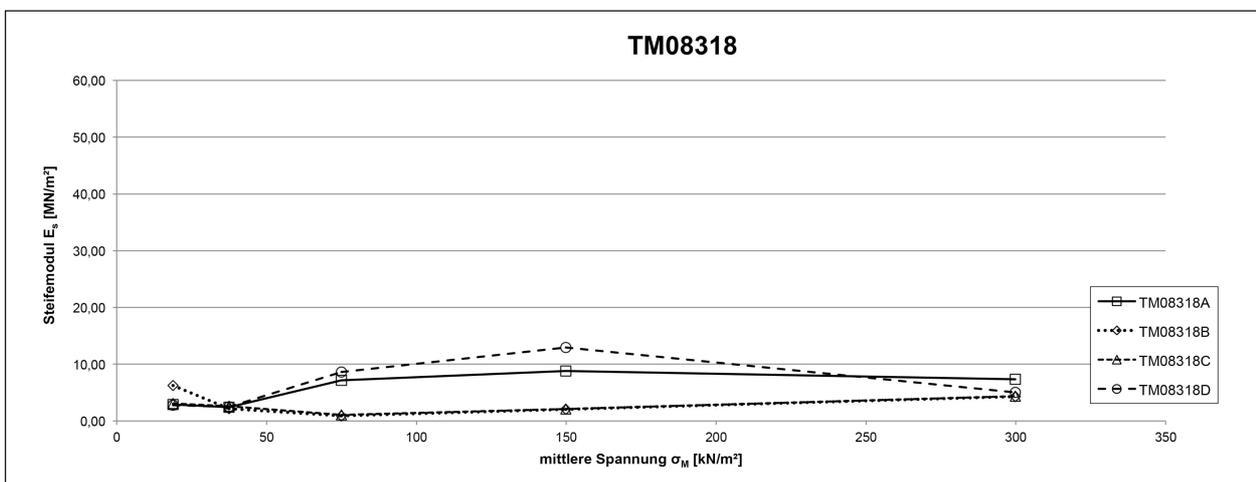


Bild 108: Spannungs-Steifemodul-Diagramm der Versuchsreihe TM08318

lichen Proben verliefen zunächst deckungsgleich. Mit der Sättigung der Probe C verliefen ab einer mittleren Spannung von $\sigma_M = 37,5 \text{ kN/m}^2$ die Kurven der Proben B und C annähernd deckungsgleich und zeigten im Folgenden einen geringen Anstieg der Steifemoduln mit zunehmender Spannung. Bei den Proben TM08318A und TM08318D war derweil ein weiterer Anstieg der Steifemoduln auf $E_s = 8,8 \text{ MN/m}^2$ bzw. $12,9 \text{ MN/m}^2$ bei einer mittleren Spannung von $\sigma_M = 150 \text{ kN/m}^2$ zu verzeichnen. Mit der letzten Steigerung der mittleren Spannung von $\sigma_M = 150 \text{ kN/m}^2$ auf 300 kN/m^2 war bei beiden Proben eine Abnahme der Steifigkeiten erkennbar. Bei der Probe TM08318D kann dieser auf die Sättigung zurückgeführt werden, bei der Probe TM08318A sind womöglich Einflüsse bei der Versuchsdurchführung hierfür verantwortlich.

Bei den Versuchen der Reihen TM08622 und TM08318 wiesen zumeist die bis dato ungesättigten Versuche die höchsten Steifigkeiten auf. Beim Vergleich der beiden Versuchsreihen weisen tendenziell die Versuche mit der höheren Einbautrockendichte im ungesättigten Fall die höheren Steifigkeiten auf. Bei den gesättigten Proben waren nur sehr geringfügige Unterschiede in den Steifigkeiten feststellbar.

In Bild 109 bis Bild 112 sind die Spannungs-Zusammendrückungsdiagramme der Versuchsreihen TM08622 und TM08318 dargestellt. Dargestellt ist die bezogene Zusammendrückung am Ende einer Laststufe gegen die jeweilige Spannung bei dieser Laststufe. Zur besseren Lesbarkeit sind jeweils nur zwei Versuchskurven in einem Diagramm dargestellt. Zunächst werden jeweils die Versuche ohne Sättigung und mit Sättigung bei

einer Spannung von $\sigma = 200 \text{ kN/m}^2$ miteinander verglichen, anschließend die Versuche mit Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 12,5 \text{ kN/m}^2$ und 50 kN/m^2 .

Die Kurvenverläufe der Versuche mit gleichem Versuchsablauf gleichen sich bei den Versuchen der Reihen TM08622 und TM08318 deutlich. Die Versuche ohne Sättigung wiesen eine kontinuierliche Zunahme der bezogenen Zusammendrückung mit steigender Spannung auf, wobei die Kurve langsam abflachte. Die maximalen Werte betragen bei einer Spannung von $\sigma = 400 \text{ kN/m}^2$ $s' = 3,0 \%$ für TM08622E und $6,0 \%$ für TM08318A. Die Entlastungsäste haben trotz abnehmender Spannung einen flachen Verlauf und erreichten die Ausgangsprobenhöhe deutlich nicht mehr. Bei den Versuchen mit Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 200 \text{ kN/m}^2$ fielen die bis zur Sättigungsspannung annähernd deckungsgleich zu den Versuchen ohne Sättigung verlaufenden Versuchskurven auf. Mit der Wasserzugabe waren deutliche Sackungen verbunden, die in den Diagrammen als senkrechte Linien ersichtlich sind. Bei der maximalen Spannung von $\sigma = 400 \text{ kN/m}^2$ erreichten die Proben ihre größten bezogenen Zusammendrückungen mit $s' = 13,0 \%$ (TM08622H) bzw. $14,6 \%$ (TM08318D). Mit Abnahme der Spannung reduzierten sich die Werte für s' auf $11,8 \%$ bzw. $13,1 \%$.

Die Versuche mit einer Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 12,5 \text{ kN/m}^2$ und 50 kN/m^2 wiesen mit Ausnahme der Veränderungen durch die Wasserzugabe annähernd parallele Kurvenverläufe auf. Die Sättigung der Proben war mit Ausnahme der Probe TM08318C, die geringfügig sackte, mit

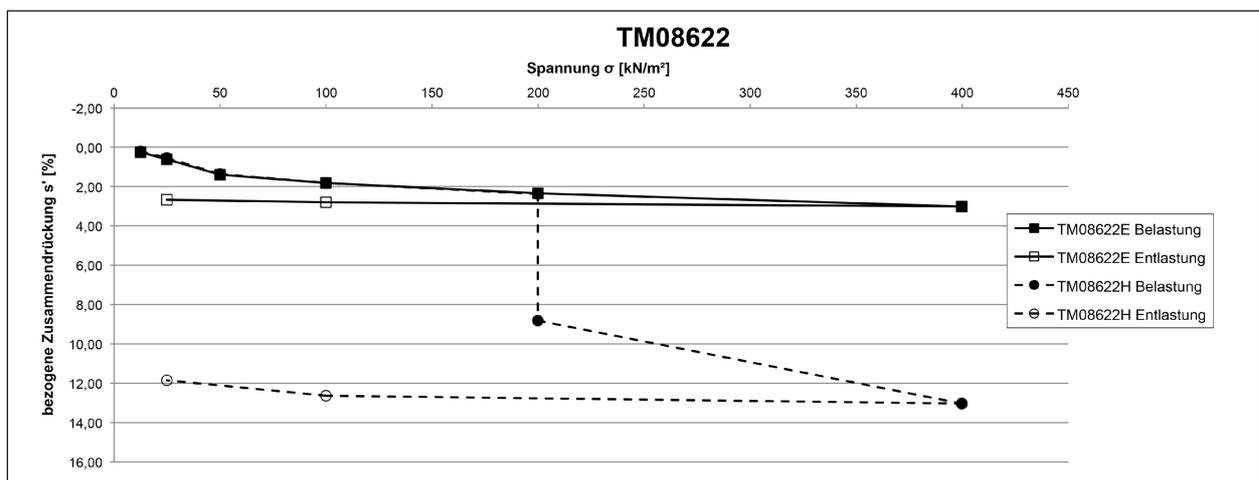


Bild 109: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche TM08622E und TM08622H

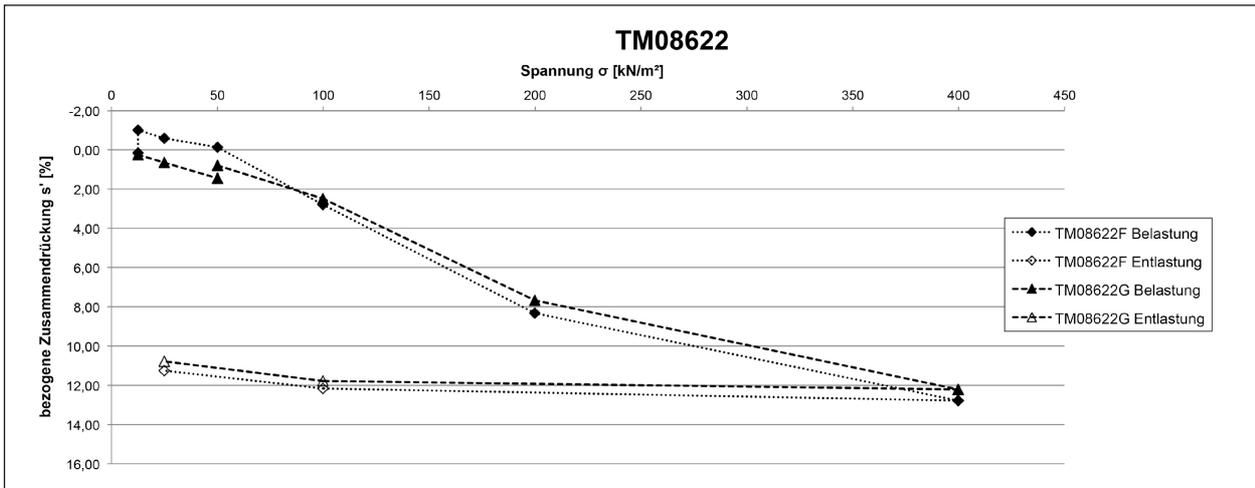


Bild 110: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche TM08622F und TM08622G

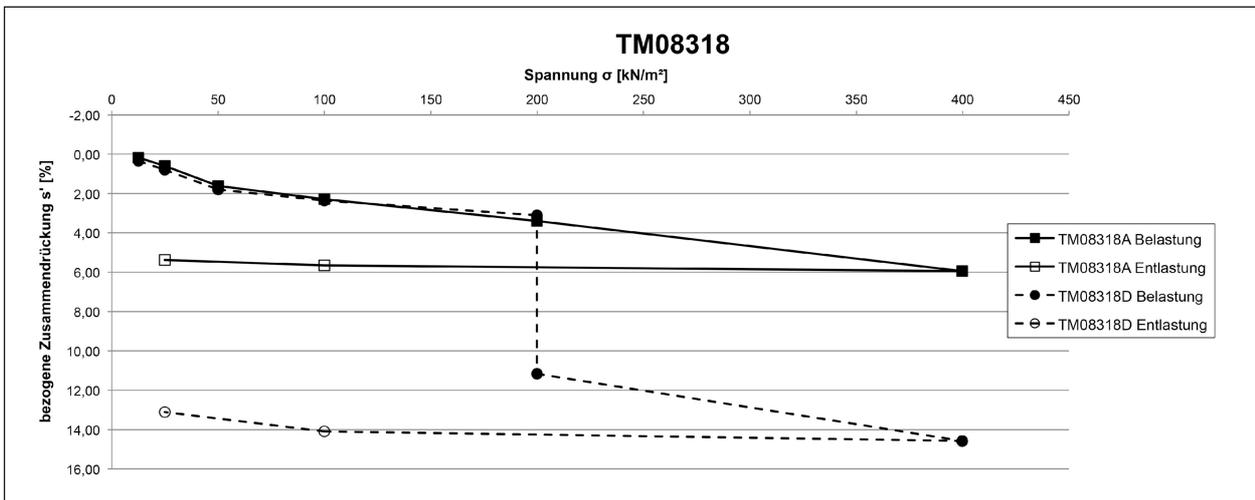


Bild 111: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche TM08318A und TM08318D

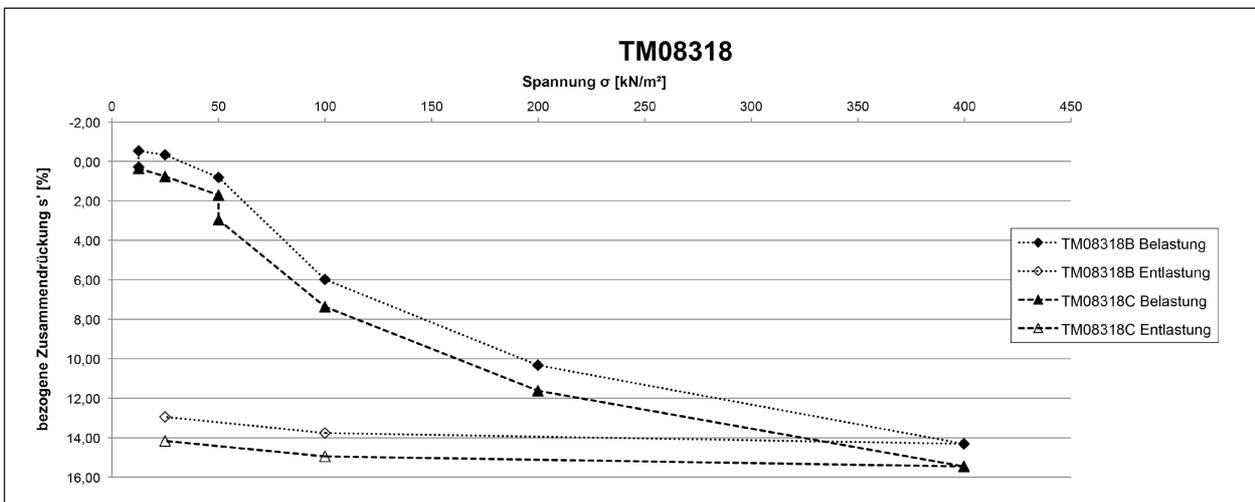


Bild 112: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche TM08318B und TM08318C

geringen Hebungerscheinungen verbunden. Mit zunehmender Spannung stieg bei allen Proben die bezogene Zusammendrückung, wobei die Kurven langsam abflachten. Die maximalen Werte für die bezogene Zusammendrückung lagen bei einer Spannung von $\sigma = 400 \text{ kN/m}^2$ zwischen $s' = 12,2 \%$ (TM08622G) und $15,5 \%$ (TM08318C). Die Proben der Reihe TM08318 wiesen hierbei die etwas höheren Werte für s' auf. Mit zunehmender Entlastung der Proben nahm bei allen Proben die bezogene Zusammendrückung wieder ab und erreichte bei Versuchsende Werte von $s' = 10,8 \%$ (TM08622G) und $14,2 \%$ (TM08318C).

In Bild 113 sind die allein durch die Wasserzugabe hervorgerufenen Änderungen der bezogenen Zusammendrückung gegen die jeweiligen Spannungen, bei denen die Sättigung erfolgte, aufgetragen. Für die Auswertung hinsichtlich Hebungen und Sackungen wurde jeweils die Differenz der bezogenen Zusammendrückung s' direkt vor und am Ende der Wasserzugabe nach 24 h gebildet.

Bei den Versuchen der Reihen TM08622 und TM08318 konnten bei einer Spannung von $\sigma = 12,5 \text{ kN/m}^2$ geringe Hebungen zwischen $0,8 \%$ und $1,2 \%$ der Probenhöhe beobachtet werden. Während der Sättigung der Proben bei einer Spannung von $\sigma = 50 \text{ kN/m}^2$ zeigte sich bei der Probe TM08622G erneut eine geringfügige Hebung. Bei der Probe TM08318C hingegen wurde eine deutliche Sackung um ca. $1,3 \%$ registriert. Durch die Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 200 \text{ kN/m}^2$ wurden deutliche Sackungen verursacht. Diese lagen bei $6,4 \%$ für die Probe TM08622H und bei $8,1 \%$ für die Probe TM08318.

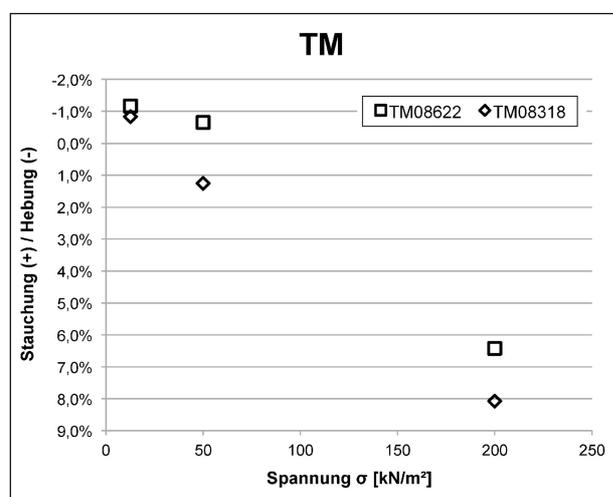


Bild 113: Auswertung der durch Wasserzugabe bei unterschiedlichen Spannungen verursachten Stauchungen und Hebungen

Tendenziell traten somit die etwas geringeren Hebungen und etwas höheren Sackungen bei der Probe mit der geringeren Einbaudichte und dem geringeren Luftporenanteil auf.

Ausgeprägt plastischer Ton (TA)

In Bild 114 bis Bild 121 sind die Einbau- und Ausbaupunkte der mit dem ausgeprägt plastischen Ton (TA) durchgeführten Versuche in Proctordiagrammen dargestellt. Enthalten sind dabei jeweils neben der Proctorkurve auch die Sättigungslinie ($S_r = 1$ bzw. $n_a = 0 \text{ Vol.-%}$) und die Isolinien für Luftporenanteile von $n_a = 4 \text{ Vol.-%}$, 8 Vol.-% und 12 Vol.-% . Die angestrebten Einbaubedingungen entsprechend dem zugrunde gelegten Versuchsprogramm wurden erreicht. Bei der Herstellung der Probekörper für die Einbaubedingung TA09508 wurden im ersten Versuch die geplanten Trockendichten übertroffen. Die Versuchsreihe wurde entsprechend der erreichten Trockendichte von 96% der Proctordichte in TA09608 umbenannt (Bild 119). Später wurde die Versuchsreihe TA09508 erfolgreich mit den angedachten Einbaubedingungen wiederholt.

Die überwiegende Anzahl der Versuche lag innerhalb des Sollbereichs für die Einbaubedingungen. Bei den Versuchen der Reihe TA10008 überstiegen die Einbauwassergehalte die Solleinbauwassergehalte um etwas mehr als 1% -Punkt (Bild 115). Vereinzelt lagen Proben geringfügig außerhalb des Sollbereichs. Bei den restlichen Versuchsreihen wurden die gewünschten Einbaubedingungen jedoch eingehalten.

Die Versuche mit Wasserzugabe wiesen nach Ausbau alle eine vollständige bis nahezu vollständige Sättigung auf. Somit kann von einem erfolgreichen Sättigungsvorgang während der Versuche ausgegangen werden. Die Ausbaupunkte lagen häufig im Proctordiagramm knapp oberhalb der Sättigungslinie (Bild 114 bis Bild 121). Dies ist vermutlich auf Messungenauigkeiten zurückzuführen. Eventuell sind hierfür aber auch Anhaftungen von Wasser oder die Aufnahme von Wasser beim Probenausbau verantwortlich. Bei den Versuchen, die keine Sättigung während des Versuchs erfuhren, konnte durchweg eine Abnahme des Wassergehalts um vier bis sechs Prozentpunkte durch Austrocknung der Probekörper beobachtet werden.

Bei nahezu allen Versuchen mit Sättigung der Proben kam es aufgrund von Quellvorgängen nach der

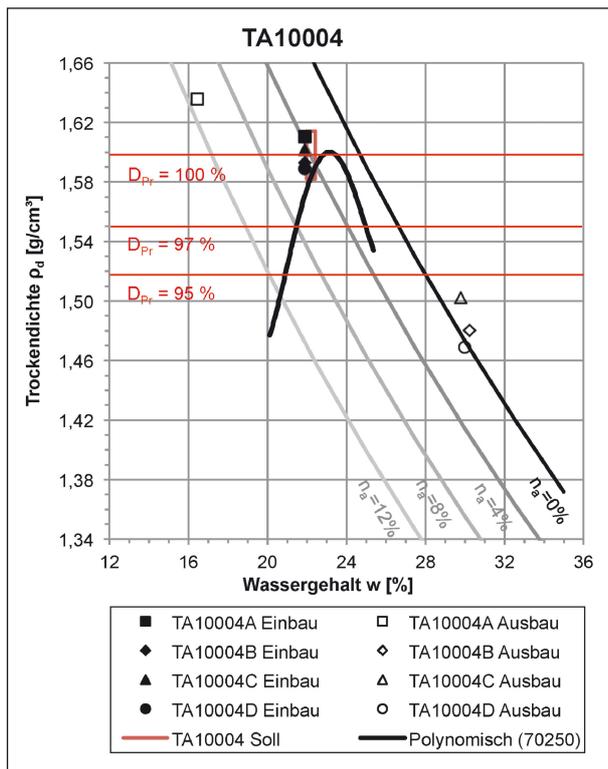


Bild 114: Erreichte Werte für Trockendichte und Wassergehalt bei Ein- und Ausbau der Proben TA10004

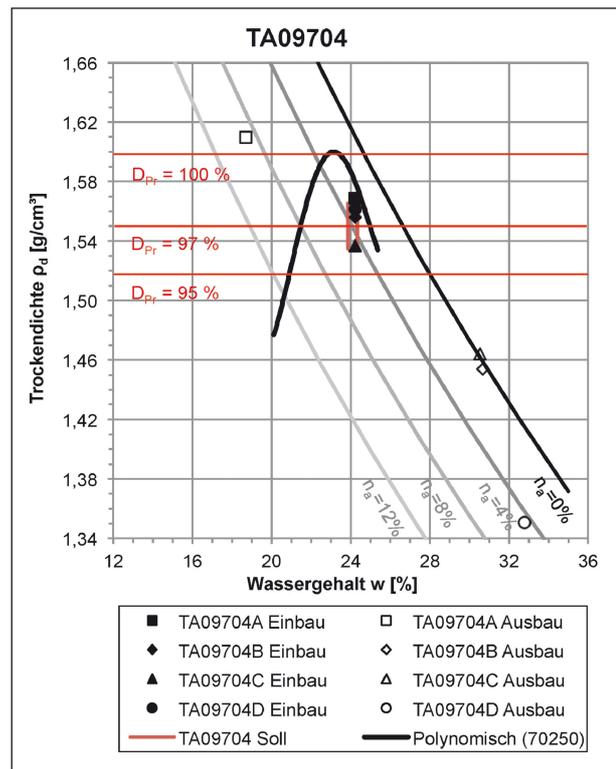


Bild 116: Erreichte Werte für Trockendichte und Wassergehalt bei Ein- und Ausbau der Proben TA09704

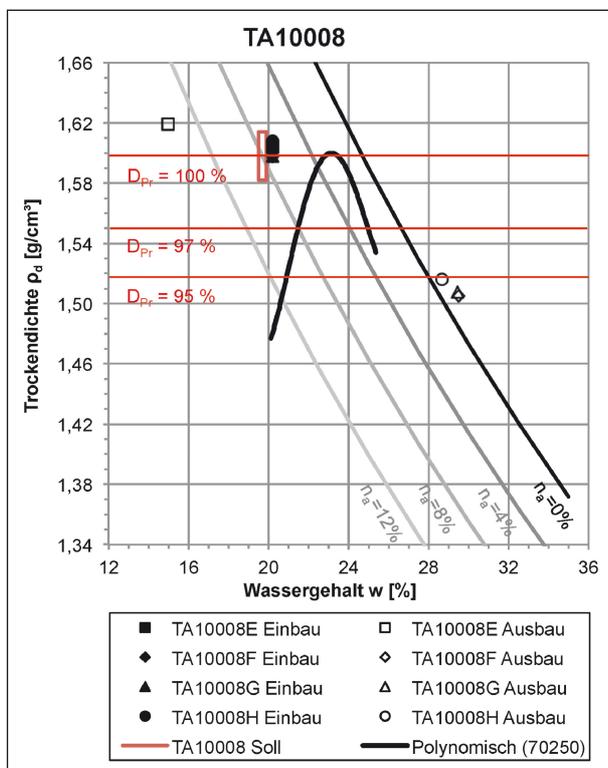


Bild 115: Erreichte Werte für Trockendichte und Wassergehalt bei Ein- und Ausbau der Proben TA10008

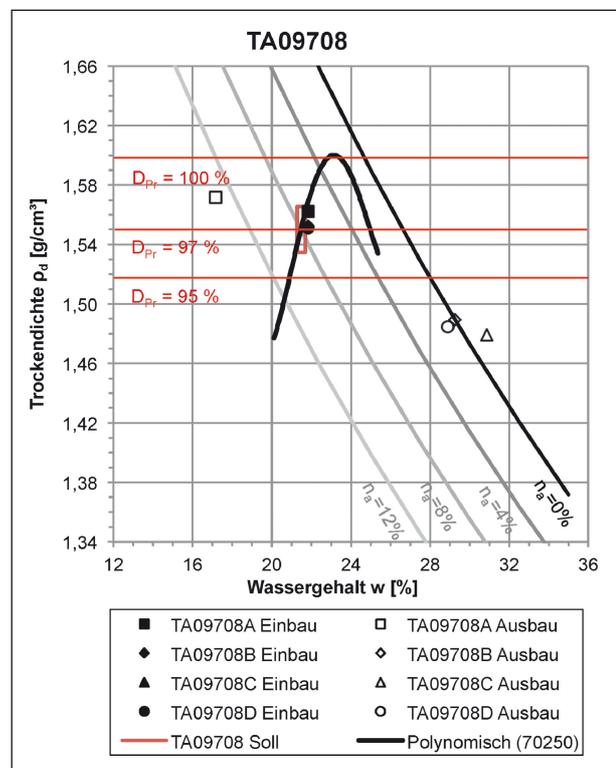


Bild 117: Erreichte Werte für Trockendichte und Wassergehalt bei Ein- und Ausbau der Proben TA09708

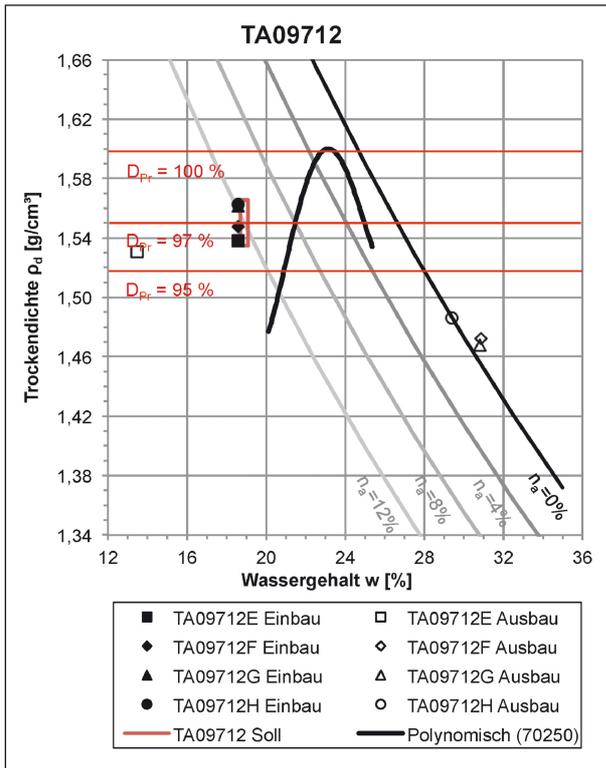


Bild 118: Erreichte Werte für Trockendichte und Wassergehalt bei Ein- und Ausbau der Proben TA09712

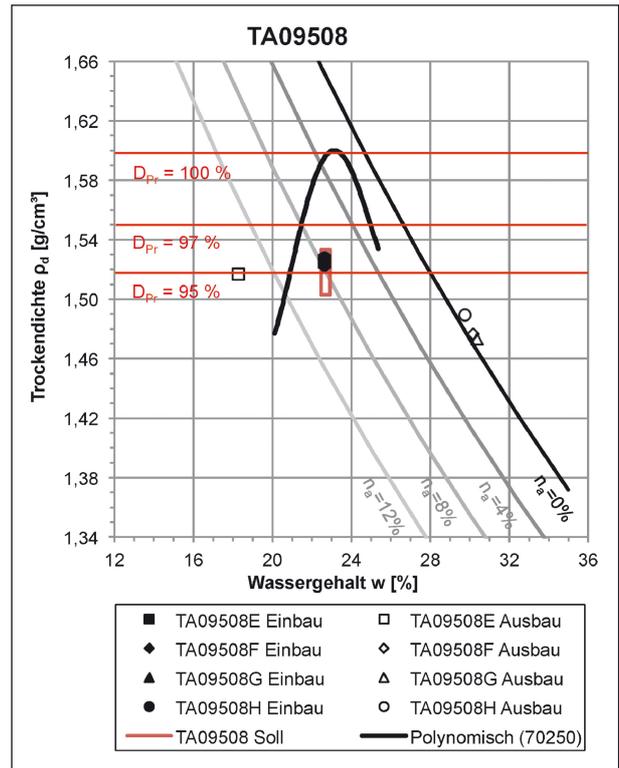


Bild 120: Erreichte Werte für Trockendichte und Wassergehalt bei Ein- und Ausbau der Proben TA09508

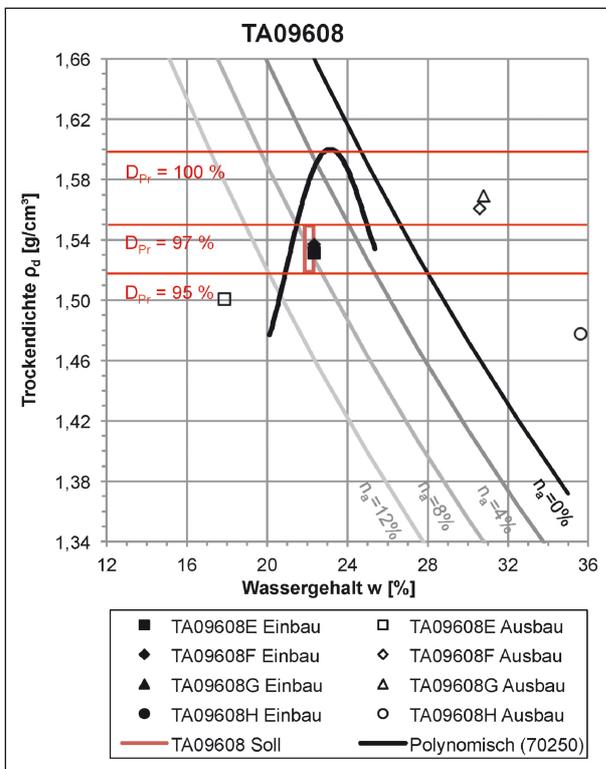


Bild 119: Erreichte Werte für Trockendichte und Wassergehalt bei Ein- und Ausbau der Proben TA09608

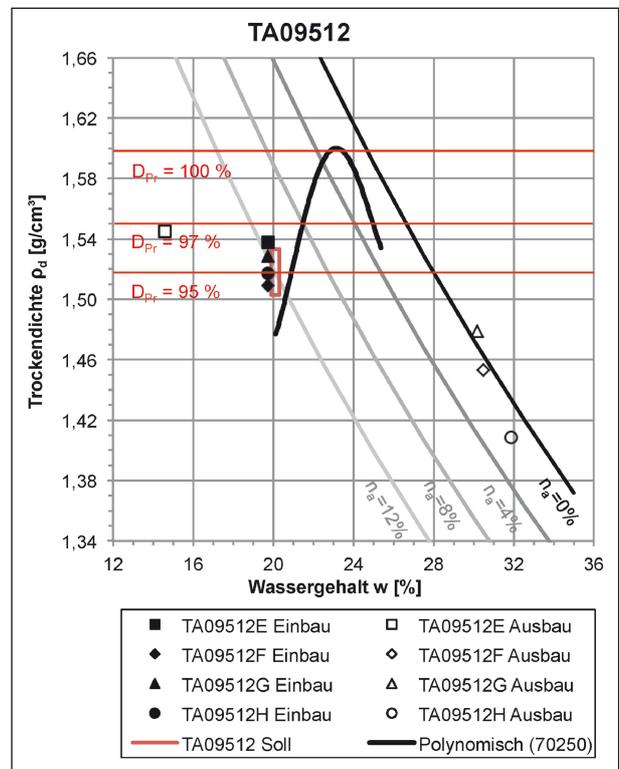


Bild 121: Erreichte Werte für Trockendichte und Wassergehalt bei Ein- und Ausbau der Proben TA09512

Wasserzugabe zu teilweise deutlichen Verringerungen der Dichten, die maximal $0,21 \text{ g/cm}^3$ betrug. Am deutlichsten wurden diese Dichteunterschiede bei den Versuchen mit hohen Einbautrockendichten bzw. geringen Luftporenanteilen festgestellt. Hier lagen die Ausbautrockendichten der Versuche mit Sättigung um durchschnittlich $0,11 \text{ g/cm}^3$ (TA10004), $0,09 \text{ g/cm}^3$ (TA10008) bzw. $0,13 \text{ g/cm}^3$ (TA09704) unterhalb der Einbautrockendichten. Bei den Versuchen mit den geringsten Einbautrockendichten fielen die Unterschiede mit durchschnittlich $0,05 \text{ g/cm}^3$ (TA09508) und $0,07 \text{ g/cm}^3$ (TA09512) deutlich geringer aus.

Die Protokolle der einzelnen Versuche sind in den Anlagen 5.69 bis 5.100 enthalten.

In Bild 122 bis Bild 129 sind die Spannungs-Steifemodul-Diagramme der mit dem ausgeprägt plastischen Ton durchgeführten Versuchsreihen dargestellt. Die Ermittlung der Steifemoduln erfolgte als Sekantenmoduln von zwei aufeinanderfolgenden Laststufen. Die in den Diagrammen angegebenen mittleren Spannungen stellen jeweils die Mittelwerte der Spannungen dieser beiden Laststufen dar.

Die Versuchsreihen wiesen überwiegend ähnliche Verläufe in den Spannungs-Steifemodul-Diagrammen auf. Nach einer Zunahme der Steifigkeiten zu Beginn des Versuchs bei niedrigen Spannungen blieben die Werte bei den Proben, die während des Versuchs gesättigt wurden, ab einer mittleren Spannung von $\sigma_M = 75 \text{ kN/m}^2$ relativ konstant. Überwiegend konnten bei höheren mittleren Spannungen nur noch leichte Zunahmen, vereinzelt auch leichte Abnahmen der Steifemoduln beobachtet werden. Bei den Versuchen ohne Sättigung wurde bei allen Proben ein deutlicher Anstieg

der Steifigkeit mit der Steigerung der mittleren Spannung von $\sigma_M = 150 \text{ kN/m}^2$ auf 300 kN/m^2 festgestellt.

Zu Beginn der Versuche war bei Proben der Reihen B und F mit einer frühen Wasserzugabe bei einer Spannung von $\sigma = 12,5 \text{ kN/m}^2$ eine Abnahme der Steifigkeiten zu beobachten (z. B. Bild 124). Dies ist auf die frühe Wassersättigung der Proben bei einer Spannung von $\sigma = 12,5 \text{ kN/m}^2$ zurückzuführen.

Die höchsten Steifigkeiten wurden insbesondere bei den höchsten untersuchten mittleren Spannungen an den Versuchen ohne Sättigung (Proben A und E) ermittelt. Bei einer mittleren Spannung von $\sigma_M = 300 \text{ kN/m}^2$ lagen hierbei die Steifemoduln zwischen $E_s = 23,6 \text{ MN/m}^2$ (TM09508E, Bild 128) und $42,0 \text{ MN/m}^2$ (TM09712E, Bild 126). In deutlichem Abstand folgten die Versuche mit einer späten Sättigung. Die Versuche mit einer frühen Sättigung bei $\sigma = 12,5 \text{ kN/m}^2$ und 50 kN/m^2 wiesen bei mittelhohen und hohen Spannungen generell die geringsten Steifigkeiten auf.

Aussagen hinsichtlich des Einflusses des Luftporenanteils auf die Versuchsergebnisse lassen sich anhand der Spannungs-Steifemodul-Diagramme nur schwer ableiten. Sowohl Proben mit niedrigen als auch mit hohen Luftporenanteilen wiesen im Vergleich der Steifemoduln bei gleichen Laststufen und Sättigungen teilweise die höchsten als auch die niedrigsten Steifigkeiten auf. Vermutlich sind die Einflüsse bei der Probekörperherstellung und der Versuchsdurchführung oder auch zu geringe Unterschiede in den Einbaubedingungen als Ursache dafür verantwortlich, dass keine eindeutigeren Aussagen getroffen werden können.

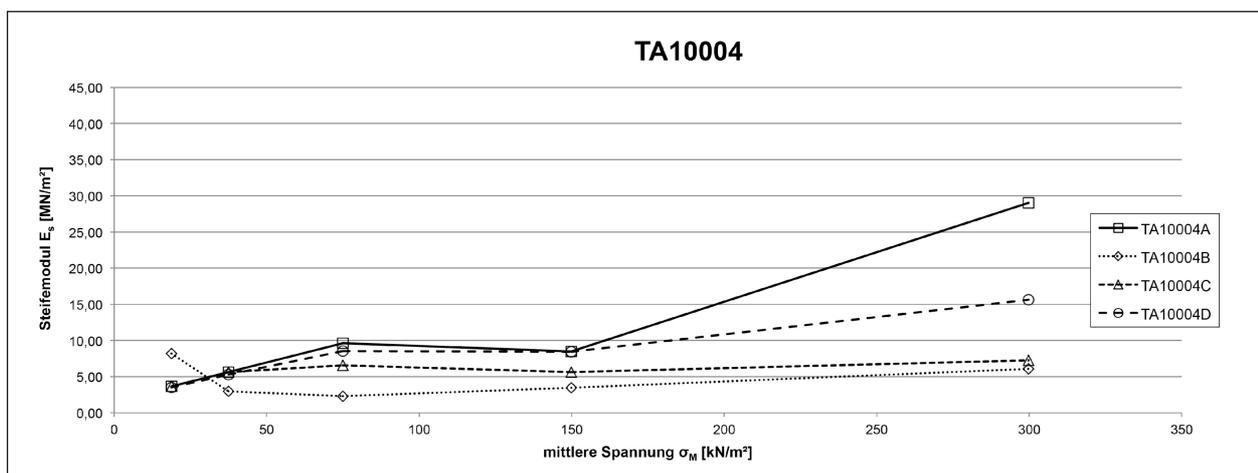


Bild 122: Spannungs-Steifemodul-Diagramm der Versuchsreihe TA10004

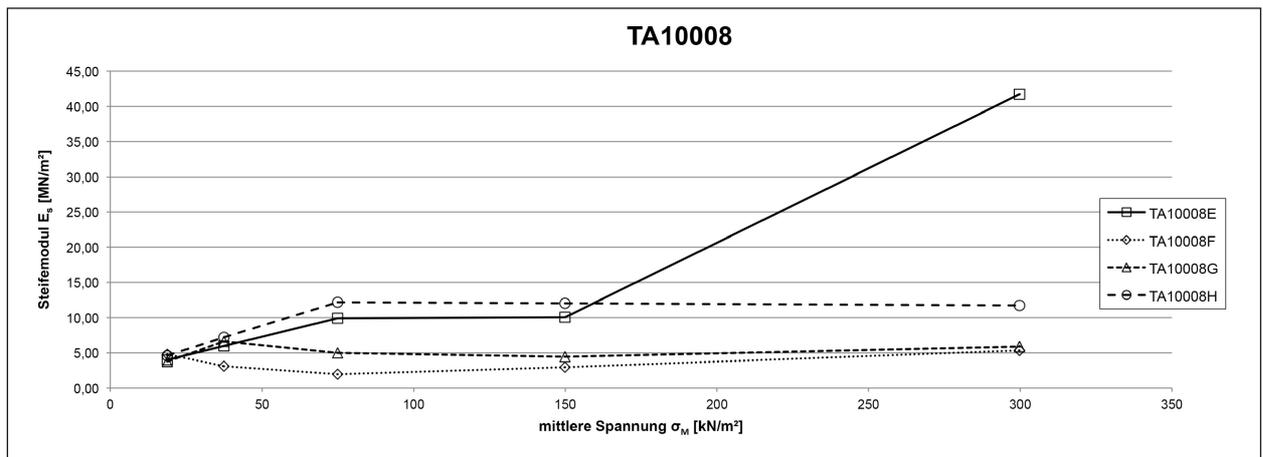


Bild 123: Spannungs-StEIFemodul-Diagramm der Versuchsreihe TA10008

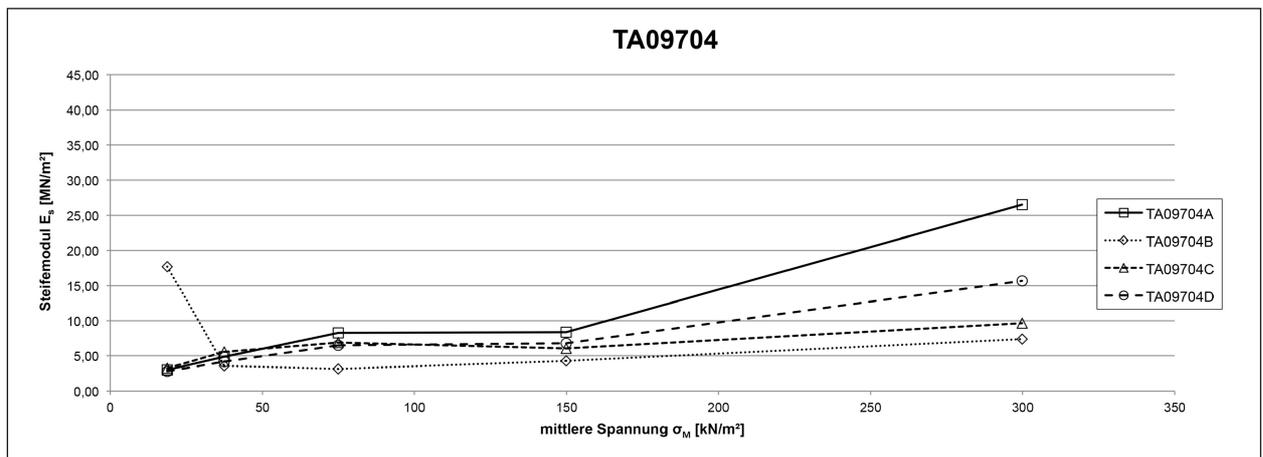


Bild 124: Spannungs-StEIFemodul-Diagramm der Versuchsreihe TA09704

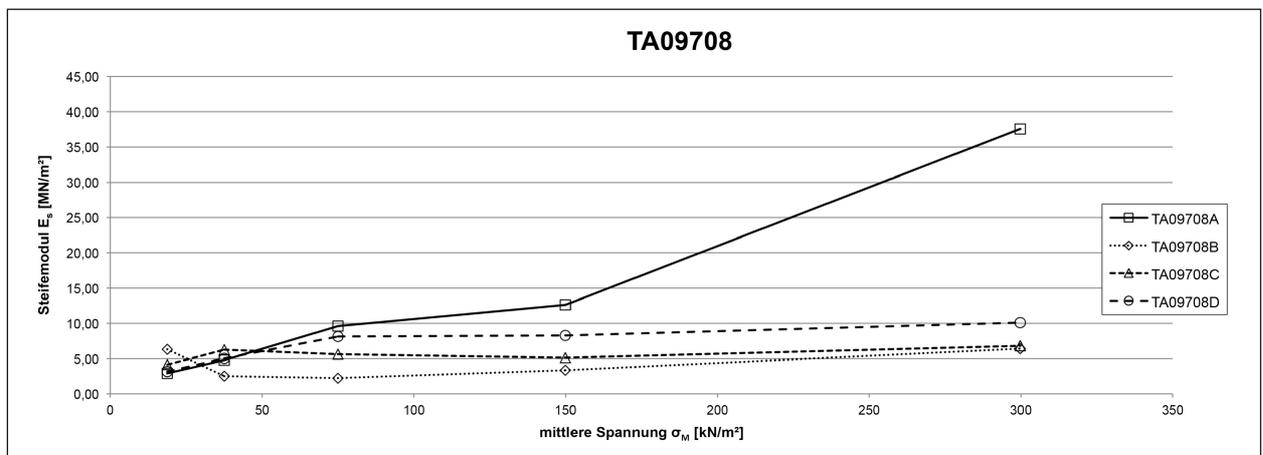


Bild 125: Spannungs-StEIFemodul-Diagramm der Versuchsreihe TA09708

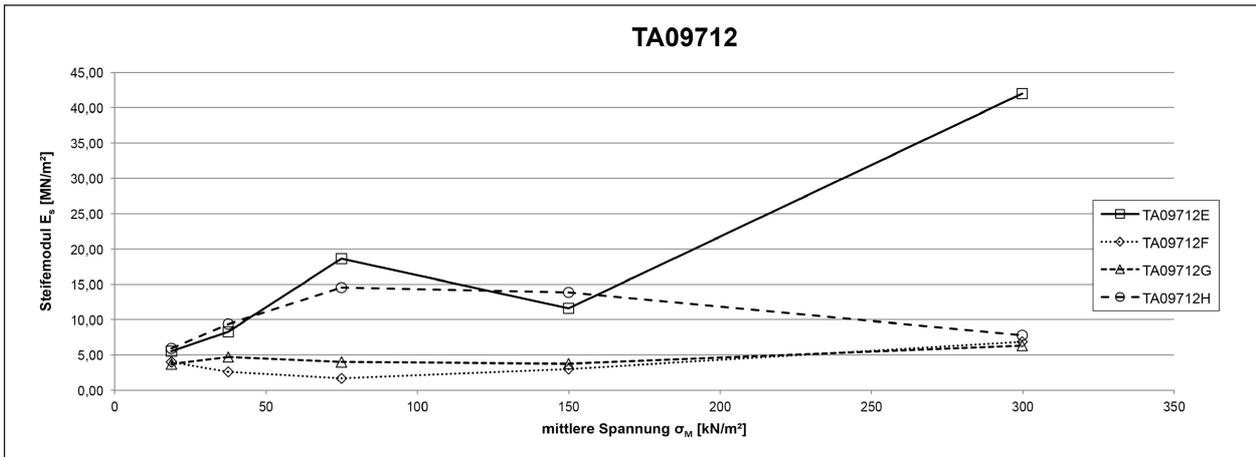


Bild 126: Spannungs-StEIFEMODUL-DIAGRAMM der Versuchsreihe TA09712

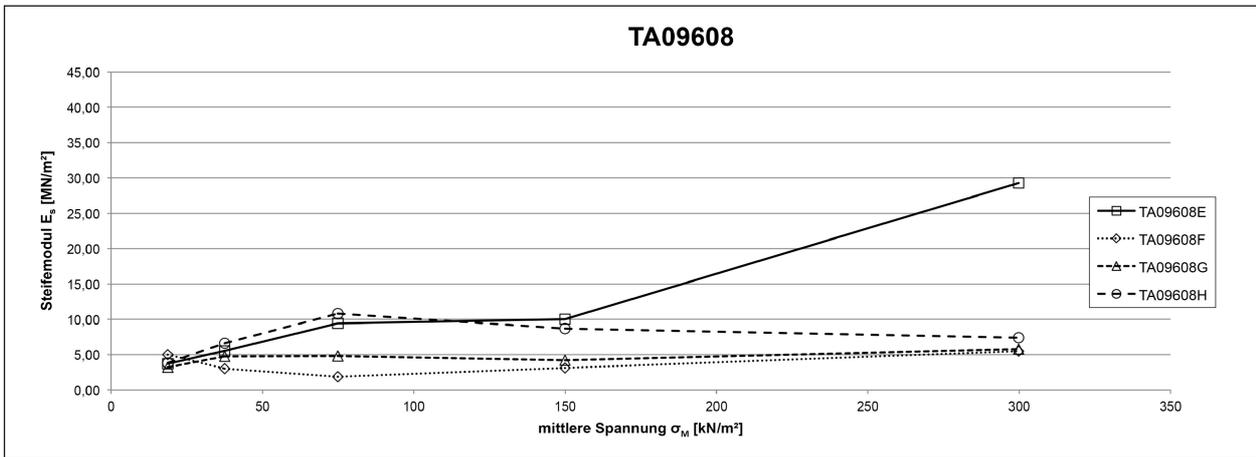


Bild 127: Spannungs-StEIFEMODUL-DIAGRAMM der Versuchsreihe TA09608

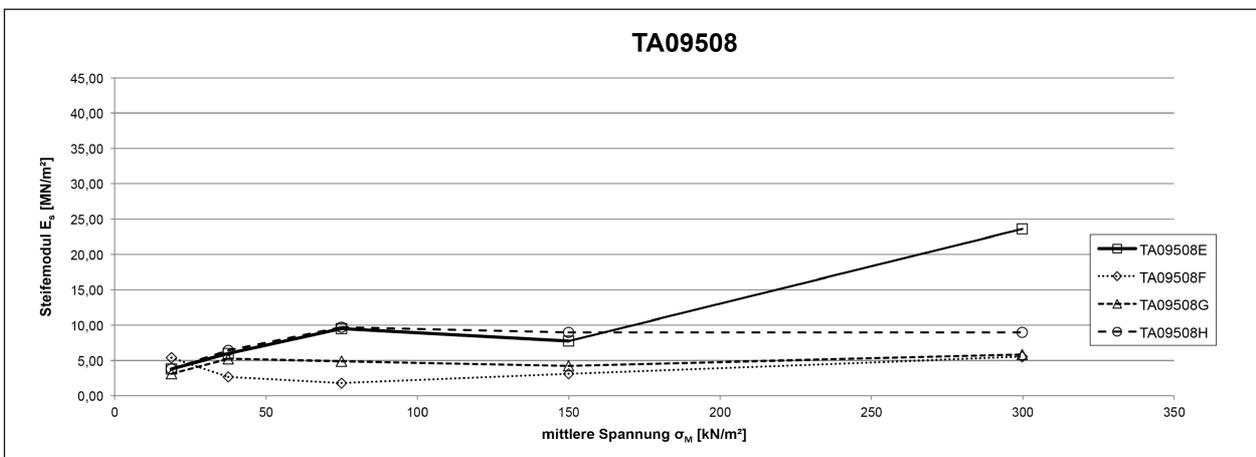


Bild 128: Spannungs-StEIFEMODUL-DIAGRAMM der Versuchsreihe TA09508

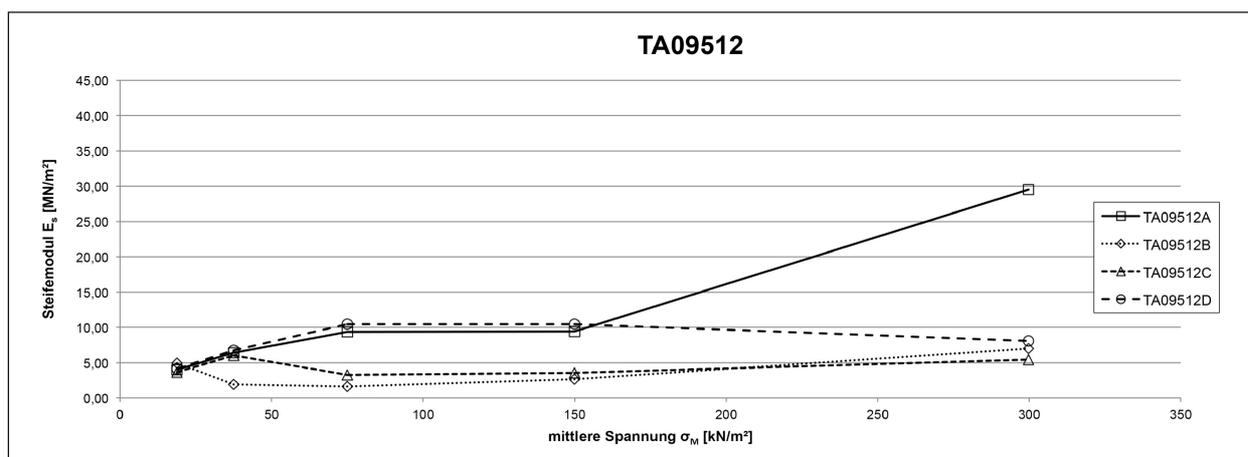


Bild 129: Spannungs-StEIFEMODUL-DIAGRAMM der Versuchsreihe TA09512

In Bild 130 bis Bild 133 sind die Versuche der verschiedenen Versuchsreihen mit dem Boden TA miteinander verglichen, die nicht bzw. bei gleicher Laststufe gesättigt wurden. Dementsprechend sind in Bild 130 die Versuche ohne Sättigung (mit den Endungen A und E) dargestellt, in Bild 131 die Versuche mit einer Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 12,5$ kN/m² (Endungen B und F), in Bild 132 jene mit einer Sättigung bei $\sigma = 50$ kN/m² (Endungen C und G) und in Bild 133 die Versuche mit einer Wasserzugabe bei $\sigma = 200$ kN/m² (Endungen D und H).

