
Grundlagen für die Eignungsprüfung von Böden mit organischen Bestandteilen zur Verwendung als Baustoffe im Erdbau

Berichte der Bundesanstalt
für Straßenwesen
Straßenbau Heft S 209

Grundlagen für die Eignungsprüfung von Böden mit organischen Bestandteilen zur Verwendung als Baustoffe im Erdbau

von

Anjali Uday, Stefan Huber, Emanuel Birle, Roberto Cudmani

Lehrstuhl und Prüfamts für

Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau

Technische Universität München

Berichte der Bundesanstalt
für Straßenwesen
Straßenbau Heft S 209

bast 
Bundesanstalt für
Straßenwesen

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 Kommunikation.

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

Seit 2015 stehen die Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 05.0204
Grundlagen für die Eignungsprüfung von Böden mit organischen Bestandteilen zur Verwendung als Baustoff im Erdbau

Fachbetreuung:
Michael Bürger

Referat:
Nachhaltiges Bauen und Erhalten von Straßen

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

Redaktion:
Stabsstelle Presse und Kommunikation

Gestaltungskonzept:
MedienMélange: Kommunikation

Druck und Verlag:
Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 0 | E-Mail: kontakt@schuenemann-verlag.de
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9323 | ISBN 978-3-95606-817-1 | <https://doi.org/10.60850/bericht-s209>

Bergisch Gladbach, Januar 2025

Kurzfassung - Abstract

Grundlagen für die Eignungsprüfung von Böden mit organischen Bestandteilen zur Verwendung als Baustoffe im Erdbau

Organogene Böden oder Böden mit organischen Beimengungen sind im straßenbautechnischen Regelwerk (TL BuB E-StB 20) als Erdbaustoff nicht vorgesehen. Fallen sie allerdings als Aushubmaterial lokal innerhalb einer Baumaßnahme an und wurden die Eignung und die Einbaubedingungen gesondert untersucht und bestätigt, können nach ZTV E-StB 17 im Einvernehmen mit dem Auftraggeber Böden der Bodengruppen OU und OT in Schutzwällen oder Dämmen im Straßenunterbau eingesetzt werden. Voraussetzung ist dabei stets, dass die Eignung nachgewiesen wurde. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass Böden der Bodengruppen OH und OK in den ZTV E-StB 17 nicht erwähnt sind, diese aus fachlicher Sicht aber in derselben Weise wie die Böden OU und OT behandelt werden können. Gerade die geforderten Eignungsnachweise stellen die Baupraxis allerdings vor erhebliche Herausforderungen, da einerseits nur wenige bautechnische Erfahrungen mit diesen speziellen Böden vorliegen und andererseits die relevanten Regelwerke zur Untersuchung dieser Böden für bautechnische Zwecke nicht auf deren besondere Eigenschaften abgestimmt sind. Das übergeordnete Ziel des Forschungsvorhabens war daher, die bestehenden Vorgaben der Regelwerke für die Anwendung auf organogene Böden zu überprüfen und Hinweise zur Durchführung von Eignungsuntersuchungen an Böden mit organischen Beimengungen bzw. organogenen Böden zu geben.

Zur Überprüfung der Anwendbarkeit der für eine erdbautechnische Beurteilung erforderlichen bodenmechanischen Untersuchungen an Böden mit organischen Beimengungen wurden zum einen Versuche zur Klassifizierung (Wassergehalt, Glühverlust, Korngrößenverteilung, Plastizitätsgrenzen, Korndichte) und zum anderen Untersuchungen zur Verdichtbarkeit, zum Scherverhalten, zum Last-Verformungs-Verhalten und zur Wasserdurchlässigkeit durchgeführt. Für die klassifizierenden Untersuchungen wurden sechs Versuchsböden herangezogen, wobei es sich um vier feinkörnige Böden (Bodengruppe OT nach DIN 18196:2011-05) und zwei gemischtkörnige Böden (Bodengruppe OH nach DIN 18196:2011-05) handelte. Der organische Anteil der sechs Böden (Glühverlust) betrug zwischen ca. 16 % und 30 %. Die weitergehenden bodenmechanischen Untersuchungen wurden an drei Böden, einem feinkörnigen Boden und zwei gemischtkörnigen Böden, durchgeführt.

Anhand der durchgeführten experimentellen Untersuchungen wurden Besonderheiten bei der Versuchsdurchführung an Böden mit organischen Beimengungen herausgearbeitet und Empfehlungen für Eignungsuntersuchungen gegeben.