Die Versuche ohne Sättigung wiesen überwiegend sehr ähnliche Versuchsverläufe auf (Bild 130). Mit Zunahme der mittleren Spannungen von $\sigma_M = 18,75$ kN/m² auf 75 kN/m² stiegen die Steifemoduln bei allen Proben deutlich an. Bis zu einer mittleren Spannung von $\sigma_M = 150$ kN/m² blieben die Steifigkeitswerte bei der überwiegenden Anzahl an Proben anschließend relativ konstant. Auffällig ist jedoch die nicht nachvollziehbare deutliche Zunahme und spätere Abnahme des Steifemoduls der Probe TA09712E von $E_s = 8,3$ MN/m² (bei $\sigma_M = 18,75$ kN/m²) auf 18,6 MN/m² ($\sigma_M = 75$ kN/m²) auf 11,6 MN/m² ($\sigma_M = 150$ kN/m²). Mit der weiteren Zunahme der mittleren Spannungen von $\sigma_M = 150$ kN/m² auf 300 kN/m² stiegen die Steifemoduln von Werten zwischen $E_s = 7,7$ MN/m² und 12,6 MN/m² auf $E_s = 23,6$ MN/m² bis 42,0 MN/m² an.

Auch die Versuche mit Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 12,5$ kN/m² wiesen sehr ähnliche Versuchsverläufe in den Spannungs-StEIFEMODUL-DIAGRAMMEN auf (Bild 131). Alle Proben wiesen zu Beginn des Versuchs nach der Sättigung eine Abnahme ihrer Steifigkeiten von Werten zwischen

$E_s = 4,0$ MN/m² und 17,7 MN/m² bei $\sigma_M = 18,75$ kN/m² auf Werte von $E_s = 2,0$ MN/m² bis 3,6 MN/m² bei $\sigma_M = 37,5$ kN/m² und weiter auf Werte zwischen $E_s = 1,6$ MN/m² und 3,2 MN/m² bei $\sigma_M = 75$ kN/m² auf. Mit einem weiteren Anstieg der mittleren Spannungen auf $\sigma_M = 150$ kN/m² und $\sigma_M = 300$ kN/m² stiegen anschließend die Steifemoduln geringfügig auf Werte zwischen $E_s = 2,7$ MN/m² und 4,3 MN/m² bzw. von 5,3 MN/m² bis 7,4 MN/m². Entsprechend flach ist der Kurvenverlauf. Die höchsten Steifigkeiten wurden an der Probe TM09704B gemessen, die niedrigsten überwiegend an der Probe TM09512B. Die Steifigkeitsunterschiede fielen bei dieser Versuchsreihe jedoch äußerst gering aus.

Zu Beginn der Versuche mit einer Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 50$ kN/m² wiesen die Proben ähnliche Werte für die Steifemoduln zwischen $E_s = 3,1$ MN/m² und 4,1 MN/m² auf (Bild 132). Mit zunehmender Spannung stiegen bei allen Versuchen die Steifemoduln zunächst an, bis die Proben gesättigt wurden. Lediglich bei den Versuchen TA10004A und TA09704A konnte ein weiterer, deutlicher Anstieg der Steifemoduln nach der Sättigung festgestellt werden. Dementsprechend weisen diese beiden Proben bei dieser mittleren Spannung die höchsten Steifemoduln auf. Bei den Proben TA10008G, TA09708C, TA09712G, TA09508G und TA09512C wurde eine Abnahme der Steifemoduln beobachtet. Im Folgenden nahmen bei allen Versuchen mit Ausnahme der Probe TA09512C die Steifemoduln bis zur nächsten mittleren Spannung von $\sigma_M = 150$ kN/m² geringfügig weiter ab ($E_s = 3,6$ MN/m² bis 6,1 MN/m²). Bis zur maximalen mittleren Spannung von $\sigma_M = 300$ kN/m² war abschließend ein Anstieg der Steifigkeiten auf Werte zwischen $E_s = 5,4$ MN/m²

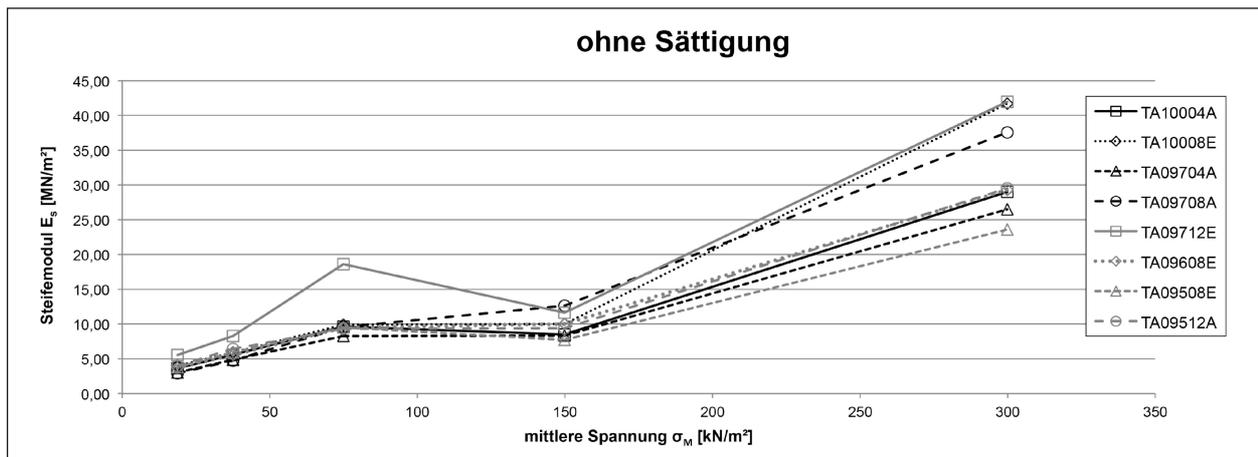
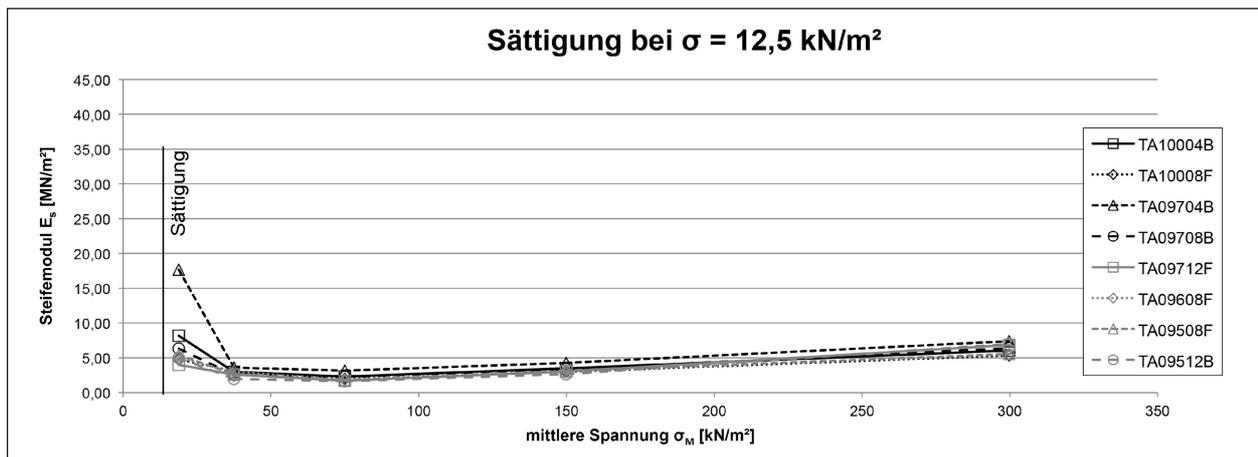


Bild 130: Spannungs-Steifemodul-Diagramm der Versuche ohne Sättigung

Bild 131: Spannungs-Steifemodul-Diagramm der Versuche mit Sättigung bei einer mittleren Spannung von 12,5 kN/m²

bis 9,6 MN/m² zu verzeichnen. Die höchsten Steifigkeiten wiesen bei den Versuchen mit einer Sättigung bei $\sigma = 50 \text{ kN/m}^2$ überwiegend die Proben TA10004C, TA10008G, TA09704C und TA09708C auf.

Zu Beginn der Versuche mit einer späten Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 200 \text{ kN/m}^2$ wiesen die Proben der Versuche D und H des Versuchsbodens TA einen deutlichen Anstieg der Steifemoduln bis zu einer mittleren Spannung von $\sigma_M = 75 \text{ kN/m}^2$ auf (Bild 133). Aufgrund der Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 200 \text{ kN/m}^2$ wurden bei einer mittleren Spannung von $\sigma_M = 150 \text{ kN/m}^2$ überwiegend nur geringfügige Änderungen der Steifigkeiten registriert. Lediglich die Probe TA09508G wies eine deutliche Abnahme der Stei-

figkeit auf. Bis zu einer mittleren Spannung von $\sigma_M = 300 \text{ MN/m}^2$ reagierten dann tendenziell die Proben mit hohen Verdichtungsgraden und geringen Luftporenanteilen mit einer deutlichen Zunahme der Steifigkeiten (z. B. TA09704D: von $E_s = 6,8 \text{ MN/m}^2$ auf $15,7 \text{ MN/m}^2$). Die deutlichsten Abnahmen in den Steifigkeiten wurden bei Proben mit hohen Luftporenanteilen von $n_a = 12 \text{ Vol.-%}$ beobachtet (z. B. TA09712H: von $E_s = 13,8 \text{ MN/m}^2$ auf $7,8 \text{ MN/m}^2$).

Aus Bild 130 bis Bild 133 ist erkennbar, dass die untersuchten Einbaudichten und Einbauwasserhalte keinen signifikanten Einfluss auf die Verläufe der Spannungs-Steifemodul-Beziehungen nehmen. Entscheidend ist vielmehr der Zeitpunkt der Probensättigung.

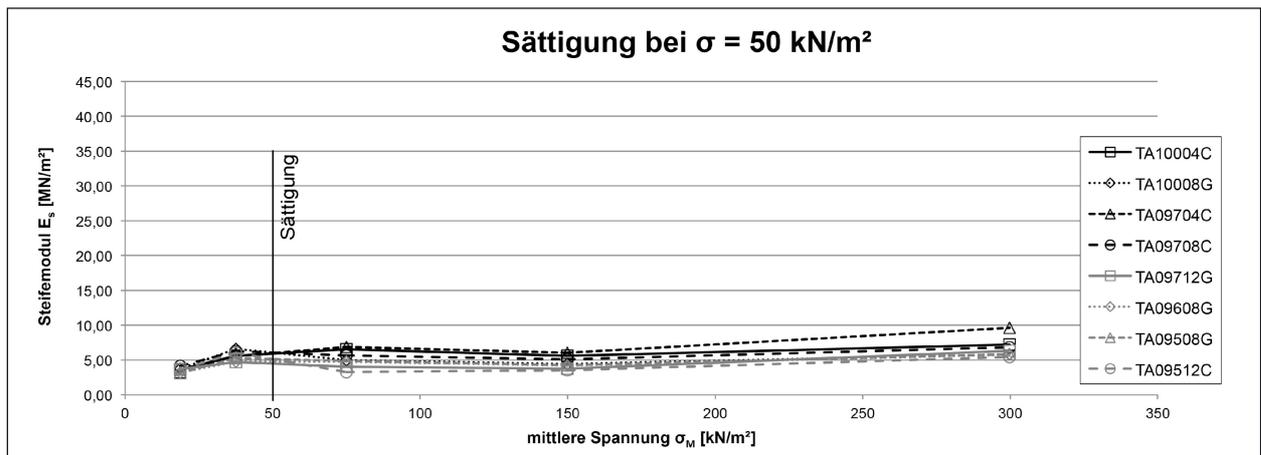


Bild 132: Spannungs-Steifemodul-Diagramm der Versuche mit Sättigung bei einer mittleren Spannung von 50 kN/m²

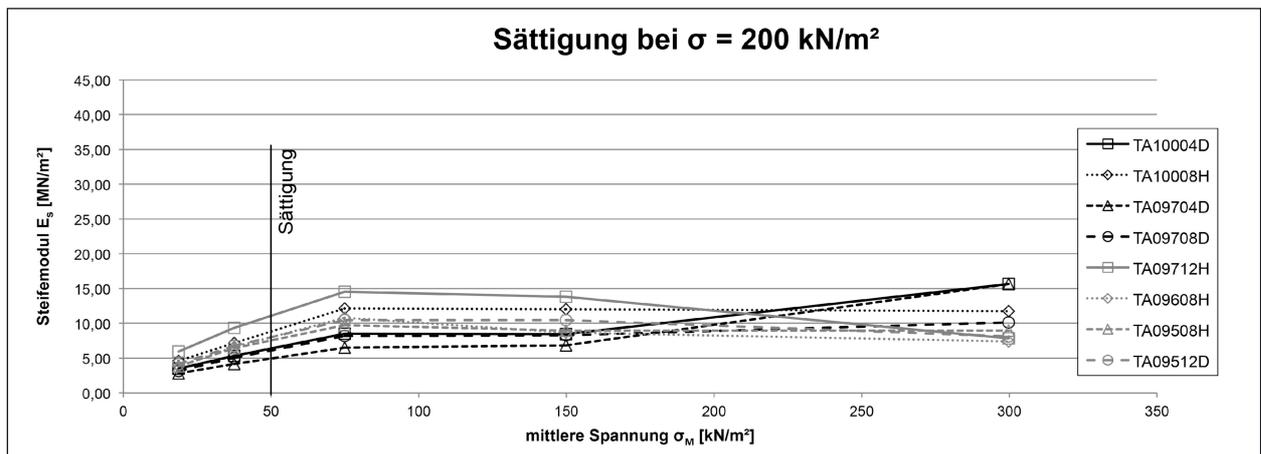


Bild 133: Spannungs-Steifemodul-Diagramm der Versuche mit Sättigung bei einer mittleren Spannung von 200 kN/m²

In Bild 134 bis Bild 149 sind die Spannungs-Zusammendrückungsdiagramme der einzelnen Versuchsreihen dargestellt. Für die bessere Lesbarkeit sind jeweils nur zwei Versuche in einem Diagramm dargestellt. Zunächst werden die Versuche ohne Sättigung und die Versuche mit einer Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 200 \text{ kN/m}^2$ miteinander verglichen, anschließend die mit einer Sättigung bei $\sigma = 12,5 \text{ kN/m}^2$ und 50 kN/m^2 .

Die Versuchsreihen ähneln sich hinsichtlich der Kurvenverläufe bis zu einem bestimmten Maß. Mit zunehmender Last verflacht sich die Spannungs-Zusammendrückungskurve bei allen Versuchen. Der Entlastungsast steigt anschließend mit abnehmender Last stärker an. Die Proben, die während des Versuchs gesättigt worden waren, weisen zudem deutliche spannungsunabhängige Verformungen

durch die Wasseraufnahme auf, die in den Diagrammen als senkrechte Linien dargestellt sind. Aufgrund dieser Hebungerscheinungen hatten die Probekörper am Versuchsende größere Höhen als beim Einbau, entsprechend wies die bezogene Zusammendrückung s' in den Diagrammen negative Werte auf. Sackungen wurden nicht beobachtet. Die Probekörper, die nicht gesättigt worden waren, erreichten mit Ausnahme der Probe TA09508E (Bild 146) nach der Entlastung die Ausgangshöhen nicht mehr.

Die maximal ermittelte bezogene Zusammendrückung betrug $s' = 4,9 \%$ bei einer Spannung von $\sigma = 400 \text{ kN/m}^2$ und wurde an der Probe TA09608H ermittelt (Bild 144). Die minimale bezogene Zusammendrückung bei dieser Spannung wurde an der Probe TA09704D mit $s' = 1,1 \%$ gemessen (Bild 138).

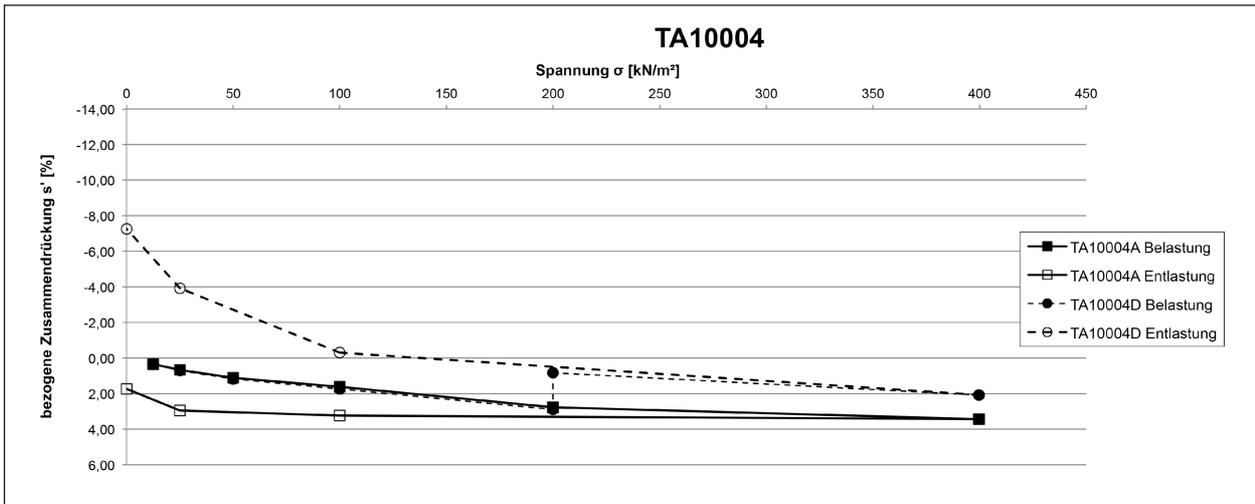


Bild 134: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche TA10004A und TA10004D

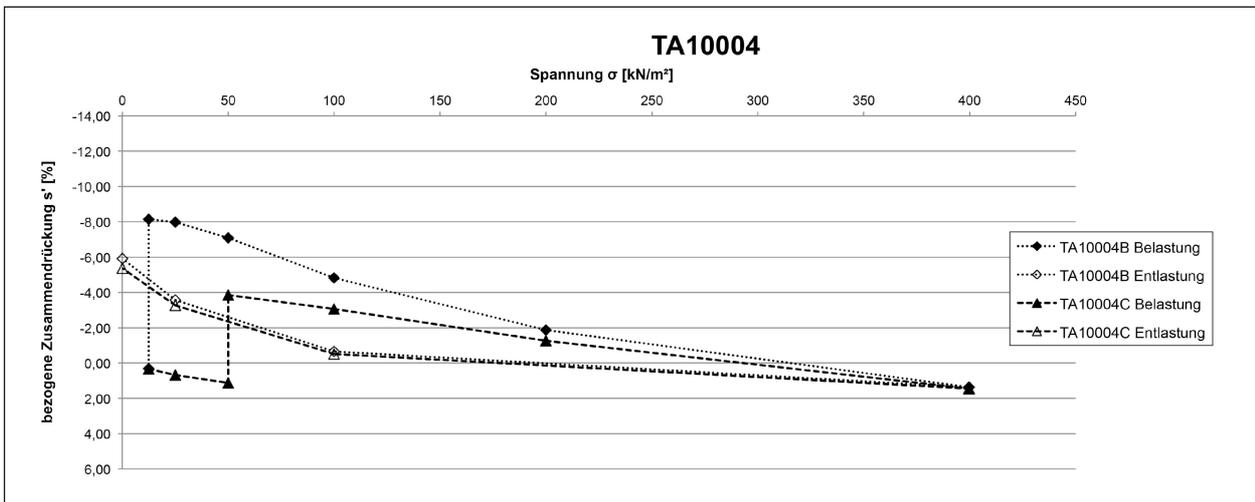


Bild 135: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche TA10004B und TA10004C

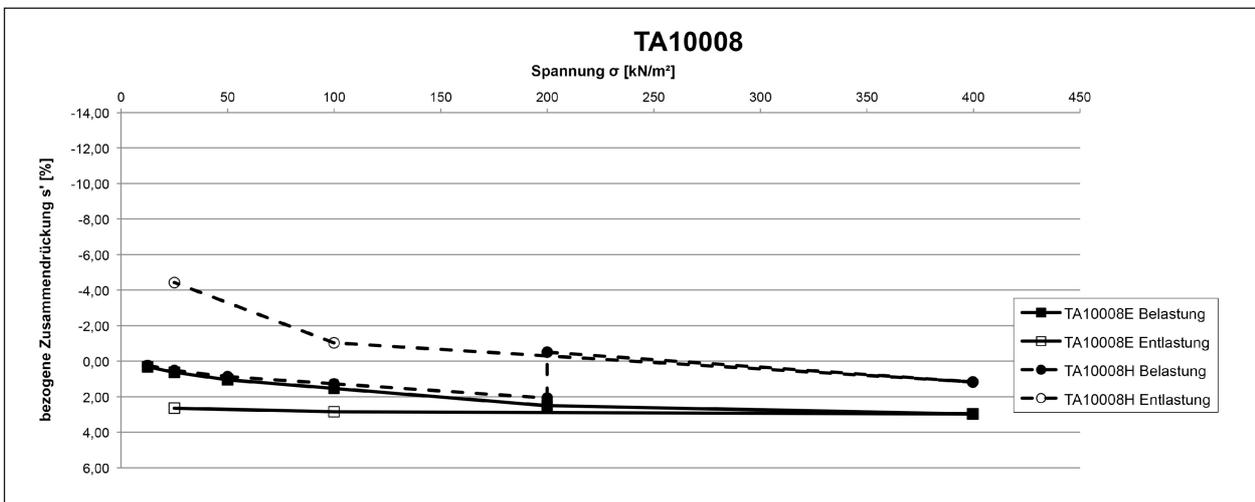


Bild 136: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche TA10008E und TA10008H

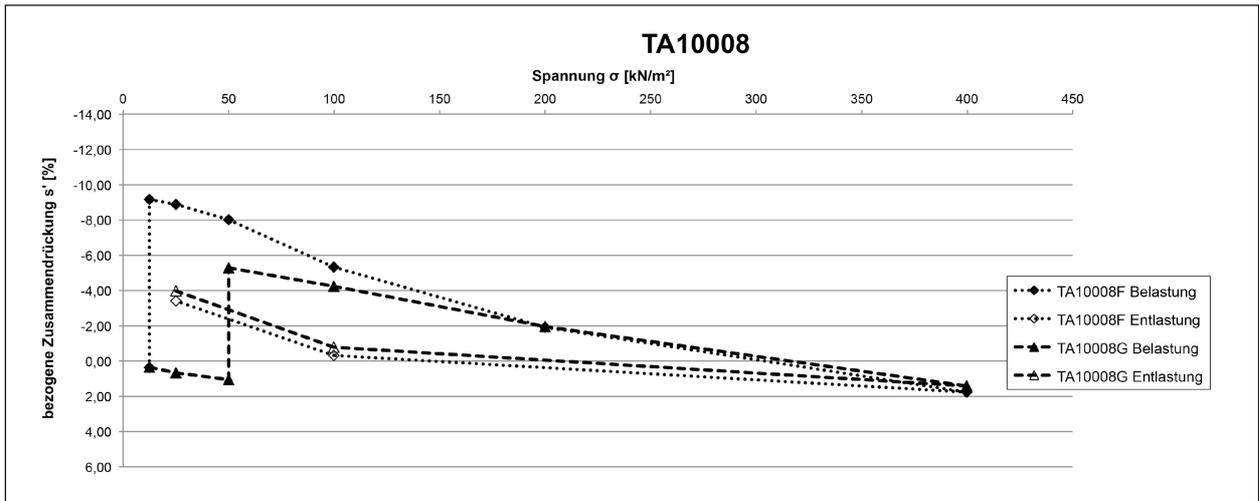


Bild 137: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche TA10008F und TA10008G

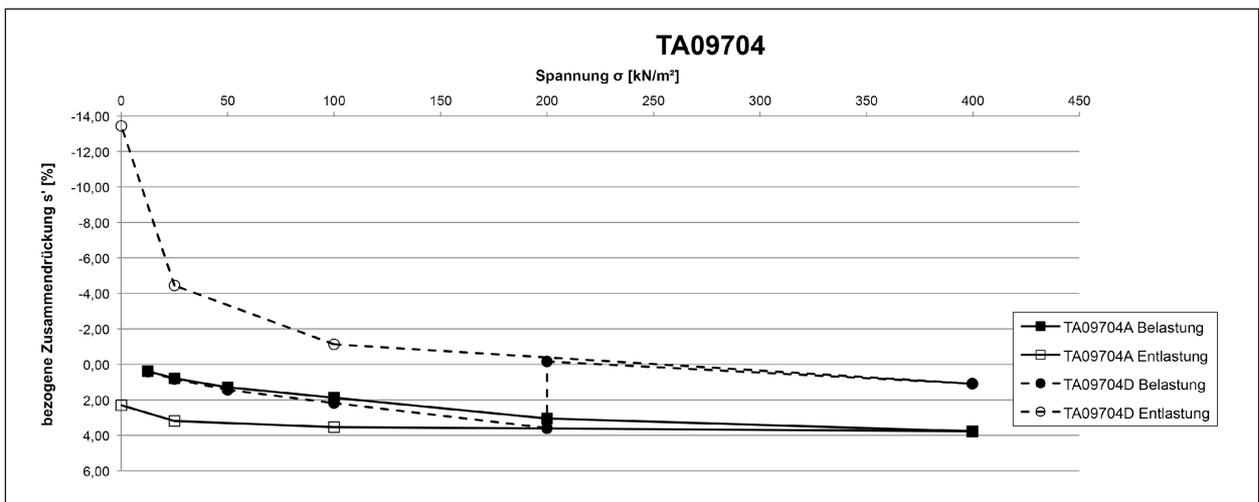


Bild 138: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche TA09704A und TA09704D

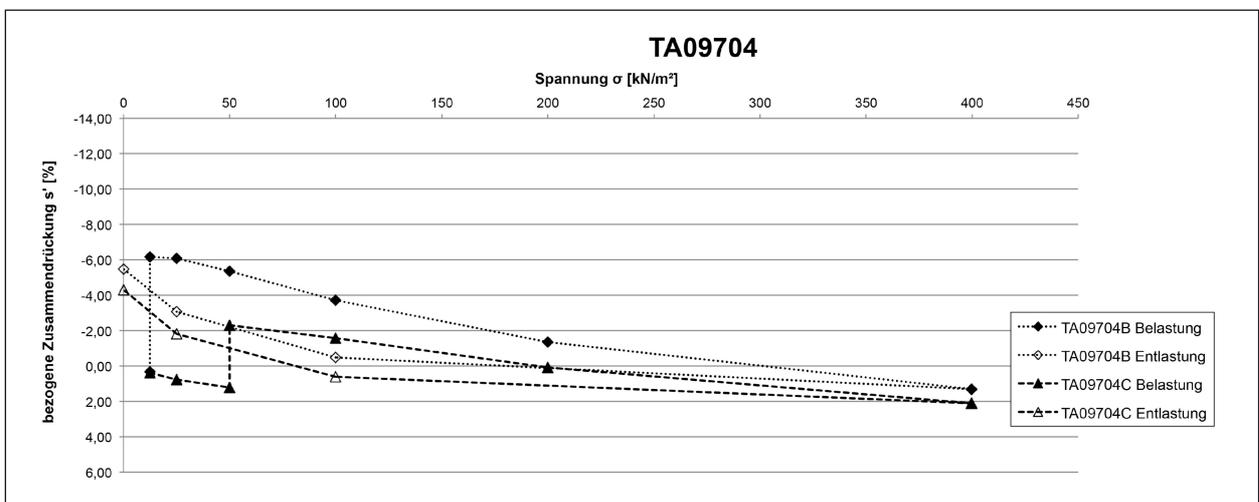


Bild 139: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche TA09704B und TA09704C

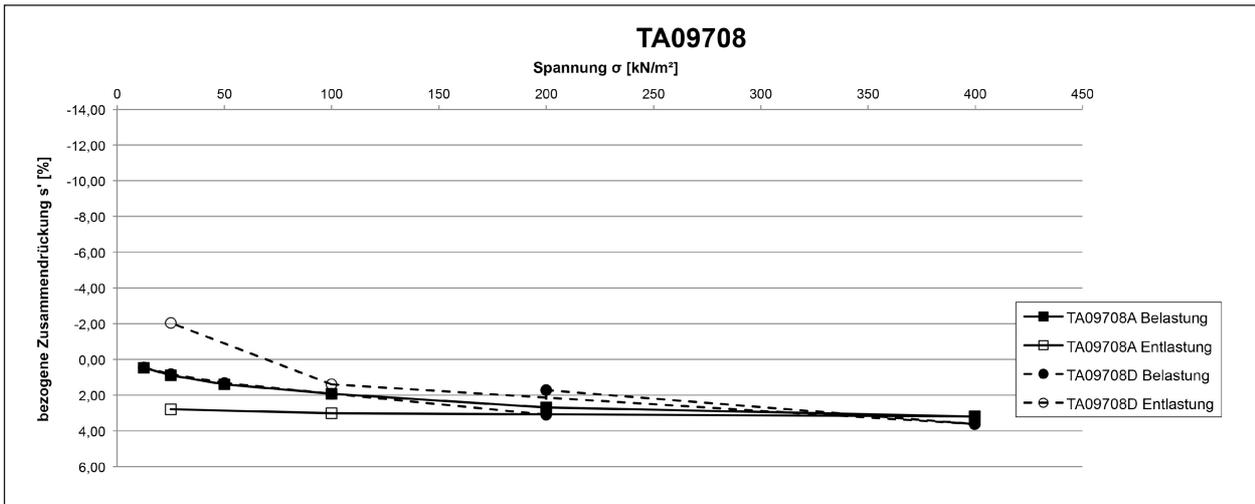


Bild 140: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche TA09708A und TA09708D

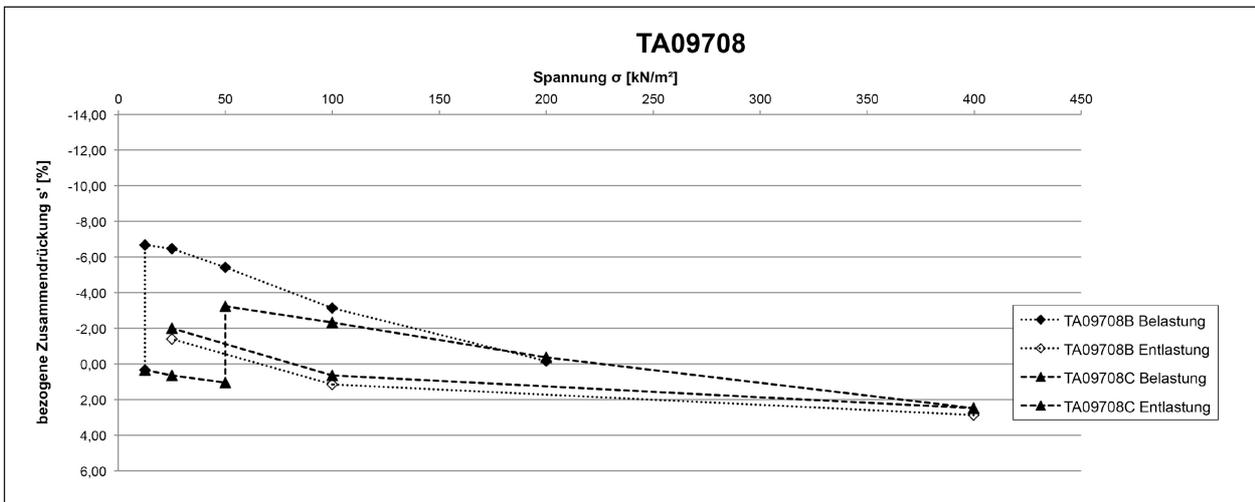


Bild 141: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche TA09708B und TA09708C

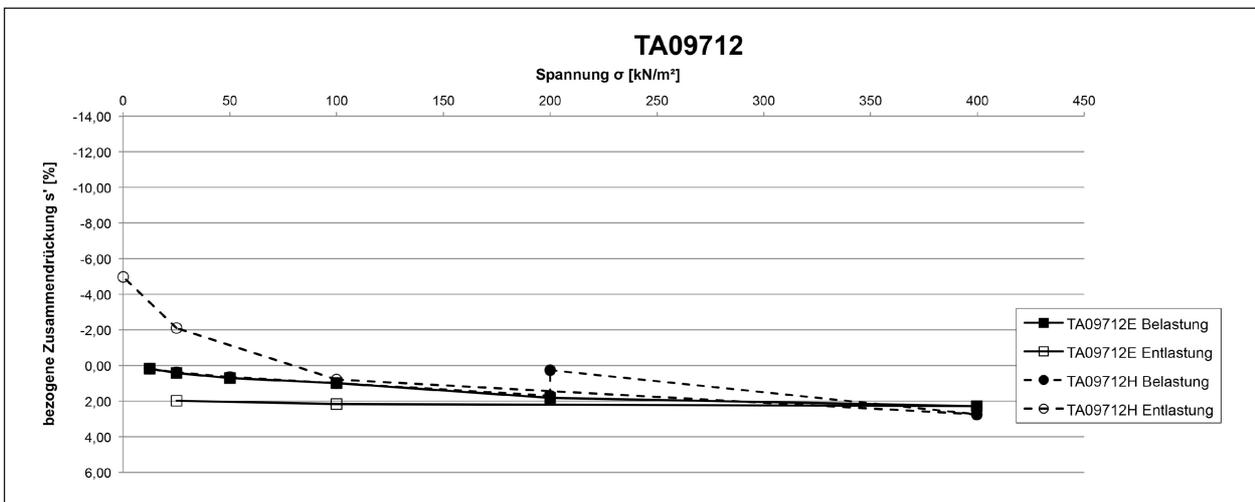


Bild 142: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche TA09712E und TA09712H

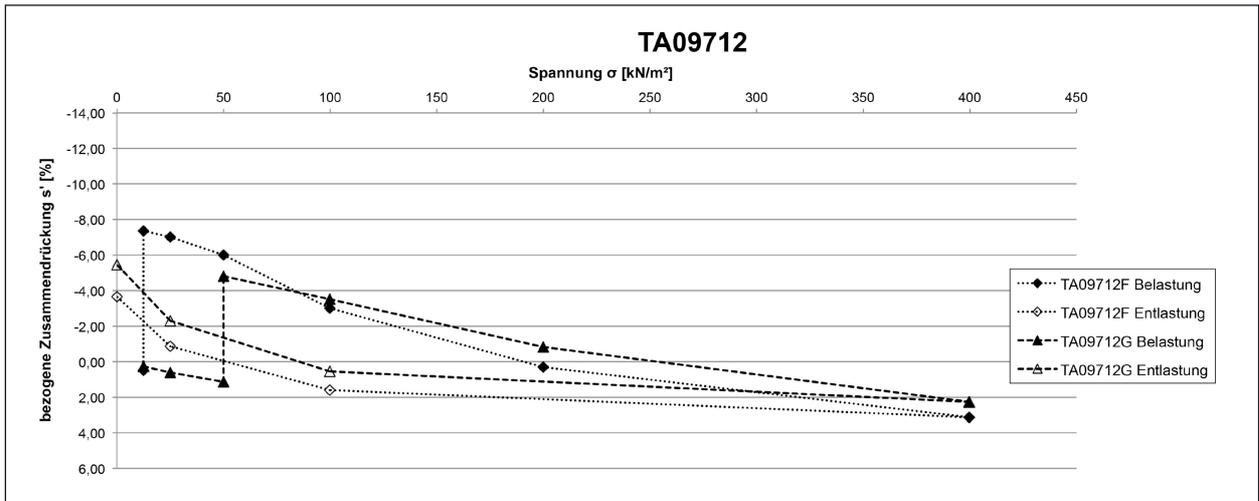


Bild 143: Spannungs-Zusammendrücksungsdiagramm der Versuche TA09712F und TA09712G

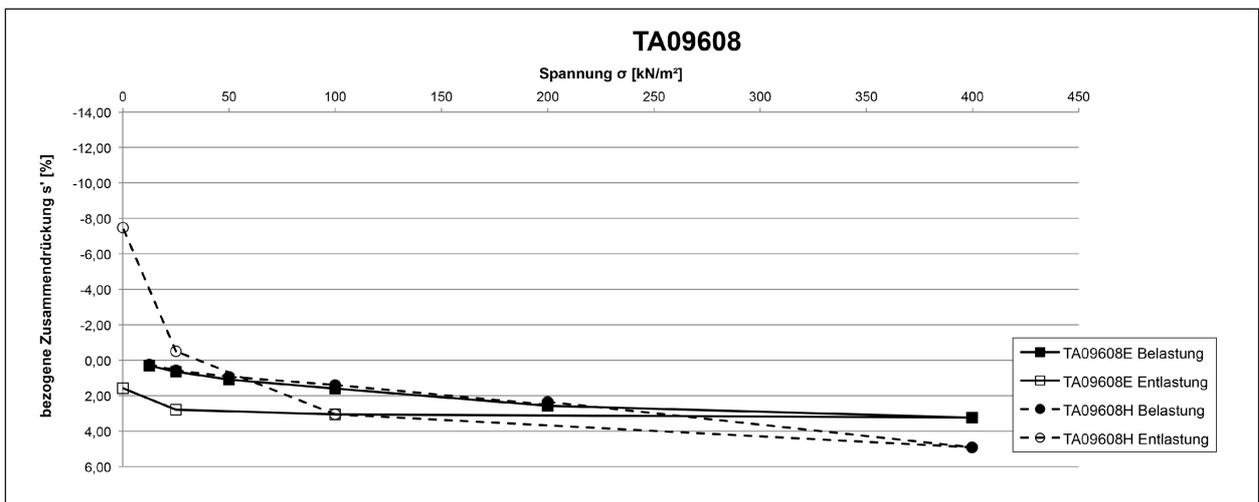


Bild 144: Spannungs-Zusammendrücksungsdiagramm der Versuche TA09608E und TA09608H

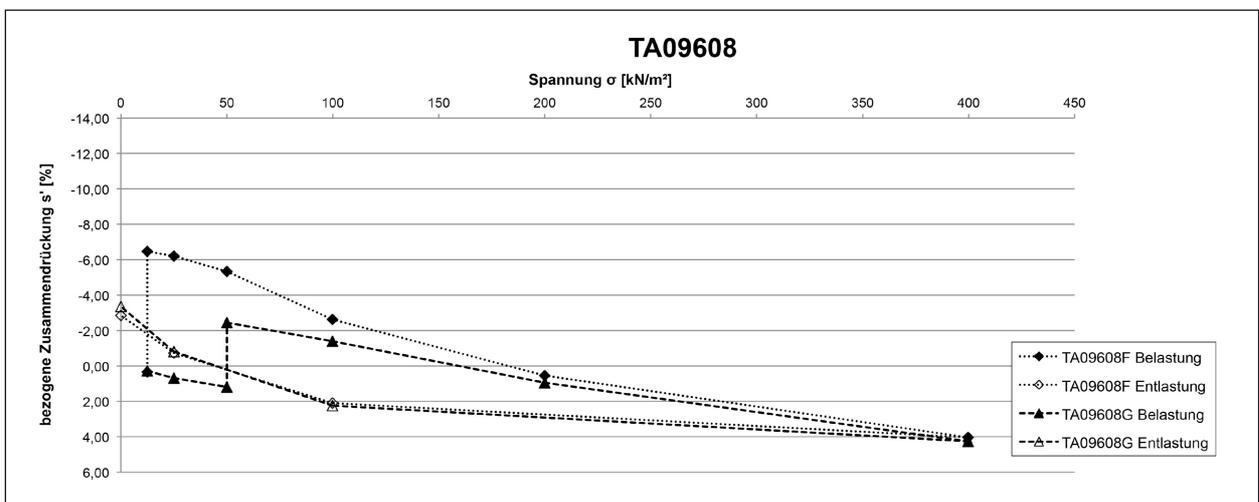


Bild 145: Spannungs-Zusammendrücksungsdiagramm der Versuche TA09608F und TA09608G

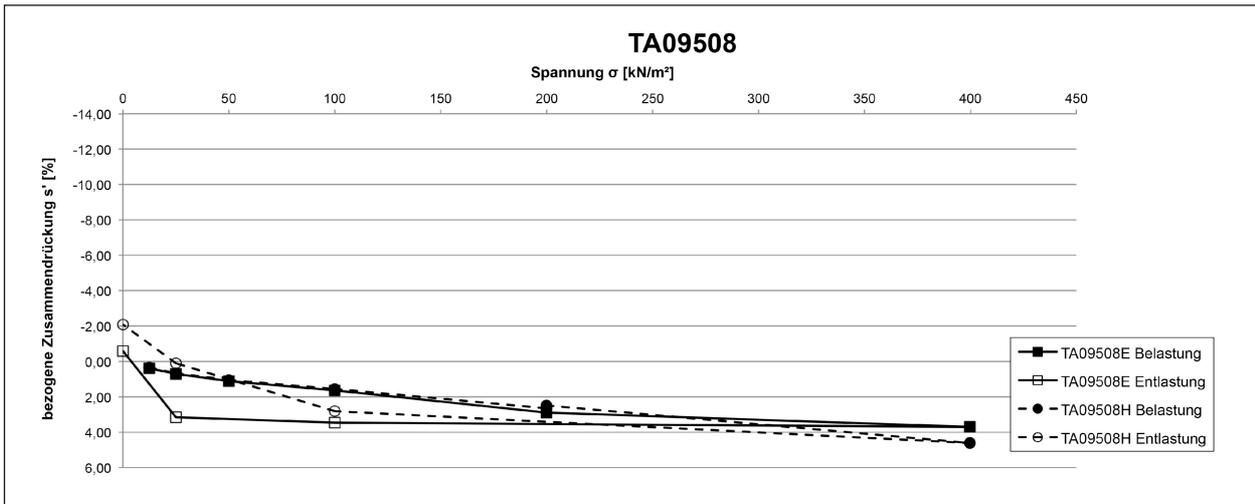


Bild 146: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche TA09508E und TA09508H

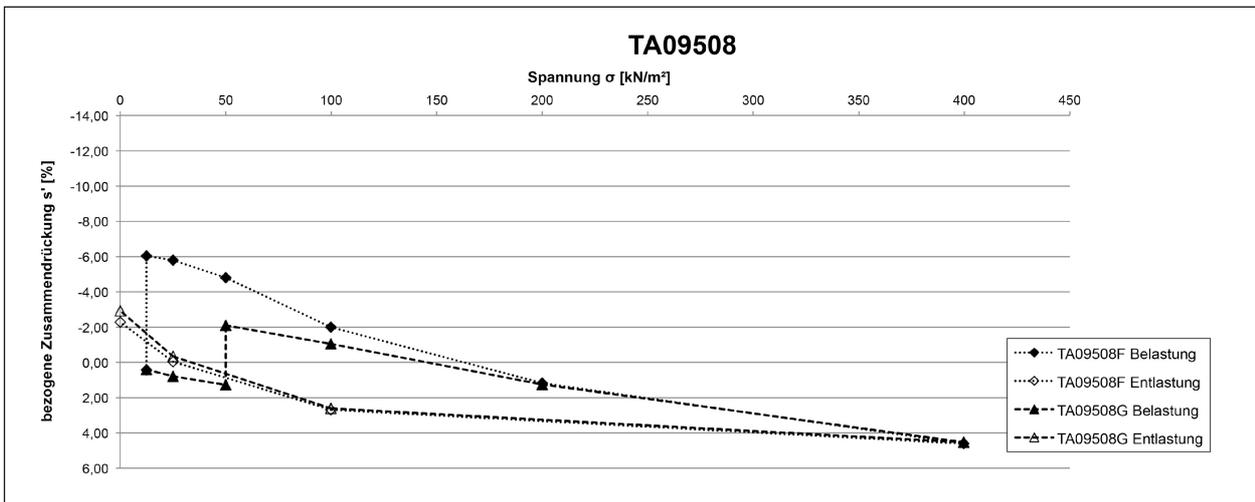


Bild 147: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche TA09508F und TA09508G

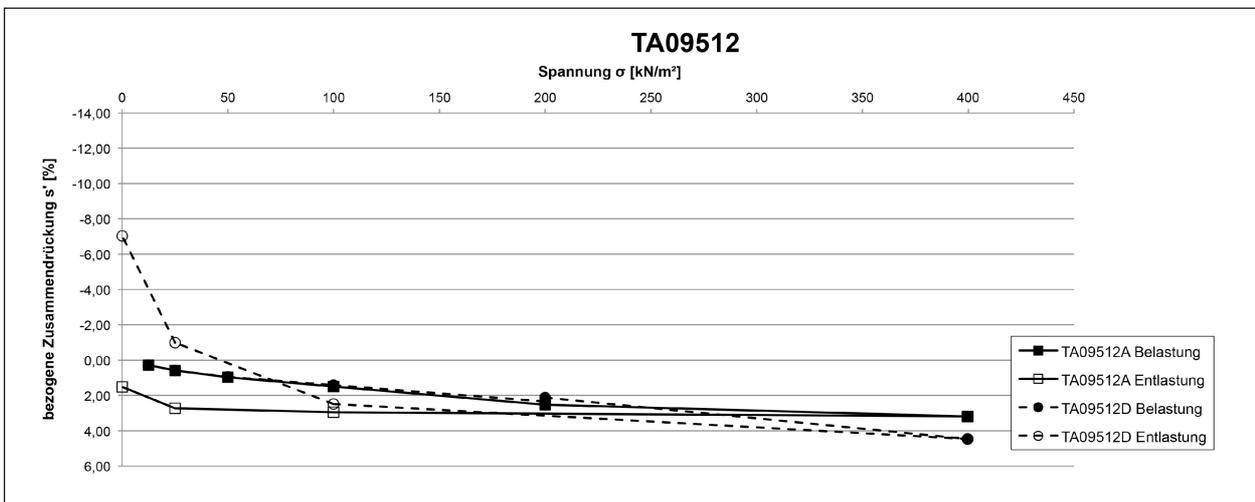


Bild 148: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche TA09512A und TA09512D

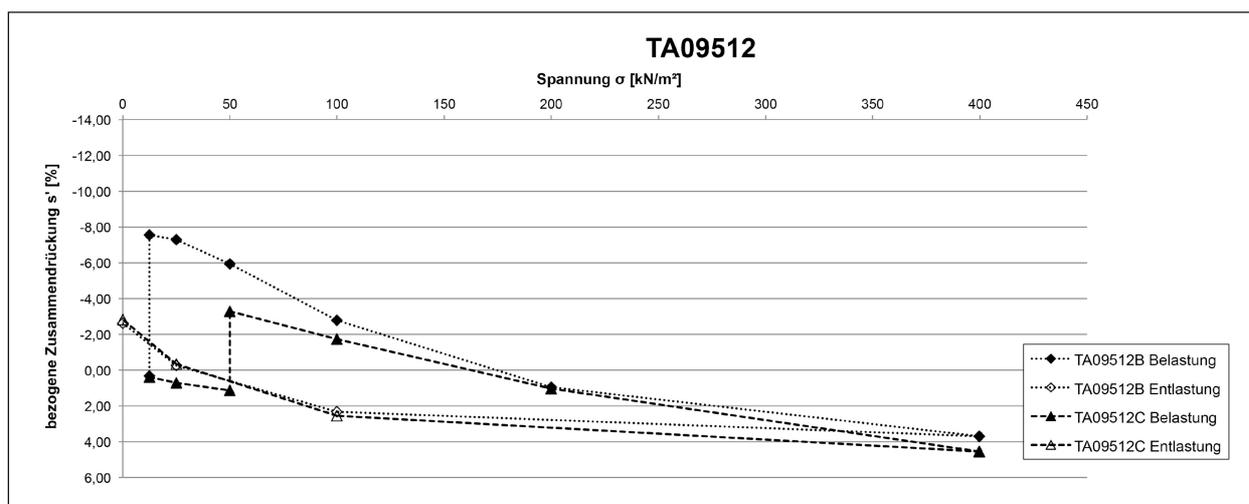


Bild 149: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche TA09512B und TA09512C

In Bild 150 bis Bild 157 werden jene Versuche hinsichtlich ihres Spannungs-Zusammendrückungsverhaltens miteinander verglichen, die nicht bzw. bei gleicher Laststufe gesättigt wurden. Zur besseren Lesbarkeit sind die Kurven mit gleichem Versuchsablauf auf zwei Diagramme aufgeteilt. Zunächst werden jeweils die Kurven der Versuchsreihen TA10004, TA10008, TA09704 und TA09708 einander gegenübergestellt, anschließend die Kurven der Reihen TA09712, TA09608, TA09508 und TA09512.