Principles for the suitability testing of soils with organic content for use as fill materials in earthworks

Organic soils or soils with organic components are not designated as earthfill material in the highway construction norms (TL BuB E-Stb 07). However, if such soils need to be excavated within the construction area and if they satisfy the suitability criteria and installation conditions, soils classified as OU and OT can be used in safety barriers or embankments in highway substructures in accordance with ZTV E-StB 17 in agreement with the Client. The prerequisite is always that the suitability has been proven. In this context, it should be noted that soils classified as OH and OK are not mentioned in ZTV E-StB 17, but from a technical point of view they can be treated similar to OU and OT soils. However, this check of the suitability criteria pose some challenges, on one hand, there is less technical experience with such special soils and on the

other hand, the relevant regulations for the investigation of these soils for construction purposes are not adapted to their special characteristics.

The overall objective of the research project was therefore to review the existing specifications of the regulations for the application to organogenic soils and to provide information on the performance of suitability tests on soils with organic contents or organogenic soils. To verify the applicability of the soil mechanics tests on soils with organic content, classification tests (water content, loss on ignition, grain size distribution, consistency limits, specific gravity) and tests on compactability, shear behavior, load-deformation behavior and permeability were carried out. Classification tests were conducted on six soils, four of which were fine-grained soils (soil group OT according to DIN 18196:2011-05) and two mixed-grained soils (soil group OH according to DIN 18196:2011-05). Further tests were carried out on three soils, one fine-grained soil and two mixed-grained soils. The organic content of the six soils (loss on ignition) varied between 16 - 30 %.

Based on the extensive experimental investigations carried out, aspects to be noted about the tests on soils with organic content were identified and recommendations for suitability tests were provided.

Summary

1 Introduction

Organogenic soils or soils with organic contents are not designated as earthfill material in highway construction norms (TL BuB E-Stb 07). However, if such soils need to be excavated within the construction area and if they satisfy the suitability criteria and installation conditions, soils classified as OU and OT can be used in safety barriers or embankments in highway substructures in accordance with ZTV E-StB 17 in agreement with the Client. The prerequisite is always that the suitability has been proven. In this context, it should be noted that soils classified as OH and OK are not mentioned in ZTV E-StB 17, but from a technical point of view they can be treated similar to OU and OT soils. These suitability criteria pose some challenges, on one hand, there is less technical experience with such special soils and on the other hand, the relevant regulations for the investigation of these soils for construction purposes are not adapted to their special characteristics.

As can be deduced from own experience and the scientific literature, there is a lack of specifications that define the application to soils with organic components and thus contribute to the comparability of test results.

The overall objective of the research project was therefore to review the existing specifications of the regulations for the application to organic soils and, if necessary, to provide information on the performance of suitability tests on soils with organic contents or organogenic soils. It should be taken into account that the repeatability and representativeness of the tests for earthworks applications must be ensured in the suitability tests.

2 Test materials

The laboratory tests were divided into classification tests (water content, loss on ignition, grain size distribution, consistency limits, specific gravity) and tests on compactibility, shear behavior, load-deformation behavior, and permeability.

Classification tests were conducted on six soils, four of which were fine-grained soils (classified as OT according to DIN 18196:2011-05) and two mixed-grained soils (classified according to DIN 18196:2011-05). Further tests were carried out on three of the six soils, one fine-grained and two mixed-grained soils. The loss on ignition of the six soils varied from 16% to 30%.

Before conducting the individual laboratory tests, the material was extensively homogenized by alternating between manual mixing and the use of a cutter.

3 Results and recommendations

3.1 Determination of water content

Test procedure and results: The tests were designed such that both the influence of drying temperature and drying time on the water content determination could be determined. In test series I, the samples were dried at 105 °C for 24 hours. In test series II and III, the samples were dried at 105 °C and 60 °C, respectively, over 4, 8, 16, 24 and 120 hours.

As expected, higher water contents were determined for the samples dried at 105°C than for the samples dried at 60°C (see Figure 1). A minimum drying time approx. 48 hours was required to reach constant mass at a drying temperature of 60°C, while for the samples dried at 105°C, constant mass was already achieved after approx. 16 hours. Summarizing the findings from the literature and our own tests (in particular the tests carried out according to O'Kelly's procedure), it can be seen that the pore water is not completely removed when the sample is dried at temperatures lower than 105 °C. According to the method proposed by O'Kelly (O'KELLY, 2005) to determine the optimum drying temperature, the optimum drying temperature for the soils BoSc, BoGr, NiSt, BoWo and BoFr was calculated to be in the range between 105 and approximately 115°C. It has also been shown that the error in the determination of the water content is significantly greater at a drying temperature of 60°C than at a temperature of 105°C.

Conclusions: For the implementation of soil mechanical laboratory tests within the scope of suitability tests, it is recommended to dry soils containing organic matter or organogenic soils, which have a loss on ignition of up to approx. 30 wt. %, at a temperature of 105°C. The water content of the organogenic soil is underestimated when dried at 60°C.

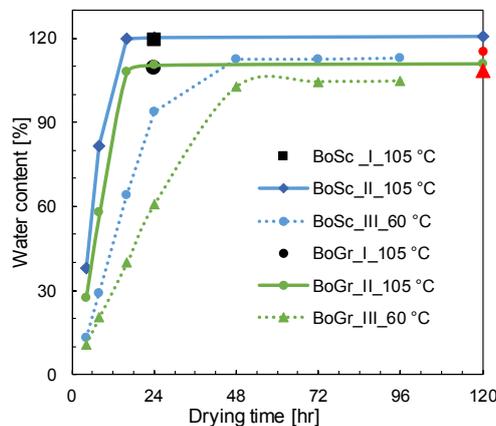


Figure 1: Water content determined at 105° and 60°C for different drying times for the soil BoSc

3.2 Determination of organic content

Test procedure and results: The organic content of the soils was determined by the loss on ignition method, by thermogravimetric analysis and by dry combustion to determine TOC. The results of the thermogravimetric analysis show that a weight loss occurs between 300°C and 350°C in soils containing clay minerals, which is probably due to dehydration of the interlayer water. In addition, at an ignition temperature of 550°C, a mass loss may also occur as a result of the decomposition of calcite. This was observed in particular for the calcareous soils NiSt and BoFr (see Figure 2). The above-mentioned processes lead to an overestimation of the organic fraction based on the loss on ignition and explain, among other things, the differences in the values determined for loss on ignition and TOC. Thus, the ratio (TOC/VGI_{550°C}) lies in the range of 0.4 - 0.6.

Conclusions: Since organic content has a significant influence on the soil mechanical properties, the determination of the organic content based on both loss on ignition and TOC is recommended for suitability tests. As the investigations carried out have shown, the conversion of the loss on ignition to the TOC value is subject to uncertainties.

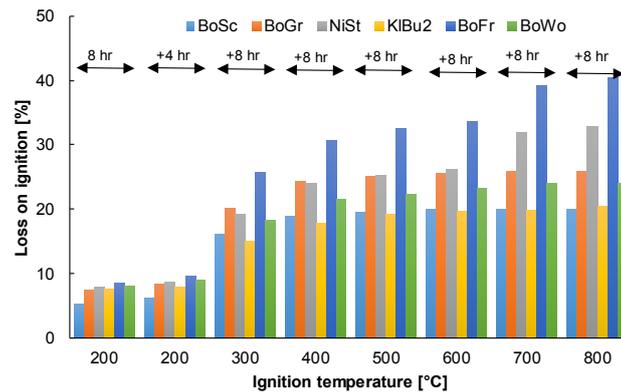


Figure 2: Loss on ignition determined at temperatures between 200°C and 800°C for all soils

3.3 Determination of grain size distribution

Test procedure and results: The particle size distribution was determined by combined sieving and sedimentation analysis according to DIN EN ISO 17892-4:2017-04. Sodium pyrophosphate was used as dispersion agent in a quantity of 100 ml. Only for the soil BoWo the amount was reduced to 25 ml due to strong foaming. As per visual observations, the addition of sodium pyrophosphate prevented lumping or aggregation in all samples.

Since the organic matter present may lead to aggregation and dispersion, the soil was pretreated with hydrogen peroxide to remove the organic matter present, as recommended in DIN EN ISO 17892-4:2017-04. However, the tests carried out have shown that despite pretreatment of the samples with hydrogen peroxide, a large part of the organic matter remains in the soil. Hence, the method is not suitable or only suitable to a limited extent for the removal of organic matter.

The particle size distribution was additionally determined by means of laser diffraction (LDM). Considerable differences were found between the results of the classical method (combined sieving and sedimentation analysis) and laser diffraction (Figure 3) since the two methods measure two completely different grain diameters and therefore a comparison of the results is not very meaningful.