Bei den Versuchen ohne Sättigung (Proben A und E) ergaben sich sehr ähnliche, flache Kurvenverläufe. Bei der maximalen untersuchten Spannung von $\sigma = 400 \text{ kN/m}^2$ wurden für die bezogene Zusammendrückung Werte zwischen $s' = 2,3 \%$ und $3,8 \%$ ermittelt (Bild 150, Bild 151). Die geringsten Verformungen wies dabei die Probe TA09712E auf, die höchsten die Probe TM09704A.

Die Versuche, die bei einer Spannung von $\sigma = 12,5 \text{ kN/m}^2$ gesättigt wurden, wiesen bei der maximalen Spannung von $\sigma = 400 \text{ kN/m}^2$ bezogene Zusammendrückungen zwischen $s' = 1,3 \%$ und $4,6 \%$ auf (Bild 152, Bild 153). Die Extremwerte wurden an den Proben der Reihen TM09704 und TM09508 ermittelt. Aufgrund der Wasserzugabe wurden Änderungen der bezogenen Zusammendrückung vor und nach der Sättigung festgestellt, die zwischen $6,5 \%$ und $9,5 \%$ betragen. Die größte Volumenzunahme verzeichnete dabei die Probe TA10008F, die geringste die Probe

TA09508F. Beim Vergleich von Proben gleicher Einbautrockendichte hinsichtlich der Änderungen der bezogenen Zusammendrückung durch die Wasserzugabe ließ sich feststellen, dass die Volumenzunahme umso größer war, je höher der Luftporenanteil der Proben war. So wiesen die Proben TA09704B, TA09708B und TA09712F Werte für die bezogene Zusammendrückung von $s' = -6,16 \%$, $-6,68 \%$ und $-7,36 \%$ auf, wobei eine negative bezogene Zusammendrückung einer Volumenzunahme entspricht. Beim Vergleich von Proben gleicher Luftporenanteile fiel auf, dass die Volumenzunahme umso größer war, je höher die Einbautrockendichte der Proben war. An den Proben TA09508F, TA09608F, TA09708F und TA10008F wurden hierbei Werte für s' von $-6,04 \%$, $-6,47 \%$, $-6,68 \%$ und $-9,17 \%$ ermittelt.

Die maximal ermittelte bezogene Zusammendrückung für die Versuche mit einer Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 50 \text{ kN/m}^2$ (Bild 154, Bild 155) wurde an der Probe TM09512C bei der maximalen untersuchten Spannung von $\sigma = 400 \text{ kN/m}^2$ gemessen und betrug $s' = 4,6 \%$. Der niedrigste Wert wurde an der Probe TM10008G mit $s' = 1,4 \%$ ermittelt. Die Änderungen der bezogenen Zusammendrückung wiesen Werte zwischen $3,4 \%$ (TA09508G) und $6,3 \%$ (TA10008G) auf. Beim Vergleich der Änderungen der bezogenen Zusammendrückung durch die Wasserzugabe hinsichtlich der Luftporenanteile und der Einbautrockendichten ergaben sich die gleichen Ergebnisse wie bei der Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 12,5 \text{ kN/m}^2$.

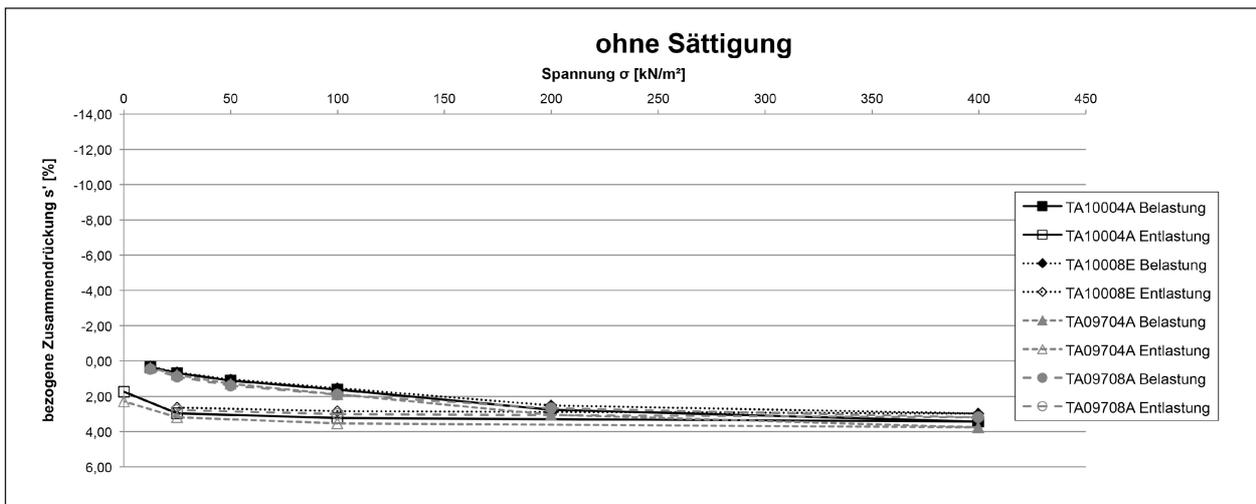


Bild 150: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche TA10004A, TA10008E, TA09704A und TA09708A (ohne Sättigung)

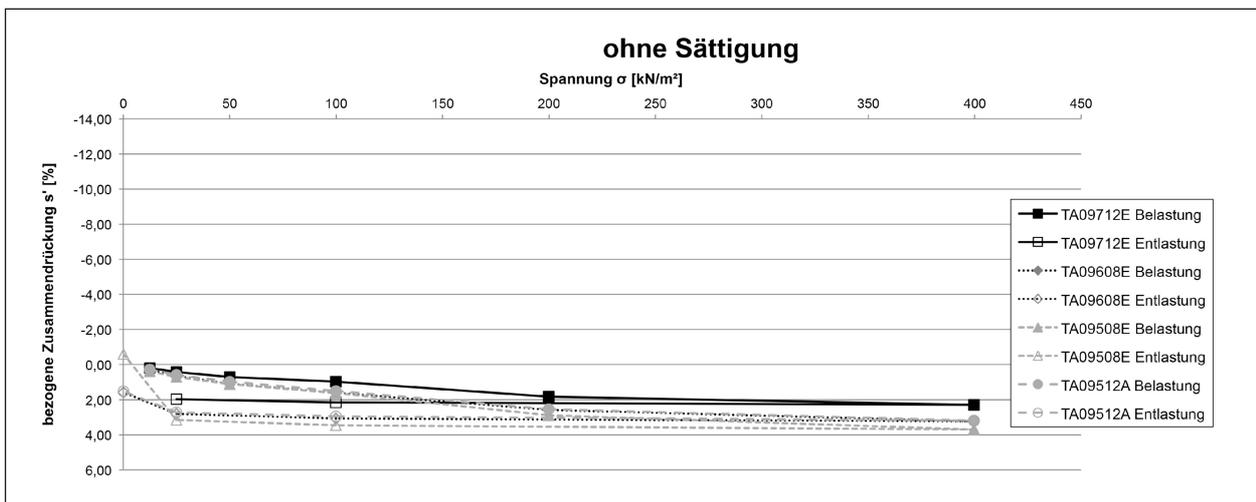


Bild 151: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche TA09712E, TA09608E, TA09508E und TA09512A (ohne Sättigung)

Die Proben, die bei einer Spannung von $\sigma = 200$ kN/m² gesättigt wurden, wiesen bei der höchsten untersuchten Spannung bezogene Zusammendrückungen zwischen $s'_z = 1,1$ % (TM09704D) und 4,9 % (TM09608H) auf (Bild 156, Bild 157). Die Änderungen der bezogenen Zusammendrückung vor und nach Wasserzugabe betragen zwischen 0,2 % (TA09508H) und 3,8 % (TA09704D). Abgesehen von den deutlichen Änderungen der Probe TA09704D bestätigten sich auch bei diesen Versuchen die Ergebnisse der beiden vorherigen Versuchsreihen hinsichtlich des Einflusses von Luftporenanteil und Einbautrockendichte.

Die Auswertung der Spannungs-Zusammendrückungsdiagramme des Versuchsbodens TA hinsichtlich des Einflusses der Einbautrockendichte und des Luftporengehalts ergab, dass tendenziell die Proben zu deutlichen Volumenzunahmen während des Sättigungsvorgangs neigten, die hohe Einbautrockendichten und hohe Luftporenanteile aufwiesen.

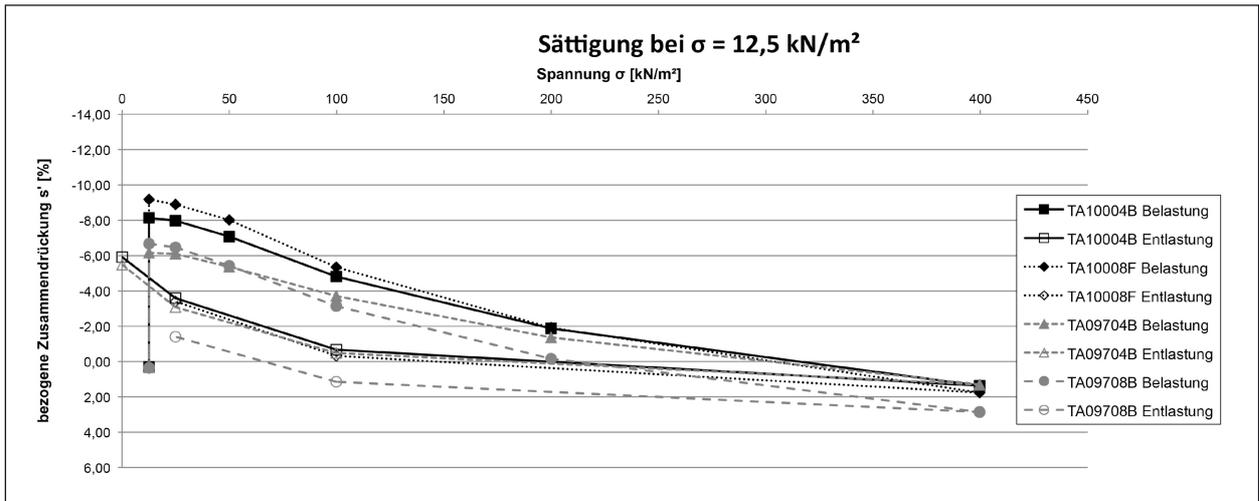


Bild 152: Spannungs-Zusammendrücksdiagramm der Versuche TA10004B, TA10008F, TA09704B und TA09708B (Sättigung bei einer mittleren Spannung von $12,5 \text{ kN/m}^2$)

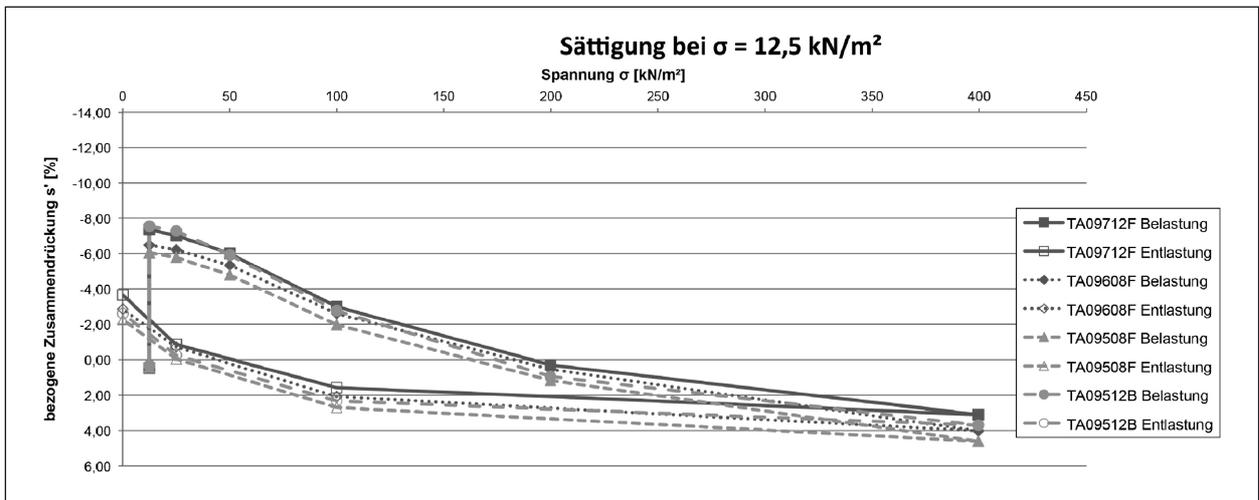


Bild 153: Spannungs-Zusammendrücksdiagramm der Versuche TA09712F, TA09608F, TA09508F und TA09512B (Sättigung bei einer mittleren Spannung von $12,5 \text{ kN/m}^2$)

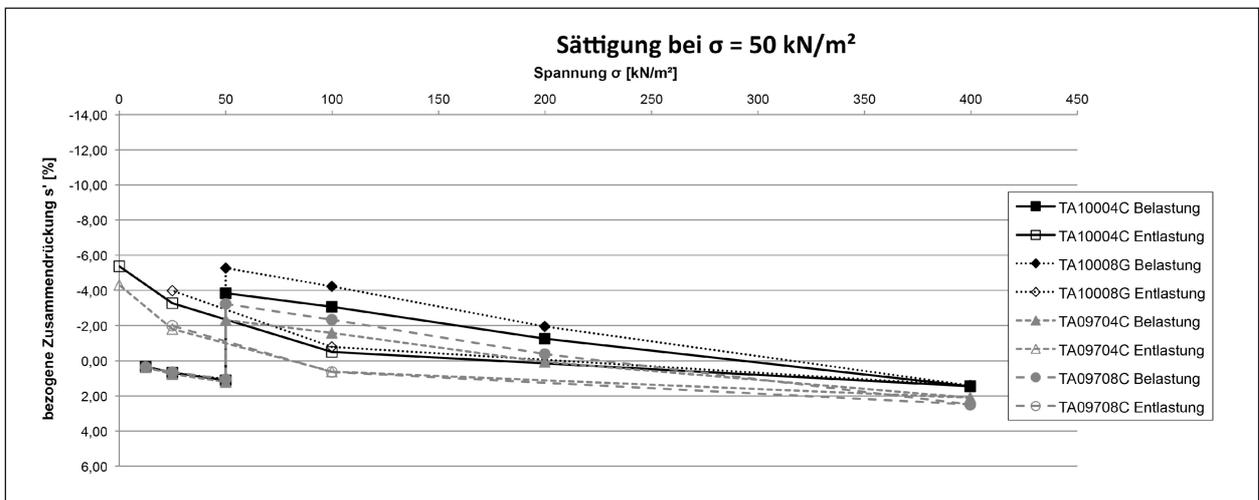


Bild 154: Spannungs-Zusammendrücksdiagramm der Versuche TA10004C, TA10008G, TA09704C und TA09708C (Sättigung bei einer mittleren Spannung von 50 kN/m^2)

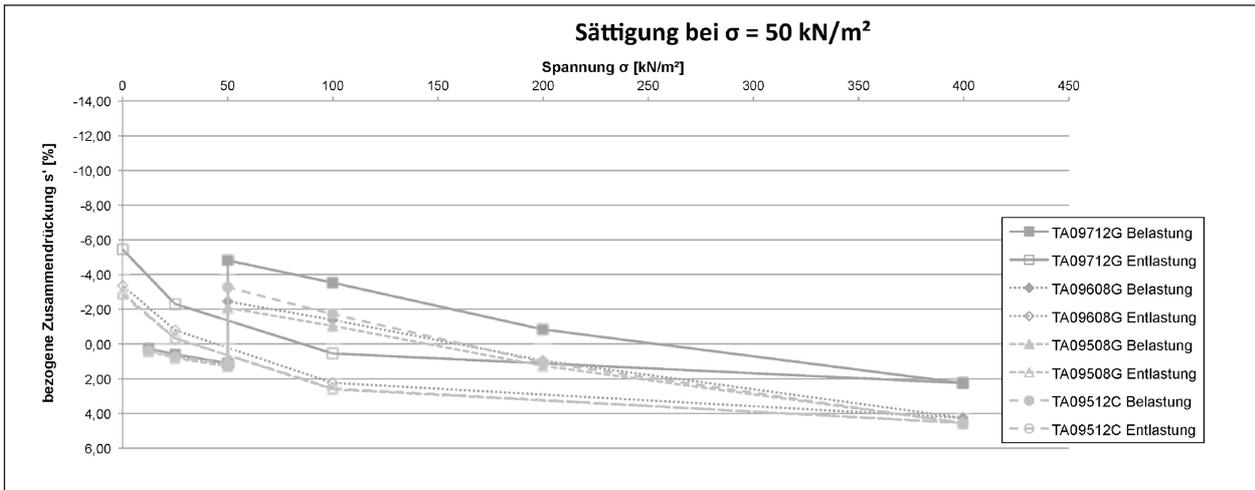


Bild 155: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche TA09712G, TA09608G, TA09508G und TA09512C (Sättigung bei einer mittleren Spannung von 50 kN/m²)

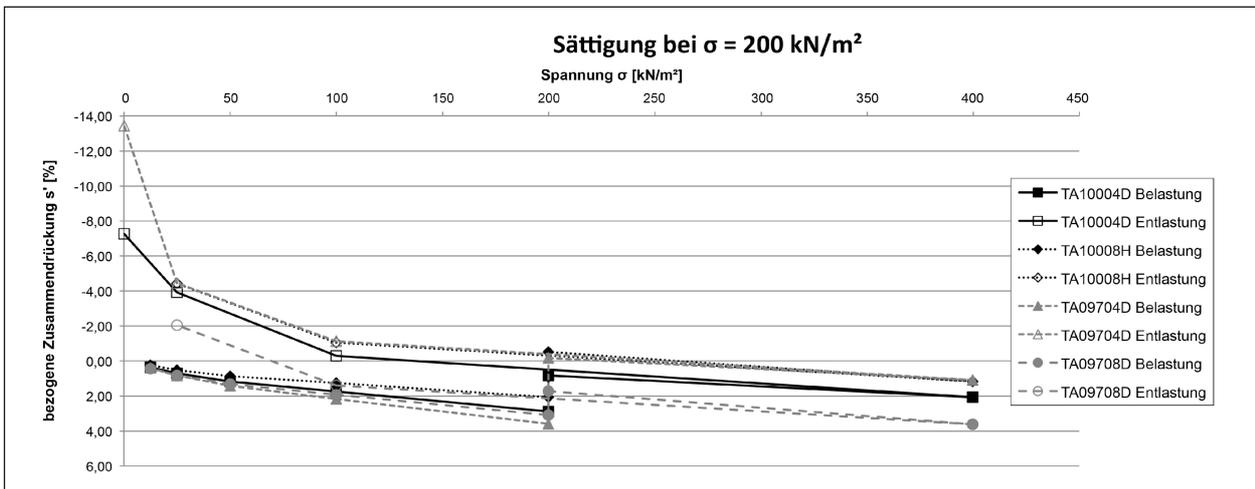


Bild 156: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche TA10004D, TA10008H, TA09704D und TA09708D (Sättigung bei einer mittleren Spannung von 200 kN/m²)

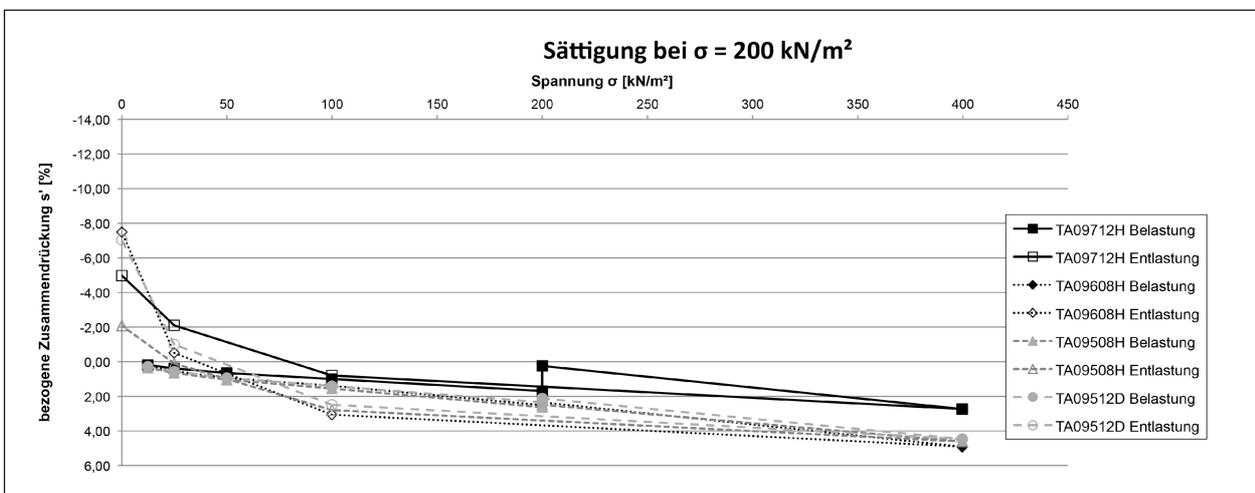


Bild 157: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche TA09712H, TA09608H, TA09508H und TA09512D (Sättigung bei einer mittleren Spannung von 200 kN/m²)

In Bild 158 sind die allein durch die Wasserzugabe hervorgerufenen Änderungen der bezogenen Zusammendrückung gegen die jeweiligen Spannungen, bei denen die Sättigung erfolgte, aufgetragen. Für die Auswertung hinsichtlich Hebungen und Sackungen wurde jeweils die Differenz der bezogenen Zusammendrückung s' direkt vor und am Ende der Wasserzugabe nach 24 h gebildet.

Bei allen Versuchen mit dem Versuchsboden TA konnten während der Wasserzugabe bei einer Spannung von $\sigma = 12,5 \text{ kN/m}^2$ deutliche Hebungen registriert werden. Diese lagen zwischen 6 % und 10 % der Probenhöhe. Die größten Hebungen wiesen hierbei die Proben TA10004B und TA10008F mit 8,5 % und 9,5 % ihrer Probenhöhe auf. Die geringsten Hebungen wurden mit Werten zwischen 6,5 % und 6,8 % bei den Proben TA09508F, TA09608F und TA09704B gemessen. Tendenziell zeigte sich somit, dass sich die Proben mit hohen Verdichtungsgraden und niedrigen Luftporenanteilen empfindlicher gegenüber Hebungen verhielten.

Während der Sättigung der Proben bei einer Spannung von $\sigma = 50 \text{ kN/m}^2$ zeigten sich ähnliche Ergebnisse wie bei der geringeren Spannung zuvor, die Hebungsraten fielen jedoch mit Werten zwischen 3 % und 7 % deutlich geringer aus. Mit 6,3 % bzw. 5,9 % wiesen die Versuche TA10008G und TA09712G die größten Hebungen auf. Die geringsten Hebungen zeigten sich erneut bei den Proben TA09508G, TA09608G und TA09704C. Diese lagen bei ca. 3,5 % der Probekörperhöhe.

Bei den Versuchen, die bei einer Spannung von $\sigma = 200 \text{ kN/m}^2$ gesättigt wurden, konnte erneut eine Abnahme der Hebungsraten im Vergleich zu den Versuchen bei einer Spannung von $\sigma = 50 \text{ kN/m}^2$ festgestellt werden. Sackungen traten wie bei den Sättigungsvorgängen bei geringeren Spannungen beim Versuchsboden TA nicht auf. Die deutlichsten Hebungen wurden mit einem Wert von 2,6 % der Probenhöhe für den Versuch TA10008H ermittelt. Der Versuch TA09704D wurde als vermutlicher Ausreißer hier nicht gewertet. Die geringsten Hebungsraten wiesen die Versuche mit den geringsten Verdichtungsgraden (TA09508, TA09512 und TA09608) mit Werten zwischen 0,1 % und 0,3 % auf.

Die bestimmten Hebungen bestätigten überwiegend die nach FERBER (2009) zu erwartenden Ergebnisse, wonach bei einem gegebenen Wassergehalt das Schwellpotenzial mit zunehmender Trockendichte ansteigt (Kapitel 4.1). Beim Ver-

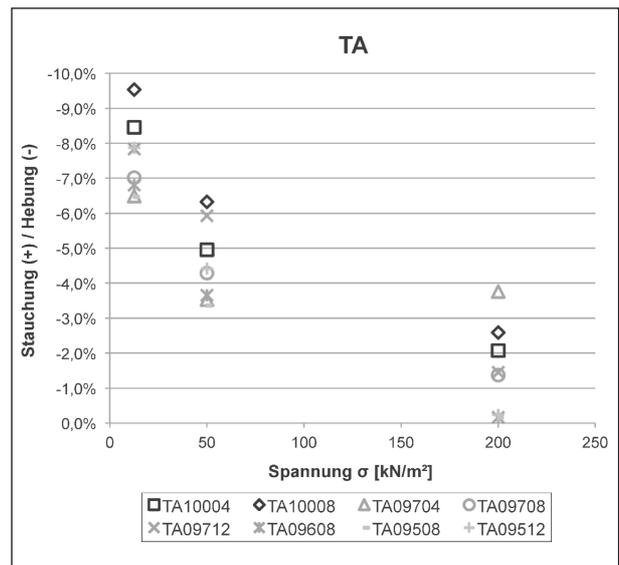


Bild 158: Auswertung der durch Wasserzugabe bei unterschiedlichen Spannungen verursachten Stauchungen und Hebungen

gleich der Versuche TA10004, TA09708, TA09608 und TA09508, die mit ähnlichen Wassergehalten eingebaut worden waren, wiesen die Proben der Reihe TA10004 die deutlichsten Hebungen auf, die der Reihe TA09508 die geringsten. Überwiegend die gleichen Ergebnisse zeigten sich auch beim Vergleich der Proben TA10008, TA09712 und TA09512. Lediglich die durch die Sättigung bei einer geringen Spannung von $\sigma = 12,5 \text{ kN/m}^2$ verursachten Hebungen waren hierbei an der Probe TA09712F am geringsten.

Stark schluffiger Sand (SU*)

In Bild 159 bis Bild 165 sind die Einbau- und Ausbaupunkte der Versuche in Proctordiagrammen dargestellt, die mit dem aus den Einzelkörnungen hergestellten Sandgemisch durchgeführt wurden. Enthalten sind dabei neben der Proctorkurve auch die Sättigungslinie ($S_r = 1$ bzw. $n_a = 0 \text{ Vol.-%}$) und die Isolinien für Luftporenanteile von $n_a = 4 \text{ Vol.-%}$, 8 Vol.-% und 12 Vol.-% .

Die Einbaubedingungen gemäß dem gewählten Versuchsprogramm wurden beim Versuchsboden SU* erreicht. Bei den Versuchsreihen SU10004 (Bild 159), SU09712 (Bild 163), SU09508 (Bild 164) und SU09512 (Bild 165) konnten Abweichungen vom geplanten Solleinbauwassergehalt festgestellt werden, die geringfügig jenseits der 1%-Punkte-Grenze lagen. Die überwiegende Anzahl der Versuche lag jedoch innerhalb des Sollbereichs für die Einbaubedingungen.

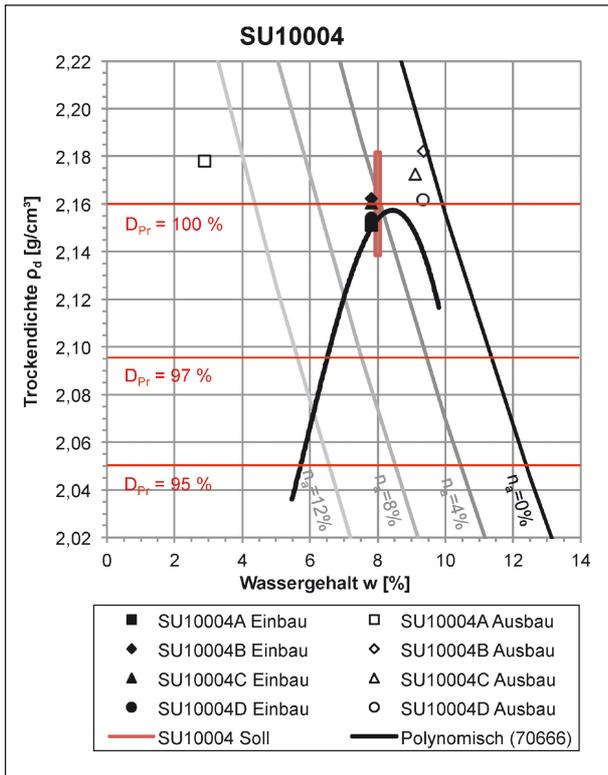


Bild 159: Erreichte Werte für Trockendichte und Wassergehalt bei Ein- und Ausbau der Proben SU10004

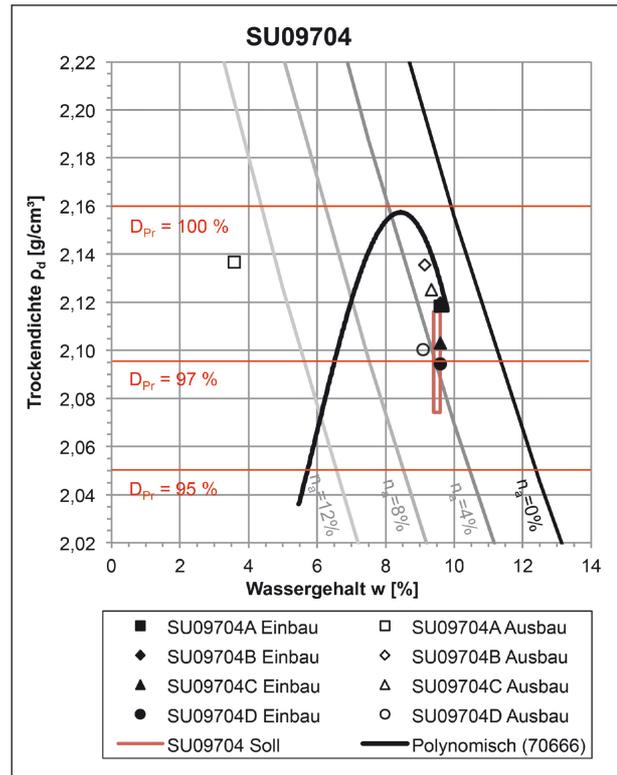


Bild 161: Erreichte Werte für Trockendichte und Wassergehalt bei Ein- und Ausbau der Proben SU09704

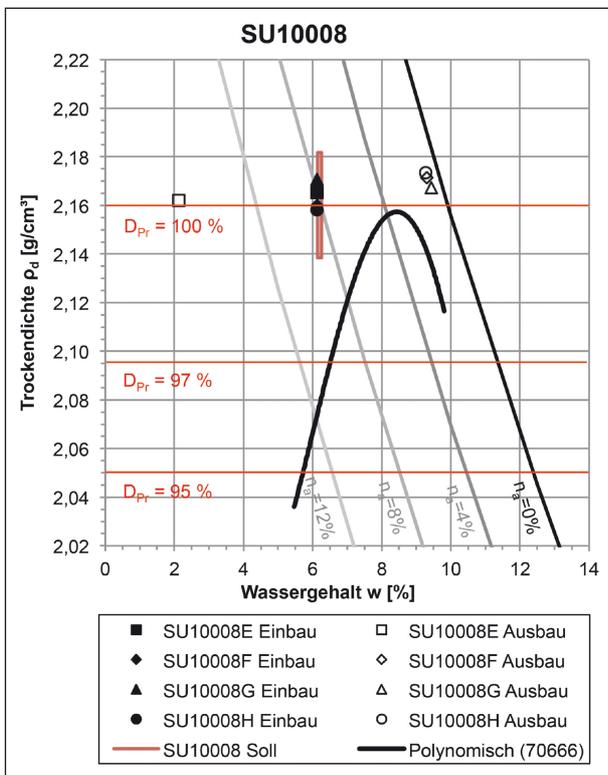


Bild 160: Erreichte Werte für Trockendichte und Wassergehalt bei Ein- und Ausbau der Proben SU10008

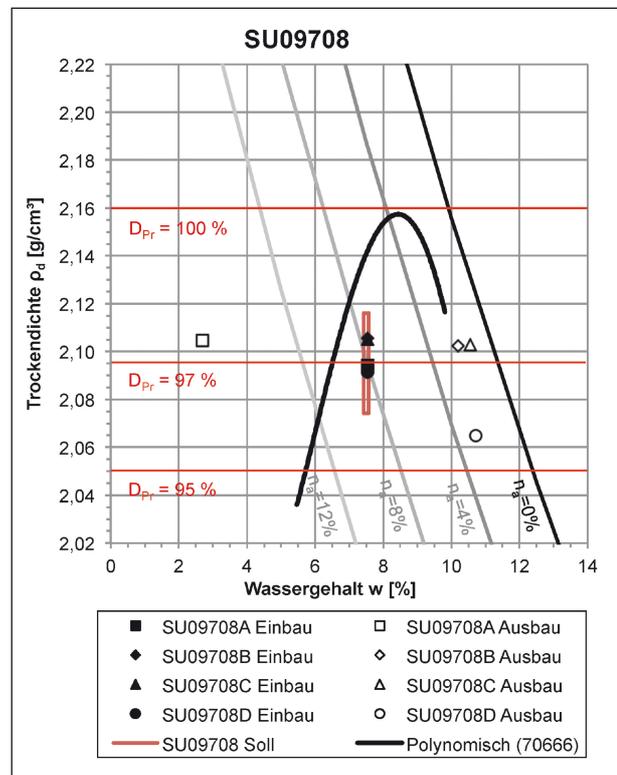


Bild 162: Erreichte Werte für Trockendichte und Wassergehalt bei Ein- und Ausbau der Proben SU09708

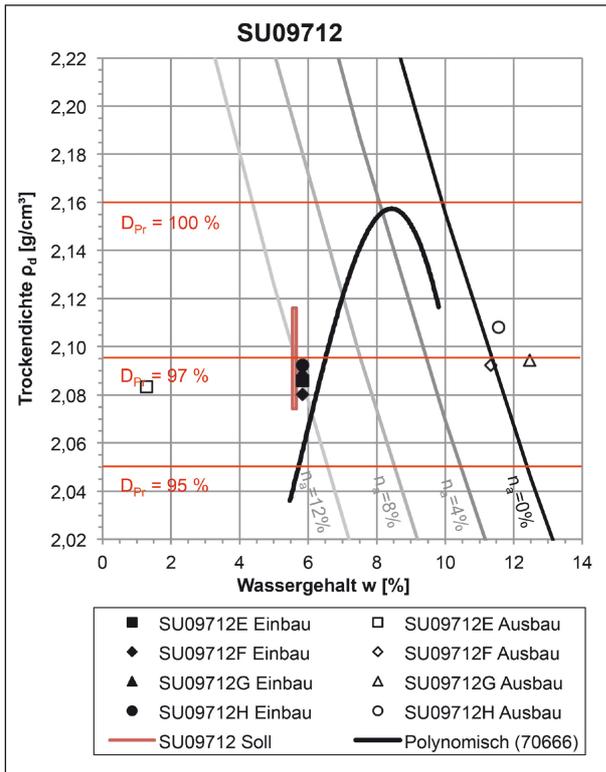


Bild 163: Erreichte Werte für Trockendichte und Wassergehalt bei Ein- und Ausbau der Proben SU09712

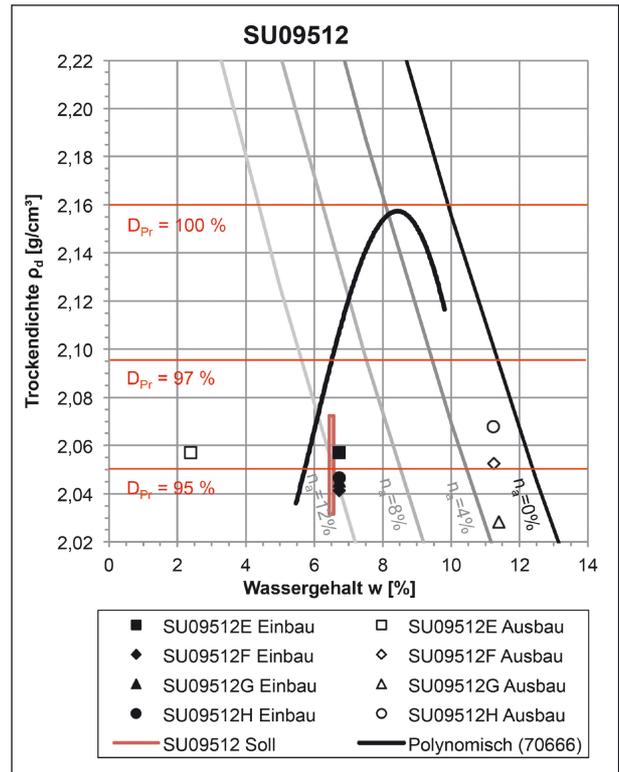


Bild 165: Erreichte Werte für Trockendichte und Wassergehalt bei Ein- und Ausbau der Proben SU09512

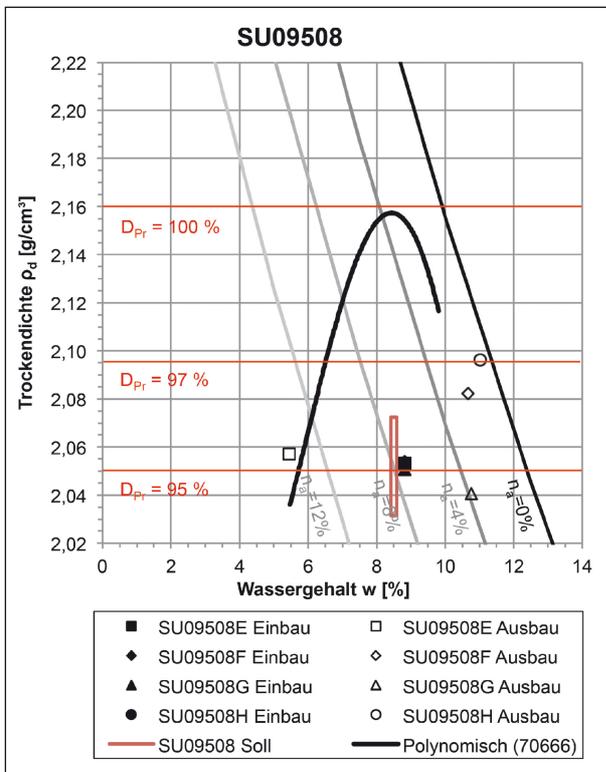


Bild 164: Erreichte Werte für Trockendichte und Wassergehalt bei Ein- und Ausbau der Proben SU09508

Im Allgemeinen wiesen die Versuche mit Wasserzugabe nach Ausbau eine nahezu vollständige Sättigung auf. Dies spricht für einen hohen Sättigungsgrad der Proben beim Ausbau und somit für einen im Versuch erfolgreichen Sättigungsvorgang. Bei den Versuchen SU09712G und SU09712H (beide Bild 163) lagen die Ausbaupunkte im Proctordiagramm geringfügig oberhalb der Sättigungslinie. Dies ist möglicherweise auf Messungenauigkeiten, auf Anhaftungen von Wasser an die Probenoberfläche beim Ausbau oder auf eine Wasseraufnahme der Proben im Zuge des Ausbaus zurückzuführen. Die restlichen gesättigten Proben wiesen beim Ausbau Luftporengehalte von $n_a = 0$ Vol.-% bis 4 Vol.-% auf. Bei den Proben ohne Wassersättigung konnte eine deutliche Abnahme der Wassergehalte verzeichnet werden. Die Ausbauwassergehalte lagen hierbei zwischen $w = 1$ M.-% (Bild 163) und 5,5 M.-% (Bild 164).

Bei einem Großteil der Fälle konnte beim Vergleich der Einbau- und Ausbaupunkte eine Konsolidation und somit eine Zunahme der Dichte festgestellt werden, die maximal $0,04 \text{ g/cm}^3$ betrug. In wenigen Fällen kam es aufgrund von Quellvorgängen bei der Wasserzugabe zu geringfügigen Verringerungen der Dichten.

Die Protokolle der einzelnen Versuche sind in den Anlagen 5.101 bis 5.128 enthalten.

In Bild 166 bis Bild 172 sind die Spannungs-Steifemodul-Diagramme der mit dem stark schluffigen Sand durchgeführten Versuchsreihen dargestellt. Die Ermittlung der Steifemoduln erfolgte als Sekantenmoduln von zwei aufeinanderfolgenden Laststufen. Die in den Diagrammen angegebenen mittleren Spannungen stellen jeweils die Mittelwerte der Spannungen dieser beiden Laststufen dar.

Die Versuchsreihen wiesen überwiegend einen Anstieg der Steifigkeit auf, der mit zunehmender Spannung langsam abflachte. Vereinzelt traten auch Versuche auf, bei denen eine annähernd lineare Zunahme der Steifigkeiten mit steigenden Spannungen beobachtet werden konnten.

Zu Beginn der Versuche konnte vereinzelt eine Abnahme der Steifigkeiten festgestellt werden. Bei Proben mit einer frühen Wasserzugabe ist hierfür die Sättigung verantwortlich (z. B. Bild 172). Bei den restlichen Proben ist dies vermutlich auf eine Vorbelastung der Proben während der Probekörperherstellung zurückzuführen (z. B. Bild 171).

Die höchsten Steifemoduln wurden überwiegend bei der höchsten untersuchten mittleren Spannung von $\sigma_M = 300 \text{ kN/m}^2$ an den Proben A und E ohne Sättigung festgestellt, gefolgt von den Proben D und H, die bei einer Spannung von $\sigma = 200 \text{ kN/m}^2$ gesättigt wurden. Die niedrigsten Steifemoduln wurden in der Regel an den Proben ermittelt, die bereits früher bewässert worden waren.