Conclusions: The LDM method was not found to be suitable for soils with organic matter in comparison with classical sieving and sedimentation analysis. Since the sieving and sedimentation analysis is established in soil mechanics for the determination of the grain size distribution and anchored in the regulations, the application of this classical method is recommended on the basis of the present investigation results, regardless of whether these are fine-grained or mixed-grained organogenic soils. Furthermore, the investigations carried out have shown that pretreatment of the samples with hydrogen peroxide is not suitable for removing the organic matter from soils with organic contents in the range between 20 wt. % and 30 wt. %.

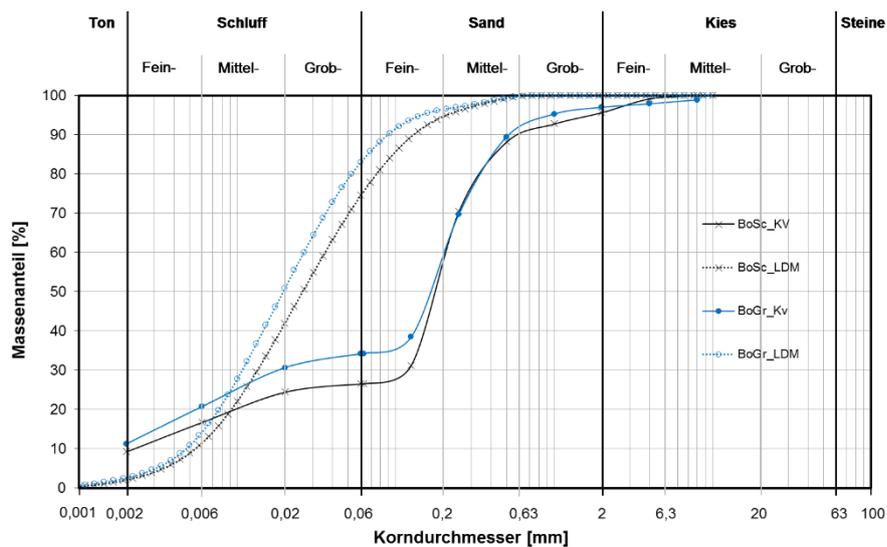


Figure 3: Grain size distributions obtained by conventional combined sieving and sedimentation analysis and laser diffraction method for soils BoSc and BoGr

3.4 Determination of specific gravity

Test procedure and results: The grain density of organogenic soil depends on the composition of both mineral and organic components. The specific gravity of the investigated soils was determined by means of the capillary pycnometer, the gas pycnometer and the air pycnometer. Capillary pycnometer tests were performed on moist samples and samples dried at 105°C. In the capillary and air pycnometer tests, it was observed that the organic matter floated on the surface and the sample foamed up as soon as water was added.

The capillary pycnometer test results yielded higher specific gravities than the gas pycnometer tests. Whether the samples were tested moist or dry in the capillary pycnometer had no systematic influence on the measurement results. The measurements with the gas pycnometer showed the lowest scatter.

Conclusions: Since the gas pycnometer was the only measurement for the determination of the specific gravity without any particular anomalies in the experimental procedure and also in which the measurement results showed the lowest scatter, the use of the gas pycnometer is recommended. However, it is still not clear what causes the differences in the specific gravities determined by capillary pycnometer, air pycnometer and the gas pycnometer.

3.5 Determination of consistency limits

Test procedure and results: The liquid limit was determined using the falling cone and Casagrande methods, where the water content was increased or decreased in a stepwise manner. From the results, it can be seen that regardless of the method, very similar values for liquid limit were obtained using both the Casagrande and the falling cone methods. Whether the tests were performed with decreasing or increasing water content had no discernible effect on the test results.

Conclusions: With regard to the determination of the liquid limit of soils with organic matter or organogenic soils, both the Casagrande method and the Falling Cone test proved to be suitable.

3.6 Determination of compactibility

Test procedure and results: As known from previous studies, the preparation of the soil sample (by increase or decrease of the water content) has an influence on the dry densities achievable in the Proctor test for soils with organic matter. In order to quantify the differences, three proctor tests were carried out on each of the three test materials. In the first and second series of tests, the samples were dried from the dry side of the Proctor curve to the desired water content (drying to 5 - 10 % below wopt or to >20 % below wopt), while in the third series of tests the samples were dried from the wet side of the Proctor curve to the target water content.

The stronger drying in test II as part of the sample drying to water contents at least 20 % below the optimum resulted in greater dry densities than in test series I and III. No pronounced maximum was discernible in test series III. The dry densities achieved from test I were of a similar order of magnitude to those of process III, with somewhat higher dry densities being achieved in test series I. The dry densities achieved with test series III were of a similar order of magnitude to those achieved with test series III. As an example, the compaction properties of soil BoSc are shown in Figure 4.

Conclusions: Since soils with organic matter naturally have a water content significantly above the optimum compaction water content and must be dried to such an extent for earthworks purposes that compaction with standard earthworks equipment is possible, conducting tests in accordance with DIN 18127:2012-09 with prior drying of the material does not appear to be reasonable. Rather, it is recommended to determine the type of test execution depending on the natural water content.

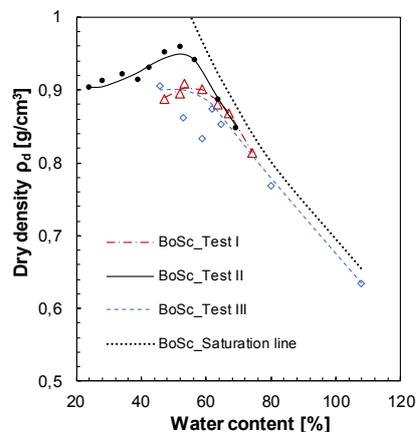


Figure 4: Compaction properties of soil BoSc

3.7 Determination of shear behaviour

Test procedure and results: Direct shear tests, consolidated drained (CD) and consolidated undrained (CU) triaxial tests, and unconfined compression tests were performed to determine the shear parameters of the soils. The shear parameters determined from direct shear, CU, and CD triaxial tests are summarised in Table 1. The results show that the cohesion values determined from the direct shear tests are significantly higher than those determined from the triaxial tests. Furthermore, the tests show that the friction angles derived from CU triaxial tests are higher than the values determined from CD triaxial tests. Similar results, where the shear parameters determined from CU tests were higher than those from CD tests, were obtained by KHATTAK & DAS (1985). They found that the higher the fiber content of the specimens, the more pronounced this effect. The fibers impart a comparatively high shear strength to the specimen despite the

acting pore water pressures, which leads to an overestimation of the shear parameters when evaluating the triaxial tests using the principle of effective stresses (KÖLSCH, 1996).

Conclusions: For the determination of the effective shear parameters of soils with organic matter in the context of suitability tests, the execution of consolidated, drained triaxial tests is recommended on the basis of the obtained results. In the case of undrained triaxial tests, the angle of friction may be overestimated for soils with organic matter. In direct shear tests, the shear parameters can also be overestimated due to the predefined position of the shear failure plane.

Type of test	BoSc		BoGr		KIBu2	
	c' [kN/m ²]	φ' [°]	c' [kN/m ²]	φ' [°]	c' [kN/m ²]	φ' [°]
Direct shear	51,60	27,76	42,50	27,00	42,50	27,00
CU-Triax.	18,10	34,20	12,00	33,40	23,90	33,40
CD-Triax.	18,60	29,13	11,11	30,70	19,62	29,14

Table 1: Summary of shear parameters determined from direct shear, CU and CD triaxial tests on soils BoSc, BoGr and KIBu2

3.8 Determination of the force-deformation behaviour

Test procedure and results: Within the scope of the research project, the force-deformation properties in the saturated state with and without simultaneous measurement of the pore water pressure, in the partially saturated state in a conventional oedometer cell and in a suction controlled oedometer cell according to BIRLE (2012) were investigated.

The compression tests showed that soils with organic content exhibit a time-dependent deformation behavior, which differs significantly from that of mineral soils. Due to the high density of the samples after preparation at Proctor maximum densities and the resulting overconsolidated state, soils with organic content show comparatively low values of excess pore water pressure and a short consolidation time in the saturated state when loaded. Accordingly, the time-dependent deformation behavior is primarily influenced by secondary settlements (creep), whereby the time-dependent deformations on a semi-logarithmic scale (as shown in Figure 5) assume a curved path and thus cannot be described with a constant creep coefficient. Similar results on the time-dependent behavior of organic soils are described by DHOWIAN & EDIL (1980), among others, who subdivide the time-dependent deformation behavior into secondary and tertiary settlements due to the above-mentioned curved path.