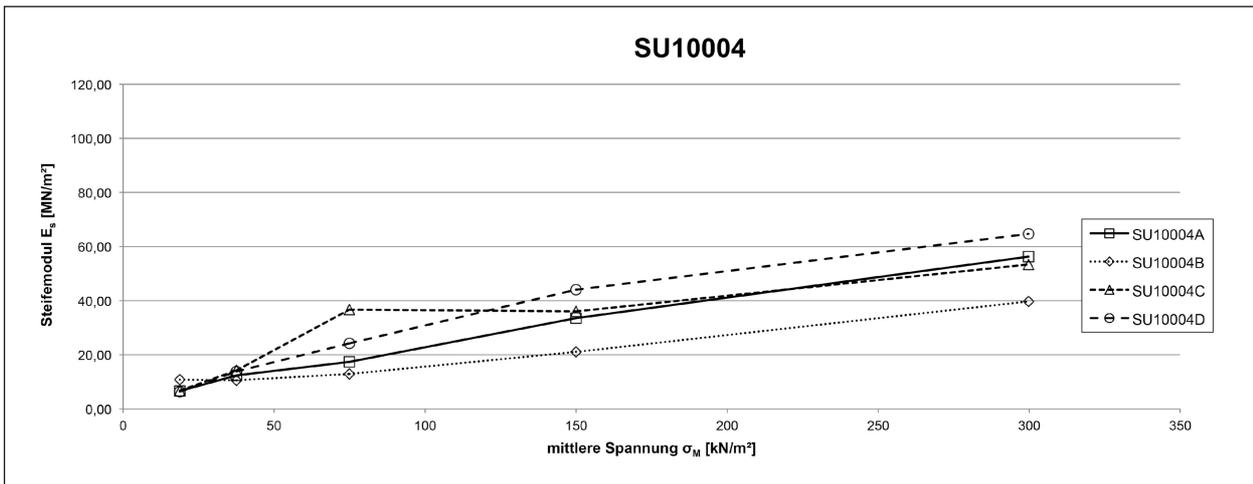


Bild 166: Spannungs-Steifemodul-Diagramm der Versuchsreihe SU10004

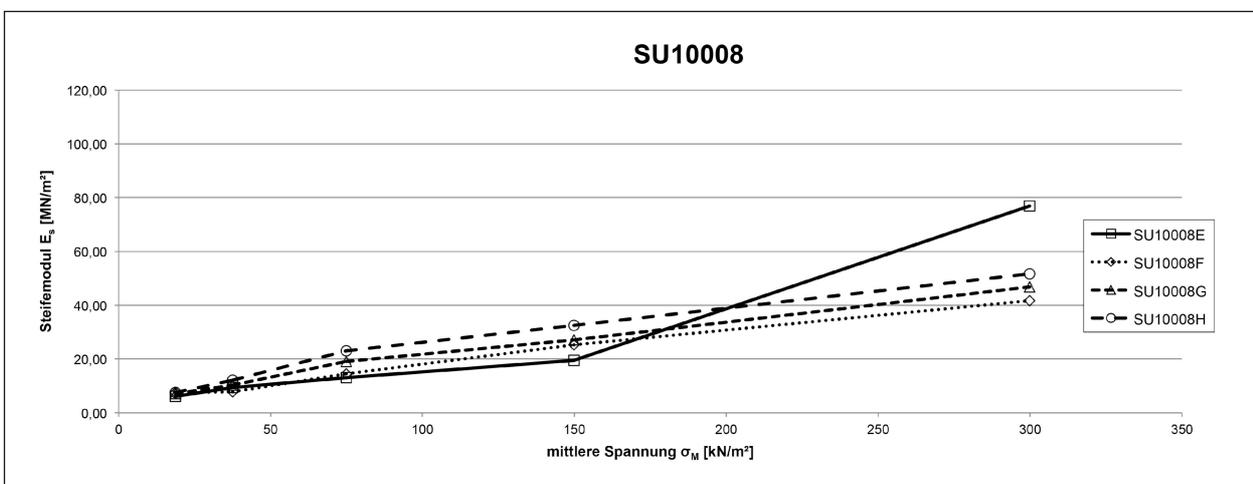


Bild 167: Spannungs-Steifemodul-Diagramm der Versuchsreihe SU10008

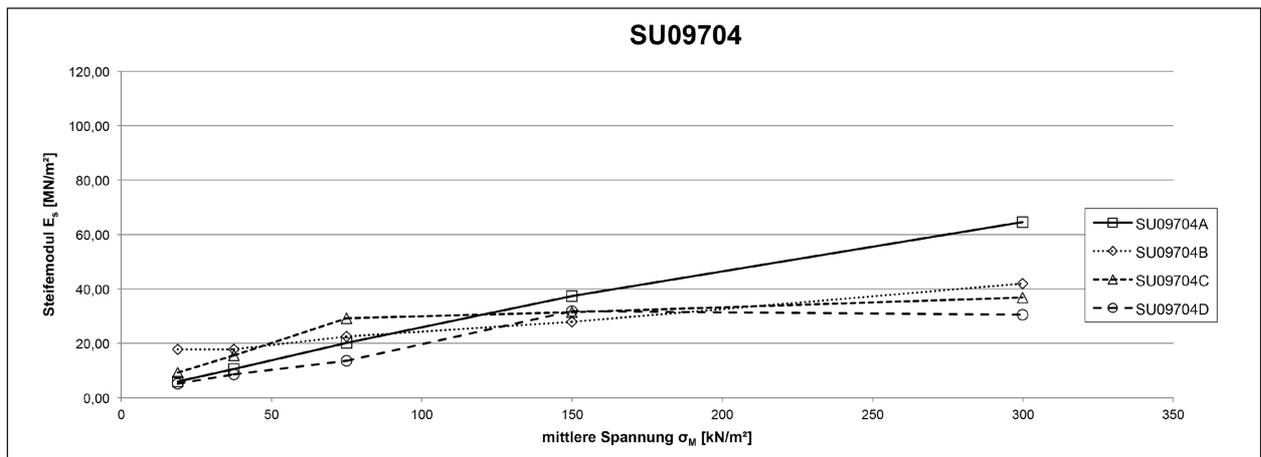


Bild 168: Spannungs-StEIFEMODUL-DIAGRAMM der Versuchsreihe SU09704

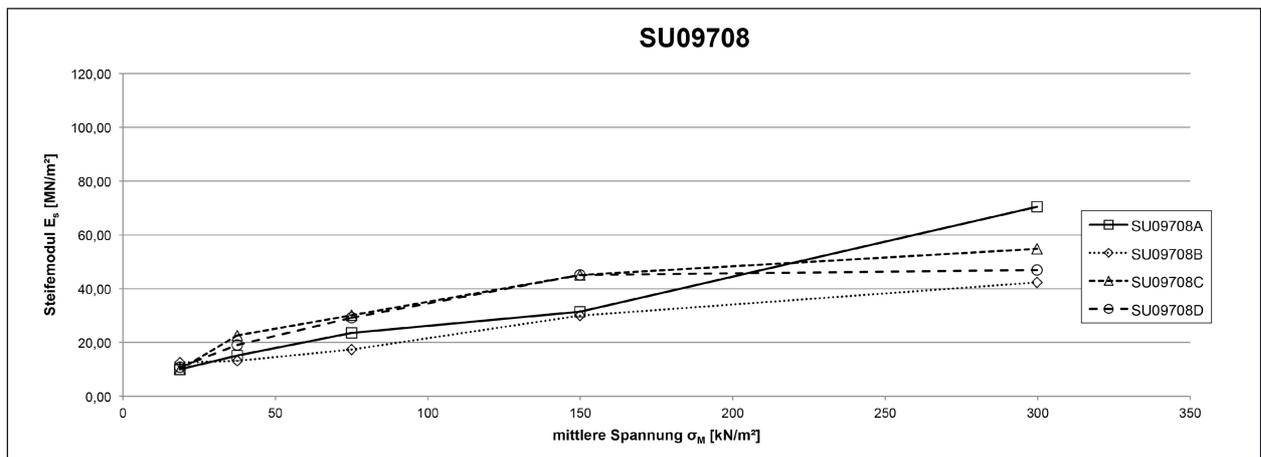


Bild 169: Spannungs-StEIFEMODUL-DIAGRAMM der Versuchsreihe SU09708

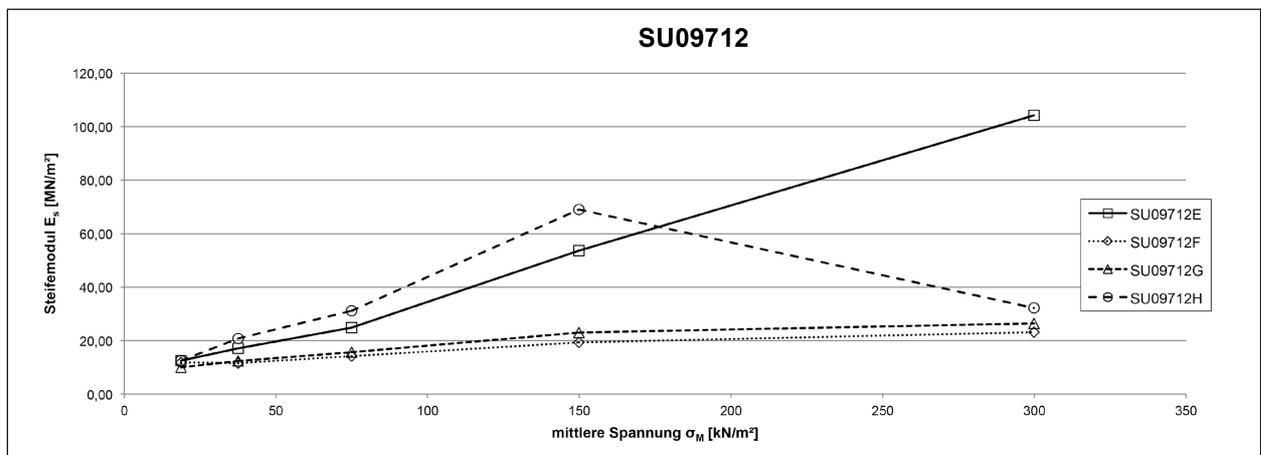


Bild 170: Spannungs-StEIFEMODUL-DIAGRAMM der Versuchsreihe SU09712

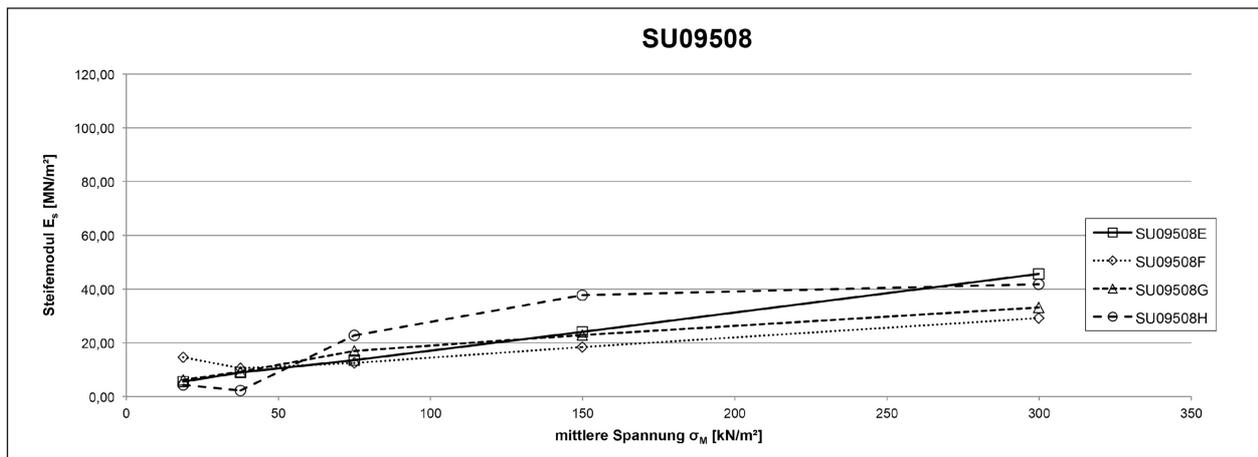


Bild 171: Spannungs-StEIFEMODUL-Diagramm der Versuchsreihe SU09508

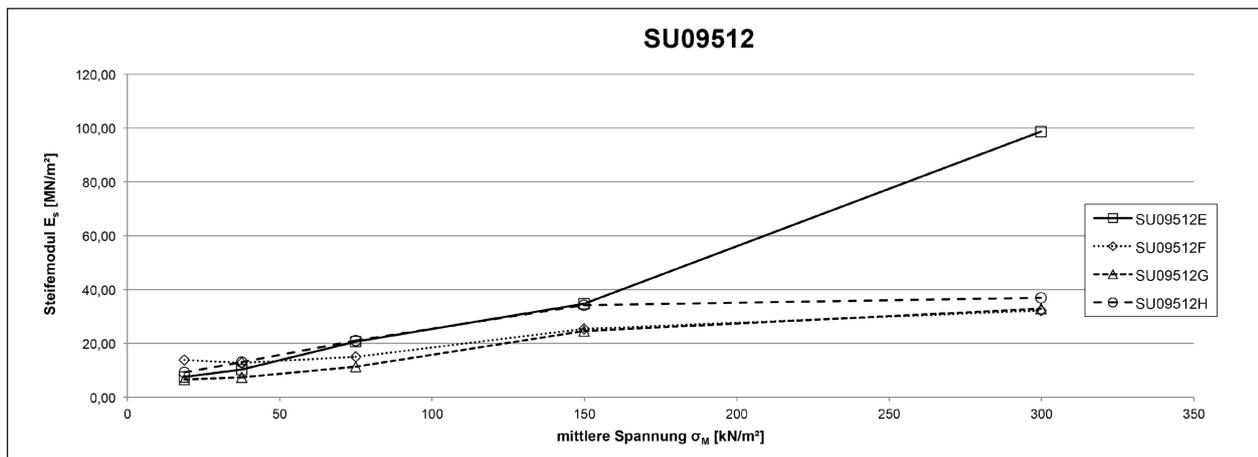


Bild 172: Spannungs-StEIFEMODUL-Diagramm der Versuchsreihe SU09512

In Bild 173 bis Bild 176 werden die Versuche der verschiedenen Versuchsreihen mit dem Versuchsboden SU* miteinander verglichen, die nicht bzw. bei gleicher Laststufe gesättigt wurden. Die Versuche ohne Sättigung (Proben A und E) finden sich in Bild 173, die mit einer Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 12,5$ kN/m² in Bild 174. In Bild 175 und Bild 176 sind schließlich noch die Versuche dargestellt, denen bei einer Spannung von $\sigma = 50$ kN/m² bzw. 200 kN/m² Wasser zugegeben worden war.

Die Versuche ohne Sättigung wiesen überwiegend einen annähernd linearen Anstieg der Steifigkeiten mit zunehmender Spannung auf (Bild 173). Die höchsten Steifigkeiten wurden bei einer mittleren Spannung von $\sigma_M = 300$ kN/m² mit $E_s = 104,2$ MN/m² und $98,7$ MN/m² an den Proben

SU09712E und SU09512E ermittelt. Den niedrigsten Steifemodul wies die Probe SU09508E mit $E_s = 45,6$ MN/m² auf.

Bei den Proben mit einer Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 12,5$ kN/m² konnte zu Beginn der Versuche teilweise ein geringer Anstieg, überwiegend jedoch eine geringe Abnahme der Steifigkeiten bis maximal $4,1$ MN/m² (SU09508F) beobachtet werden (Bild 174). Im Folgenden wurde ein kontinuierlicher Anstieg der Steifemoduln beobachtet. Bei der höchsten untersuchten mittleren Spannung von $\sigma_M = 300$ kN/m² wiesen die Proben SU09708B, SU09704B, SU10008F und SU10004B mit Werten zwischen $E_s = 39,7$ MN/m² und $42,4$ MN/m² die höchsten Steifemoduln auf. Die Proben SU09712F, SU09508F und SU09512F wiesen Werte zwischen $E_s = 23,2$ MN/m² und $32,2$ MN/m² auf.

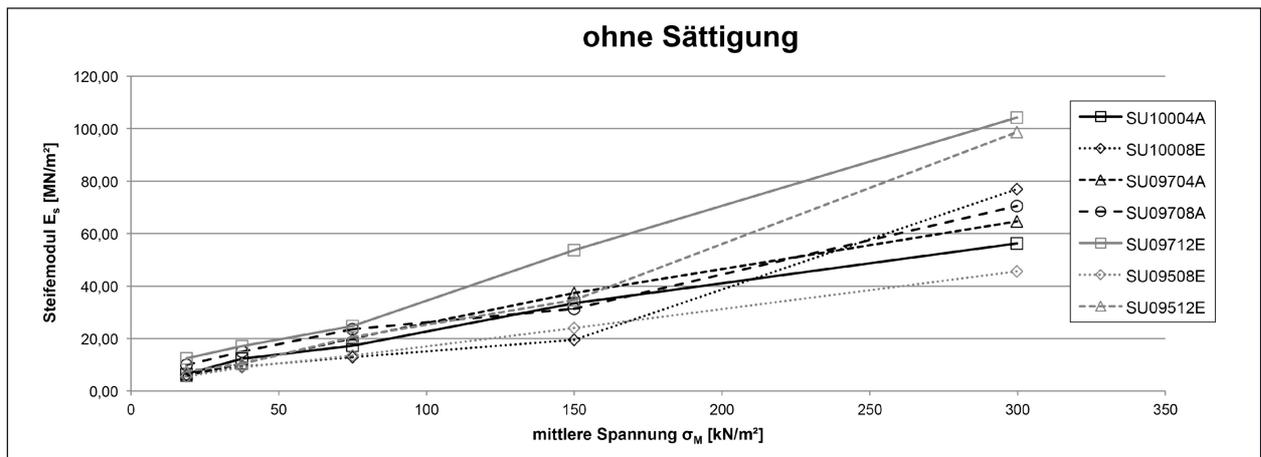


Bild 173: Spannungs-Steifemodul-Diagramm der Versuche ohne Sättigung

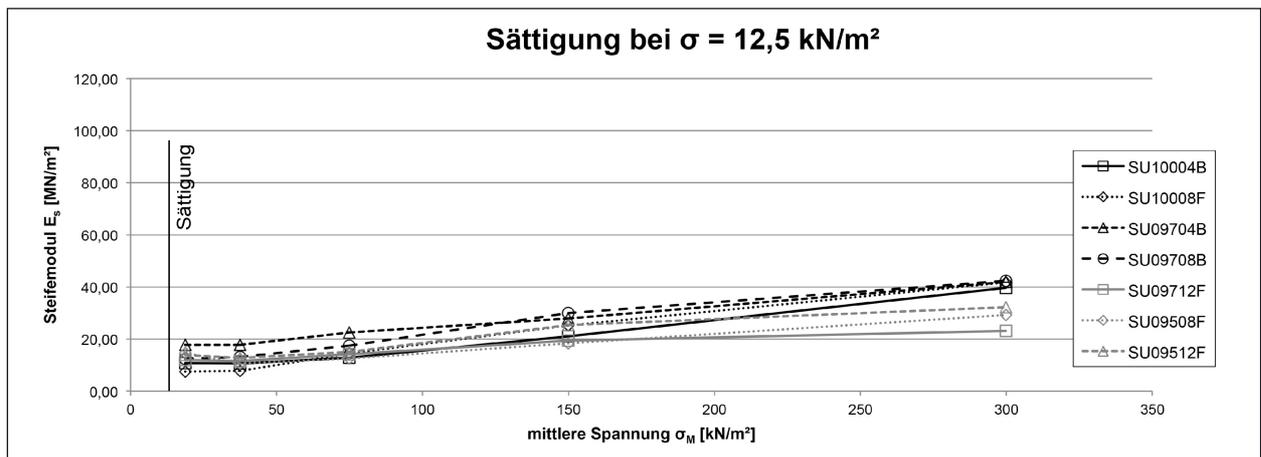


Bild 174: Spannungs-Steifemodul-Diagramm der Versuche mit Sättigung bei einer mittleren Spannung von $12,5 \text{ kN/m}^2$

Zu Beginn der Versuche mit einer Sättigung bei $\sigma = 50 \text{ kN/m}^2$ wiesen alle Proben Steifemoduln von $E_s = 6,2 \text{ MN/m}^2$ bis $10,0 \text{ MN/m}^2$ auf (Bild 175). Mit zunehmender Spannung stiegen bei allen Proben die Steifigkeiten an, wobei bei den überwiegenden Proben die Steifigkeitszunahme mit ansteigender Spannung geringer wurde. Die größten Steifemoduln wiesen während des Versuchs zumeist die Proben SU10004C, SU09704C und SU09708C auf.

Die Versuche mit Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 200 \text{ kN/m}^2$ wiesen überwiegend einen durchgängigen Anstieg ihrer Steifigkeiten von Versuchsbeginn an auf, der mit zunehmender Spannung langsam abflacht (Bild 176). Auffällig sind bei dieser Versuchsreihe eine Abnahme der Steifemoduln der Probe SU09508H zu Beginn des Ver-

suchs sowie der nicht nachvollziehbare deutliche Anstieg der Steifigkeit der Probe SU09712H von $E_s = 31,2 \text{ MN/m}^2$ bei einer mittleren Spannung von $\sigma_M = 75 \text{ kN/m}^2$ auf $E_s = 69,0 \text{ MN/m}^2$ bei $\sigma_M = 150 \text{ kN/m}^2$, gefolgt von einem Abfall der Steifigkeit auf $E_s = 32,2 \text{ MN/m}^2$ bei $\sigma_M = 300 \text{ kN/m}^2$. Bei niedrigen Spannungen wiesen die Versuche SU09708D und SU09712H die höchsten Steifigkeiten auf, zum Ende des Versuchs die Proben SU10004D und SU10008H. Den niedrigsten Steifemodul verzeichnete überwiegend die Probe SU09704D.

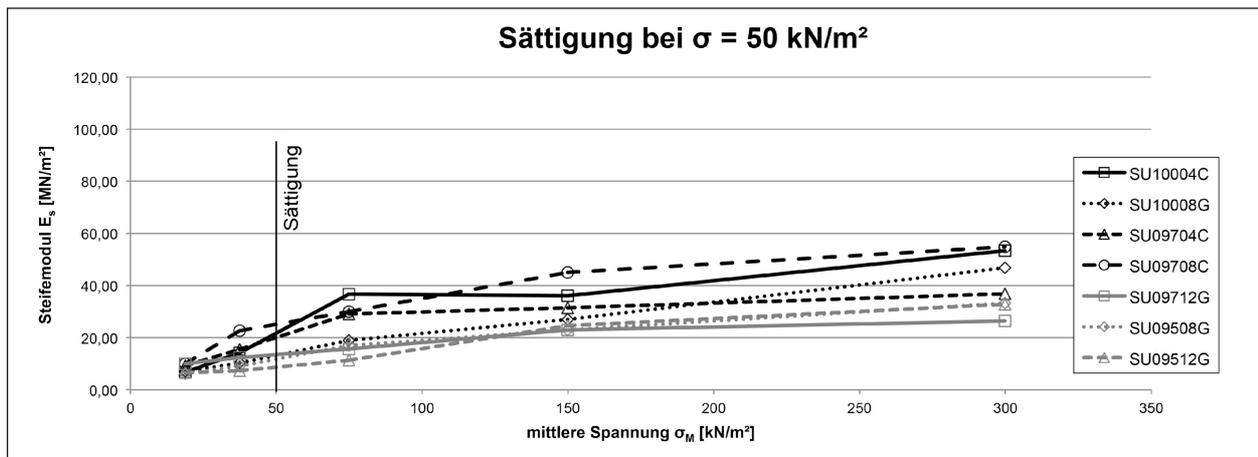


Bild 175: Spannungs-StEIFEMODUL-Diagramm der Versuche mit Sättigung bei einer mittleren Spannung von 50 kN/m²

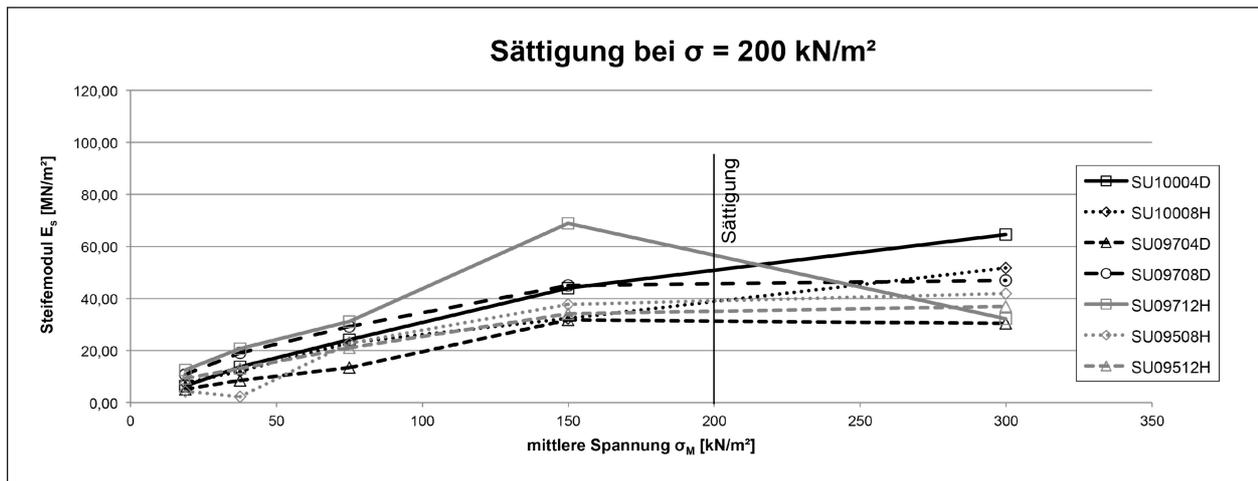


Bild 176: Spannungs-StEIFEMODUL-Diagramm der Versuche mit Sättigung bei einer mittleren Spannung von 200 kN/m²

In Bild 177 bis Bild 190 sind die Spannungs-Zusammendrückungsdiagramme für die verschiedenen Versuchsreihen mit dem Boden SU* dargestellt. Zur Gewährleistung der Lesbarkeit sind jeweils lediglich zwei Versuche in einem Diagramm enthalten. Zunächst werden jeweils die Versuche ohne Sättigung und die Versuche mit Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 200 \text{ kN/m}^2$ in einem Diagramm verglichen, anschließend die Versuche mit Sättigung bei $\sigma = 12,5 \text{ kN/m}^2$ und 50 kN/m^2 .

Die Versuche weisen ähnliche Verläufe auf. Mit zunehmender Last verflacht sich zumeist die Spannungs-Zusammendrückungskurve. Der Entlastungsast steigt anschließend mit abnehmender Last stärker an, die Ausgangsprobhöhen werden jedoch zumeist nicht erreicht. Eine Ausnahme bildet hierbei der Versuch SU09508G (Bild 188) und SU09512G (Bild 190).

Die maximale bezogene Zusammendrückung wurde mit $s' = 2,5 \%$ bei einer Spannung von $\sigma = 400 \text{ kN/m}^2$ an der Probe SU09508H ermittelt (Bild 187). Der niedrigste Wert bei gleicher Spannung wurde mit $s' = 0,9 \%$ an der Probe SU09712E bestimmt (Bild 185).

Bei den Proben, die gesättigt wurden, wurden Hebungs- und Sackungserscheinungen festgestellt. Diese äußern sich in den Diagrammen als senkrechte Linien (z. B. Bild 179). Die beobachteten Hebungen fielen zumeist so gering aus, dass sie in den Diagrammen nur schwer erkennbar sind. Die überwiegend während der Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 200 \text{ kN/m}^2$ aufgetretenen Sackungen sind hingegen bei fast allen Proben D und H gut sichtbar.

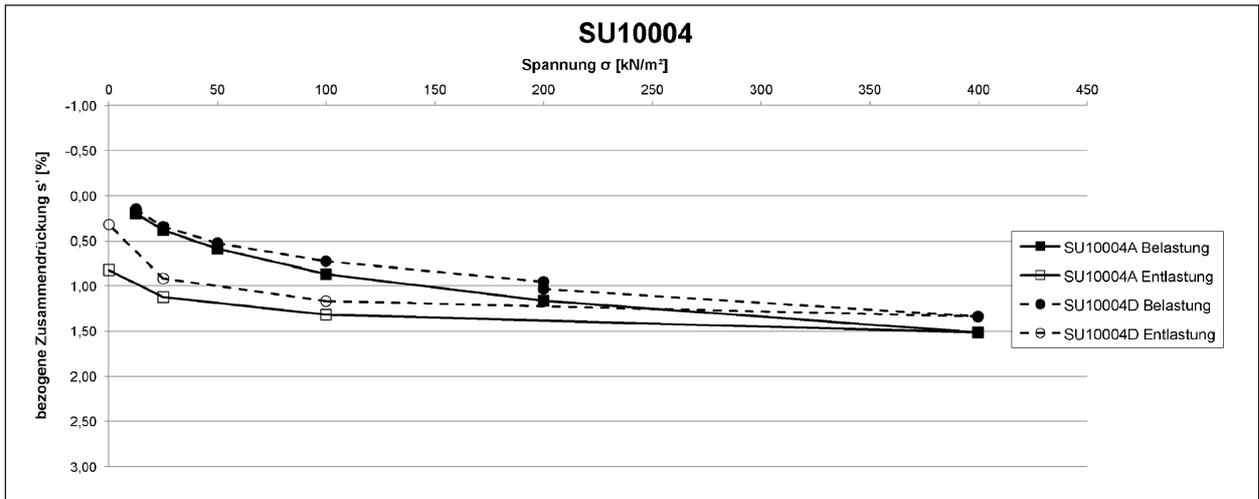


Bild 177: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche SU10004A und SU10004D

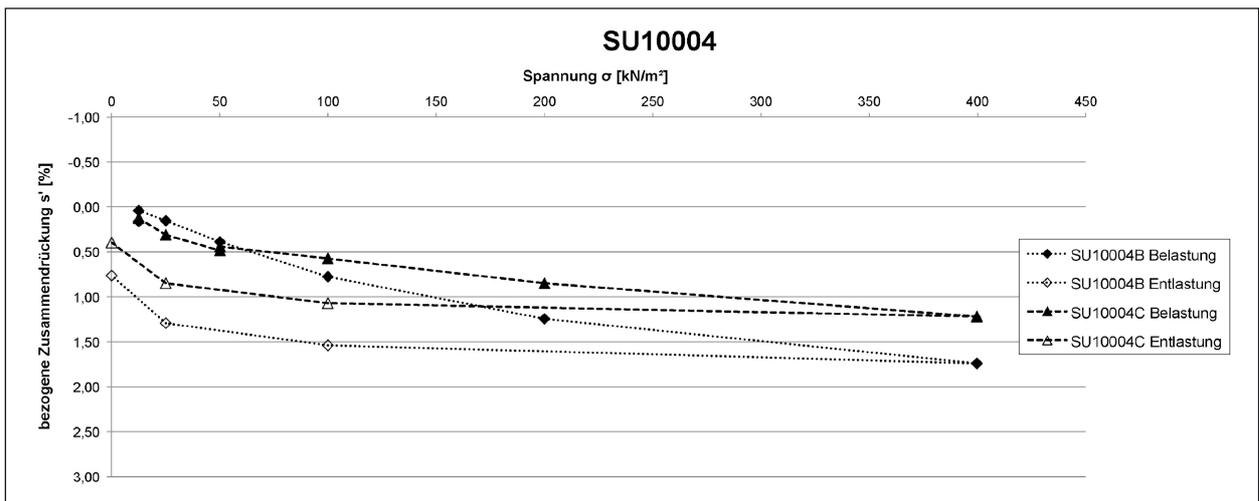


Bild 178: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche SU10004B und SU10004C

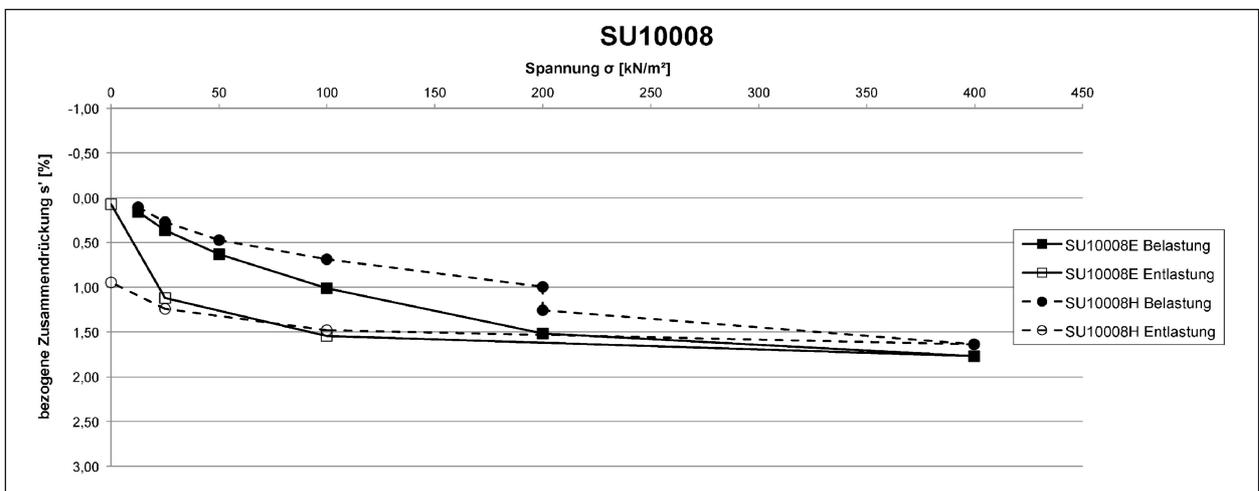


Bild 179: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche SU10008E und SU10008H

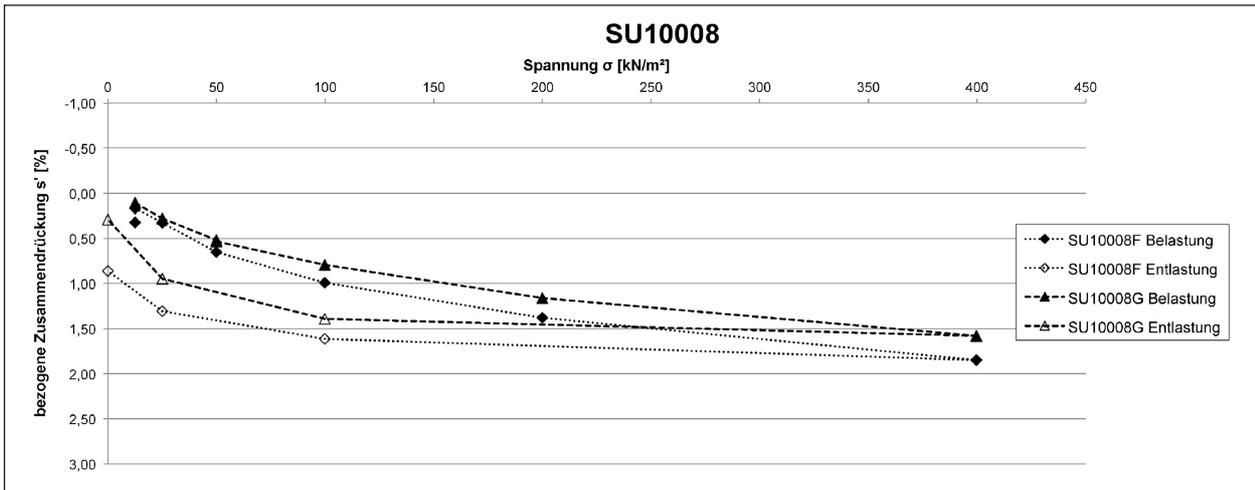


Bild 180: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche SU10008F und SU10008G

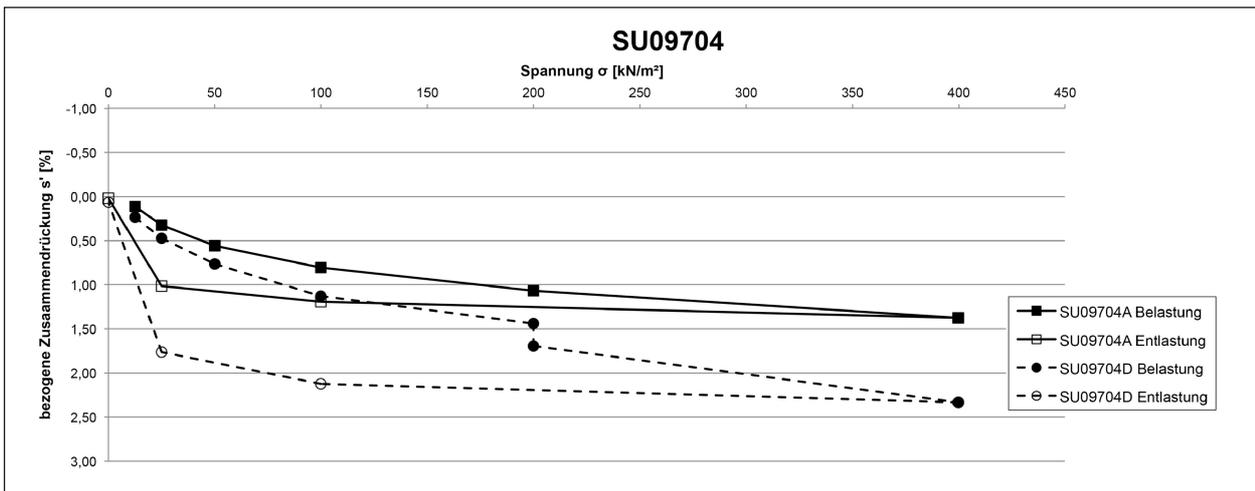


Bild 181: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche SU09704A und SU09704D

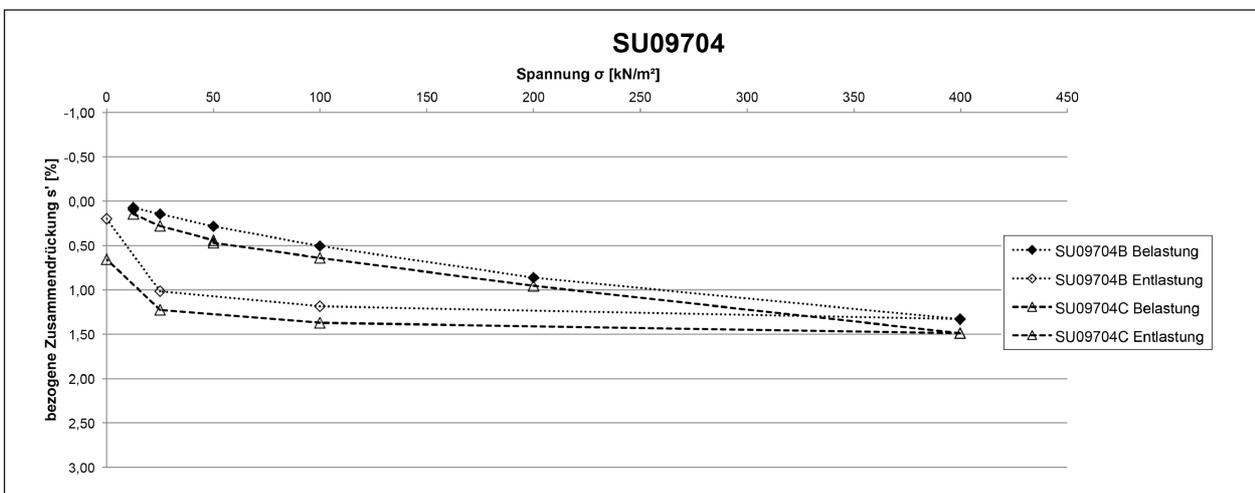


Bild 182: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche SU09704B und SU09704C

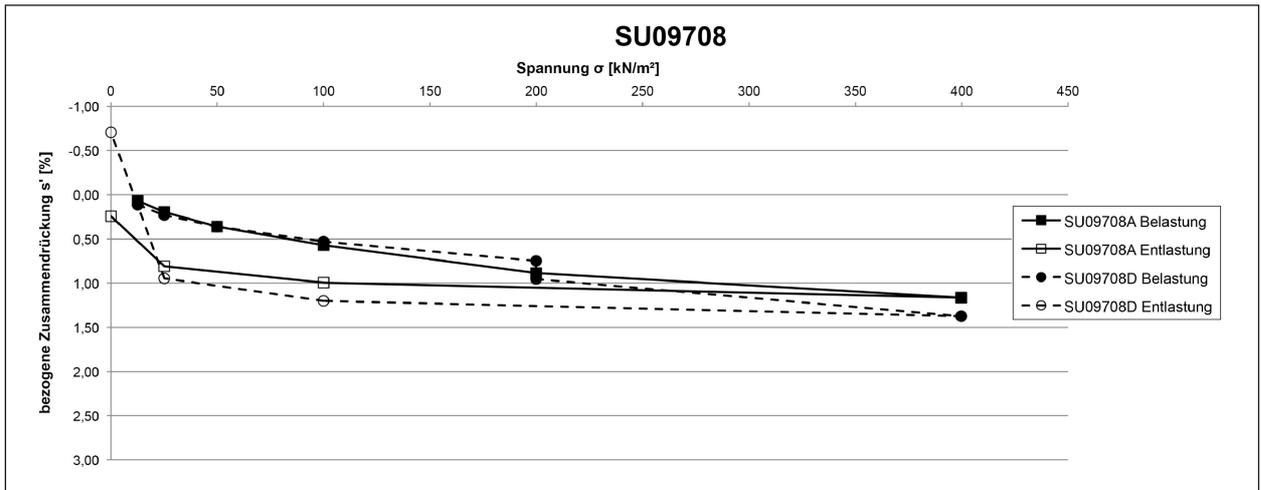


Bild 183: Spannungs-Zusammendrücksdiagramm der Versuche SU09708A und SU09708D

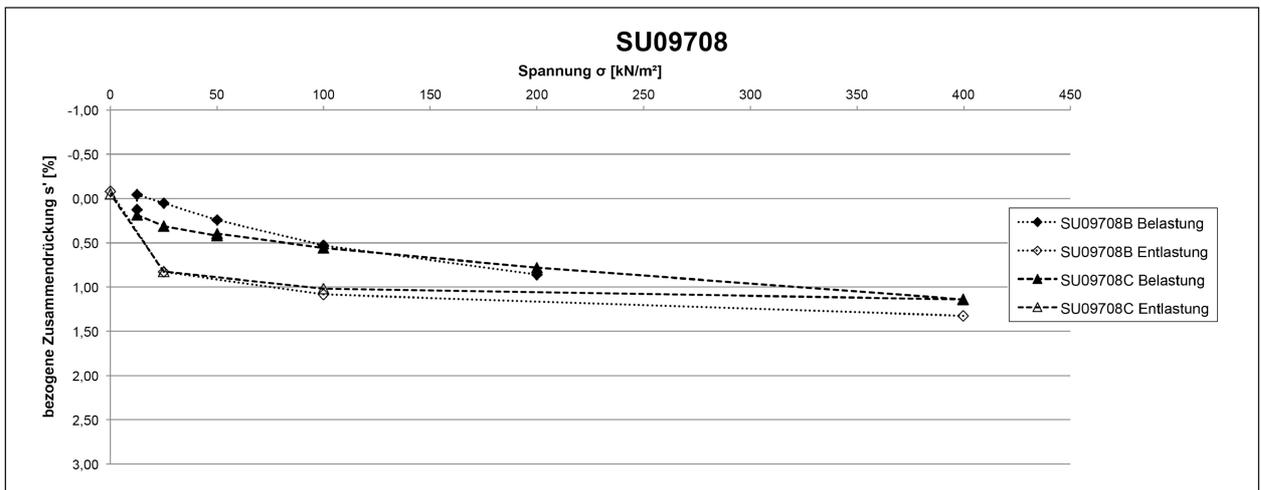


Bild 184: Spannungs-Zusammendrücksdiagramm der Versuche SU09708B und SU09708C

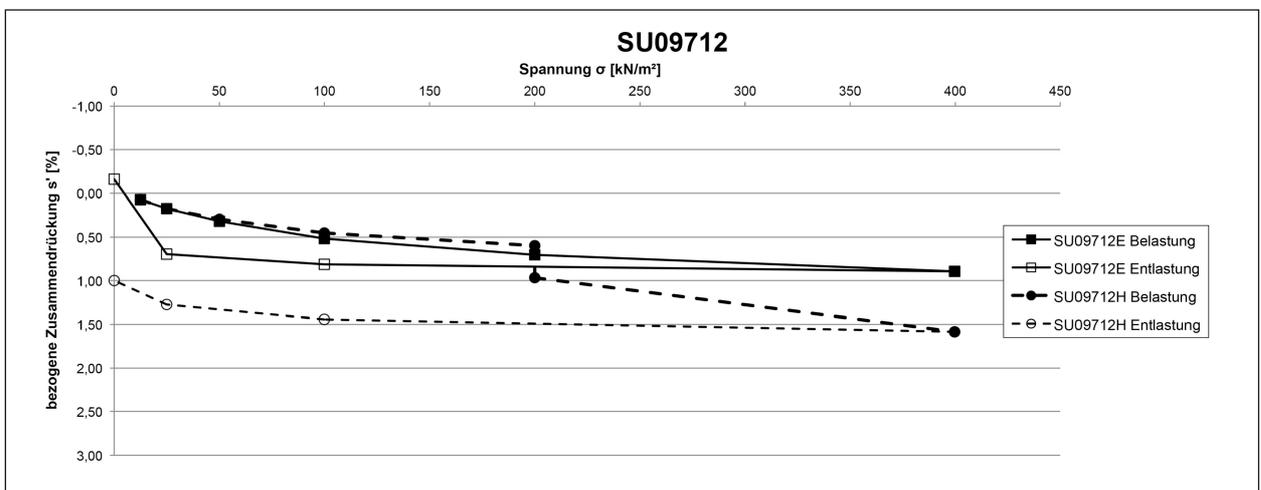


Bild 185: Spannungs-Zusammendrücksdiagramm der Versuche SU09712E und SU09712H

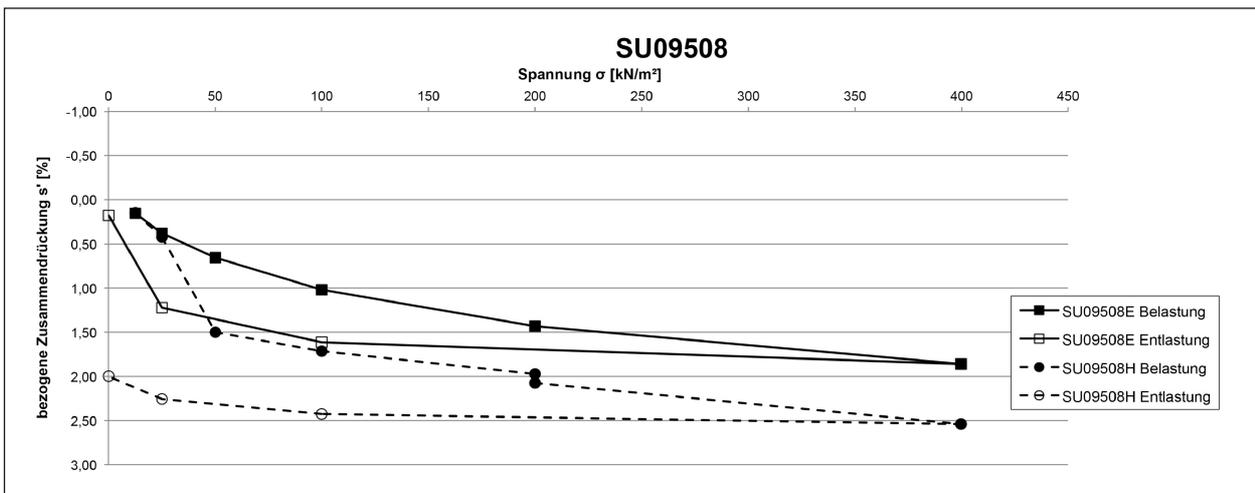


Bild 186: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche SU09508E und SU09508H

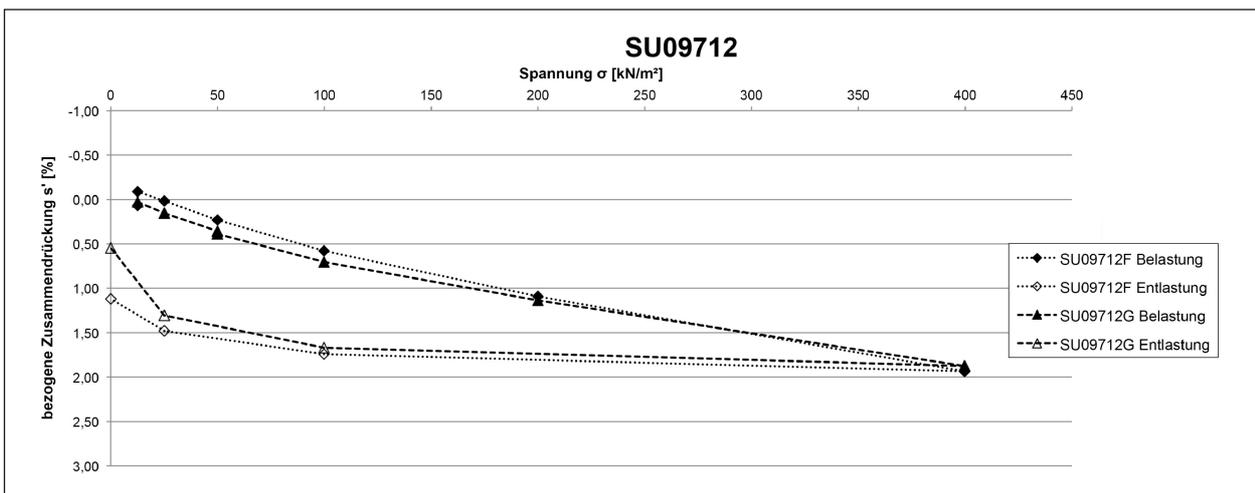


Bild 187: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche SU09712F und SU09712G

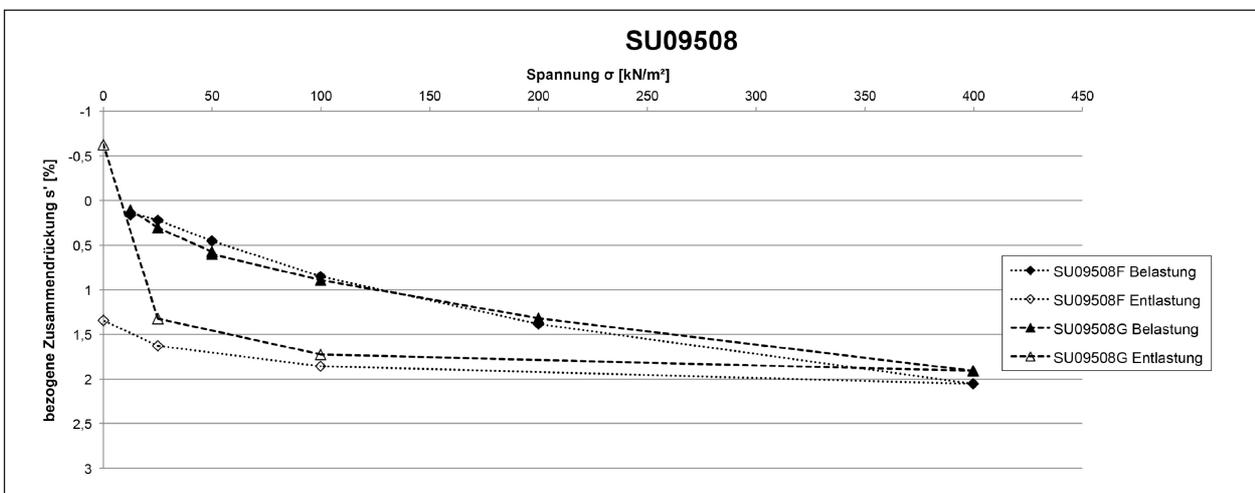


Bild 188: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche SU09508F und SU09508G

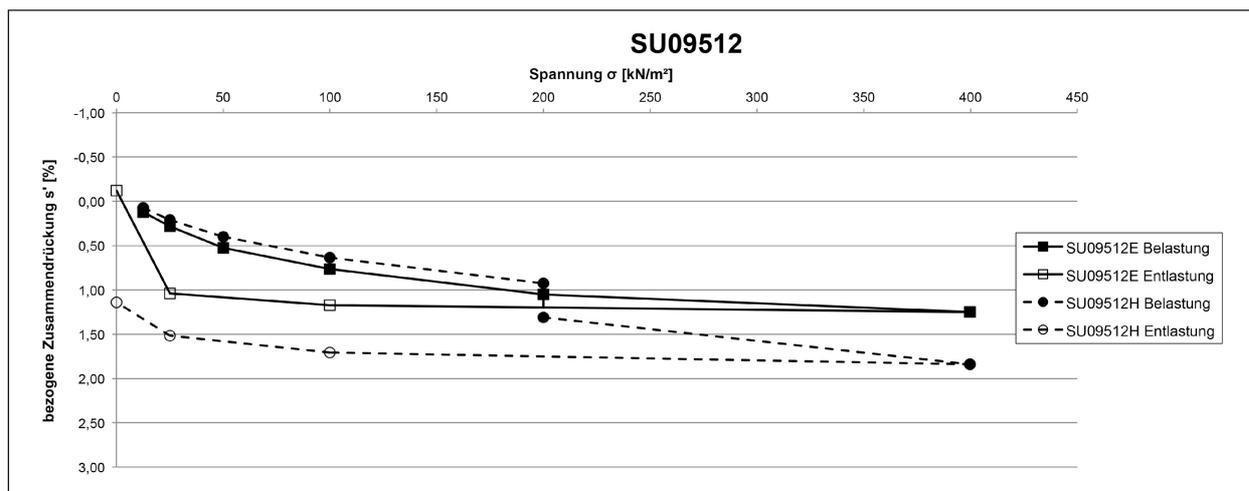


Bild 189: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche SU09512E und SU09512H

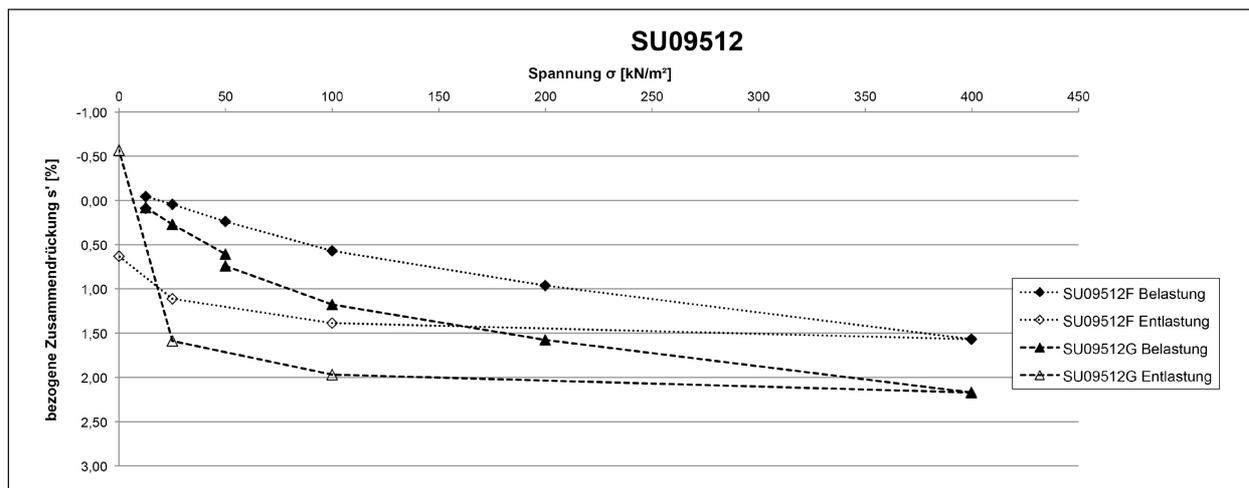


Bild 190: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche SU09512F und SU09512G

In Bild 191 bis Bild 198 werden die Versuche der verschiedenen Versuchsreihen hinsichtlich ihres Spannungs-Zusammendrückungsverhaltens miteinander verglichen, die nicht bzw. bei gleicher Laststufe gesättigt wurden. Zur besseren Lesbarkeit sind in einem Diagramm jeweils die Versuche der Reihen SU10004, SU10008, SU09704 und SU09708, in einem darauffolgenden Diagramm jeweils die der Reihen SU09712, SU09508 und SU09512 dargestellt.