The stress-dependent deformation behavior exhibits a curved path due to the high density on a semi-logarithmic scale, which leads to an increase of the compression coefficient with stress. However, in accordance with the concept of MESRI & CASTRO (1987), the ratio of the coefficient of creep to the coefficient of compression remains approximately constant for the soils studied.

During the execution of the tests, it has been observed that samples in the partially saturated condition lose moisture during the test resulting in softer behaviour. As a result of the moisture loss, the suction stresses increase, which leads to a volume reduction and thus to additional settlements in the compression test. As the compression tests with control of the suction stresses have shown, increases in suction stress can lead to significant deformations in soils with organic content. However, compared to volume reduction due to external loads, the specimens behave more stiffly in this case.

Conclusions: For the determination of the time- and stress-dependent deformation behavior in the context of suitability tests, the performance of classical, saturated compression tests are recommended. Since the time-dependent deformation behavior cannot be described with a constant creep coefficient, the time-dependent deformation behavior under one loading step should be observed over a minimum period of 24 hours, but preferably even longer. If the test durations are too short, there is a risk that a low creep coefficient will be derived from the compression tests, since the creep coefficient increases with increasing time. With regard to the prediction of the creep settlements of earth structures made of soils with organic content, there are uncertainties as to how far these can be described with common creep models since the time-dependent behavior in the compression tests showed a change in the creep coefficient with time. There is still a need for further research in this respect.

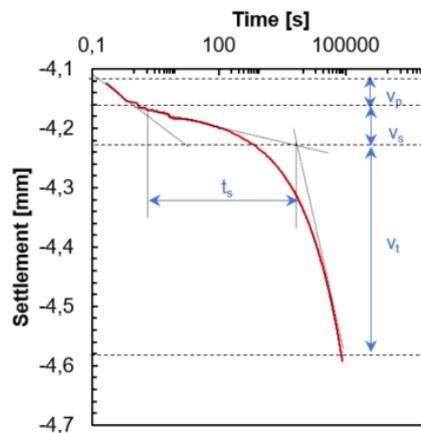


Figure 5: Time-dependent deformation behavior of the soil BoSc under a pressure of 400 kPa with representation of the primary (v_p), secondary (v_s) and tertiary (v_t) settlements

If drying of the soil after installation in the field is to be expected, additional suction-pressure-controlled compression tests shall be conducted. However, since these tests are very time-consuming, shrinkage tests can be carried out as an alternative to determine the volume reduction during drying.

Classical compression tests can be carried out to investigate possible settlement or swelling phenomena when water is added in the field, whereby the specimens are saturated under representative pressures.

3.9 Determination of permeability

Test procedure and results: Within the scope of the research project, permeability tests were carried out in pressure cells, i.e. without a fixed boundary, whereby the difference between the cell pressure and the pore water pressure was varied. The experimental results in Figure 6 show that this difference leads to a consolidation of the samples and, as expected, with increasing consolidation pressure the water permeability decreases due to the compression of the sample. The relationship between the permeability coefficient k and the consolidation stress is qualitatively similar to the relationship between the void ratio and the consolidation stress.

Conclusion. When determining the permeability coefficient of soils with organic matter in the context of suitability studies, the stress dependence of the permeability coefficient must be taken into account. The consolidation stress of the samples in pressure cells (i.e. the difference between the cell pressure and the pore water pressure) should be selected according to the stresses present or expected in the field.

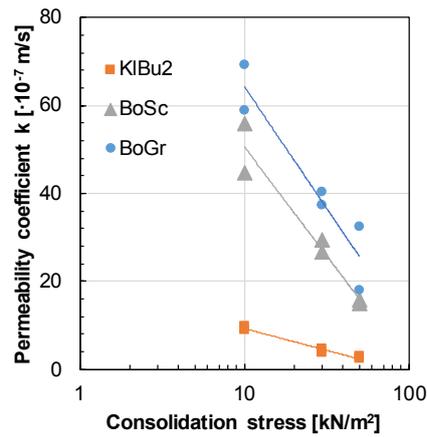


Figure 6: Dependence of permeability on the consolidation stress for the soils BoSc, BoGr and KIBu2

4 Outlook

The investigations carried out show that the organic content in soils in the investigated range of 20 to 30 wt. % has a significant influence on the mechanical properties of the soil and that the suitability tests should be oriented accordingly. It has not yet been possible to investigate to what extent and the conditions under which the organic sub-stance is decomposed after installation in earthworks and its influence on the deformation behavior of the structures. For this purpose, further investigations would be necessary, which should be carried out over a correspondingly long period of time, if necessary.