Bei den Versuchen ohne Sättigung lag die bezogene Zusammendrückung der Proben bei der höchsten untersuchten Spannung zwischen $s' = 0,9\%$ und $1,9\%$ (Bild 191, Bild 192). Die geringsten Verformungen wiesen die Proben SU09712E und SU09708A auf. Die größten Verformungen wurden

bei den Proben SU09508E und SU10008E gemessen.

Während der Versuche mit Proben, die bei einer Spannung von $\sigma = 12,5\text{ kN/m}^2$ gesättigt wurden, konnten bei einer maximalen Spannung von $\sigma = 400\text{ kN/m}^2$ bezogene Zusammendrückungen zwischen $s' = 1,3\%$ und $2,1\%$ festgestellt werden (Bild 193, Bild 194). Die größten Verformungen wurden bei den Proben SU09712F und SU09508F gemessen, die geringsten Verformungen wiesen die Proben SU09704B und SU09708B auf.

Bei den Versuchen mit Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 50\text{ kN/m}^2$ wurden bei der maximalen Spannung bezogene Zusammendrückungen von $s' = 1,1\%$ bis $2,2\%$ ermittelt (Bild 195, Bild 196).

Die Proben SU10004C und SU09708C wiesen die geringsten Verformungen auf, die Proben SU09712G, SU09508G und SU09512G die größten.

Die Proben, die bei einer Spannung von $\sigma = 200 \text{ kN/m}^2$ gesättigt wurden, wiesen bei der höchsten untersuchten Spannung bezogene Zusammendrückungen zwischen $s' = 1,3 \%$ und $2,5 \%$ auf (Bild 197, Bild 198). Die größten Verformungen wurden an den Proben SU09704D und SU09508H gemessen, die geringsten wiesen erneut die Proben der Reihen SU10004D und SU09708D auf.

Eindeutige Aussagen über den Einfluss von Trockendichte oder Luftporenanteil konnten anhand der Auswertung der Spannungs-Zusammendrückungskurven der Versuche mit dem Boden SU* nicht getroffen werden. Die festgestellte Streuung der Ergebnisse ließ in dieser Hinsicht keine eindeutige Interpretation der Ergebnisse zu. Bei den Ergebnissen der Versuche, die nach ZTV E-StB 09 zulässige Einbaubedingungen aufwiesen, konnten jedoch keine auffälligen Sackungs- oder Hebungerscheinungen und dadurch bedingte deutliche Änderungen hinsichtlich der bezogenen Zusammendrückung festgestellt werden.

In Bild 199 sind die allein durch die Wasserzugabe hervorgerufenen Änderungen der bezogenen

Zusammendrückung gegen die jeweiligen Span-

nungen, bei denen die Sättigung erfolgte, aufgetragen. Für die Auswertung hinsichtlich Hebungen und Sackungen wurde jeweils die Differenz der bezogenen Zusammendrückung s' direkt vor und am Ende der Wasserzugabe nach 24 h gebildet.

Bei den Versuchen mit dem Versuchsboden SU* wurden bei einer Spannung von $\sigma = 12,5 \text{ kN/m}^2$ bei allen Versuchen geringe Hebungen bis maximal $0,17 \%$ der Probekörperhöhe beobachtet.

Während der Sättigung der Proben bei einer Spannung von $\sigma = 50 \text{ kN/m}^2$ zeigten lediglich die Proben SU10004C und SU09708C Hebungen bis maximal $0,05 \%$. Die Probe SU09512G wies als einzige deutliche Sackungen auf. Diese lagen bei $0,14 \%$ der Probenhöhe. Die restlichen Proben zeigten geringe Sackungen zwischen $0,01 \%$ und $0,04 \%$.

Nur geringe Sackungen bis maximal $0,1 \%$ der Probenhöhe konnten bei den Proben SU10004 und SU09508 während der Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 200 \text{ kN/m}^2$ beobachtet werden. Die restlichen Proben wiesen Sackungen zwischen $0,2 \%$ und $0,4 \%$ der Probenhöhe auf. Die höchste Sackung zeigte dabei die Probe SU09512H auf, die um ca. $0,39 \%$ ihrer Probenhöhe gestaucht wurde.

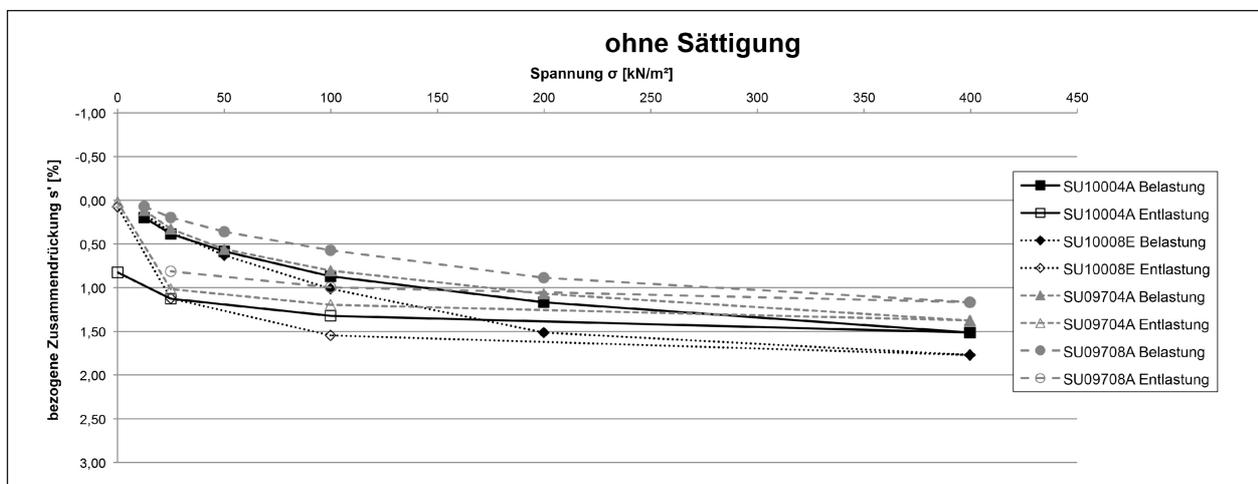


Bild 191: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche SU10004A, SU10008E, SU09704A und SU09708A (ohne Sättigung)

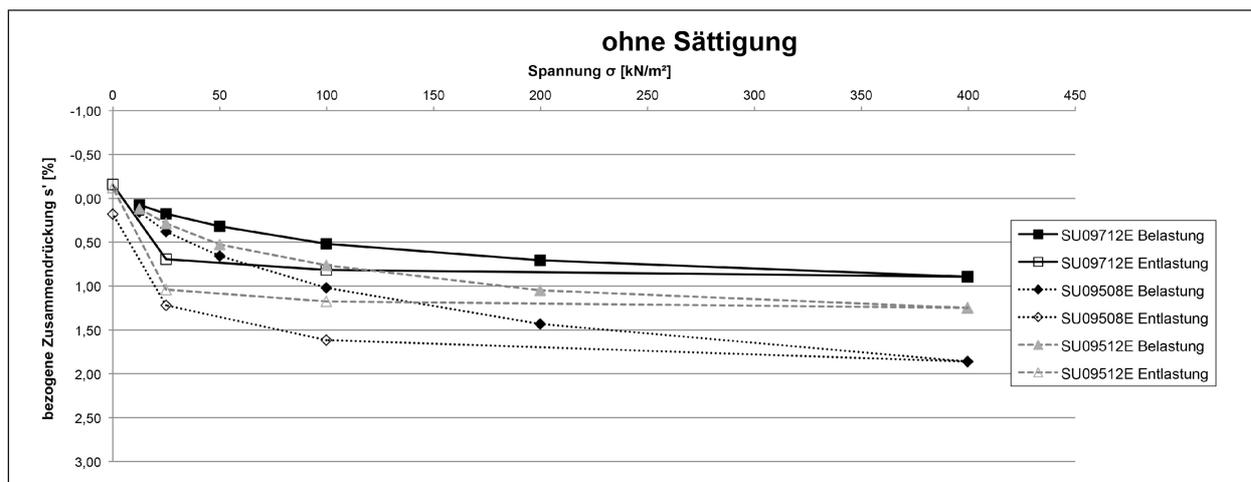


Bild 192: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche SU09712E, SU09508E und SU09512E (ohne Sättigung)

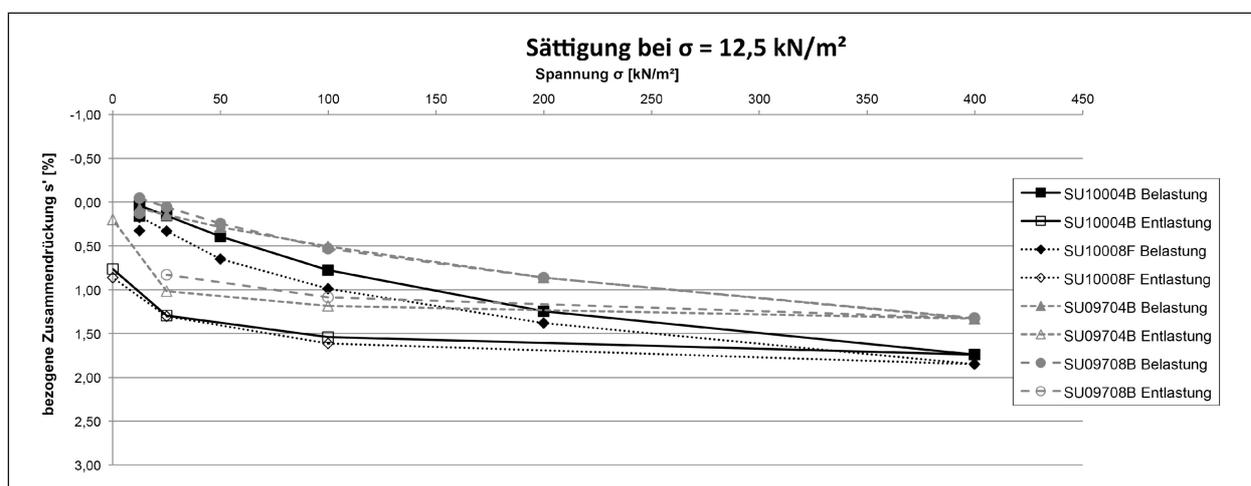


Bild 193: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche SU10004B, SU10008F, SU09704B und SU09708B (Sättigung bei einer mittleren Spannung von 12,5 kN/m²)

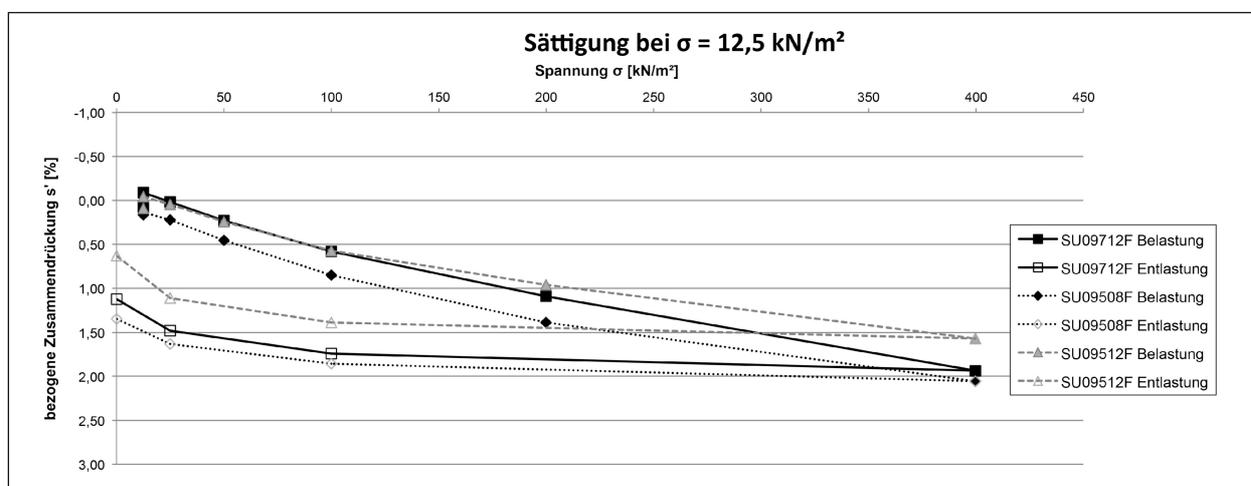


Bild 194: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche SU09712F, SU09508F und SU09512F (Sättigung bei einer mittleren Spannung von 12,5 kN/m²)

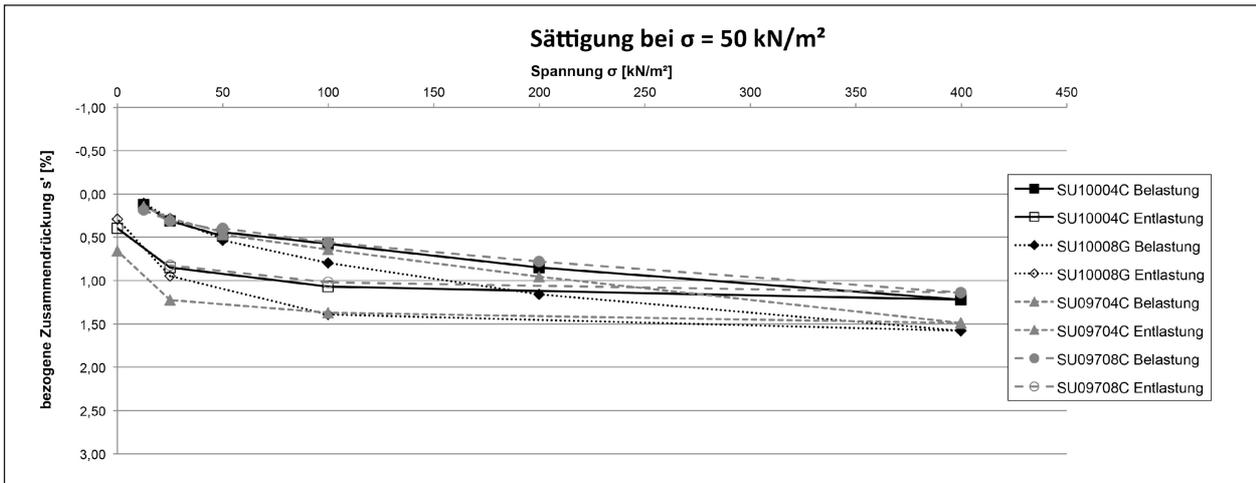


Bild 195: Spannungs-Zusammendrücksdiagramm der Versuche SU10004C, SU10008G, SU09704C und SU09708C (Sättigung bei einer mittleren Spannung von 50 kN/m²)

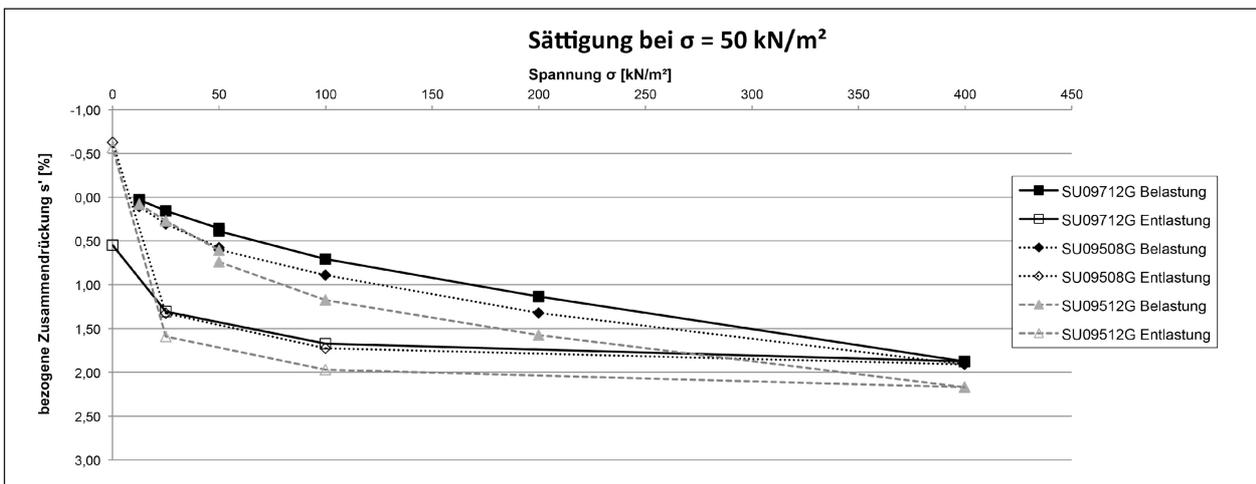


Bild 196: Spannungs-Zusammendrücksdiagramm der Versuche SU09712G, SU09508G und SU09512G (Sättigung bei einer mittleren Spannung von 50 kN/m²)

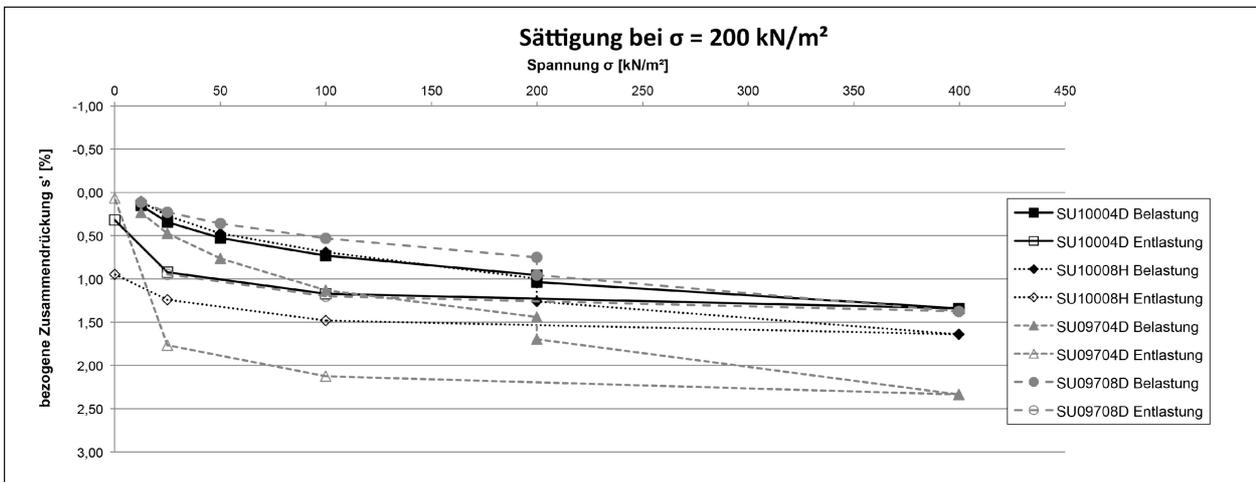


Bild 197: Spannungs-Zusammendrücksdiagramm der Versuche SU10004D, SU10008H, SU09704D und SU09708D (Sättigung bei einer mittleren Spannung von 200 kN/m²)

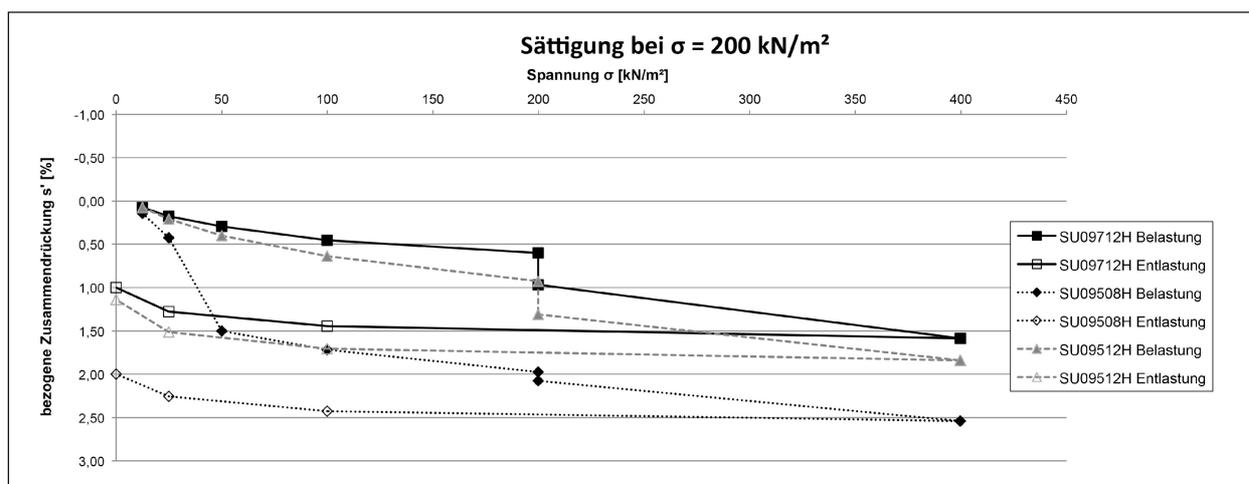


Bild 198: Spannungs-Zusammendrücksdiagramm der Versuche SU09712H, SU09508H und SU09512H (Sättigung bei einer mittleren Spannung von 200 kN/m²)

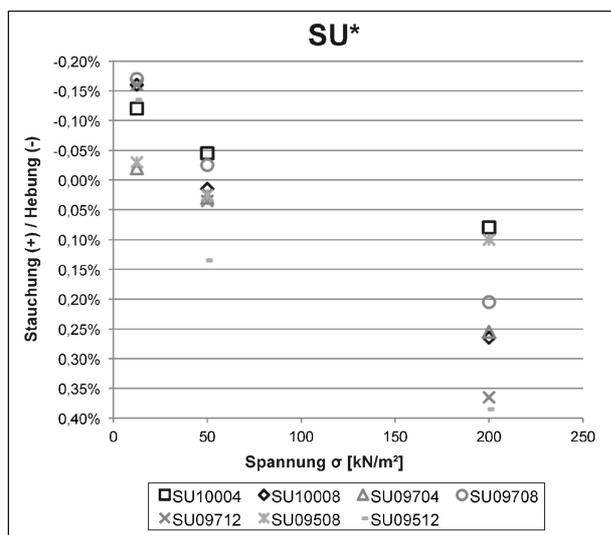


Bild 199: Auswertung der durch Wasserzugabe bei unterschiedlichen Spannungen verursachten Stauchungen und Hebungen

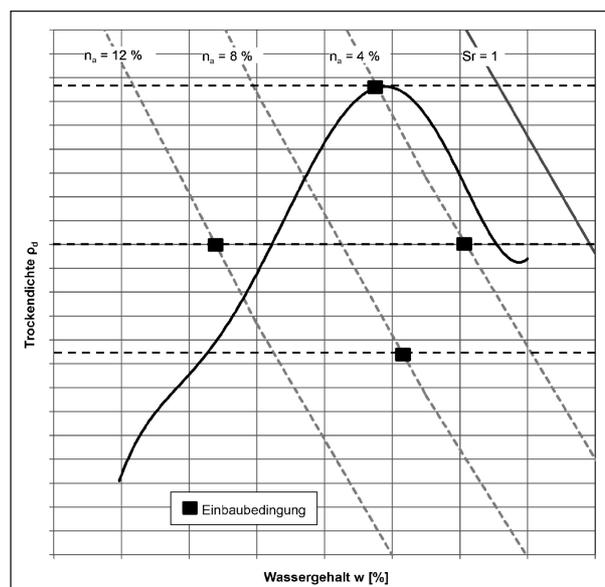


Bild 200: Übersicht über die Einbaubedingungen im Proctor-Diagramm

6.5 Eindimensionale Kompressionsversuche im Großoedometer

6.5.1 Festlegung des Versuchsprogramms

Am Boden GU* wurde ein im Vergleich zu den restlichen Versuchsböden reduziertes Versuchsprogramm vorgenommen. Bedingt wurde dies durch die verglichen mit den kleinen Oedometerzellen geringere Anzahl an zur Verfügung stehenden Großoedometerzellen.

Der Versuchsboden wurde dementsprechend nur unter den folgenden vier Einbaubedingungen im Großoedometer untersucht (Bild 200):

- $D_{Pr} = 100\%$, $n_a = 4 \text{ Vol.-%}$,
- $D_{Pr} = 97\%$, $n_a = 4 \text{ Vol.-%}$,
- $D_{Pr} = 97\%$, $n_a = 12 \text{ Vol.-%}$ und
- $D_{Pr} = 95\%$, $n_a = 8 \text{ Vol.-%}$.

Die Auswahl der Einbaubedingungen erfolgte in erster Linie analog zur Festlegung für die restlichen Versuchsböden (Kapitel 6.4.1). Es wurde versucht, das gesamte Spektrum der möglichen Einbaubedingungen nach der ZTV E-StB 09 mit nur vier Einbaubedingungen bestmöglich abzudecken.

Zur Beurteilung des Verhaltens der Böden bei Wasserzugabe wurden die Böden bei jeder der vier Einbaubedingungen bei unterschiedlichen Spannungen gesättigt.

6.5.2 Versuchsschema

Zur Untersuchung des Versuchsbodens GU* standen drei Großoedometerzellen zur Verfügung. Das für den Oedometerversuchsstand entwickelte Versuchsschema (Tabelle 5) wurde entsprechend der geringeren Anzahl an Großoedometerzellen angepasst. Die Versuchsreihen C/G mit einer Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 50 \text{ kN/m}^2$ wurden am Versuchsboden GU* nicht durchgeführt, sodass jeweils in einer Zelle die Versuche ohne Sättigung und mit einer Sättigung bei einer niedrigen Spannung sowie einer hohen Spannung vorgenommen wurden. Der Sättigungsvorgang erfolgte wie bei den vorhergegangenen Versuchsreihen in den kleineren Oedometerzellen über 24 h bei gleichbleibender Belastung der Proben.

Analog zu den restlichen Kompressionsversuchen erfolgte die Belastung der Zellen über sechs Laststufen, wobei von Laststufe zu Laststufe die auf die Probe wirkende Spannung verdoppelt wurde. Bei der Entlastung wurde die Last jeweils auf ein Viertel der vorhergehenden Laststufe reduziert. Die Laststufen sind in Tabelle 6 dargestellt.

Die maximale Last wurde mit 400 kN/m^2 festgelegt. Dies entspricht in etwa einer Dammhöhe von 20 m und spiegelt so einen Großteil der üblichen Schütthöhen von Dämmen wider.

6.5.3 Großoedometerzellen

Der Versuchsboden GU* wurde in drei Großoedometerzellen mit einem Durchmesser von 300 mm untersucht. Um den Einfluss der Wandreibung während der Versuchsdurchführung zu minimieren, betrug die Probenhöhe maximal ein Fünftel des Probendurchmessers und dementsprechend maximal 60 mm.

Die Wasserzugabe erfolgte über eine im unteren Bereich der Zelle angebrachte Versorgungsleitung. Über in die Grundplatten eingefräste, spiralförmige Vertiefungen, über denen die unteren Filterplatten angeordnet waren, wurde das Wasser über die gesamte Probengrundfläche verteilt und somit eine gleichmäßige Sättigung der Proben ermöglicht. Zur Erfassung der von den Proben aufgenommenen



Bild 201: Großoedometerzellen

Wassermengen waren die Wasserbehältnisse auf Waagen angeordnet.

Die Belastung der Proben erfolgte über kraftgesteuerte Pressen, die Verformungen wurden über Wegaufnehmer gemessen. Die Erfassung der Daten erfolgte in beiden Fällen digital.

In Bild 201 sind die Großoedometerzellen dargestellt.

6.5.4 Probenherstellung

Zur Herstellung der Proben wurde das Ausgangsmaterial auf den gewünschten Wassergehalt gebracht. Die zu erzielenden Trockendichten und Wassergehalte wurden zuvor anhand der aus den Klassifizierungsversuchen erhaltenen Ergebnisse und der in Kapitel 6.4.1 gewählten Einbaubedingungen errechnet. Zur Gewährleistung einer ausreichenden Homogenisierung des Probenmaterials nach der Wasserzugabe wurde das Material für mindestens 24 h luftdicht verschlossen gelagert.

Zu Beginn des Probeneinbaus wurde das Oedometer zunächst um einen Aufsatzring erhöht und anschließend das homogenisierte Probenmaterial eingefüllt. Die Verdichtung des Materials im Großoedometer erfolgte mithilfe eines Proctorhammers mit einem Fallgewicht von 15 kg. Zur Gewährleistung einer gleichmäßigen Verteilung der Schlagenergie und einer ebenen Probenoberfläche wurde eine Schlagplatte mit einem Durchmesser von 300 mm herangezogen. Die Kontrolle der Einbauhöhe erfolgte an vier Stellen mittels einer Tiefenlehre. Um eine Beschädigung oder gar Zerstörung der unteren Filterplatte während des Verdichtungsvorganges zu vermeiden, wurde der Boden zunächst auf einer soliden Grundplatte verdichtet. Im Anschluss wurde diese Grundplatte durch eine Grundplatte mit Filterstein ausge-

Boden	Verdichtungsgrad D_{Pr} [%]	Trockendichte ρ_d [g/cm ³]	Luftporenanteil n_a [Vol.-%]	Wassergehalt w [M.-%]
GU*	100	2,227	4	6,7
	97	2,160	4	8,1
			12	4,4
95	2,116	8	7,1	

Tab. 8: Übersicht über die Einbaubedingungen beim Versuchsboden GU*

tauscht. Abschließend wurden Belastungs- und Opferplatte auf der Probenoberseite angebracht.

Die angestrebten Einbaubedingungen sind in Tabelle 8 aufgelistet.

Zur Erfüllung der Einbaubedingungen wurden Abweichungen von jeweils $\pm 1\%$ -Punkte für den Wassergehalt und die Trockendichte erlaubt.

Analog zu den restlichen Oedometerversuchen folgte die Probenbezeichnung dem in Kapitel 6.4.4 beschriebenen, achtstelligen Schema (z. B. GU09508B). Der Buchstabe am Ende der Abkürzung stand dementsprechend erneut für den Zeitpunkt der Sättigung. Da aufgrund der wenigen zur Verfügung stehenden Großoedometer keine unterschiedlichen Einbaubedingungen parallel untersucht wurden, wurden lediglich die Buchstaben A, B und D für die Beschreibung des Zeitpunkts der Sättigung verwendet. Der Buchstabe C wurde nicht vergeben, da im Großoedometer keine Versuche mit einer Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 50 \text{ kN/m}^2$ erfolgten.

6.5.5 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung erfolgte anhand des in Kapitel 6.5.2 dargestellten Versuchsschemas. Die Lasten wurden jeweils nach 24 h verdoppelt bzw. die Proben im Fall der Wasserzugabe in diesem Zeitraum gesättigt. Nach dem Erreichen der maximalen Lasten wurden die Proben entlastet, wobei nach 24 h die Lasten auf ein Viertel der vorangegangenen Spannungen reduziert wurden. Die Messung der Verformungen erfolgte mittels digitaler Wegaufnehmer. Zeit, Last und Höhenänderung wurden in vorgegebenen Intervallen aufgezeichnet.

Zur Vermeidung einer Wasseraufnahme der Proben vor der geplanten Sättigung wurden die Filterplatten trocken in die Oedometerzellen eingebaut.

Nach der letzten Entlastung wurden die Proben ohne Auflast für 24 h entspannt und anschließend aus den Zellen ausgebaut und die Proben gewogen. Zur Bestimmung des Ausbauwassergehalts wurden die Proben zum Schluss getrocknet.

6.5.6 Versuchsergebnisse mit dem stark schluffigen Kies (GU*)

In Bild 202 bis Bild 205 sind die Einbau- und Ausbaupunkte der Versuche in Proctordiagrammen dargestellt, die mit dem aus den Einzelkörnungen hergestellten Kiesgemisch durchgeführt wurden. Enthalten sind dabei neben der Proctorkurve auch die Sättigungslinie ($S_r = 1$ bzw. $n_a = 0 \text{ Vol.-%}$) und die Isolinien für Luftporenanteile von $n_a = 4 \text{ Vol.-%}$, 8 Vol.-% und 12 Vol.-% .

Die Einbaubedingungen gemäß dem gewählten Versuchsprogramm wurden beim Versuchsboden GU* fast ausnahmslos erreicht. Lediglich bei der Versuchsreihe GU09508 (Bild 205) wurde beim Versuch mit einer späten Sättigung die Einbautrockendichte deutlich überschritten und anstatt eines Verdichtungsgrades von $D_{Pr} = 95 \%$ eine Verdichtung von $D_{Pr} = 98 \%$ erreicht.

Im Allgemeinen wiesen die Versuche mit Wasserzugabe nach Ausbau einen sehr hohen Sättigungsgrad auf. Dies spricht für einen erfolgreichen Sättigungsvorgang während des Versuchs. Die Luftporengehalte der Proben mit Sättigung wiesen ausnahmslos Werte von $n_a < 3 \%$ auf. Bei den Proben ohne Wassersättigung konnten geringfügige Abnahmen der Wassergehalte verzeichnet werden. Die Ausbauwassergehalte lagen hierbei zwischen $w = 4 \text{ M.-%}$ und 8 M.-% .

Im Großteil der Fälle konnte beim Vergleich der Einbau- und Ausbau-Verdichtungspunkte eine Konsolidation und somit eine Zunahme der Dichte festgestellt werden, die maximal $0,04 \text{ g/cm}^3$ betrug. Im Fall der Proben GU09712B und GU09712D konnte im Vergleich der Dichten vor und nach dem Versuch keine nennenswerten Veränderungen festgestellt werden.

Die Protokolle der einzelnen Versuche sind in den Anlagen 5.129 bis 5.140 enthalten.

In Bild 206 bis Bild 209 sind die Spannungs-Steifemodul-Diagramme der mit dem stark schluffigen Kies durchgeführten Versuchsreihen dargestellt. Die Ermittlung der Steifemoduln erfolgte als Sekantenmoduln von zwei aufeinanderfolgenden

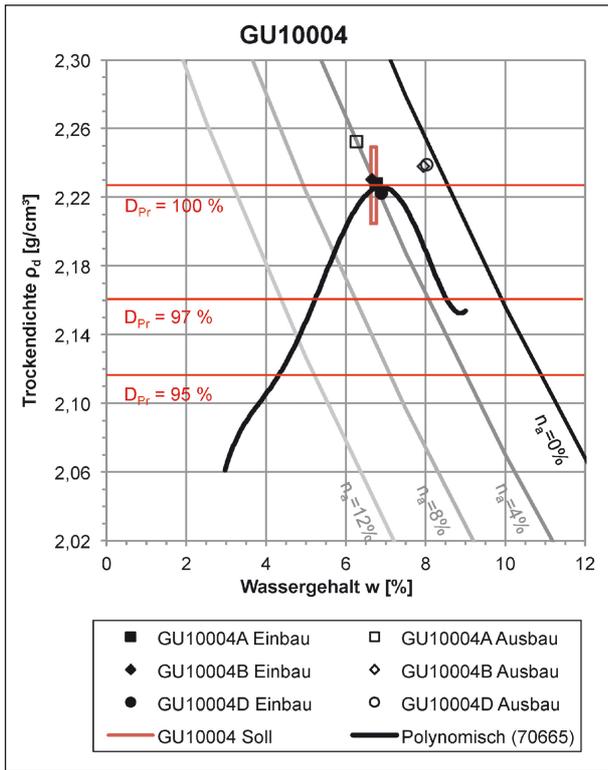


Bild 202: Erreichte Werte für Trockendichte und Wassergehalt bei Ein- und Ausbau der Proben GU10004

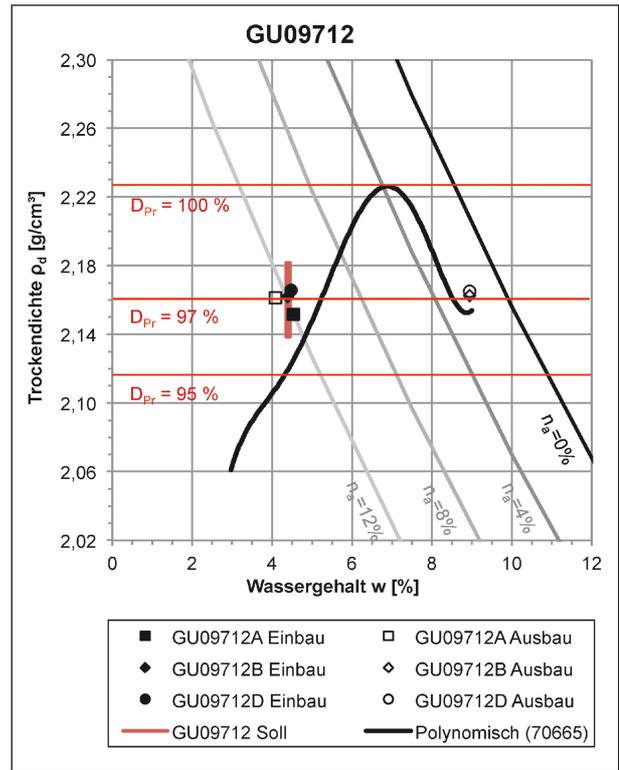


Bild 204: Erreichte Werte für Trockendichte und Wassergehalt bei Ein- und Ausbau der Proben GU09712

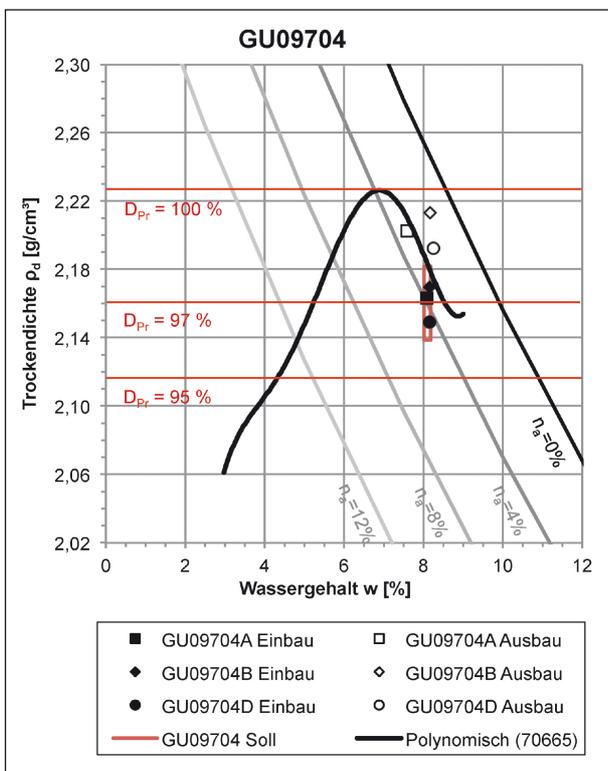


Bild 203: Erreichte Werte für Trockendichte und Wassergehalt bei Ein- und Ausbau der Proben GU09704

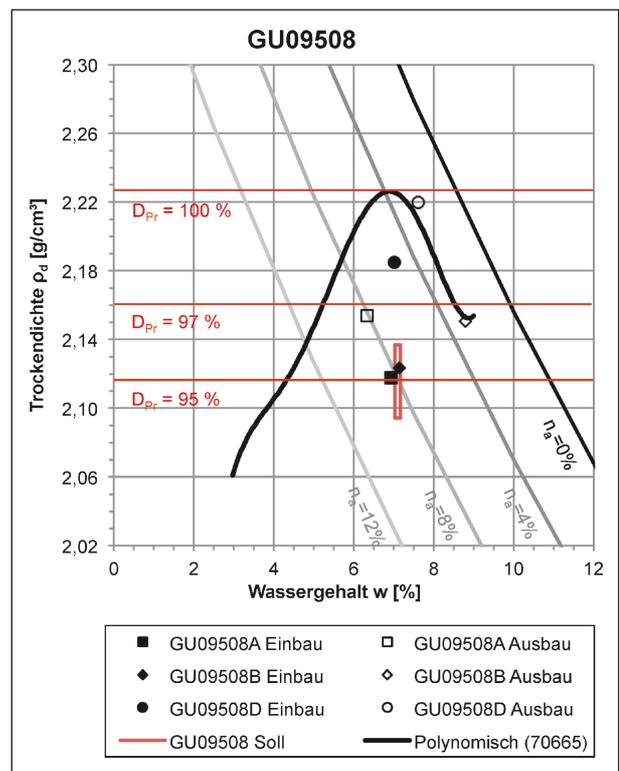


Bild 205: Erreichte Werte für Trockendichte und Wassergehalt bei Ein- und Ausbau der Proben GU09508

Laststufen. Die in den Diagrammen angegebenen mittleren Spannungen stellen jeweils die Mittelwerte der Spannungen dieser beiden Laststufen dar.

Die Versuchsreihen wiesen größtenteils einen Anstieg der Steifigkeit auf, der mit zunehmender Spannung langsam abflachte. Untergeordnet traten auch Versuche auf, bei denen kaum eine Zunahme der Steifigkeiten mit steigenden Spannungen beobachtet werden konnte (z. B. GU09508A in Bild 209).

Die Versuche der Reihe B zeigten zu Beginn der Versuche leichte Abnahmen (Bild 209) oder nur geringe Zunahmen der Steifigkeiten (Bild 206, Bild 207, Bild 208). Dies ist auf die frühe Sättigung der Proben zurückzuführen.

Die höchsten Steifemoduln wurden überwiegend bei der höchsten untersuchten mittleren Spannung von $\sigma_M = 300 \text{ kN/m}^2$ an den Proben ohne Sättigung festgestellt, gefolgt von den Proben, die bei einer Spannung von $\sigma = 200 \text{ kN/m}^2$ gesättigt wurden. Die niedrigsten Steifemoduln wurden in der Regel an den Proben ermittelt, die bereits früher bewässert worden waren. Eine Ausnahme bildet hierzu lediglich die Versuchsreihe GU09508, bei der die Probe ohne Sättigung die geringste Steifigkeit bei der höchsten mittleren Spannung aufwies. Die Steifemoduln wiesen dabei jedoch eine sehr geringe Schwankungsbreite auf (Bild 209). Hierbei gilt jedoch auch zu beachten, dass die Probe GU09508D mit einer zu hohen Einbautrockendichte eingebaut worden war.