Inhalt

1	Einleitung	17
2	Forschungskonzept	21
2.1	Forschungsfragen	21
2.2	Untersuchungskonzept	21
2.2.1	Klassifizierende Versuche	22
2.2.2	Versuche zur Bestimmung der bautechnischen Eigenschaften	24
3	Grundlagen und Literaturlauswertung	26
3.1	Entstehung und Eigenschaften von Böden mit organischen Bestandteilen. .	26
3.2	Erdbautechnische Eigenschaften	26
3.2.1	Allgemeines	26
3.2.2	Bestimmung des Wassergehalts	26
3.2.3	Bestimmung des Glühverlustes	29
3.2.4	Bestimmung der Korngrößenverteilung	34
3.2.5	Bestimmung der Korndichte	36
3.2.6	Bestimmung der Plastizitätsgrenzen.	38
3.2.7	Bestimmung der Verdichtungseigenschaften	40
3.2.8	Bestimmung der Scherparameter	42
3.2.9	Bestimmung der Last-Verformungseigenschaften	45
3.2.10	Bestimmung der Durchlässigkeit	51
4	Laborversuche	53
4.1	Versuchsböden	53
4.1.1	Böden aus dem Projekt FE05.0166/2011/ERB.	53
4.1.2	Neu beschaffte Böden	55
4.2	Laborversuche zur Bestimmung des Wassergehalts.	57
4.3	Laborversuche zur Bestimmung des Glühverlustes	68
4.3.1	Konzeption	68
4.3.2	Bestimmung anhand des Glühverfahrens.	68
4.3.3	Bestimmung mittels thermogravimetrischer Analyse, Röntgendiffraktometrie und chemischen Analyse.	72

4.4	Laborversuche zur Bestimmung der Korngrößenverteilung	79
4.5	Laborversuche zur Bestimmung der Korndichte	87
4.6	Laborversuche zur Bestimmung der Plastizitätsgrenzen.	91
4.7	Laborversuche zur Bestimmung der Verdichtungseigenschaften	93
4.7.1	Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung	93
4.7.2	Zusammenfassung der Ergebnisse	93
4.7.3	Interpretation.	94
4.8	Bestimmung der Scherparameter - Rahmenscherversuch	95
4.8.1	Probenvorbereitung and Versuchsdurchführung	95
4.8.2	Zusammenfassung der Ergebnisse und Interpretation.	95
4.9	Bestimmung der Scherparameter – undränierter Triaxialversuche.	98
4.9.1	Probenvorbereitung and Versuchsdurchführung	98
4.9.2	Zusammenfassung der Ergebnisse und Interpretation.	98
4.9.3	Interpretation.	101
4.10	Bestimmung der Scherparameter – dränierter Triaxialversuche.	104
4.10.1	Probenvorbereitung and Versuchsdurchführung	104
4.10.2	Zusammenfassung der Ergebnisse und Interpretation.	105
4.11	Bestimmung der Scherparameter – einaxialer Druckversuch	113
4.11.1	Probenvorbereitung and Versuchsdurchführung	113
4.11.2	Zusammenfassung der Ergebnisse und Interpretation.	113
4.12	Bestimmung der Last-Verformungseigenschaften - im gesättigten Zustand ohne gleichzeitige Messung des Porenwasserdrucks	115
4.12.1	Probenvorbereitung and Versuchsdurchführung	115
4.12.2	Zusammenfassung der Ergebnisse und Interpretation.	115
4.13	Bestimmung der Last-Verformungseigenschaften - im gesättigten Zustand mit gleichzeitiger Messung des Porenwasserdrucks	121
4.13.1	Zusammenfassung der Ergebnisse und Interpretation.	122
4.14	Bestimmung der Last-Verformungseigenschaften - im teilgesättigten Zustand	133
4.14.1	Probenvorbereitung and Versuchsdurchführung	133
4.14.2	Zusammenfassung der Ergebnisse und Interpretation.	133
4.15	Bestimmung der Last-Verformungseigenschaften - im teilgesättigten Zustand in Saugspannungs-kontrollierten Oedometerzellen.	136
4.15.1	Probenvorbereitung and Versuchsdurchführung	136
4.15.2	Zusammenfassung der Ergebnisse und Interpretation.	139