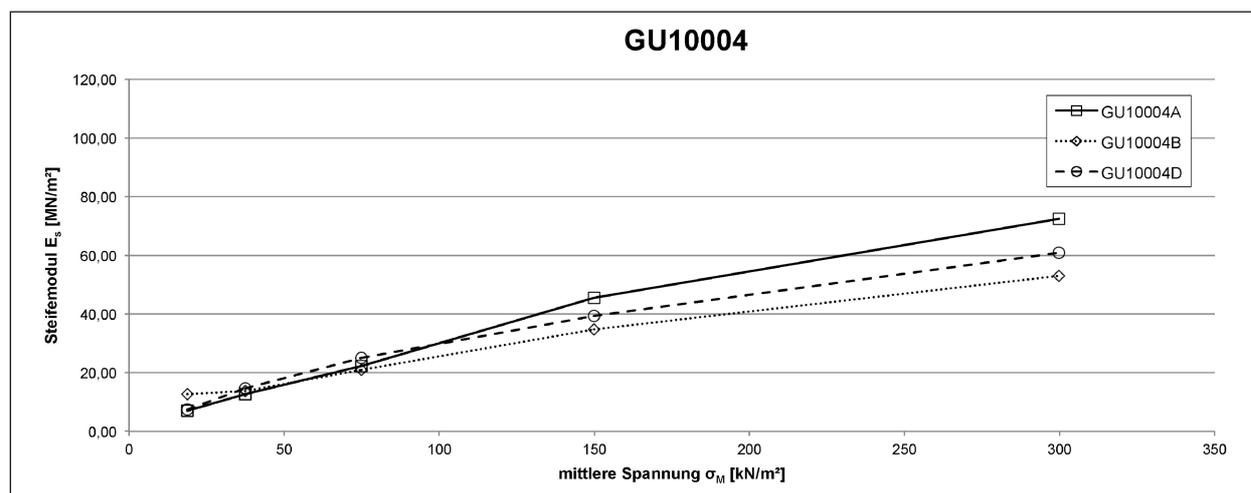


Bild 206: Spannungs-Steifemodul-Diagramm der Versuchsreihe GU10004

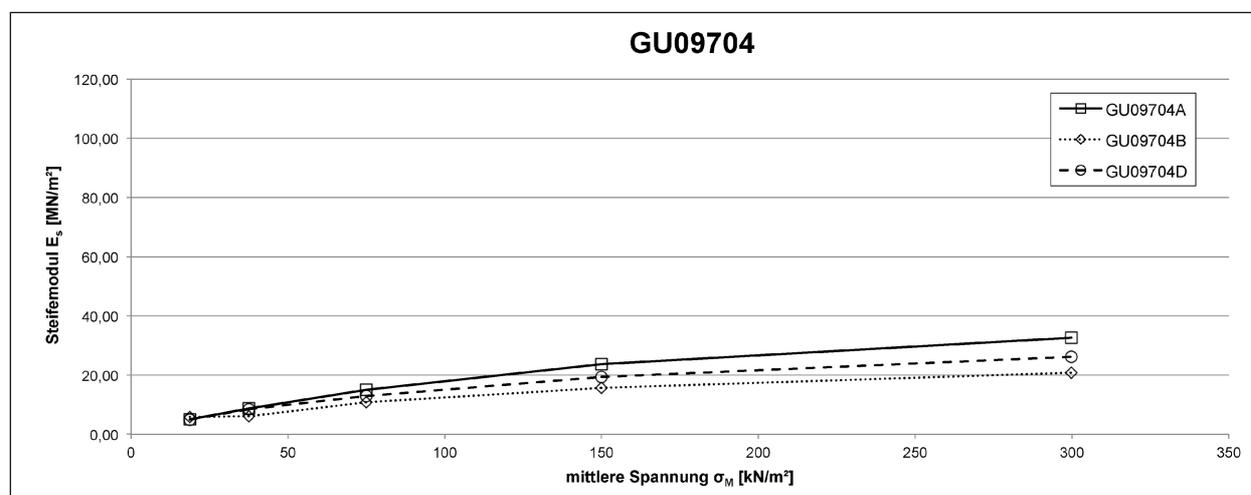


Bild 207: Spannungs-Steifemodul-Diagramm der Versuchsreihe GU09704

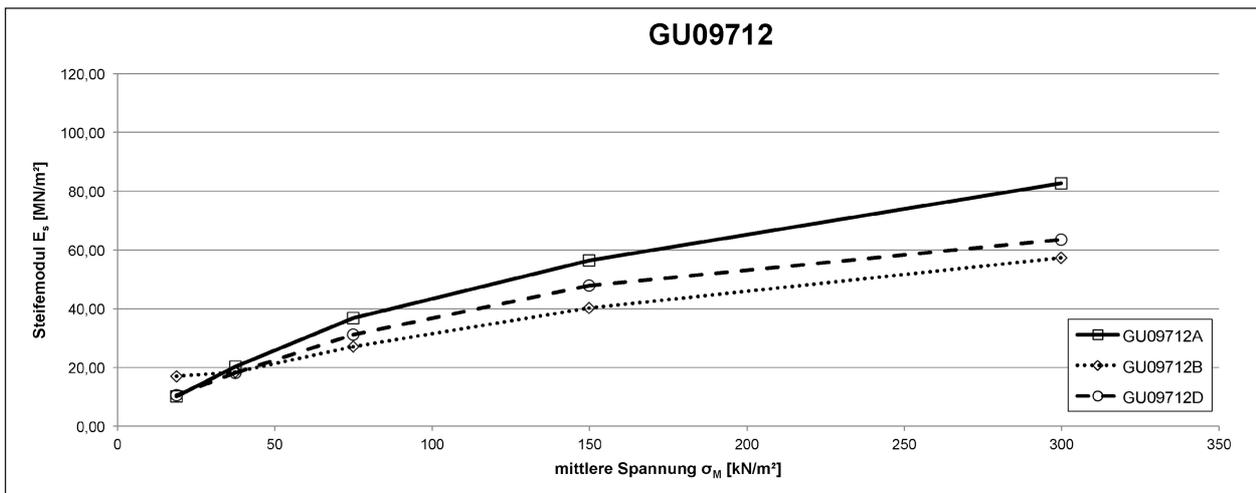


Bild 208: Spannungs-Steifemodul-Diagramm der Versuchsreihe GU09712

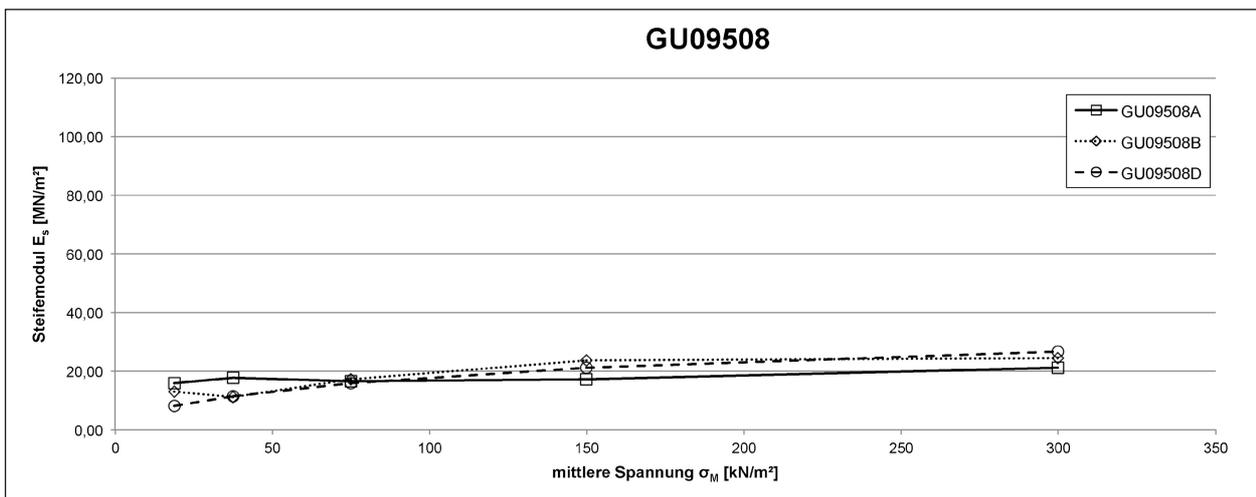


Bild 209: Spannungs-Steifemodul-Diagramm der Versuchsreihe GU09508

In Bild 210 bis Bild 212 werden die Versuche der verschiedenen Versuchsreihen mit dem Versuchsboden GU* miteinander verglichen, die nicht bzw. bei gleicher Laststufe gesättigt wurden. Die Versuche ohne Sättigung (Proben A) finden sich in Bild 210, die mit einer Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 12,5$ kN/m² (Proben B) in Bild 211 und die mit einer Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 200$ kN/m² (Proben D) in Bild 212.

Bei den Versuchen ohne Sättigung können mehrere Kurvenverläufe unterschieden werden. Die Proben GU10004A und GU09712A wiesen einen deutlichen Anstieg der Steifigkeiten mit zunehmender Spannung auf (Bild 210). Dieser Anstieg fiel bei der Probe GU09704A deutlich flacher aus. Von den genannten drei Kurven unterschied sich der Verlauf

der Probe GU09508A deutlich, der insgesamt nur eine sehr geringe Zunahme der Steifigkeit von $E_s = 15,9$ MN/m² auf 21,1 MN/m² aufzeigte. Zudem lagen die Steifigkeiten bei mittleren Spannungen von $\sigma_M = 75$ kN/m² und 150 kN/m² unterhalb der bei einer mittleren Spannung von $\sigma_M = 37,5$ kN/m². Die Gründe für das Verhalten des Probekörpers konnten nicht geklärt werden. Die höchsten Steifigkeiten wurden bei einer mittleren Spannung von $\sigma_M = 300$ kN/m² mit $E_s = 87,7$ MN/m² und 72,4 MN/m² an den Proben GU09712A und GU10004A ermittelt. Den niedrigsten Steifemodul bei dieser Spannung wies die Probe GU09508A mit $E_s = 21,1$ MN/m² auf.

Bei den Proben mit einer Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 12,5$ kN/m² konnte zu Beginn

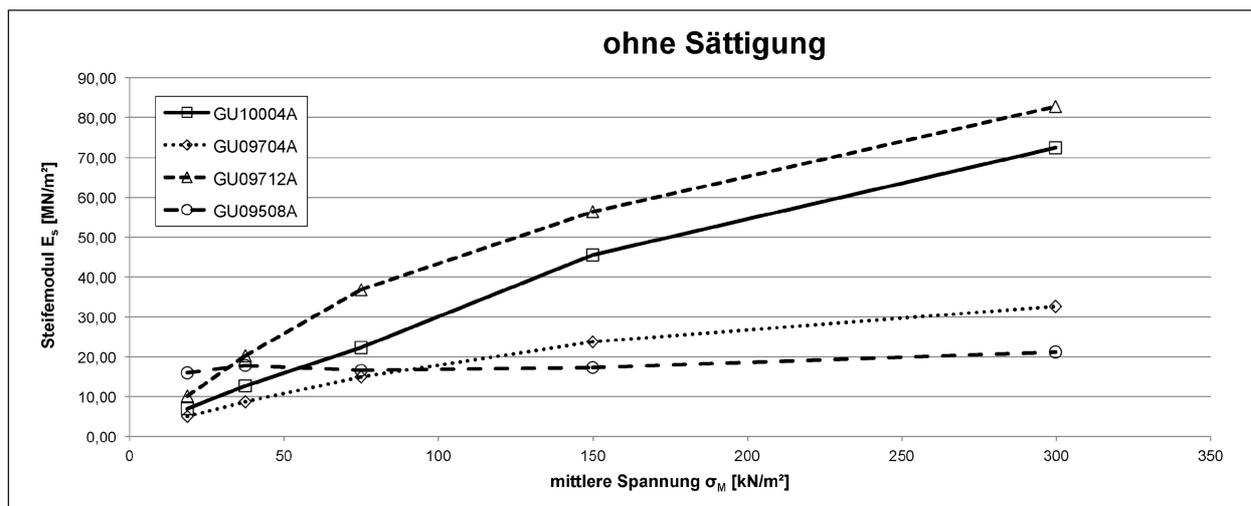
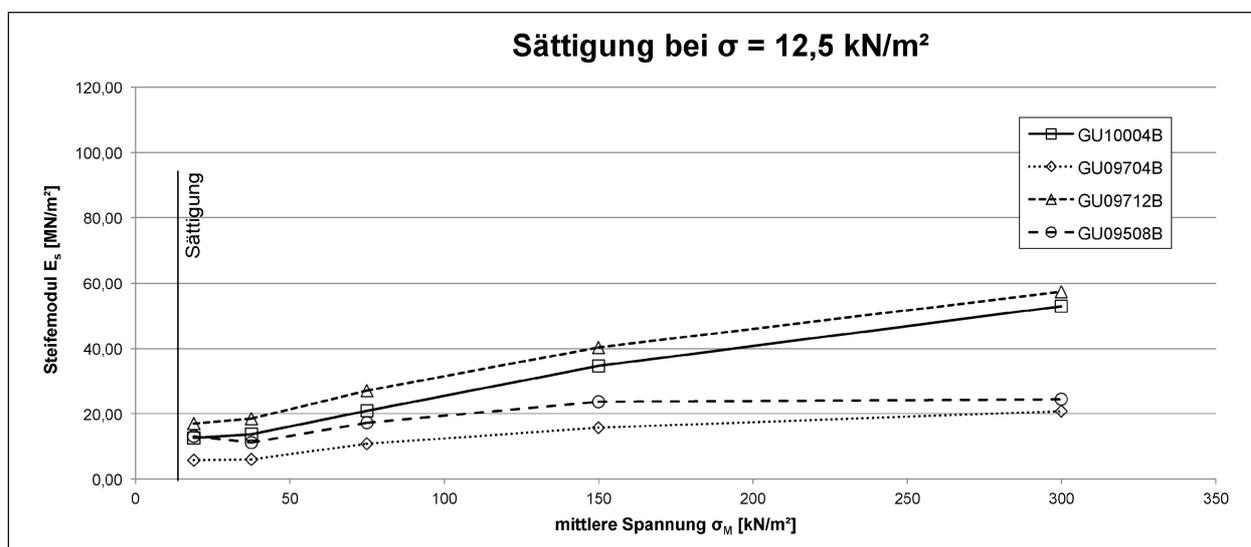
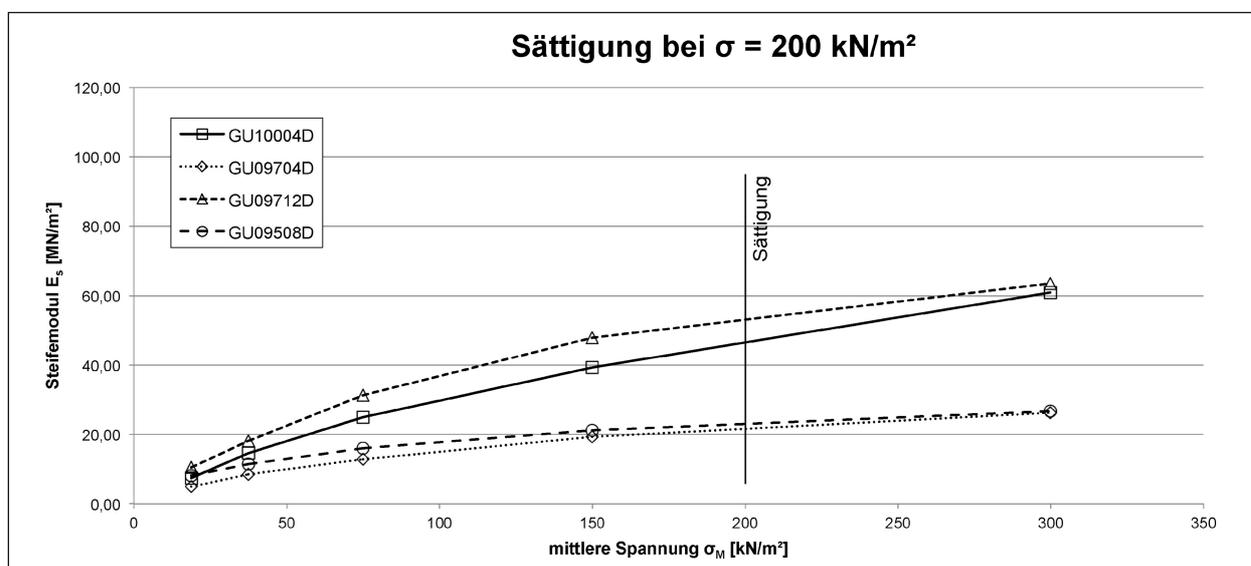


Bild 210: Spannungs-Steifemodul-Diagramm der Versuche ohne Sättigung

Bild 211: Spannungs-Steifemodul-Diagramm der Versuche mit Sättigung bei einer mittleren Spannung von 12,5 kN/m²Bild 212: Spannungs-Steifemodul-Diagramm der Versuche mit Sättigung bei einer mittleren Spannung von 200 kN/m²

der Versuche zumeist ein sehr geringer Anstieg und im Fall der Probe GU09508B eine geringe Abnahme der Steifigkeiten beobachtet werden (Bild 211). Im Folgenden wurde ein kontinuierlicher, teilweise fast linearer Anstieg der Steifemoduln beobachtet, wobei insbesondere ab mittleren Spannungen von $\sigma_M = 75 \text{ kN/m}^2$ ein deutlicher Unterschied zwischen den Kurven GU09712B und GU10004B einerseits und den Versuchen GU09704B und GU09508B andererseits erkennbar war. Letztere beiden Kurven wiesen deutlich geringere Steigungen auf. Folglich wurden bei der höchsten untersuchten mittleren Spannung von $\sigma_M = 300 \text{ kN/m}^2$ deutlich höhere Steifigkeiten mit Werten von $E_s = 53,0 \text{ MN/m}^2$ und $57,4 \text{ MN/m}^2$ an den Proben GU09712B und GU10004B festgestellt, während diese bei den Proben GU09704B und GU09508B Werte von $E_s = 20,8 \text{ MN/m}^2$ und $24,5 \text{ MN/m}^2$ aufwiesen.

Die Versuche mit Sättigung bei einer Spannung von $\sigma = 200 \text{ kN/m}^2$ ergaben ähnliche Ergebnisse wie die Versuche mit einer früheren Sättigung. Die Proben wiesen einen durchgängigen Anstieg ihrer Steifigkeiten von Versuchsbeginn an auf, der mit zunehmender Spannung langsam abflacht (Bild 212). Von Beginn an fiel die Zunahme der Steifigkeitswerte bei den Proben GU10004D und GU09712D jedoch deutlich höher aus als bei den Proben 09704D und GU09508D. Dementsprechend lagen die Steifigkeiten ersterer bei der höchsten untersuchten mittleren Spannung von $\sigma_M = 300 \text{ kN/m}^2$ bei $E_s = 60,9 \text{ MN/m}^2$ und $63,5 \text{ MN/m}^2$, die Steifigkeiten letzterer bei $E_s = 26,3 \text{ MN/m}^2$ und $26,8 \text{ MN/m}^2$.

Aus den Versuchen ergab sich die allgemeine Tendenz, dass hohe Einbautrockendichten zu hohen Steifigkeiten führen, wobei die Versuchsergebnisse eine nennenswerte Streuung aufwiesen. Der Einfluss des Luftporenanteils auf die Steifigkeit kann anhand der vorliegenden Versuchsergebnisse nicht eindeutig beurteilt werden.

In Bild 213 bis Bild 216 sind die Spannungs-Zusammendrückungsdiagramme für die verschiedenen Versuchsreihen dargestellt.

Die Versuche wiesen ähnliche Verläufe auf. Mit zunehmender Last verflachte sich zumeist die Spannungs-Zusammendrückungskurve. Der Entlastungsast stieg anschließend mit abnehmender Last stärker an, die Ausgangsprobhöhen wurden jedoch mit Ausnahme der Versuche GU09712B und GU09712D (Bild 215) nicht erreicht.

Die maximale bezogene Zusammendrückung wurde mit $s' = 3,1 \%$ bei einer Spannung von $\sigma = 400 \text{ kN/m}^2$ an der Probe GU09704B ermittelt (Bild 214). Der niedrigste Wert bei gleicher Spannung wurde mit $s' = 0,9 \%$ an der Probe GU09712B bestimmt (Bild 215).

Bei den Proben, die gesättigt wurden, wurden Hebungs- und Sackungserscheinungen festgestellt, die in den Diagrammen als senkrechte Linien (z. B. GU09712F in Bild 215) erkennbar sind. Die beobachteten Hebungen und Sackungen fielen zumeist jedoch so gering aus, dass sie in den Diagrammen nicht zu erkennen sind.

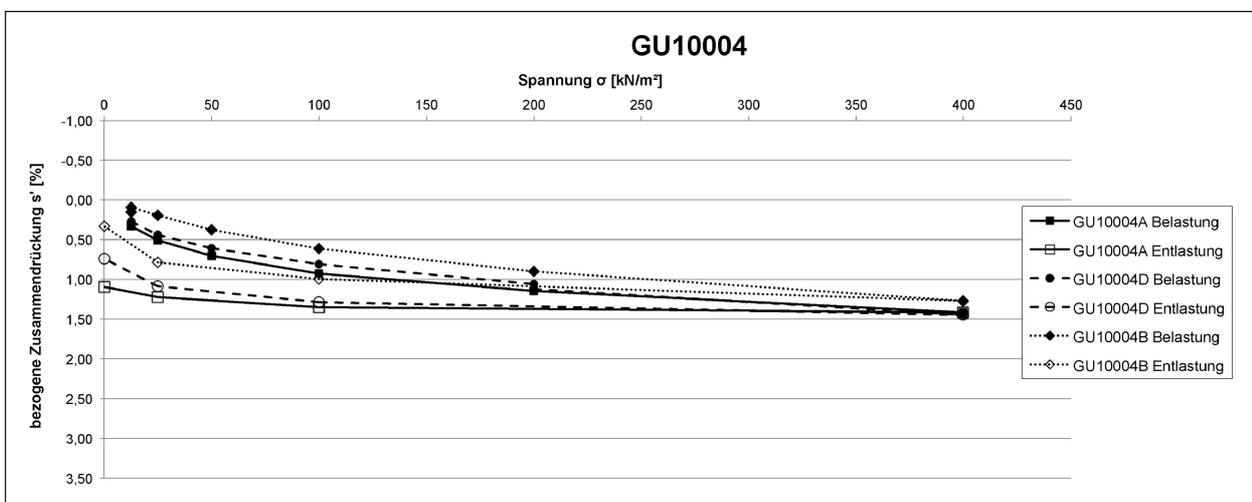


Bild 213: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuchsreihe GU10004

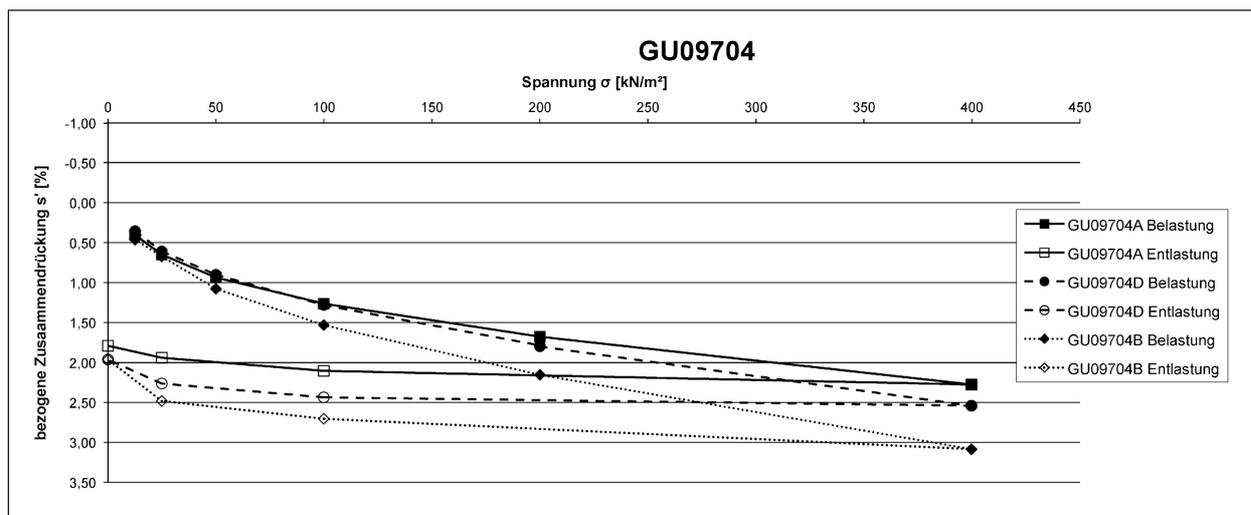


Bild 214: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuchsreihe GU09704

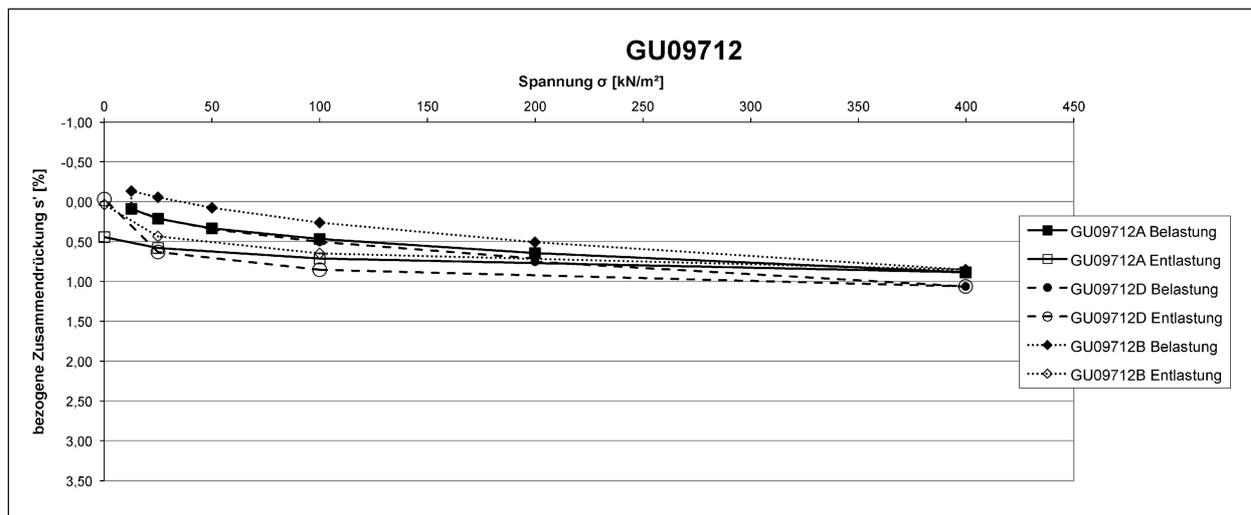


Bild 215: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuchsreihe GU09712

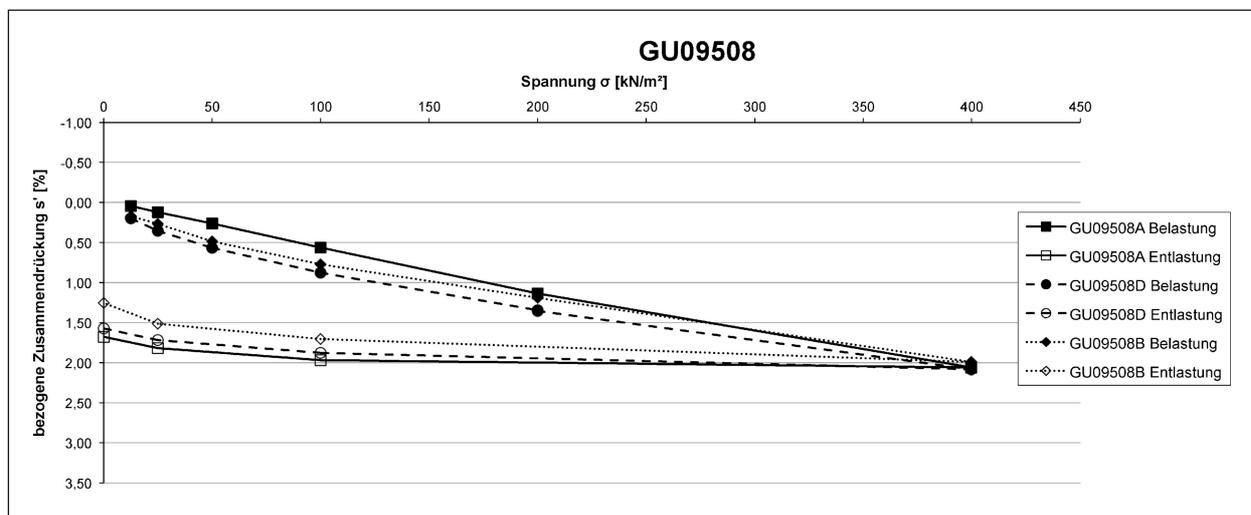


Bild 216: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuchsreihe GU09508

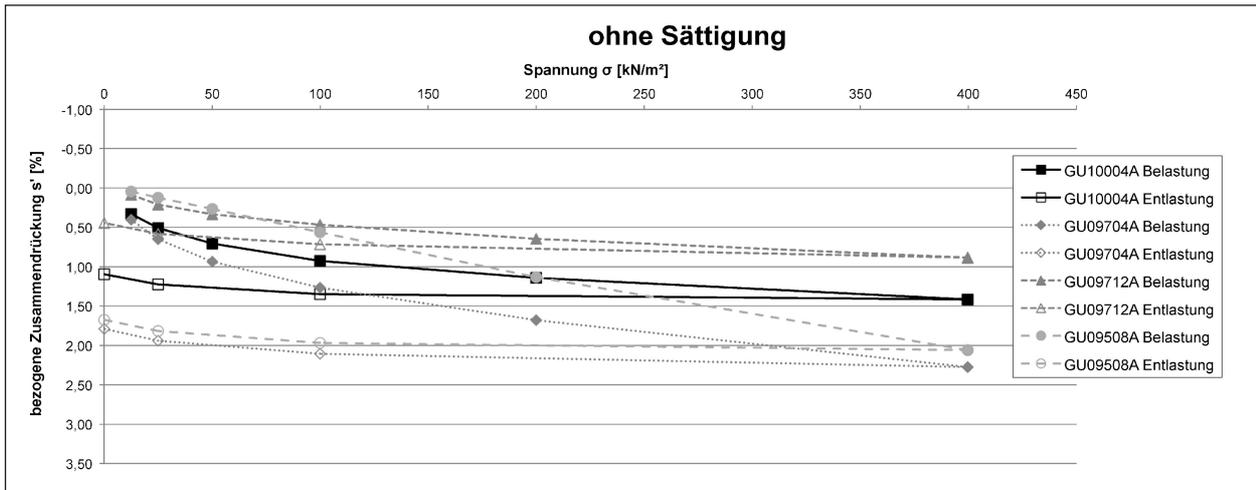


Bild 217: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche GU10004A, GU09704A, GU09712A und GU09508A (ohne Sättigung)

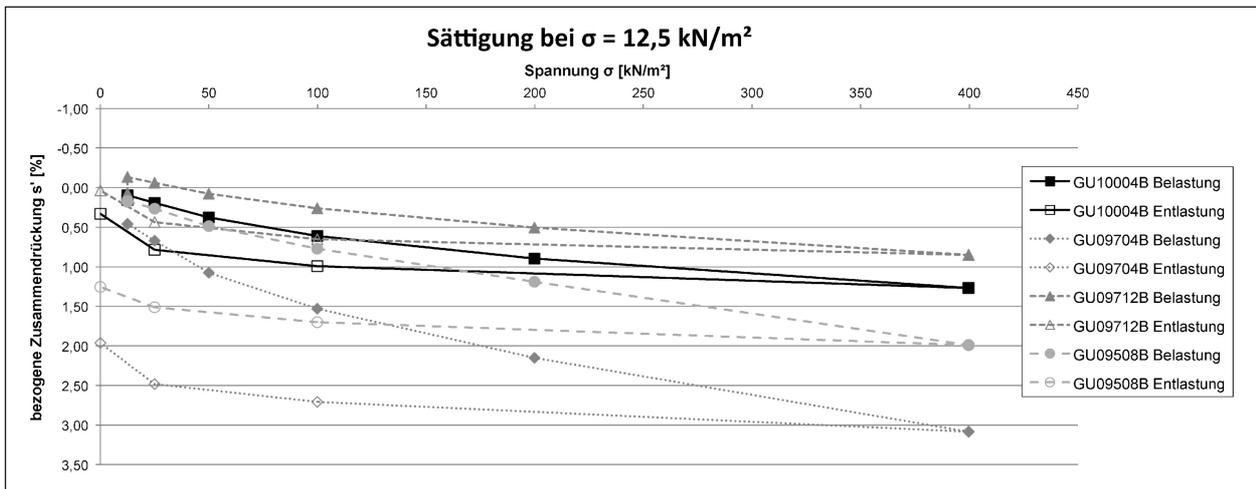


Bild 218: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche GU10004B, GU09704B, GU09712B und GU09508B (Sättigung bei einer mittleren Spannung von 12,5 kN/m²)

In Bild 217 bis Bild 219 werden die Versuche der verschiedenen Versuchsreihen hinsichtlich ihres Spannungs-Zusammendrückungsverhaltens miteinander verglichen, die nicht bzw. bei gleicher Laststufe gesättigt wurden.

Bei den Versuchen ohne Sättigung lag die bezogene Zusammendrückung der Proben bei der höchsten untersuchten Spannung zwischen $s' = 0,9$ % und 2,3 % (Bild 217). Die geringsten Verformungen wies die Probe GU09712A auf. Die größten Verformungen wurden an der Probe GU09704A gemessen.

Während der Versuche mit Proben, die bei einer Spannung von $\sigma = 12,5$ kN/m² gesättigt wurden, konnten bei einer maximalen Spannung von $\sigma = 400$ kN/m² bezogene Zusammendrückungen

zwischen $s' = 0,9$ % und 3,1 % festgestellt werden (Bild 218). Erneut wurden die größten bzw. kleinsten Verformungen an den Proben der Reihen GU09712 und GU09704 ermittelt.

Die Proben, die bei einer Spannung von $\sigma = 200$ kN/m² gesättigt wurden, wiesen bei der höchsten untersuchten Spannung bezogene Zusammendrückungen zwischen $s' = 1,1$ % und 2,5 % auf (Bild 219). Die geringsten Verformungen zeigte wiederum die Probe GU09712D, gefolgt von den Proben GU10004D und GU09508D. Die größten Verformungen wurden erneut an der Probe GU09704D gemessen.

Eindeutige Aussagen über den Einfluss des Luftporenanteils konnten anhand der Auswertung der Spannungs-Zusammendrückungskurven der

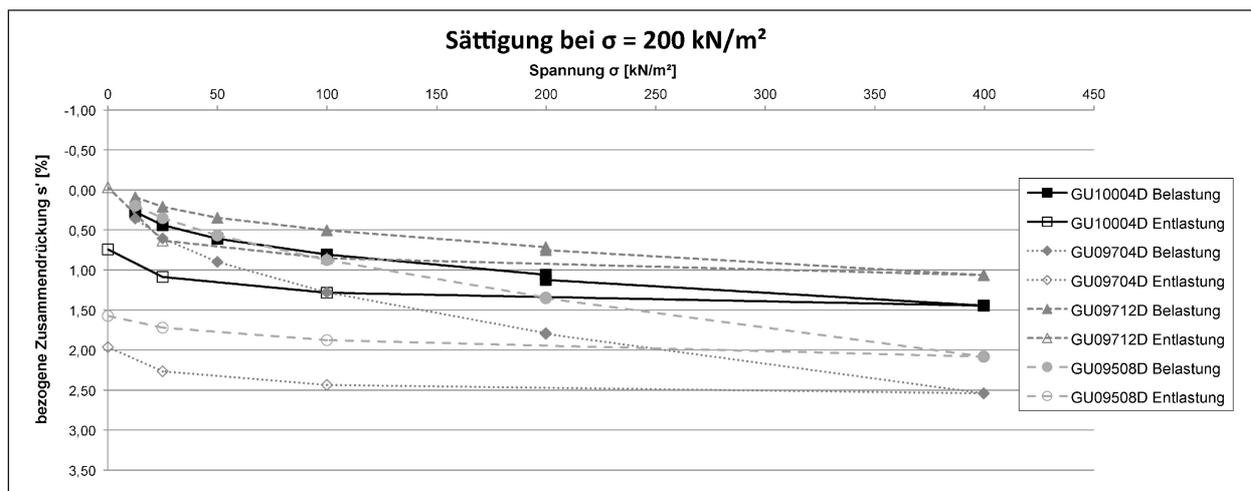


Bild 219: Spannungs-Zusammendrückungsdiagramm der Versuche GU10004D, GU09704D, GU09712D und GU09508D (Sättigung bei einer mittleren Spannung von 200 kN/m²)

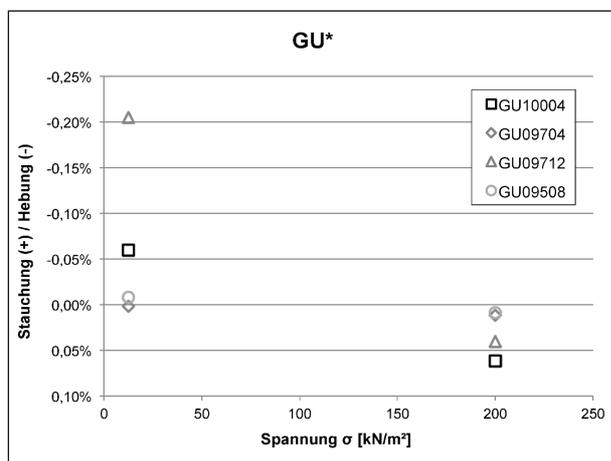


Bild 220: Auswertung der durch Wasserzugabe bei unterschiedlichen Spannungen verursachten Stauchungen und Hebungen

Versuche mit dem Boden GU* nicht getroffen werden. Die festgestellte Streuung der Ergebnisse ließ in dieser Hinsicht keine Interpretation der Ergebnisse zu. Bei den Ergebnissen der Versuche, die nach ZTV E-StB 09 zulässige Einbaubedingungen aufwiesen, konnten jedoch keine auffälligen Sackungs- oder Hebungerscheinungen und somit deutliche Änderungen hinsichtlich der bezogenen Zusammendrückung festgestellt werden.

In Bild 220 sind die allein durch die Wasserzugabe hervorgerufenen Änderungen der bezogenen Zusammendrückung gegen die jeweiligen Spannungen, bei denen die Sättigung erfolgte, aufgetragen. Für die Auswertung hinsichtlich Hebungen und Sackungen wurde jeweils die Differenz der bezogenen Zusammendrückung s' direkt vor und am Ende der Wasserzugabe nach 24 h gebildet.

Bei den Versuchen mit dem Versuchsboden GU* wurden bei einer Spannung von $\sigma = 12,5$ kN/m² bei den Versuchen GU09712B und GU10004B sehr geringe Hebungen bis maximal 0,2 % der Probehöhe beobachtet. Bei den Versuchen GU09704B und GU09508B wurden kaum Verformungen durch die Wasserzugabe festgestellt.

Während der Sättigung der Proben bei einer Spannung von $\sigma = 200$ kN/m² wurden geringfügige Sackungen an den Proben GU10004D und GU09712D beobachtet. Diese wurden um ca. 0,05 % ihrer Probehöhe gestaucht wurde. Die Proben GU09704D und GU09508D wiesen keine nennenswerten Sackungen bzw. Hebungen auf.

6.6 Taschenpenetrometerversuche

6.6.1 Versuchsdurchführung

Die Taschenpenetrometerversuche wurden im Zuge des Ausbaus der Proben aus den Oedometerzellen vorgenommen und vor Ausbau der Proben aus den Oedometerringen durchgeführt. Überwiegend bestand ein Versuch aus 5 Einzelversuchen. Für die Auswertung wurde ein Mittelwert der Einzelversuchsergebnisse gebildet.

6.6.2 Versuchsergebnisse

Die Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgte mittels eines Diagramms, dessen Eignung durch Erfahrungswerte, die im Rahmen zahlreicher Projekte gewonnen wurden, belegt ist. Es erlaubt eine Abschätzung der Scherfestigkeit mittel- und

ausgeprägt plastischer feinkörniger Böden anhand deren Konsistenzzahl sowie der Ergebnisse der Taschenpenetrometerversuche. Dementsprechend wurden die Versuche lediglich für die Versuchsböden TM und TA ausgewertet.

Mittelplastischer Ton (TM)

Die Taschenpenetrometermessungen an den Proben, die während der Oedometerversuche nicht gesättigt wurden, ergaben überwiegend Werte von > 4,5 und lagen somit oberhalb des Messbereichs des Taschenpenetrometers (TPM). Die Proben wiesen aufgrund der niedrigen Wassergehalte eine feste Konsistenz auf. Lediglich bei den Proben TM09704A und TM09708A, die eine steife Konsistenz aufwiesen, wurden durchschnittliche Werte unter 4,5 gemessen (Bild 222).

Für die während der Oedometerversuche gesättigten Proben der Versuchsreihen TM10004 und TM10008 ergaben sich bei den Taschenpene-

trometermessungen durchschnittliche Werte von etwa 2,4 bis 2,8. Bei einer steifen Konsistenz entsprechen diese Werte Scherfestigkeiten von ca. $c_u = 120 \text{ kN/m}^2$ bis 140 kN/m^2 (Bild 221).

Die Versuche an den gesättigten Proben der Versuchsreihen TM09704 und TM09708 wiesen bei den Taschenpenetrometerversuchen durchschnittliche Werte zwischen ca. 1,8 und 2,0 auf, die der Versuchsreihe TM09712 zwischen 1,4 und 1,6. Die Konsistenz wurde jeweils mit steif bestimmt. Entsprechend dem Diagramm können somit für die Reihen TM09704 und TM09708 Scherfestigkeiten von ca. $c_u = 90 \text{ kN/m}^2$ bis 100 kN/m^2 abgeschätzt werden, für die Reihe TM09712 von ca. $c_u = 75 \text{ kN/m}^2$ (Bild 222).

Für die während der Oedometerversuche gesättigten Proben ergaben sich bei den Taschenpenetrometermessungen durchschnittliche Werte von 1,3 bis 1,8 für die Versuchsreihe TM09508 und von etwa 1,1 bis 1,2 für die Versuchsreihe TM09512

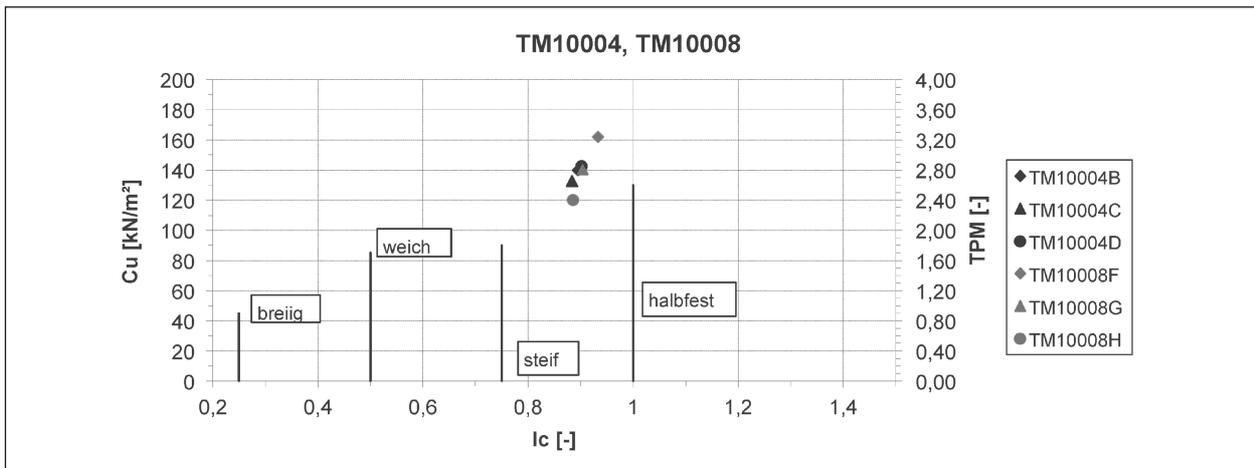


Bild 221: Ergebnisse der Taschenpenetrometerversuche an den Proben der Versuchsreihen TM10004 und TM10008

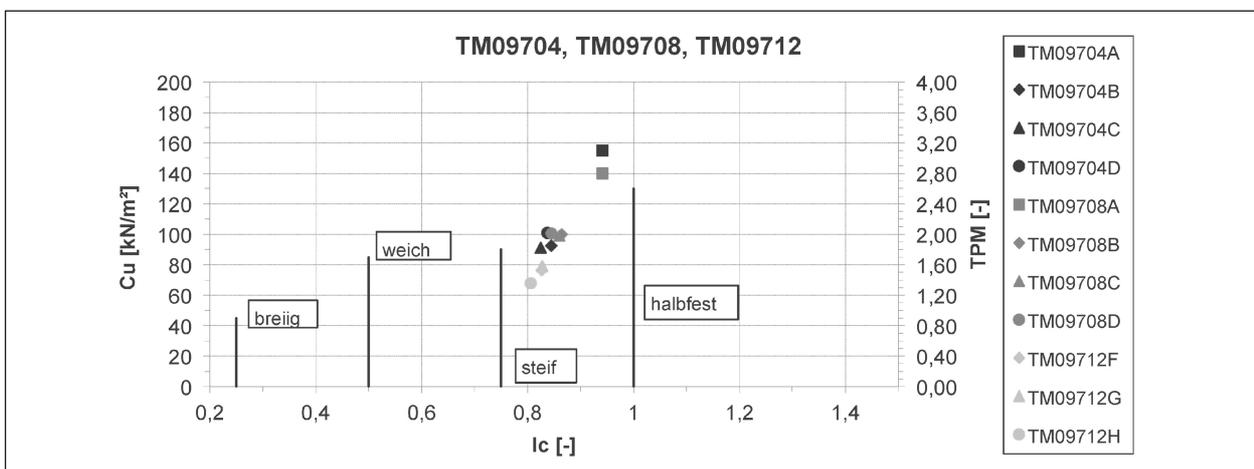


Bild 222: Ergebnisse der Taschenpenetrometerversuche an den Proben der Versuchsreihen TM09704, TM09708 und TM09712

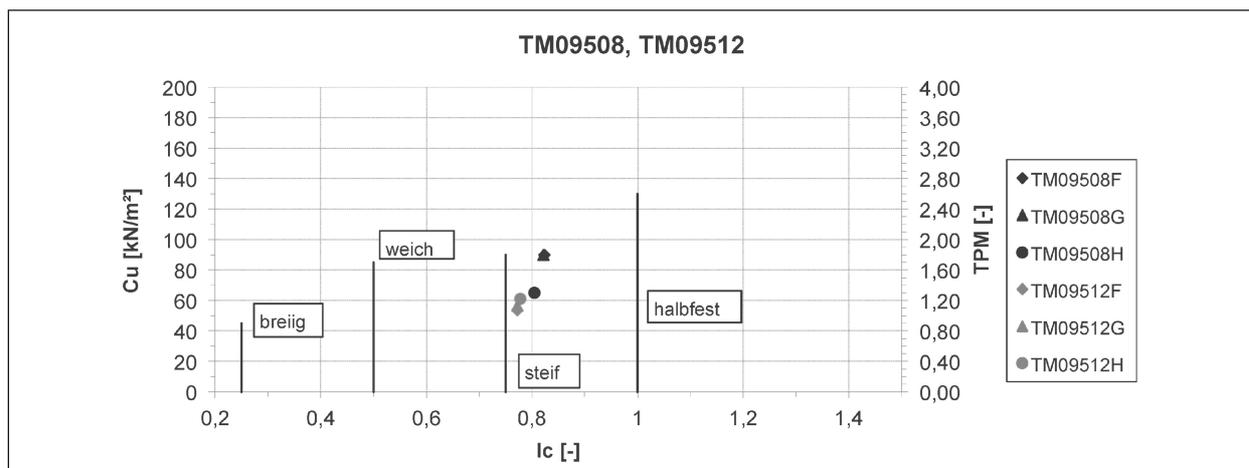


Bild 223: Ergebnisse der Taschenpenetrometerversuche an den Proben der Versuchsreihen TM09508 und TM09512

(Bild 223). Die Proben der Reihe TM09508 wiesen dabei steife, die der Reihe TM09512 weiche bis steife Konsistenz auf. Dadurch ergaben sich Scherfestigkeiten von ca. $c_u = 60 \text{ kN/m}^2$ bis 90 kN/m^2 (TM09508) bzw. von ca. 50 kN/m^2 bis 60 kN/m^2 (TM09512).

Die größten Scherfestigkeiten konnten bei den Versuchen mit dem mittelplastischen Ton an den Proben mit dem höchsten Verdichtungsgrad abgeschätzt werden. Für die Proben mit den höchsten Luftporengehalten von $n_a = 12 \%$ ergaben sich jedoch die niedrigsten Scherfestigkeiten, die entsprechend der vorliegenden Korrelation mit $c_u < 80 \text{ kN/m}^2$ angenommen wurden.

Ausgeprägt plastischer Ton (TA)

Die Taschenpenetrometermessungen an den Proben ohne Sättigung ergaben ausnahmslos Werte von $> 4,5$ und lagen somit oberhalb des Messbereichs des Taschenpenetrometers. Die Proben wiesen aufgrund der niedrigen Wassergehalte feste Konsistenz auf.

Für die während der Oedometerversuche gesättigten Proben der Versuchsreihen TA10004 und TA10008 ergaben sich bei den Taschenpenetrometermessungen durchschnittliche Werte von etwa $0,8$ bis $0,9$ (Bild 224). Bei einer weichen bis steifen Konsistenz entsprechen diese Werte Scherfestigkeiten von ca. $c_u = 40 \text{ kN/m}^2$.

Die Versuche an den gesättigten Proben der Versuchsreihen TA09704 und TA09712 wiesen bei den Taschenpenetrometerversuchen durchschnittliche Werte zwischen ca. $0,6$ und $0,8$ auf, die der Versuchsreihe TA09708 zwischen $0,9$ und $1,0$

(Bild 225). Die Konsistenz wurde überwiegend mit weich, teilweise mit weich bis steif bestimmt. Entsprechend dem Diagramm können somit für die Reihen TA09704 und TA09712 Scherfestigkeiten von ca. $c_u = 30 \text{ kN/m}^2$ bis 40 kN/m^2 abgeschätzt werden, für die Reihe TA09708 von ca. $c_u = 50 \text{ kN/m}^2$.

Für die während der Oedometerversuche gesättigten Proben ergaben sich bei den Taschenpenetrometermessungen durchschnittliche Werte von $0,6$ bis $0,8$ für die Versuchsreihen TA09608, TA09508 und TA09512 (Bild 226). Der höchste Wert wurde mit $0,9$ an der Probe TA09608H bestimmt. Die Proben der Reihen wiesen dabei weiche Konsistenz auf. Dadurch ergaben sich Scherfestigkeiten von ca. $c_u = 25 \text{ kN/m}^2$ bis 45 kN/m^2 .

Die Versuche an den Proben des ausgeprägt plastischen Tons weisen eine geringe Schwankungsbreite der Ergebnisse auf. Die von den Taschenpenetrometermessungen abgeleiteten Scherfestigkeiten liegen zwischen $c_u = 25 \text{ kN/m}^2$ und 50 kN/m^2 . Die höchsten Ergebnisse wurden dabei an den Proben der Reihe TA09708 bestimmt, gefolgt von den Reihen TA10004 und TA10008. Die niedrigsten Scherfestigkeiten ergaben sich an den Reihen TA09712, TA09508 und TA09512. Tendenziell ergaben sich somit die geringsten Scherfestigkeiten an den Proben mit niedrigen Einbautrockendichten und hohen Luftporengehalten bzw. eine Zunahme der undrännierten Scherfestigkeit mit zunehmender Trockendichte. Die festgestellten Scherfestigkeitsunterschiede fielen jedoch eher gering aus.

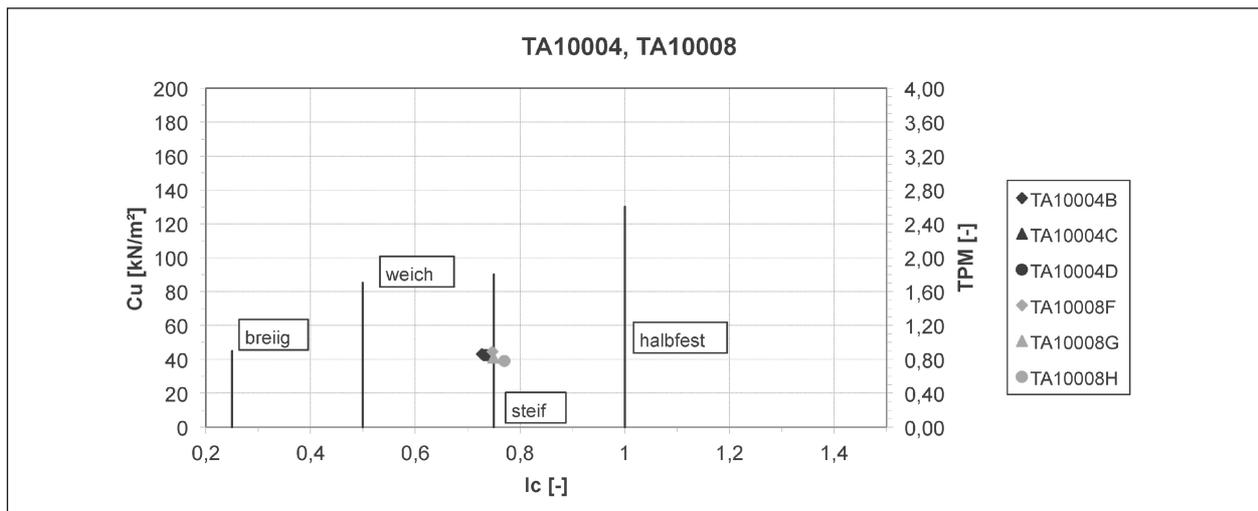


Bild 224: Ergebnisse der Taschenpenetrometerversuche an den Proben der Versuchsreihen TA10004 und TA10008

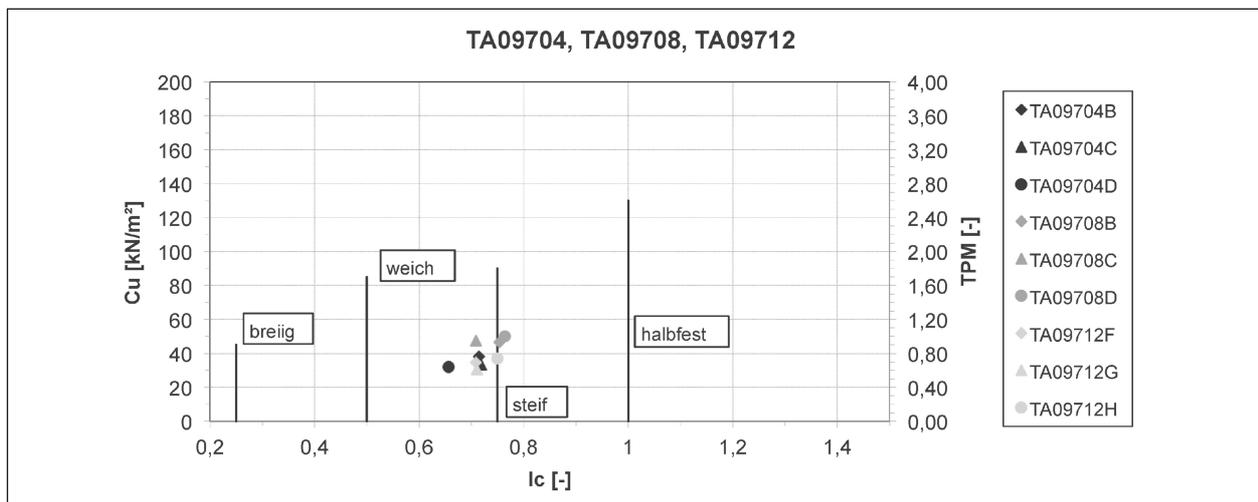


Bild 225: Ergebnisse der Taschenpenetrometerversuche an den Proben der Versuchsreihen TA09704, TA09708 und TA09712

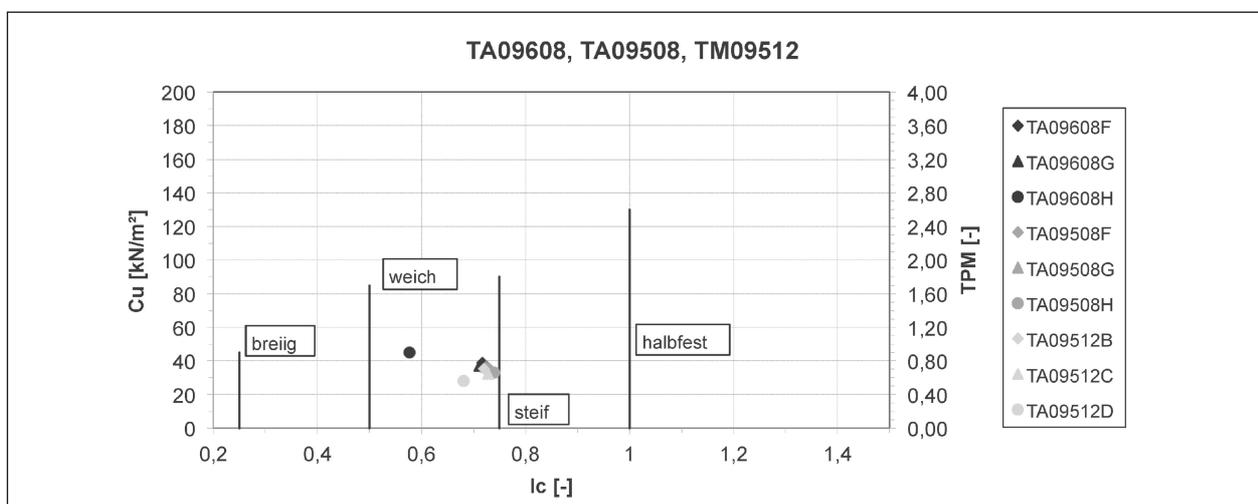


Bild 226: Ergebnisse der Taschenpenetrometerversuche an den Proben der Versuchsreihen TA09608, TA09508 und TA09512

6.7 Triaxialversuche

6.7.1 Versuchsprogramm

Die Durchführung der Triaxialversuche nach DIN 18137-2 erfolgte an den Versuchsböden TM und TA bei zwei unterschiedlichen Einbaubedingungen. Zum einen wurden die Böden jeweils bei einem Verdichtungsgrad von $D_{Pr} = 97\%$ und einem Luftporengehalt von $n_a = 12\%$ untersucht, zum anderen bei einem Verdichtungsgrad von $D_{Pr} = 100\%$ und einem Luftporengehalt von $n_a = 4\%$.

Die Proctordichten und Luftporengehalte wurden so gewählt, dass die Bandbreite der nach ZTV E-StB 09 zulässigen Einbaubedingungen mit zwei Proben bestmöglich abgedeckt werden konnten.

6.7.2 Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden an Proben mit einem Durchmesser von 3,6 cm und einer Höhe von 9 cm durchgeführt. Je Versuchsboden wurden die o. g. Einbaubedingungen untersucht. Je Einbaubedingung wurden zusätzlich abhängig von der Spannung während der isotropen Konsolidation zwei Fälle unterschieden:

- Fall a: $\sigma_3 = 25$ kPa und
- Fall b: $\sigma_3 = 100$ kPa.

An den Probekörpern wurde während der Konsolidation die axiale Verformung gemessen. Im Anschluss an die Konsolidation wurde ein Sättigungsdruck von jeweils 500 kPa aufgebracht und die Proben gesättigt. Für die Konsolidation ergaben sich dementsprechend folgende Spannungszustände:

- Fall a: $\sigma_3 = \sigma_1$, $\sigma_3 = 525$ kPa, $\sigma_3' = 25$ kPa und
- Fall b: $\sigma_3 = \sigma_1$, $\sigma_3 = 600$ kPa, $\sigma_3' = 100$ kPa.

Die Messung der Verformungen erfolgte analog zur Konsolidation. Die Sättigung der Proben wurde entsprechend dem Vorgehen nach DIN 18137-2 über den B-Wert überprüft.

Anschließend wurden die Spannungen bis zum gewünschten Niveau bei gleichzeitiger Konsolidation erhöht. Nach Erreichen der gewählten σ_3' -Spannung erfolgte das undrainierte Abscheren der Proben unter Messung des Porenwasserdrucks (cu-Versuch). Die Proben wurden unter folgenden σ_3' -Spannungen untersucht:

- Fall a: I. $\sigma_3' = \sigma_1' = 50$ kPa,
II. $\sigma_3' = \sigma_1' = 100$ kPa,
III. $\sigma_3' = \sigma_1' = 200$ kPa,
IV. $\sigma_3' = \sigma_1' = 300$ kPa,
- Fall b: I. $\sigma_3' = \sigma_1' = 100$ kPa,
II. $\sigma_3' = \sigma_1' = 200$ kPa und
III. $\sigma_3' = \sigma_1' = 300$ kPa.

6.7.3 Probenherstellung

Zur Herstellung der Proben wurde das Ausgangsmaterial in einem ersten Schritt gebrochen und mit einem 2 mm-Sieb gesiebt. Das Material wurde anschließend auf den gewünschten Wassergehalt gebracht. Die für den Einbau notwendige Probenmasse wurde aus dem Volumen und der vorgegebenen Trockendichte ermittelt.

Die Probekörper wurden anschließend mittels einer Presse in einem Zylinder statisch auf die gewünschten Abmessungen verdichtet.

6.7.4 Versuchsergebnisse

Mittelplastischer Ton (TM)

Die Triaxialversuche am Versuchsboden TM ergaben für die inneren Reibungswinkel des dränierten Bodens Werte zwischen $\varphi' = 30,0^\circ$ und $31,3^\circ$ bei einem Verdichtungsgrad von $D_{Pr} = 97\%$ und einem Luftporengehalt von $n_a = 12\%$. Die Werte bei einem Verdichtungsgrad von $D_{Pr} = 100\%$ und einem Luftporengehalt von $n_a = 4\%$ lagen zwischen $\varphi' = 26,1^\circ$ und $28,4^\circ$. Für die Kohäsion wurden Werte zwischen $c' = 3,5$ kN/m² und $5,8$ kN/m² (TM09712) bzw. $c' = 4,5$ kN/m² und $11,4$ kN/m² (TM10004) ermittelt.

Die im Vergleich zur Reihe TM09712 etwas geringeren Reibungswinkel sowie die tendenziell höhere Kohäsion bei den Versuchen TM10004 sind vermutlich auf die höheren Wassergehalte zurückzuführen.

In Bild 227 ist die undrainierte Scherfestigkeit c_u gegenüber der Konsolidationsspannung $\sigma_{a,c}'$ bei einer axialen Dehnung von $\varepsilon_a = 5\%$ aufgetragen. Zumeist liegen die Werte für die Versuche mit einer Sättigung bei einer effektiven Spannung von $\sigma_3' = 25$ kPa (TM09712A und TM10004A) unterhalb der Werte für die Versuche mit einer Sättigung bei einer effektiven Spannung von $\sigma_3' = 100$ kPa (TM09712B und TM10004B).

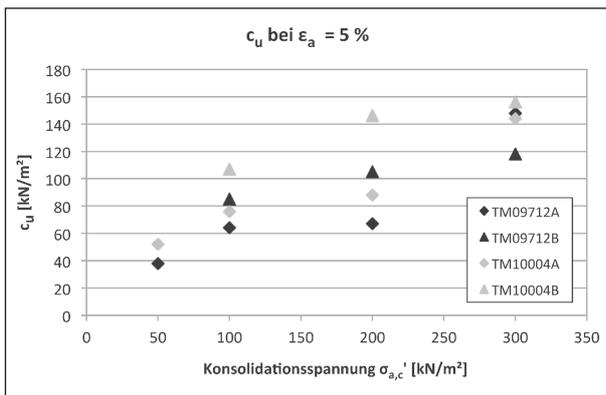


Bild 227: Undrainede Scherfestigkeit des Bodens TM bei einer axialen Dehnung von 5 %

Im Vergleich der beiden untersuchten Einbaubedingungen weisen die Versuche der Reihe TM10004 überwiegend die höheren undraineden Scherfestigkeiten auf. Lediglich für den Versuch mit einer frühen Sättigung und einer Konsolidationsspannung von 300 kPa liegt der Wert des Versuchs TM09712A geringfügig oberhalb des Wertes von TM10004A. Die Versuchsprotokolle sind in den Anlagen 6.1 bis 6.4 enthalten.

Ausgeprägt plastischer Ton (TA)

Die am Versuchsboden TA ermittelten Reibungswinkel lagen zwischen $\varphi' = 17,9^\circ$ und $21,3^\circ$. Eine tendenzielle Abhängigkeit der Reibungswinkel vom Verdichtungsgrad war hierbei nicht erkennbar. Die beiden Proben mit einem Verdichtungsgrad von $D_{Pr} = 100\%$ wiesen Reibungswinkel von $\varphi' = 20,1^\circ$ auf. Die an den Proben TA09712A und TA09712B festgestellten Reibungswinkel lagen mit $\varphi' = 21,3^\circ$ bzw. $17,9^\circ$ sowohl ober- als auch unterhalb dieser Ergebnisse. Die Kohäsion wurde mit Werten zwischen $c' = 2,7 \text{ kN/m}^2$ und $16,1 \text{ kN/m}^2$ bestimmt. Die Proben mit einem Verdichtungsgrad von $D_{Pr} = 100\%$ wiesen dabei mit $c' = 2,7 \text{ kN/m}^2$ die niedrigeren Werte für die Kohäsion gegenüber $10,5 \text{ kN/m}^2$ und $16,1 \text{ kN/m}^2$ bei den Proben mit $D_{Pr} = 97\%$ auf.

Die undrainede Scherfestigkeit c_u des Bodens TA bei einer axialen Dehnung von $\epsilon_a = 5\%$ ist in Bild 228 gegenüber der Konsolidationsspannung $\sigma_{a,c}'$ aufgetragen. Aufgrund der Streuung der Versuchsergebnisse lassen sich eindeutige Aussagen über den Einfluss des Zeitpunkts der Sättigung auf die Scherfestigkeit ebenso wenig feststellen wie Aussagen über den Einfluss von Verdichtungsgrad, Luftporenanteil und Wassergehalt auf die Scherfestigkeit.

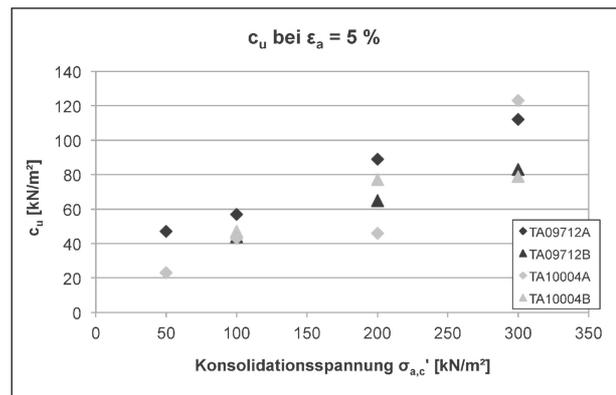


Bild 228: Undrainede Scherfestigkeit des Bodens TA bei einer axialen Dehnung von 5 %

Die Versuchsprotokolle sind in den Anlagen 6.5 bis 6.8 enthalten.

6.7.5 K_0 -Triaxialversuch

In einem K_0 -Triaxialversuch wurde das Verformungsverhalten des mittelplastischen Tons weitergehend untersucht. In einem derartigen Versuch wird je nach Versuchsdurchführung durch Anpassung von Zellentdruck oder axialer Spannung der Probendurchmesser konstant gehalten. Dementsprechend ähnelt der Versuch einem ein-dimensionalen Kompressionsversuch. Vorteilhaft gegenüber den Oedometerversuchen sind jedoch die fehlende Wandreibung sowie die größere Probenhöhe. Als Einbaubedingung wurden eine Trockendichte von 97 % der Proctordichte ($\rho_{d,Soll} = 1,757 \text{ g/cm}^3$) und ein Luftporenanteil von $n_{a,Soll} = 12\%$ gewählt. Diese Einbaubedingung liegt innerhalb des in den ZTV E-StB zugelassenen Bereichs und weist mit ihrem hohen Luftporenanteil tendenziell ein höheres Risiko für Sackungen auf. Die erreichte Trockendichte lag bei $\rho_{d,Ist} = 1,768 \text{ g/cm}^3$. Dies entspricht 97,6 % der Proctordichte. Der Luftporenanteil des Probekörpers lag bei $n_{a,Ist} = 12,4 \text{ Vol.-%}$.

Der Versuch wurde an einem Probekörper mit einer Höhe von $h = 6 \text{ cm}$ und einem Durchmesser von $d = 10 \text{ cm}$ durchgeführt. Die Probeabmessungen erforderten einen höheren messtechnischen Aufwand zur Dokumentation der Verformungen als die für die CU-Versuche verwendeten Proben. Neben der axialen Verformung wurden an den beiden Drittelpunkten der Probe mittels zweier Wegaufnahme zusätzlich die radialen Verformungen gemessen. Die Vorbereitung des Probenmaterials erfolgte analog zu den CU-Versuchen.

Der Probekörper wurde in einer Triaxialzelle eingebaut und stufenweise bei Spannungen von $\sigma_3 \approx 25$ kPa, 100 kPa und 200 kPa unter K_0 -Bedingungen belastet und konsolidiert. Horizontale Stauchungen der Probekörper wurden durch eine Erhöhung der axialen Spannung ausgeglichen. Horizontale Verformungen an der Zylinderoberseite und -unterseite waren möglich. Bei einer radialen Spannung von $\sigma_3 = 200$ kPa wurde die Probe von unten zunächst ohne Sättigungsdruck gesättigt. Später wurde ein Sättigungsdruck von ca. 25 kPa eingestellt. Nach Ende der Sättigung wurde die radiale Spannungen auf $\sigma_3 = 400$ kPa erhöht. Die Drainageleitungen waren während des gesamten Versuchs geöffnet.

Zu Beginn des Versuchs wurde eine isotrope Zunahme der Spannungen verzeichnet. Aufgrund von radialen Verformungen, die durch einen axialen Gegendruck ausgeglichen wurden, stieg die axiale Spannung gegenüber der radialen Verformung an. Bei den ersten beiden Laststufen betrug das Verhältnis zwischen totaler axialer Spannung und totaler radialer Spannung maximal etwa 2,5:1. Dementsprechend musste die axiale Spannung deutlich erhöht werden, um radiale Verformungen des Probekörpers auszugleichen. Nach der Sättigung und einer weiteren Erhöhung des Zellen-drucks auf 400 kPa konnte ein maximales Verhältnis zwischen totaler axialer und totaler radialer Spannung von etwa 2:1 beobachtet werden.

Durch die Sättigung des Bodens unter atmosphärischem Druck, später unter einem Sättigungsdruck von 25 kPa, konnte eine maximale Abnahme der axialen Dehnung um ca. 0,3 % von ca. 1,0 % auf ca. 0,7 % beobachtet werden (Bild 229). Bei den

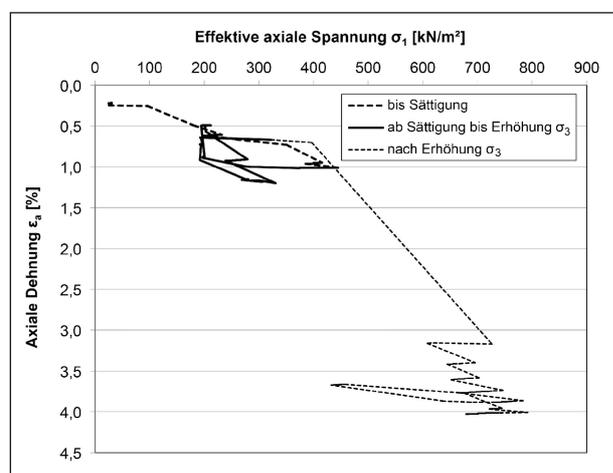


Bild 229: Verlauf der axialen Dehnung gegenüber der effektiven axialen Spannung σ_1

Oedometerversuchen waren Hebungen um max. 0,5 % der Ausgangsprobenhöhe bei einer Spannung von $\sigma = 200$ kPa festgestellt worden (Kapitel 6.4.8). Die beiden Werte liegen somit in einer vergleichbaren Größenordnung.

Die K_0 -Bedingung wurde während der Sättigung durch eine Reduktion der totalen axialen Spannung σ_1 bei gleichbleibender totaler radialer Spannung σ_3 erreicht, was einer Entlastung der Probe entspricht. Vor der Sättigung konnte dabei ein Spannungsverhältnis $K_0 = 0,52$ bestimmt werden. Entsprechend der Formel $K_0 = 1 - \sin \varphi'$ konnte somit ein Reibungswinkel von $\varphi' = 28,7^\circ$ für den Boden TM bei der gewählten Einbaubedingung ab-geschätzt werden. Dies korreliert gut mit den in den Triaxialversuchen festgestellten Werten von $\varphi' = 30,0^\circ$ bis $31,3^\circ$ (Kapitel 6.7.4).

6.8 Wasserdurchlässigkeitsversuche

6.8.1 Versuchsprogramm

Die für die Wasserdurchlässigkeitsversuche ausgewählten Materialien umfassen die Versuchsböden UL, TM, TA und SU*. Die Böden wurden unter den gleichen Einbaubedingungen wie im Oedometer untersucht (Tabelle 4).

6.8.2 Probenherstellung

Die Probekörper weisen einen Durchmesser von 10 cm und eine Höhe von 5 cm auf. Nach Einstellung des Wassergehalts und Festlegung der Probemenge wurden die Probekörper unter Berücksichtigung der zu erzielenden Dichte in einen Zylinder gepresst.

6.8.3 Versuchsdurchführung

Die Durchführung der Wasserdurchlässigkeitsversuche erfolgte in Triaxialzellen. Die Versuche wurden bei den Versuchsböden TM und TA mit veränderlichem Druckgefälle vorgenommen. Bei den Versuchsböden UL und SU* wurden die Versuche mit konstantem Druckgefälle und einer langsamen Erhöhung des Gradienten durchgeführt, um eine Erosion des Materials zu verhindern. Bei den Versuchen mit konstantem Druckgefälle wurde der Durchlässigkeitsbeiwert sowohl am Ein- als auch am Auslauf gemessen. Aus den beiden Werten wurde anschließend ein Mittelwert gebildet.

Die Proben wurden vor Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit ca. einen Tag lang gesättigt. Anschließend wurde der Versuch mit einem niedrigen Gradienten begonnen. Die Versuchsdauer betrug in etwa zwei Tage.

6.8.4 Versuchsergebnisse

Leicht plastischer Schluff (UL)

Die Versuche wurden mit konstantem Druckgefälle durchgeführt. Die im Versuch bestimmten Durchlässigkeitsbeiwerte lagen zwischen $k = 7,5 \cdot 10^{-8}$ m/s und $2,4 \cdot 10^{-7}$ m/s. Die Durchlässigkeitsbeiwerte für die einzelnen Einbaubedingungen sind in Tabelle 9 zusammengefasst.

Bei den ermittelten Durchlässigkeiten konnte festgestellt werden, dass die k-Werte der am wenigsten stark verdichteten Proben mit einer Proctordichte von $D_{Pr} = 95$ % geringfügig niedriger sind als die der stärker verdichteten Proben ($D_{Pr} = 97$ % bzw. 100 %). Dies kann auf eine gewisse Streuung der Versuchsergebnisse zurückgeführt werden. Insgesamt liegen vergleichsweise geringe Unterschiede zwischen den Versuchsergebnissen vor.

Mittelplastischer Ton (TM)

Die Wasserdurchlässigkeitsversuche am Versuchsboden TM wurden mit veränderlichem Druckgefälle durchgeführt. Die Durchlässigkeitsbeiwerte für die einzelnen Einbaubedingungen sind in Tabelle 10 zusammengefasst.

Die ermittelten Durchlässigkeiten wiesen Werte zwischen $k = 2,1 \cdot 10^{-10}$ m/s und $2,1 \cdot 10^{-8}$ m/s auf. Die geringsten Durchlässigkeitsbeiwerte wurden bei den Proben mit einem Verdichtungsgrad von $D_{Pr} = 97$ % und 100 % für die Einbaubedingungen mit den geringsten Luftporenanteilen ($n_a = 4$ Vol.-%) ermittelt. Diese lagen zwischen $k = 2,1 \cdot 10^{-10}$ m/s und $3,2 \cdot 10^{-10}$ m/s. Für die Proben, die mit gleicher Dichte, aber höheren Luftporenanteilen von $n_a \geq 8$ % verdichtet wurden, ergaben sich etwa um den Faktor 10 größere Durchlässigkeiten.

Ausgeprägt plastischer Ton (TA)

Die Versuche wurden mit veränderlichem Druckgefälle durchgeführt. Die im Versuch bestimmten Durchlässigkeitsbeiwerte lagen zwischen

Einbauzustand	k (Mittelwert)
$D_{Pr} = 100$ %, $n_a = 7$ Vol.-%	$1,8 \cdot 10^{-7}$ m/s
$D_{Pr} = 97$ %, $n_a = 4$ Vol.-%	$9,8 \cdot 10^{-8}$ m/s
$D_{Pr} = 97$ %, $n_a = 8$ Vol.-%	$2,2 \cdot 10^{-7}$ m/s
$D_{Pr} = 97$ %, $n_a = 12$ Vol.-%	$2,4 \cdot 10^{-7}$ m/s
$D_{Pr} = 95$ %, $n_a = 8$ Vol.-%	$7,9 \cdot 10^{-8}$ m/s
$D_{Pr} = 95$ %, $n_a = 12$ Vol.-%	$7,5 \cdot 10^{-8}$ m/s

Tab. 9: Ermittelte Durchlässigkeitsbeiwerte k des Versuchsbodens UL

Einbauzustand	k (Mittelwert)
$D_{Pr} = 100$ %, $n_a = 4$ Vol.-%	$2,1 \cdot 10^{-10}$ m/s
$D_{Pr} = 100$ %, $n_a = 8$ Vol.-%	$2,3 \cdot 10^{-9}$ m/s
$D_{Pr} = 97$ %, $n_a = 4$ Vol.-%	$3,2 \cdot 10^{-10}$ m/s
$D_{Pr} = 97$ %, $n_a = 8$ Vol.-%	$3,6 \cdot 10^{-9}$ m/s
$D_{Pr} = 97$ %, $n_a = 12$ Vol.-%	$2,1 \cdot 10^{-8}$ m/s
$D_{Pr} = 95$ %, $n_a = 8$ Vol.-%	$9,2 \cdot 10^{-9}$ m/s
$D_{Pr} = 95$ %, $n_a = 12$ Vol.-%	$4,8 \cdot 10^{-9}$ m/s

Tab. 10: Ermittelte Durchlässigkeitsbeiwerte k des Versuchsbodens TM

Einbauzustand	k (Mittelwert)
$D_{Pr} = 100$ %, $n_a = 4$ Vol.-%	$5,9 \cdot 10^{-11}$ m/s
$D_{Pr} = 100$ %, $n_a = 8$ Vol.-%	$5,5 \cdot 10^{-11}$ m/s
$D_{Pr} = 97$ %, $n_a = 4$ Vol.-%	$5,2 \cdot 10^{-11}$ m/s
$D_{Pr} = 97$ %, $n_a = 8$ Vol.-%	$5,2 \cdot 10^{-12}$ m/s
$D_{Pr} = 97$ %, $n_a = 12$ Vol.-%	$8,7 \cdot 10^{-11}$ m/s
$D_{Pr} = 95$ %, $n_a = 8$ Vol.-%	$8,4 \cdot 10^{-11}$ m/s
$D_{Pr} = 95$ %, $n_a = 12$ Vol.-%	$1,2 \cdot 10^{-10}$ m/s

Tab. 11: Ermittelte Durchlässigkeitsbeiwerte k des Versuchsbodens TA

$k = 5,2 \cdot 10^{-12}$ m/s und $1,2 \cdot 10^{-10}$ m/s. Die Durchlässigkeitsbeiwerte für die einzelnen Einbaubedingungen sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

Die größten Durchlässigkeitsbeiwerte konnten für die Proben mit geringem Verdichtungsgrad bzw. hohem Luftporengehalt festgestellt werden. Allerdings ist die Streubreite der ermittelten Ergebnisse gering und die gemessenen Durchlässigkeiten weisen alle sehr geringe Werte auf.

Einbauzustand	k (Mittelwert)
$D_{Pr} = 100 \%$, $n_a = 4 \text{ Vol.-%}$	$3,9 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$
$D_{Pr} = 100 \%$, $n_a = 8 \text{ Vol.-%}$	$2,2 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$
$D_{Pr} = 97 \%$, $n_a = 4 \text{ Vol.-%}$	$2,7 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$
$D_{Pr} = 97 \%$, $n_a = 8 \text{ Vol.-%}$	$1,0 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$
$D_{Pr} = 97 \%$, $n_a = 12 \text{ Vol.-%}$	$1,4 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$
$D_{Pr} = 95 \%$, $n_a = 8 \text{ Vol.-%}$	$2,2 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$
$D_{Pr} = 95 \%$, $n_a = 12 \text{ Vol.-%}$	$3,8 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$

Tab. 12: Ermittelte Durchlässigkeitsbeiwerte k des Versuchsbodens SU*

Stark schluffiger Sand (SU*)

Die Wasserdurchlässigkeitsversuche am Versuchsboden SU* wurden mit konstantem Druckgefälle und langsamer Steigerung des Gradienten durchgeführt. Die ermittelten Durchlässigkeiten wiesen Werte zwischen $k = 2,2 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$ und $3,8 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ auf. Die Durchlässigkeitsbeiwerte für die einzelnen Einbaubedingungen sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

Die niedrigsten Durchlässigkeitsbeiwerte wurden an Proben bestimmt, deren Einbaubedingungen einen hohen Verdichtungsgrad und/oder einen niedrigen Luftporengehalt aufwiesen. Die höchsten k-Werte wurden an den Proben mit einem Verdichtungsgrad von $D_{Pr} = 95 \%$ ermittelt.

6.8.5 Zusammenfassung der Ergebnisse der Wasserdurchlässigkeitsversuche

Die geringsten Wasserdurchlässigkeiten ergaben sich für den Boden TA, gefolgt vom Boden TM und den Böden UL und SU*, die beide ähnliche Durchlässigkeitsbeiwerte aufwiesen. Die mittleren Wasserdurchlässigkeiten lagen dabei für den Boden TA bei $k_{\text{mittel}} = 6,6 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$, für den Boden TM bei $k_{\text{mittel}} = 3,4 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$. Die Durchlässigkeiten der Versuchsböden UL und SU* wurden mit $k_{\text{mittel}} = 1,5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ und $k_{\text{mittel}} = 1,3 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ ermittelt.

Die Wasserdurchlässigkeitsversuche ergaben überwiegend die geringsten Durchlässigkeiten bei den Proben mit hohen Verdichtungsgraden bzw. niedrigen Luftporengehalten. Dies steht in Einklang mit den Ergebnissen von RÜCKERT (1999).

7 Felduntersuchungen

Im Rahmen von Feldversuchen an einem Probefeld wurde untersucht, wie sich der Verdichtungsgrad und der Luftporenanteil mit zunehmender Verdichtungsarbeit entwickeln und welche Verdichtung auf einer Baustelle erreicht werden kann.

7.1 Projektübersicht

Im Auftrag des Freistaates Bayern, vertreten durch die Autobahndirektion Nordbayern, wird der Abschnitt zwischen der Kauppenbrücke und der Autobahnausfahrt Rohrbrunn an der BAB A 3 zwischen Frankfurt und Nürnberg seit dem Frühjahr 2013 sechs- bzw. siebenspurig ausgebaut. Damit sind u. a. Brückenneubauten und umfangreiche Erdarbeiten verbunden.

Im Rahmen der Baumaßnahme werden im Bereich des Kauppenaufstiegs für die Gründung eines bis zu 30 m hohen Hangdammes Geländeabtreppungen in den anstehenden Ton- und Sandsteinen vorgenommen. Ende Oktober 2013 wurden mehrere Geotextilien für den Einbau im Hangdamm untersucht. Hierfür wurde ein Probefeld erstellt, in dem in zwei Lagen gebrochenes und gefrästes Tonsteinmaterial auf verschiedenen Geotextilien aufgebracht und anschließend verdichtet wurde. Dabei wurde die erzielte Verdichtungsleistung nach unterschiedlichen Anzahlen an Walzenübergängen ermittelt.

Die auf der Baustelle zu erzielende Trockendichte betrug 97 % der Proctordichte.

7.2 Geografische und geologische Übersicht

Die Baustelle befindet sich im Spessart und ist ca. 15 km ost-südöstlich von Aschaffenburg gelegen (Bild 230).

Aus geologischer Sicht kommt die Baustelle in Gesteinen des Unteren Buntsandsteins zu liegen (Bayerisches Geologisches Landesamt, 1972). Oberflächlich stehen überwiegend Gesteine der Salmünster- sowie der Gelnhausen-Folge an. Dabei handelt es sich um überwiegend rote, untergeordnet graue, zumeist fein- bis mittelkörnige Sandsteine. Im Liegenden folgen überwiegend rotbraune Schluff-, Feinsand- und Tonsteine des Oberen Bröckelschiefers.

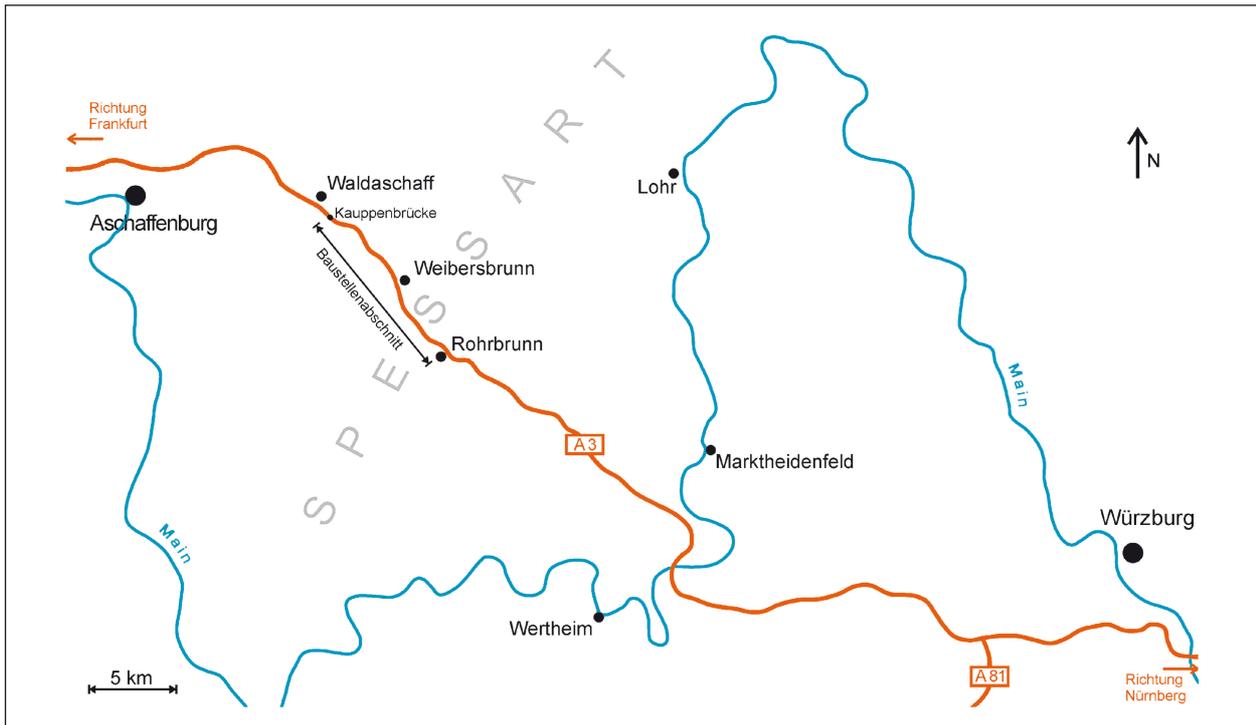


Bild 230: Lage der Baustelle an der A 3 zwischen Aschaffenburg und Würzburg

7.3 Vorausgehende Laboruntersuchungen

7.3.1 Untersuchungen am Zentrum Geotechnik der Technischen Universität München

Im Vorfeld zur Errichtung des Probefeldes wurden bei einem Ortstermin aus dem Bröckelschiefer Proben für klassifizierende Versuche sowie Proctorversuche entnommen und im Labor hinsichtlich ihrer bodenmechanischen Eigenschaften untersucht. Die Proben bestanden aus zerlegtem Tonstein mit dem Größtkorn im Grobkies-/Steinbereich. Dies entspricht in etwa der maximalen Korngröße, wie sie auf der Baustelle durch Aufbereitung vor der Verdichtung erzielt wird.

Klassifizierungsversuche

Die Untersuchungen am entnommenen Bröckelschiefer ergaben einen schwach sandigen, schwach schluffigen Kies mit einem Tongehalt von ca. 4 M.-% (Anlage 7.1) der Bodengruppe GU. Eine weitere Probe des Bodens wurde in einen Zylinder gefüllt und vier Stunden lang nass um die Längsachse gedreht, um eine höhere mechanische Belastung wie während des Löse- und Einbauvorgangs zu simulieren. Diese Probe wies einen Tonanteil von 8,5 M.-%, einen Schluffanteil von

17,8 M.-% sowie einen Sandanteil von 7,9 M.-% auf. Bei dieser Probe handelte es sich somit um einen stark schluffigen, tonigen, schwach sandigen Kies der Bodengruppe GU*. Der Ausgangswassergehalt des Materials betrug ca. 11,8 M.-%. Aus bodenmechanischer Sicht kann der Feinkornanteil des Materials einem mittelplastischen Ton (TM) zugeordnet werden (Anlage 7.2). Der Wassergehalt des Tons an der Ausrollgrenze beträgt $w_p = 19,2$ M.-%, an der Fließgrenze $w_L = 42,7$ M.-%. Daraus ergibt sich eine Plastizitätszahl von $I_p = 23,5$ %. Der Anteil organischer Bestandteile des Bodens wurde als Glühverlust V_{Gl} mit 3,0 M.-% bestimmt, der Kalkgehalt V_{Ca} mit ca. 0,06 M.-%. Bei der Dichtebestimmung mittels Tauchwägung ergab sich für den Tonstein eine Trockendichte von $\rho_d = 2,42$ g/cm³.

Proctorversuch nach DIN 18127

Der Boden weist ohne Überkorn eine Proctordichte von $\rho_{Pr} = 1,98$ g/cm³ bei einem optimalen Wassergehalt von $w_{Pr} = 12,8$ M.-% auf. Mit der rechnerischen Korrektur um den Überkornanteil ergab sich eine korrigierte Proctordichte von $\rho_{Pr}' = 1,99$ g/cm³ bei einem korrigierten optimalen Wassergehalt von $w_{Pr}' = 12,4$ M.-%. Die Korndichte liegt bei $\rho_s = 2,78$ g/cm³ (Anlage 7.3). Zudem wurden Untersuchungen mit einer Zugabe von 3 % Kalk

durchgeführt. Diese ergaben eine Proctordichte ohne Überkorn von $\rho_{Pr} = 1,91 \text{ g/cm}^3$ und einen optimalen Wassergehalt von $w_{Pr} = 14,1 \text{ M.-%}$. Unter Berücksichtigung des Überkornanteils ergab sich eine korrigierte Proctordichte von $\rho_{Pr}' = 1,92 \text{ g/cm}^3$ bei einem korrigierten optimalen Wassergehalt von $w_{Pr}' = 13,7 \text{ M.-%}$.

7.3.2 Laboruntersuchungen der örtlichen Bauüberwachung

Zum Vergleich mit den Untersuchungen am Zentrum Geotechnik der TU München standen Laborergebnisse der örtlichen Bauüberwachung zur Verfügung. Die Untersuchungen umfassten Proctorversuche, wobei dem Tonsteinmaterial 3 % einer Zement-Kalk-Mischung zugegeben waren. Die Zement-Kalk-Mischung bestand zu 90 % aus Zement und zu 10 % aus Kalk.

Aus den zur Verfügung stehenden Daten konnten Mittelwerte für die korrigierte Proctordichte und den korrigierten optimalen Wassergehalt ermittelt werden. Diese lagen bei $\rho_{Pr}' = 1,88 \text{ g/cm}^3$ bei einem korrigierten optimalen Wassergehalt von $w_{Pr}' = 15,6 \text{ M.-%}$.

Verglichen mit den Werten des Zentrum Geotechnik weist die korrigierte Proctordichte einen etwas geringeren und der korrigierte optimale Wassergehalt einen etwas höheren Wert auf. Dabei ist jedoch zu beachten, dass den Versuchsböden unterschiedliche Materialien zugegeben worden waren. Auffällig waren die deutlichen Unterschiede in der gemessenen Korndichte. Diese wurde vom Zentrum Geotechnik mit $\rho_s = 2,78 \text{ g/cm}^3$ bestimmt, während sie bei den Untersuchungen der örtlichen Bauüberwachung lediglich bei $\rho_s = 2,72 \text{ g/cm}^3$ lag.

7.4 Untersuchungen am Probefeld

7.4.1 Probefeldherstellung

Das Probefeld wies eine Länge von ca. 25 m und eine Breite von ca. 10 m auf. Auf einem vorbereiteten Planum wurden zunächst vier verschiedene Geogitter ausgelegt und Tonsteinmaterial aufgebracht. Bei dem Tonsteinmaterial handelte es sich um gebrochenen, gefrästen Bröckelschiefer, der mit 3 % einer Zement-Kalk-Mischung verbessert worden war. Durch den Löse- und den Fräsvorgang war der Bröckelschiefer soweit zerlegt worden, dass das Größtkorn augenscheinlich im Bereich

von Grobkies lag. Die groben Bestandteile befanden sich wiederum in einer Matrix aus feinkörnigem Ton- und Schluffmaterial. Anschließend wurde die erste/untere Lage Tonsteinmaterial in vier Übergängen mit einer Schaffußwalze und in zwei abschließenden Übergängen mit einer Glattmantelwalze verdichtet (Bild 231). Die Dicke der verdichteten Lage betrug ca. 0,25 m. Nach jedem zweiten Übergang wurden Feucht- und Trockendichte sowie der Wassergehalt des Bodens mittels einer Isotopsonde untersucht.

Nach Fertigstellung der unteren Lage wurde erneut Tonsteinmaterial aufgebracht (Bild 232) und wiederum mittels vier Übergängen mit der Schaffußwalze und zwei Übergängen mit der Glattmantelwalze verdichtet. Die Dicke des verdichteten Materials der oberen Lage betrug erneut ca. 0,25 m. In einem Streifen auf einer Seite des Probefeldes wurden anschließend sechs weitere Übergänge mit der Schaffußwalze vorgenommen, um eine weitere Verdichtung des Bodens zu untersuchen. Erneut wurden nach jedem zweiten Übergang Messungen mit der Isotopsonde vorgenommen.



Bild 231: Verdichtung der ersten Lage



Bild 232: Aufbringen der zweiten Lage



Bild 233: Schafffußwalze Bomag BW 226



Bild 234: Glattmantelwalze Hamm 3414

Bei der Schafffußwalze handelte es sich um eine Bomag BW 226 mit einem Gewicht von ca. 26 t (Bild 233), bei der Glattmantelwalze um eine Hamm 3414 (Bild 234) mit einem Gewicht von ca. 14 t.

7.4.2 Untersuchungen mit der Isotopsonde

Grundlagen

Mittels Gamma- und Neutronenstrahlen können Feuchtdichte und Wassergehalt eines Bodens bestimmt werden (BEHR, 1972). Die von einer Strahlenquelle ausgesandte Gammastrahlung wird auf dem Weg zum Detektor vom Boden geschwächt und gestreut. Die am Detektor ankommende Strahlenmenge hängt dabei von der Dichte des Bodens sowie der Weglänge und dem Energiespektrum der Strahlung ab. Bei bekannter Weglänge und bekanntem Energiespektrum kann somit die Dichte des Bodens bestimmt werden.

Die Neutronenstrahlung kann zur Bestimmung des Wassergehalts herangezogen werden. Die Neu-

tronen treten beim Durchgang durch den Boden in Wechselwirkung mit den Atomkernen. Ihr Energieverlust hängt dabei vom Massenunterschied zwischen Kern und Neutron ab. Je geringer dieser Unterschied, umso mehr Energie gibt das Neutron ab. Da Wasserstoff das einzige Element mit einer in etwa ausgeglichenen Masse von Kern und Neutron ist, werden die Neutronen fast ausschließlich vom Wasserstoffgehalt im Boden beeinflusst. Durch eine Kalibrierung kann aus dem Wasserstoffgehalt auf den Wassergehalt eines Bodens geschlossen werden. Die Kombination aus Gamma- und Neutronenstrahlung ermöglicht des Weiteren neben der Bestimmung der Feuchtdichte und des Wassergehalts auch die Ermittlung der Trockendichte.

Untersuchungen am Probefeld

Nach jeweils zwei Walzenübergängen wurden mit der Isotopsonde Feucht-, Trockendichte und Wassergehalt an jeweils zwei Punkten des Probefelds in Tiefen von 5 cm, 15 cm und 30 cm bestimmt. Im Bereich der ersten Lage konnte die Strahlenquelle teilweise nur 25 cm tief in den Boden eingebracht werden.

Um eine genaue Messung mit der Isotopsonde zu gewährleisten, die eine glatte Oberfläche voraussetzt, wurden nach den Übergängen mit der Schafffußwalze die Oberflächen im zu messenden Bereich zunächst von Hand mittels einer Schaufel, später mit einer Baggerschaufel geglättet.

7.4.3 Untersuchungsergebnisse

Die Auswertung der Feldversuche erfolgte anhand der eigenen Messungen mit der Isotopsonde sowie der gemittelten Laborergebnisse der örtlichen Bauüberwachung. Aufgrund der unterschiedlichen Bindemittelzugabe (Kalk-Zement-Mischung auf der Baustelle gegenüber Kalk am Zentrum Geotechnik) wurden die eigenen Laboruntersuchungen nicht für die Auswertung herangezogen.

In Bild 235 bis Bild 238 sind die erreichten Trockendichten gegenüber den Walzenübergängen dargestellt.

Die am Punkt A bestimmten Trockendichten der unteren Lage wiesen mit zunehmenden Walzenübergängen höhere Trockendichten auf (Bild 235). Nach sechs Übergängen lagen die Trockendichten in allen Tiefenlagen bei ca. $\rho_d = 1,97 \text{ g/cm}^3$. Die

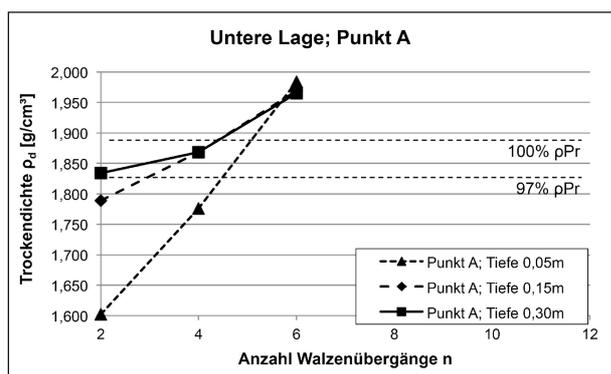


Bild 235: Entwicklung der Trockendichte mit zunehmenden Walzenübergängen am Punkt A im Bereich der unteren Lage

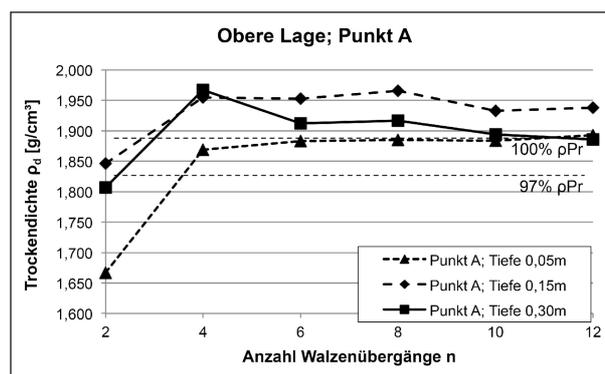


Bild 237: Entwicklung der Trockendichte mit zunehmenden Walzenübergängen am Punkt A im Bereich der oberen Lage

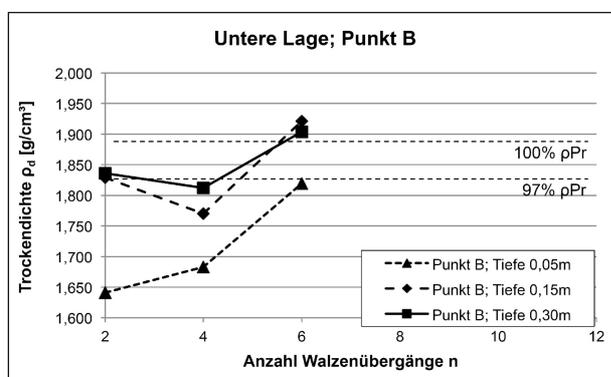


Bild 236: Entwicklung der Trockendichte mit zunehmenden Walzenübergängen am Punkt B im Bereich der unteren Lage

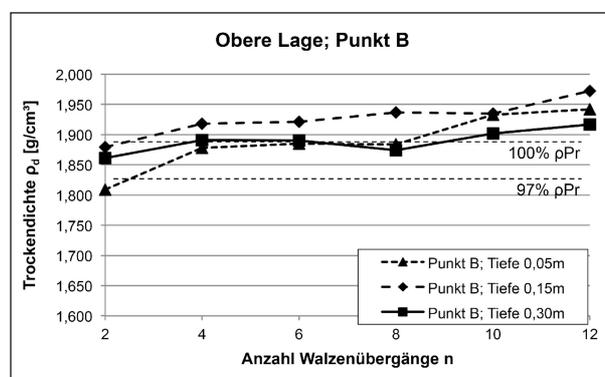


Bild 238: Entwicklung der Trockendichte mit zunehmenden Walzenübergängen am Punkt B im Bereich der oberen Lage

deutlichste Zunahme zeigte sich in einer Tiefe von 0,05 m von $\rho_d = 1,60 \text{ g/cm}^3$ auf $\rho_d = 1,98 \text{ g/cm}^3$.

Die Ergebnisse der Messungen am Punkt B wiesen ebenfalls eine Zunahme der Trockendichten nach sechs Übergängen auf, jedoch lagen die Trockendichten in Tiefen von 0,15 m und 0,25 m nach vier Übergängen unterhalb derer nach zwei Übergängen (Bild 236). Die nach sechs Übergängen erreichten Trockendichten lagen bei ca. $\rho_d = 1,91 \text{ g/cm}^3$ (Tiefe 0,15 m und 0,25 m) bzw. $\rho_d = 1,82 \text{ g/cm}^3$ (Tiefe 0,05 m) und wiesen somit deutlich niedrigere Werte auf als an Punkt A.

In Bild 237 sind die Trockendichten am Punkt A im Bereich der oberen Lage dargestellt. Zu Beginn ist eine deutliche Zunahme der Trockendichten von $\rho_d = 1,67 \text{ g/cm}^3$ bis $1,85 \text{ g/cm}^3$ auf $\rho_d = 1,87 \text{ g/cm}^3$ bis $1,97 \text{ g/cm}^3$ erkennbar. Im Anschluss ist jedoch lediglich ein geringer Zuwachs (Tiefe 0,05 m) bzw. sogar eine Abnahme (Tiefe 0,30 m) der Trockendichten ersichtlich.

Im Punkt B zeigt sich eine überwiegend kontinuierliche Zunahme der Trockendichten mit zunehmenden

den Walzenübergängen von Werten zwischen $\rho_d = 1,81 \text{ g/cm}^3$ und $1,88 \text{ g/cm}^3$ auf Werte zwischen $\rho_d = 1,92 \text{ g/cm}^3$ und $1,97 \text{ g/cm}^3$ (Bild 238). Teilweise ist eine geringfügige Abnahme der Trockendichten nach zwei zusätzlichen Walzenübergängen erkennbar.

Aus den Messergebnissen der Isotopensonde ist erkennbar, dass mit einer Erhöhung der Walzenüberfahrten und somit einer Erhöhung der Verdichtungsarbeit nur bis zu einem bestimmten Punkt eine Erhöhung der Trockendichten erreicht werden kann. Teilweise konnte sogar eine erneute Auflockerung des Bodengefüges beobachtet werden. Die auf der Baustelle geforderte Trockendichte von $\rho_d = 97 \% \rho_{Pr}$ wurde mit Ausnahme des Punktes B der unteren Lage in einer Tiefe von 0,05 m stets nach spätestens 6 Walzenübergängen erreicht, wobei eine gewisse Auflockerung der obersten Bodenschicht durch die Überfahrt nicht ausgeschlossen werden kann. In den tieferen Bereichen (0,15 m und 0,30 m) wurde die Anforderung an die Trockendichte zumeist bereits nach 4 Walzenübergängen erfüllt.

Aus Bild 239 ist ersichtlich, dass am Punkt A (untere Lage) der Luftporenanteil mit zunehmenden Walzenübergängen deutlich abnimmt. Nach zwei Übergängen liegen die ermittelten Luftporenanteile zwischen $n_a = 14,1$ Vol.-% und 22,8 Vol.-%, nach sechs Übergängen nur noch bei ca. $n_a = 6,8$ Vol.-%.

Ein ähnlicher Verlauf zeigt sich auch in Bild 240. Am deutlichsten ist hierbei die Reduzierung des Luftporenanteils der unteren Lage am Punkt B in einer Tiefe von 0,05 m von $n_a = 21,5$ Vol.-% nach zwei Übergängen auf 11,5 Vol.-% nach sechs Übergängen. Bei den restlichen Tiefen (0,15 m und 0,25 m) zeigt sich zunächst nur eine geringfügige Abnahme des Luftporenanteils durch die Walzenübergänge 3 und 4 ($n_a = 14,1$ Vol.-% bzw. 14,3 Vol.-% auf 13,9 Vol.-% bzw. 14,0 Vol.-%). Die letzten beiden Übergänge bewirken hingegen eine deutlichere Verminderung auf $n_a = 8,4$ Vol.-% und 9,2 Vol.-%.

Am Punkt A konnte an der oberen Lage zunächst eine deutliche Abnahme der Luftporenanteile fest-

gestellt werden (Bild 241). Nach vier Übergängen fiel die Reduktion in einer Tiefe von 0,05 m merklich kleiner aus, in einer Tiefe von 0,15 m konnte nur eine geringe Veränderung von $n_a = 7,0$ Vol.-% auf 6,9 Vol.-% festgestellt werden. In 0,25 m Tiefe wurde sogar eine Zunahme der Luftporenanteile von $n_a = 6,2$ Vol.-% auf 8,7 Vol.-% ermittelt. Im Anschluss veränderten sich die Luftporengehalte nur noch geringfügig.

Am Punkt B konnte im Bereich der oberen Lage zumeist eine geringfügige Verringerung des Luftporenanteils nach jeweils zwei Walzenübergängen festgestellt werden (Bild 242). Nach acht Übergängen wurde jedoch eine Erhöhung der Luftporenanteile gegenüber den beiden vorhergegangenen Messungen registriert. Insgesamt nahmen die Luftporengehalte aber deutlich ab von Werten zwischen $n_a = 12,1$ Vol.-% bis 14,5 Vol.-% auf $n_a = 5,2$ Vol.-% bis 6,9 Vol.-%.

Eindeutige Ergebnisse hinsichtlich der Entwicklung des Luftporenanteils konnten aus den Messungen am Probefeld nicht gewonnen werden. Im Punkt B

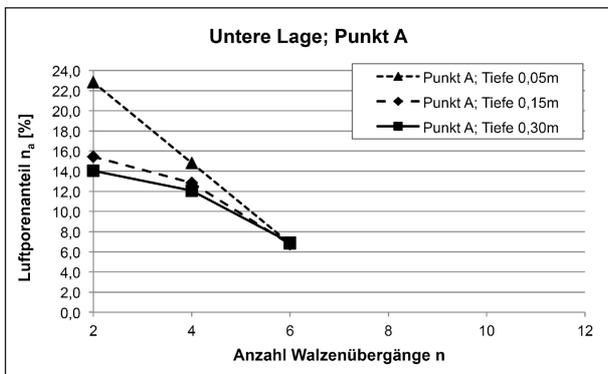


Bild 239: Entwicklung des Luftporenanteils mit zunehmenden Walzenübergängen am Punkt A im Bereich der unteren Lage

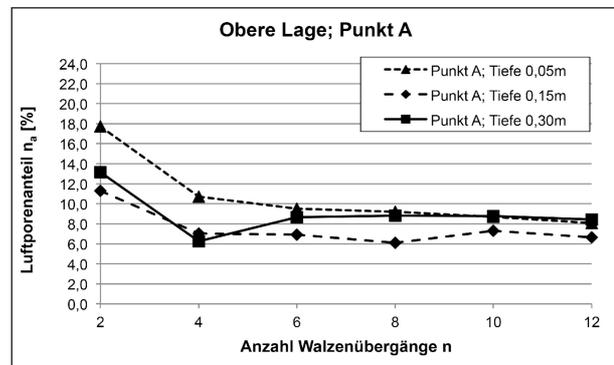


Bild 241: Entwicklung des Luftporenanteils mit zunehmenden Walzenübergängen am Punkt A im Bereich der oberen Lage

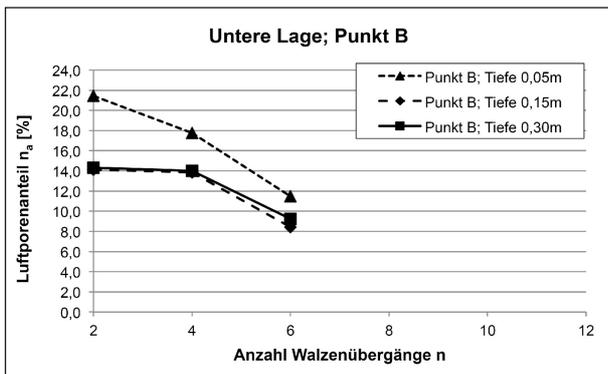


Bild 240: Entwicklung des Luftporenanteils mit zunehmenden Walzenübergängen am Punkt B im Bereich der unteren Lage

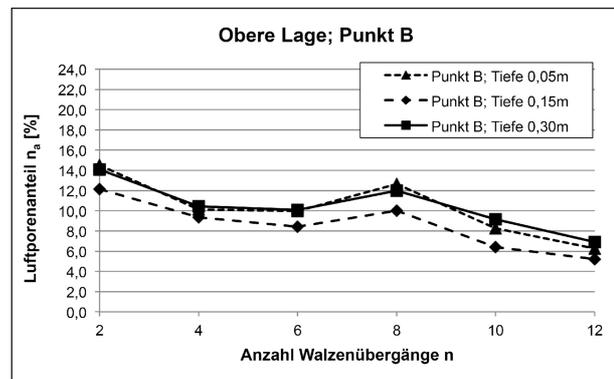


Bild 242: Entwicklung des Luftporenanteils mit zunehmenden Walzenübergängen am Punkt B im Bereich der oberen Lage

konnte eine überwiegend konstante Abnahme der Luftporenanteile mit einer zunehmenden Anzahl an Walzenübergängen festgestellt werden, im Punkt A wurde hingegen bereits nach vier Übergängen ein annähernd minimaler Luftporenanteil erreicht, der mit zunehmender Anzahl an Walzenübergängen keine größeren Veränderungen mehr aufwies.

Der im Rahmen des Bauvorhabens geforderte Verdichtungsgrad von $D_{Pr} = 97\%$ wurden bei allen Versuchen mit Ausnahme des Punktes B in der unteren Lage und einer Tiefe von 0,05 m nach spätestens sechs Walzenübergängen erreicht. Die Luftporengehalte lagen bei maximal 11,5 Vol.-%.

8 Ergebnisse von Erdbauarbeiten

Von der Autobahndirektion Nordbayern wurden freundlicherweise Daten von bisherigen Verdichtungsprüfungen von Erdbauarbeiten auf der bereits in Kapitel 7 genannten Baustelle bei Rohrbrunn zur Verfügung gestellt. Diese konnten hinsichtlich der erreichten Verdichtungsgrade und Luftporenanteile ausgewertet werden. Der Umfang an Datensätzen war jedoch leider sehr begrenzt.

Die erreichten Verdichtungsgrade und Luftporenanteile sind in Bild 243 dargestellt. Der geforderte Verdichtungsgrad von $D_{Pr} = 97\%$ wurde bei allen Prüfungen erreicht, teilweise sogar mit bis zu 102,3 % deutlich überschritten. Die erzielten Luftporengehalte bewegten sich im Bereich zwischen $n_a = 3\text{ Vol.-%}$ und 7 Vol.-% . Die Anforderungen an den Luftporenanteil von $n_{a,max} = 8\text{ Vol.-%}$ wurden dementsprechend ebenfalls eingehalten.

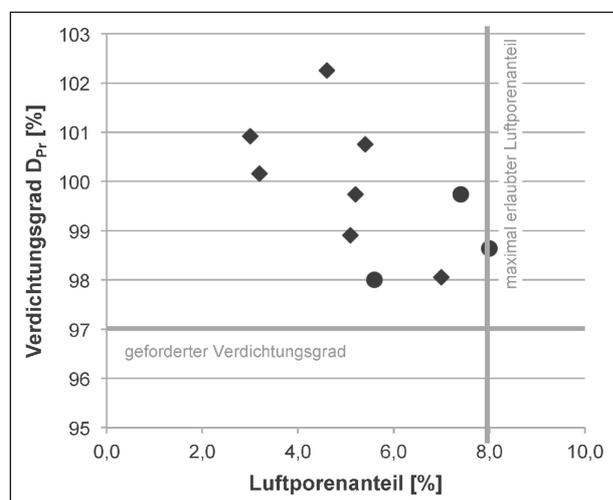


Bild 243: Erreichte Verdichtungsgrade und Luftporenanteile

Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, dass mit den in einem Probefeld festgelegten sechs Walzenübergängen und passend eingestelltem Wassergehalt die Anforderungen an die Verdichtungseigenschaften (Verdichtungsgrad, Luftporenanteil) auf der Baustelle erreicht werden konnten.

9 Bewertung der Labor- und Felduntersuchungen im Hinblick auf die Verdichtungsanforderungen nach ZTV E-StB

Bei den durchgeführten Oedometerversuchen zeigten sich teilweise deutliche Sackungserscheinungen. Diese traten jedoch ausschließlich bei Proben auf, deren Einbaubedingungen deutlich von denen in den ZTV E-StB 09 genannten abwichen. Diese Proben wiesen entsprechend hohe Luftporenanteile und/oder niedrige Verdichtungsgrade auf. Jene Proben hingegen, die entsprechend den Anforderungen in den ZTV E-StB 09 eingebaut worden waren, zeigten kaum Sackungen.

Insbesondere beim Versuchsboden TA wurden teilweise deutliche Hebungen festgestellt, die mit steigendem Luftporenanteil und steigendem Verdichtungsgrad zunahmten. Die Hebungsbeträge sind zudem abhängig von der Auflast. Insbesondere bei geringen Auflasten wurden z. T. deutliche Hebungen festgestellt. Ähnliche Erscheinungen sind jedoch aus der Praxis eher unbekannt.

Aus den Ergebnissen der in den Oedometerversuchen gemessenen Verformungen kann keine Notwendigkeit abgeleitet werden, die in den ZTV E-StB 09 enthaltenen Anforderungen an den Luftporenanteil zu erhöhen. Selbst bei den nach ZTV E-StB nicht mehr erlaubten Einbaubedingungen mit einem Verdichtungsgrad von $D_{Pr} = 95\%$ konnten bei Luftporengehalten $n_a \leq 12\text{ Vol.-%}$ zumeist keine auffälligen Verformungen festgestellt werden. Für die in den ZTV E-StB 09 enthaltenen Anforderungen spricht jedoch beispielsweise, dass beim Boden UL die Sackungen bei den Proben mit hohen Luftporenanteilen tendenziell am größten waren und beim Boden TM die Proben mit den höchsten Verdichtungsgraden die geringsten bezogenen Zusammendrückungen aufwiesen.

Aus den Ergebnissen der Wasserdurchlässigkeitsversuche lässt sich ableiten, dass überwiegend

die Versuche mit hohen Verdichtungsgraden und niedrigen Luftporenanteilen die geringsten Durchlässigkeiten aufwiesen. Dies spricht in Kombination mit den Ergebnissen der Oedometerversuche für Anforderungen an einen eher höheren Verdichtungsgrad und einen eher niedrigen Luftporenanteil. Bei den Oedometerversuchen hatte sich nämlich gezeigt, dass die Proben, die nicht oder erst bei höheren Spannungen gesättigt worden waren, überwiegend höhere Steifemoduln aufwiesen als die Proben mit einer Sättigung bei geringeren Spannungen. Dementsprechend kann ein Erreichen einer möglichst hohen Sättigung eines Erdbauwerks durch eine entsprechende Verdichtung als sinnvoll erachtet werden.

Aus den Ergebnissen der Feldversuche ist ersichtlich, dass mit den auf der Baustelle vorhandenen Verdichtungsgeräten die Anforderungen nach ZTV E-StB 09 erfüllt werden konnten, eine Steigerung des Verdichtungsgrades und eine Reduktion des Luftporenanteils aber nur bis zu einem gewissen Grad möglich ist. Aufgrund des beschränkten Umfangs der Felduntersuchungen sollten vor einer Bewertung der im Feld erzielbaren Luftporenanteile und einer möglichen Anpassung der Anforderungen hierzu noch weitere Untersuchungen vorgenommen werden.

10 Kosten-Nutzen-Analyse

Im Rahmen der Feldversuche wurde untersucht, wie sich die Erhöhung der Verdichtungsarbeit, in diesem Fall eine Erhöhung der Walzenübergänge, auf die Entwicklung der Verdichtungsgrade und der Luftporenanteile auswirkte. Dabei konnte gezeigt werden, dass der Verdichtungsgrad nur sehr schwer mit den vorhandenen Verdichtungsgeräten weiter erhöht werden konnte, wenn ein bestimmter Verdichtungsgrad erreicht war. Dieser lag bei den vorgetroffenen Bedingungen auf der Baustelle bei ca. $D_{Pr} = 102\%$ bis 103% . Teilweise wurde bei einer Erhöhung der Übergänge sogar eine erneute Auflockerung des Bodens und somit eine Verringerung der erzielten Trockendichte beobachtet. Es kann somit festgestellt werden, dass unter den vorgefundenen Bedingungen eine Erhöhung des Verdichtungsaufwandes, der mit einem erhöhten Zeit- und Materialaufwand und somit mit höheren Kosten verbunden war, keine verbesserten Verdichtungsergebnisse bewirkte.

Eine allgemeingültige Aussage kann aufgrund des geringen Umfangs der durchgeführten Feldversuche jedoch nicht getroffen werden, zumal im Rahmen der Feldversuche lediglich ein Boden untersucht werden konnte und die Auswirkung einer Wasserzugabe nicht untersucht werden konnten. Es werden hierfür weiterreichende Untersuchungen für sinnvoll erachtet (Kapitel 11).

Die Ergebnisse der Oedometerversuche an den feinkörnigen Böden und an den gemischtkörnigen Böden mit einem Feinkornanteil über 15 M.-% ergaben nur sehr geringe Sackungen, wenn die Einbaubedingungen nach den ZTV E-StB eingehalten wurden. Anhand der Laborergebnisse ergibt sich somit tendenziell kein Bedarf an zusätzlicher Verdichtungsarbeit. Voraussetzung hierbei ist jedoch, dass die Einbaubedingungen des jeweiligen Bodens eingehalten werden, was im Labor einfacher sicherzustellen ist als auf der Baustelle. Bei den Laborversuchen zeigte sich dabei nämlich durchaus, dass Unterschiede in den Wassergehalten abhängig von der Bodenart einen deutlichen Einfluss auf die erzielbare Verdichtung haben können. Deshalb sollte anhand der Laborergebnisse nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden, dass eine Erhöhung der Verdichtungsarbeit – gerade auch bei schwierig zu verdichtenden Bodenarten oder schwierigen Witterungsverhältnissen – eine positive Auswirkung auf die Gebrauchstauglichkeit und die dauerhafte Tragfähigkeit von Erdbauwerken hat und somit höhere Kosten für den höheren Verdichtungsaufwand gerechtfertigt sind.

11 Weiterer Forschungsbedarf

Im Rahmen der Kosten-Nutzen-Analyse wurden die Verdichtungsergebnisse der Feldversuche unter dem Gesichtspunkt betrachtet, wie sich die erzielten Verdichtungsgrade mit einer Erhöhung des Verdichtungsaufwandes entwickelten. Aus den Ergebnissen konnte jedoch aufgrund des beschränkten Umfangs an Feldversuchen keine allgemeingültige Aussage getroffen werden. Eine systematische Untersuchung der erzielbaren Verdichtung unter Praxisbedingungen wird deshalb als sinnvoll erachtet. Hieraus könnten genauere Aussagen abgeleitet werden, wie und mit welchem Aufwand die Verdichtung im Feld erhöht werden könnte.

Zudem konnte im Rahmen der Feldversuche lediglich ein Boden untersucht werden. Für eine

allgemeine Betrachtung der o. g. Problemstellung wären jedoch Untersuchungen an verschiedenen feinkörnigen Böden und gemischtkörnigen Böden mit einem Feinkornanteil über 15 M.-% sinnvoll. Dementsprechend sollten hieran weitere Untersuchungen anschließen.

Des Weiteren wird als sinnvoll erachtet, in Feldversuchen vergleichende Untersuchungen zu den Laborversuchen durchzuführen, was im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit aufgrund des Mangels an passenden Baustellen leider nicht möglich war. Hierdurch kann womöglich gezeigt werden, inwieweit die unter Laborbedingungen erzielten Versuchsergebnisse auch in der Praxis bestätigt werden können und ob sich aufgrund evtl. abweichender Ergebnisse eine Notwendigkeit für die Erhöhung des Verdichtungsaufwandes im Feld ergibt.

Für die Klärung vorgenannter Fragen kann ggf. auch eine Begleitung und systematische Auswertung von Probefeldern im Zusammenhang mit anstehenden Baumaßnahmen geeignet sein.

12 Zusammenfassung

Gegenstand der Arbeit waren Untersuchungen zur Überprüfung des Luftporenanteils als Verdichtungsanforderung bei feinkörnigen Böden und bindigen Mischböden. Das bodenmechanische Verhalten dieser Böden wird maßgeblich von ihrem Feinkornanteil bestimmt. Ziel der Arbeit war es herauszufinden, ob höhere Ansprüche an den Luftporenanteil zu weniger Verformungen an Erdbauwerken führen oder ob die bisher in den Regelwerken enthaltenen Anforderungen als ausreichend erachtet werden können.

Der Luftporenanteil als Verdichtungsanforderung ist wenig verbreitet. Lediglich in Deutschland und Großbritannien wird er als Anforderung genannt. Je nach Bodenart kann der Grenzwert dabei zwischen $n_a = 5$ Vol.-% und 12 Vol.-% liegen. Wesentlich weiter verbreitet als Verdichtungskriterium ist hingegen der Verdichtungsgrad D_{Pr} . Die Verformungsmoduln E_{V1} , E_{V2} , deren Verhältnis E_{V2}/E_{V1} und der Verformungsmodul m_E werden in mehreren Ländern als Verdichtungsanforderung herangezogen.

Die Schwierigkeiten bei der Kontrolle der Verdichtungsanforderungen auf Basis des Luftporenanteils

werden von MOKWA & FRIDLEIFSSON (2007) diskutiert. Als Vorteile des Luftporenanteils als Verdichtungsanforderung werden v. a. die Einfachheit und die schnelle Durchführbarkeit der Kontrolle mittels radiometrischen Sonden genannt. Die Methode ist jedoch für bestimmte Bodenarten, u. a. gleichkörnige, grobkörnige Böden, nicht bzw. für andere Böden, etwa stark plastische Tone, nur bedingt geeignet. Als Grund wird von den Autoren v. a. die Möglichkeit genannt, den Luftporenanteil durch eine Erhöhung des Wassergehalts herabzusetzen.

Fünf Böden, die das Spektrum der o. g. Bodenarten abdecken, wurden für Laboruntersuchungen ausgewählt. Dabei handelte es sich bei diesen Böden gemäß DIN 18196 um einen leicht plastischen Schluff (UL), einen mittelplastischen Ton (TM) und einen ausgeprägt plastischen Ton (TA) sowie einen stark schluffigen Sand (SU*) und einen stark schluffigen Kies (GU*). Die Böden wurden zunächst grundlegend klassifiziert und ihre bodenmechanischen Eigenschaften sowie ihr Verhalten bei Verdichtung beschrieben.

Das Spannungs-Zusammendrückungsverhalten der ausgewählten Böden wurde in 128 Oedometer- und 12 Großoedometerversuchen nach DIN 18135 untersucht. Dabei wurden je Boden zwischen vier und acht verschiedene Einbaubedingungen betrachtet, die sich in Einbautrockendichte und Luftporenanteil unterschieden. Die Auswahl der Einbaubedingungen erfolgte anhand der Vorgaben der aktuellen ZTV E-StB 09 und ihrer Vorgängerversion. Jede Einbaubedingung wurde des Weiteren ohne Sättigung der Proben sowie mit Sättigung bei verschiedenen Spannungen untersucht. In den Oedometerversuchen wurden so je Boden und Einbaubedingung jeweils vier Einzelversuche, in den Großoedometerversuchen jeweils drei Einzelversuche durchgeführt, die sich hinsichtlich der Sättigung bzw. des Zeitpunkts der Sättigung unterschieden.

Bei der Auswertung der Oedometerversuche konnten Tendenzen wie höhere Steifigkeiten an Proben mit hohen Einbautrockendichten und niedrigen Luftporengehalten festgestellt werden. Durchgehend eindeutige Aussagen zum Einfluss der Trockendichte und des Luftporenanteils auf die Probensteifigkeit und das Verformungsverhalten der Böden sind jedoch nur schwer zu treffen. Beispielsweise wurden beim Versuchsboden TM die deutlichsten Hebungen bei den Einbau-

bedingungen TM10004 und TM09512 ermittelt, die restlichen Einbaubedingungen wiesen überwiegend deutlich geringere Werte auf. Teilweise konnten tendenziell die geringsten bezogenen Zusammendrücken an den Proben mit den höchsten Einbautrockendichten festgestellt werden (Versuchsboden TM) oder die deutlichsten Volumenzunahmen durch Sättigung an Proben mit hohen Einbautrockendichten und hohen Luftporenanteilen (Versuchsboden TA).

Eindeutigere Ergebnisse ergaben sich beim Vergleich der Steifigkeiten in Bezug auf den Zeitpunkt der Sättigung. Hier wiesen unabhängig von Luftporenanteil und Trockendichte zumeist die Versuche ohne Sättigung und mit einer späten Sättigung höhere Werte auf als die Versuche, bei denen der Boden bereits bei geringen oder mittleren Spannungen gesättigt worden war.

Bei den nach den ZTV E-StB 09 zulässigen Einbaubedingungen wurden größtenteils nur geringe Hebungen und Sackungen festgestellt. Die deutlichsten Hebungen zeigte der Boden TA. Die Hebungsbeträge wiesen dabei eine deutliche Abhängigkeit von der vorherrschenden Spannung auf. So wurden die größten Hebungen bei geringen Auflasten gemessen. An den Proben des Versuchsbodens TA, die Einbaubedingungen mit hohen Trockendichten und niedrigen Luftporenanteilen aufwiesen, wurden dabei die größten Hebungen festgestellt. Beim Versuchsboden SU* hingegen zeigten die Böden mit den höchsten Luftporenanteilen die deutlichsten Sackungen.

Die Relevanz der Forschungsarbeit wurde mit den Versuchen, bei denen der Boden mit deutlich zu geringen Trockendichten ($D_{Pr} = 83\%$ und 86%) eingebaut worden war, verdeutlicht. Diese zeigten bei mittleren und insbesondere hohen Spannungen deutliche Sackungen von bis zu 8% der ursprünglichen Probenhöhe.

Die Ergebnisse der Triaxialversuche nach DIN 18137-2 am Boden TM ergaben eine Abhängigkeit von Reibungswinkel und Kohäsion vom Wassergehalt. Der Reibungswinkel nahm mit abnehmendem Wassergehalt zu. Die Kohäsion wies mit höherem Wassergehalt hingegen höhere Werte auf. Die Ergebnisse des Versuchsbodens TA bestätigten diese Ergebnisse nicht. Hier war keine Systematik hinsichtlich des Einflusses des Wassergehalts auf Reibungswinkel und Kohäsion zu erkennen. Allerdings ergaben sich aufgrund der

Streuung der Versuchsergebnisse bei den Versuchen mit einem Verdichtungsgrad von $D_{Pr} = 100\%$ und einem Luftporenanteil von $n_a = 4\%$ deutliche Schwierigkeiten bei der Versuchsauswertung.

Bei den Wasserdurchlässigkeitsversuchen nach DIN 18130-1 an den Versuchsböden UL, TM, TA und SU* wurden die Ergebnisse der Literaturrecherche überwiegend bestätigt. Größtenteils wiesen die Versuche mit hohen Verdichtungsgraden und niedrigen Luftporenanteilen die geringsten Durchlässigkeitsbeiwerte auf, wobei die Streuungen der Werte aufgrund der eher kleinen Unterschiede in den Einbaubedingungen gering ausfielen.

Im Rahmen eines Probefeldes konnte im Feld die Auswirkung der Verdichtung auf die Entwicklung des Luftporenanteils an einem gefrästen Tonsteinmaterial untersucht werden. Dabei zeigte sich, dass mit den auf der Baustelle zur Verfügung stehenden Verdichtungsgeräten nicht unbedingt eine Verringerung der Luftporenanteile erreicht werden konnte, indem die Verdichtungsenergie durch eine Erhöhung der Walzenübergänge gesteigert wurde. An einem der zwei Untersuchungspunkte konnte eine annähernd lineare Abnahme der Luftporenanteile mit den Walzenübergängen erreicht werden, am zweiten Untersuchungspunkt stellte sich hingegen nach bereits vier Walzenübergängen eine Verdichtung ein, die mit weiteren Überfahrten kaum mehr gesteigert werden konnte bzw. sogar leicht zurückging. Gleichermaßen gilt dies für die Trockendichte, die mit zunehmenden Walzenübergängen kaum mehr gesteigert werden konnte oder die teilweise sogar wieder abnahm.

Die vorliegenden Ergebnisse der Verdichtungsprüfungen der Baustelle, auf der auch die Feldversuche vorgenommen worden waren, wurden hinsichtlich der erreichten Verdichtungsgrade und Luftporenanteile ausgewertet. Mit der vorgeschriebenen Anzahl an sechs Walzenübergängen konnten dabei die Verdichtungsanforderungen ($D_{Pr} = 97\%$, $n_a = 8\text{ Vol.-%}$) erfüllt werden. Allerdings standen für die Auswertung nur sehr wenige Datensätze zur Verfügung.

13 Literatur

- ALLEN, H. (1942): Classification of soils and control procedures used in construction of embankments. *Public Roads Journal of Highway Research* 22 (12), S. 263-282, N. N.
- Bayerisches Geologisches Landesamt (1972): Geologische Karte von Bayern 1:25.000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6022 Rothenbauch. 102 S., Eigenverlag, München
- BEHR, N. (1972): Radiometrische Verfahren für Dichte- und Feuchtemessungen. In: *Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau [Hrsg.] (1972), Vorträge der Baugrundtagung 1972 in Stuttgart*, S. 529-547, Essen
- BRUNNACKER, K. (1962): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25.000 Blatt Nr. 7536 Freising Nord. 84 S., Bayerisches Geologisches Landesamt, München
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (1982): Ingenieurgeologisches Gutachten zu Projekt Kriebertunnel der Deutschen Bundesbahn. 115 S., unveröffentlichtes Gutachten, Hannover
- DB Netz AG (2008): Richtlinie 836. 494 S., Eigenverlag, Frankfurt am Main
- Department for Transport Highways Agency (1998): *Manual of Contract Documents for Highway Works – Volume 1: Specification for Highway Works*
- Deutsches Institut für Normung (1997): DIN 18122-1 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen) – Teil 1: Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze. 7 S., Beuth Verlag, Berlin
- Deutsches Institut für Normung (1998): DIN 18121-1 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Wassergehalt – Teil 1: Bestimmung durch Ofentrocknung. 4 S., Beuth Verlag, Berlin
- Deutsches Institut für Normung (1998): DIN 18130 – Teil 1 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts – Teil 1: Laborversuche. 20 S., Beuth Verlag, Berlin
- Deutsches Institut für Normung (2002): DIN 18128 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung des Glühverlustes. 6 S., Beuth Verlag, Berlin
- Deutsches Institut für Normung (2010): DIN 18125-1 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Dichte des Bodens – Teil 1: Laborversuche. 12 S., Beuth Verlag, Berlin
- Deutsches Institut für Normung (2011): DIN 18123 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Korngrößenverteilung. 24 S., Beuth Verlag, Berlin
- Deutsches Institut für Normung (2011): DIN 18125-2 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Dichte des Bodens – Teil 2: Feldversuche. 26 S., Beuth Verlag, Berlin
- Deutsches Institut für Normung (2011): DIN 18137 – Teil 2 Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte – Bestimmung der Scherfestigkeit – Triaxialversuch. 48 S., Beuth Verlag, Berlin
- Deutsches Institut für Normung (2011): DIN 18196 Erd- und Grundbau – Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke. 13 S., Beuth Verlag, Berlin
- Deutsches Institut für Normung (2012): DIN 18121-2 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Wassergehalt – Teil 2: Bestimmung durch Schnellverfahren. 16 S., Beuth Verlag, Berlin
- Deutsches Institut für Normung (2012): DIN 18127 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Proctorversuch. 32 S., Beuth Verlag, Berlin
- Deutsches Institut für Normung (2012): DIN 18134 Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte – Plattendruckversuch. 24 S., Beuth Verlag, Berlin
- Deutsches Institut für Normung (2012): DIN 18135 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Eindimensionaler Kompressionsversuch. 38 S., Beuth Verlag, Berlin
- FERBER, V.; AURIOL, J.-C.; CUI, Y.-J.; MAGNAN, J.-P. (2008): Wetting-induced volume changes in compacted silty clays and high-plasticity clays. *Canadian Geotechnical Journal* 45 (2008), S. 252-265, Ottawa
- FERBER, V.; AURIOL, J.-C.; CUI, Y.-J.; MAGNAN, J.-P. (2009): On the swelling potential of compacted high plasticity clays. *Engineering Geology* 104 (2009), S. 200-210, Amsterdam

- FLOSS, R. (1997): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau, ZTVE-StB 94, Fassung 1997, Kommentar mit Kompendium Erd- und Felsbau. 543 S., Kirschbaum Verlag, Bonn
- FLOSS, R. (2001): Verdichtungstechnik im Erdbau und Verkehrswegebau Band 1. 149 S., Eigenverlag BOMAG GmbH, Boppard
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe „Erd- und Grundbau“ (2009): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau – ZTV E-StB 09. 108 S., FGSV Verlag (Köln)
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe „Erd- und Grundbau“ (2012): TP BF-StB – Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau – Teil B 8.3. FGSV Verlag (Köln)
- Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen: Bedeutendste Geotope – Das größte Loch Europas – der Tagebau Hambach. http://www.gd.nrw.de/w_schn2k.htm, abgerufen am 15.06.2011
- Hamm AG (2008): Compaction – Verdichtung im Asphalt- und Erdbau. 141 S., Eigenverlag, Tirschenreuth
- JERZ, H. (1987): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25.000 Blatt Nr. 7934 Starnberg Nord. 128 S., Bayerisches Geologisches Landesamt, München
- KUDLA, W.; HÖBELBARTH, Y. (2006): Verdichtungsanforderungen bei Erdarbeiten im Straßenbau. In: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung [Hrsg.] (2006), Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik 930 (2006), 155 S., Bonn
- LANG, H.-J.; HUDER, J.; AMANN, P.; PUZRIN, A. M. (2011): Bodenmechanik und Grundbau. 336 S., Springer Verlag, Heidelberg
- MOKWA, R. L.; FRIDLEIFSSON, S. (2007): Earthwork compaction evaluation using soil air voids. Canadian Geotechnical Journal 44 (2007), S. 151-159, Ottawa
- PROCTOR, R. R. (1933): New Principles Applied to Actual Dam-Building. Engineering News-Record, 111 (9) (1933), S. 372-376, New York
- RÜCKERT, H. (1999): Betrachtung zur Qualitätssicherung im Erdbau. Geotechnik 22 (1) (1999), S. 23-30, Essen
- SOOS, P. v. (2008): Eigenschaften von Boden und Fels – ihre Ermittlung im Labor. In: WITT, K. J. [Hrsg.]: Grundbau-Taschenbuch – Teil 1: Geotechnische Grundlagen, 814 S., Ernst & Sohn (Berlin)
- STRIEGLER, W.; WERNER, D. (1973): Erdstoffverdichtung. 372 S., VEB Verlag für Bauwesen, Berlin
- THOM, R.; SIVAKUMAR, R.; SIVAKUMAR, V.; MURRAY, E. J.; MACKINNON, P. (2007): Pore size distribution of unsaturated compacted kaolin: the initial states and final states following saturation. Géotechnique 57 (5) (2007), S. 469-474, London

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2009

S 56: Vergangenheit und Zukunft der deutschen Straßenverwaltung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 22./23. September 2008 in Bonn € 14,00

S 57: Vergleichende Untersuchung zweischichtiger offenporiger Asphaltbauweisen
Ripke € 13,50

S 58: Entwicklung und Untersuchung von langlebigen Deckschichten aus Asphalt
Ludwig € 15,50

S 59: Bestimmung des adhäsiven Potentials von Bitumen und Gesteinsoberflächen mit Hilfe der Kontaktwinkelmessmethode
Hirsch, Friemel-Göttlich € 16,00

2010

S 60: Die Zukunftsfähigkeit der Planfeststellung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 21./22. September 2009 in Bonn € 15,50

S 61: Modell zur straßenbautechnischen Analyse der durch den Schwerverkehr induzierten Beanspruchung des BAB-Netzes
Wolf, Fielenbach € 16,50

S 62: 41. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau € 18,50

S 63: Vergleichsuntersuchungen zum Frosthebungsversuch an kalkbehandelten Böden, RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten
Blume € 16,00

S 64: Griffigkeitsprognose an offenporigen Asphalten (OPA)
Teil 1: Bestandsaufnahme an vorhandenen Strecken
Rohleder, Kunz, Wasser, Pullwitt, Müller, Ripke, Zöller, Pöppel-Decker € 23,00
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.

S 65: Untersuchungen von Dübellagen zur Optimierung des Betondeckenbaus
Freudenstein, Birmann € 14,00

2011

S 66: Qualitätssicherung von Waschbetonoberflächen
Breitenbücher, Youn € 14,50

S 67: Weiterentwicklung der automatisierten Merkmalserkennung im Rahmen des TP3
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Canzler, Winkler € 16,50

S 68: Lärmindernder Splittmastixasphalt
Ripke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 69: Untersuchung der Messunsicherheit und der Klassifizierungsfähigkeit von Straßenbelägen
Müller, Wasser, Germann, Kley € 14,50

S 70: Erprobungsstrecke mit Tragschichten ohne Bindemittel aus ziegelreichen RC-Baustoffen
Dieser Bericht liegt außerdem in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de> heruntergeladen werden.
Jansen, Kurz € 16,00

S 71: Enteignung für den Straßenbau – Verfahrensvereinheitlichung – Privatisierung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ im September 2010 in Bonn € 15,00

S 72: Griffigkeitsprognose an offenporigen Asphalten – Teil 2: Neue Baumaßnahmen
Jansen, Pöppel-Decker € 15,00

S 73: Längsebenenheitsauswerteverfahren „Bewertetes Längsprofil“ – Weiterentwicklung der Längsebenenheitsbewertung der Zustandserfassung und -bewertung
Maerschalk, Ueckermann, Heller € 18,50

2012

S 74: Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr 2“ – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche
Projektgruppe „Leiser Straßenverkehr 2“ € 30,50

S 75: Abschätzung der Risiken von Hang- und Böschungsrutschungen durch die Zunahme von Extremwetterereignissen
Krauter, Kumerics, Feuerbach, Lauterbach € 15,50

S 76: 42. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau
Maerschalk, Ueckermann, Heller € 18,50

S 77: Netzplanung – Netzbildung – Netzbereinigung
Durner € 16,50

S 78: Untersuchung des Einflusses der Grobtextur auf Messergebnisse mit dem SKM-Verfahren
Bürckert, Gauterin, Unrau € 16,50

2013

S 79: Gussasphalt ohne Abstreuerung
Ripke € 9,00

S 80: Entwicklung einer neuen Versuchstechnik zur Bestimmung der Grenze zwischen halbfestem und festem Boden
Vogt, Birle, Heyer, Etz € 17,50

S 81: Das straßenrechtliche Nutzungsregime im Umbruch – Aktuelle Fragen des Planungsrechts
Durner € 15,00

2014

S 82: Qualitätskontrolle PWS – Wehner/Schulze Quality Control
Teil 1: Auswertung der Kenndaten der PWS Prüfung
Teil 2: Auswertung von Vergleichsuntersuchungen zur Prüfung der Poliereinheit mittels Schleifpapier
Jansen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 83: Die Stellung der Gemeinden im Straßenrecht – aktuelle Probleme des Umweltrechts – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 23./24. September 2013 in Bonn
Durner € 17,00

S 84: Anforderungen an die Erhaltung von Radwegen
Maerschalk, Oertelt € 19,00

S 85: Kornformbeurteilung mit dem optischen Partikelmessgerät Camsizer®
Kunz
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2015

S 86: Einfluss des Asphaltgranulates auf die bemessungs- und ermüdungsrelevanten Materialeigenschaften einer zwangs-gemischten, kaltgebundenen und bitumendominanten Tragschicht Radenberg, Miljković, Schäfer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 87: Untersuchungen zur Ermittlung von Präzisionswerten für zwei AKR-Schnelltests Durchführung und Auswertung Müller, Seidel, Böhm
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 88: Verwendung von AKR-geschädigtem Betonaufbruch für hydraulisch gebundene Tragschichten Hüniger, Börner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 89: Ermittlung von repräsentativen Substanzwerten in homogenen Abschnitten Villaret, Frohböse, Jähmig, Karcher, Niessen, Buch, Zander
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 90: AKR-Untersuchungen für Fahrbahndecken aus Beton mit Waschbetonoberfläche Müller, Seidel, Böhm, Stark, Ludwig, Seyfarth
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 91: Straßen im Gesamtsystem der Verkehrsträger Durner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 92: Längsebenheitsmesssysteme – Überprüfung der Signalverarbeitungsverfahren nach dem Prinzip der Mehrfachabtastung (HRM) Neubeck, Wiesebrock
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2016

S 93: Bewertung und Optimierung der Hydrophobierung zur Verminderung des AKR-Schädigungsfortschrittes in Fahrbahndeckenbetonen Weise, Schrang € 19,50

S 94: Beanspruchung und Entfernbarkeit temporärer Fahrbahnmarkierung Kemper, Schacht, Klaproth, Oeser, Beyer € 16,50

S 95: Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad von Schichten ohne Bindemittel Bialucha, Merkel, Motz, Demond, Schmidt, Ritter, Haas € 14,50

S 96: Bewertungshintergrund für den Widerstand gegen Polieren von Gesteinskörnungen nach dem PWS-Verfahren Dudenhöfer, Rückert
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 97: Einheitliche Bewertungs- kriterien für Elemente der Straßenverkehrsinfrastruktur im Hinblick auf Nachhaltigkeit – Straße und Tunnel Fischer, Sauer, Jungwirth, Baumgärtner, Hess, Ditter, Roth, Xalter
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 98: Verifikation eines Europäischen Prüfverfahrens zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Asphalt Böhm, Beara
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 99: Ansprache und Steuerung von Healing-Effekten bei Asphalt Wistuba, Alisov, Isailović
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 100: Probekörperherstellung für performance-basierte Asphaltprüfungen R. Roos, C. Karcher, A. Wittenberg
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 101: Belastungseinrichtung Mobile Load Simulator MLS10 Sensorik zur Beanspruchungsdetektion im ersten gemeinsamen Versuchsbetrieb Wacker, Scherkenbach, Rabe, Golkowski
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 102: Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erdbau – Lysimeteruntersuchungen unter Laborbedingungen – Teil 1: Bodenmaterial Kellermann-Kinner, Bürger, Marks € 16,50

S 103: Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erdbau – Untersuchungen von Bauweisen in Freilandlysimetern – Teil 1: Untersuchungszeitraum 2010 - 2013 Brand, Tiffert, Endres, Schnell, Marks, Kocher € 19,50

S 104: Nachhaltige und effiziente Sanierung von Schlaglöchern Thienert, Beckedahl, Koppers, Paffrath, Nafe € 15,00

S 105: Untersuchungen zur Überprüfung des Luftporenanteils als Verdichtungsanforderung bei feinkörnigen Böden und bindigen Mischböden Lypp, Birl, Heyer, Vogt € 20,50

Fordern Sie auch unser kostenloses Gesamtverzeichnis aller lieferbaren Titel an! Dieses sowie alle Titel der Schriftenreihe können Sie unter der folgenden Adresse bestellen:

Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-63

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de