4.16	Laborversuche zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit	145
4.16.1	Probenvorbereitung and Versuchsdurchführung	145
4.16.2	Zusammenfassung der Ergebnisse und Interpretation	145
4.16.3	Interpretation	146
5	Folgerungen aus den Ergebnissen und Empfehlungen	147
5.1	Allgemeines	147
5.2	Wassergehalt	147
5.2.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	147
5.2.2	Folgerungen	147
5.3	Organischer Anteil	148
5.3.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	148
5.3.2	Folgerungen	148
5.4	Korngrößenverteilung	149
5.4.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	149
5.4.2	Folgerungen	149
5.5	Korndichte	150
5.5.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	150
5.5.2	Folgerungen	150
5.6	Plastizitätsgrenzen	150
5.6.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	150
5.6.2	Folgerungen	151
5.7	Verdichtbarkeit	151
5.7.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	151
5.7.2	Folgerungen	151
5.8	Scherfestigkeit	151
5.8.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	151
5.8.2	Folgerungen	152
5.9	Spannungs-Verformungs-Eigenschaften	153
5.9.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	153
5.9.2	Folgerungen	153
5.10	Durchlässigkeit	154
5.10.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	154
5.10.2	Folgerungen	154

6 Zusammenfassung	155
Literatur	159
Tabellen	168
Bilder	170
Anhang	174
A.1 Klassifizierende Versuche an den Ausgangsböden	175
A.2 Einzelergebnisse der Scherversuche	181
A.3 Einzelergebnisse der Ödometerversuche	200

1 Einleitung

Im Erdbau werden in Mitteleuropa organische Böden und Böden mit organischen Bestandteilen aufgrund ihrer im Vergleich zu mineralischen Böden ungünstigen mechanischen Eigenschaften als Baustoff bisher möglichst vermieden. Erst durch die sich in den letzten Jahrzehnten entwickelnde, öffentliche Anerkennung der allgemeinen Notwendigkeit zur Schonung von Primärressourcen wird dieses Material langsam als möglicher Erdbaustoff anerkannt. Das ist zu begrüßen, da der pauschale Ausschluss der Eignung von solchen Böden für die Erstellung von Erdbauwerken nicht gerechtfertigt ist. So zeigen BIRLE ET AL. (2013), HEYER ET AL. (2012) und das am Zentrum Geotechnik der TU München im Auftrag der BASt durchgeführte Forschungsvorhaben FE 05.0166/2011/ERB, dass solche Materialien aus technischer Sicht und abhängig vom Einsatzzweck durchaus in Erdbauwerken verwendet werden können.

Tatsächlich bestimmt das quantitative Maß der organischen Substanz den Grad, in dem sie die mechanischen Eigenschaften beeinflusst. Daher ist es sehr wichtig, den Boden nach seinem organischen Gehalt zu klassifizieren, um seine Verwendung als Baustoff festzustellen. Böden lassen sich in bautechnischer Sicht und in Bezug auf ihren organischen Anteil grob in drei Gruppen einteilen: a) mineralische Böden, b) organogene Böden bzw. Böden mit organischen Bestandteilen bzw. organische Beimengungen und c) organische Böden. Die DIN 18196:2011-05 unterscheidet zwischen organischen Böden (Gruppenabkürzungen H oder F) und organogenen Böden oder Böden mit organischen Beimengungen (Hauptgruppenabkürzung O) auf der Grundlage des Massenanteils der organischen Bestandteile. Organische Böden (mit den Gruppenabkürzungen H und F) können nach dem Trocknen an der Luft brennen oder schwelen, Böden mit organischen Beimengungen (die Hauptgruppenabkürzung O) dagegen nicht. Böden mit organischem Gehalt werden weiter in die Bodengruppen OU, OT, OH und OK unterteilt, basierend auf Kornverteilung und Konsistenzgrenzen. In DIN 1054:2021-4 und den ZTV E-StB 17 Pkt 3.1.4 ist zusätzlich die Grenze zwischen bindigen mineralischen und bindigen organogenen Böden bzw. Böden mit organischen Bestandteilen bei einem Glühverlust von 5 M.-% festgelegt. Bei nichtbindigen Böden gilt nach DIN 1054:2021-4 ein Massenanteil von 3 M.-%. Die Klassifizierung von Böden mit organischen Anteilen nach ASTM D2487-10 (2010) und Schweizer Norm (SN-670-004-2b-NA, 2008) erfolgt durch das Verhältnis der Fließgrenze w_{L105} des zuvor bei 105 °C getrockneten Bodens zu seiner natürlichen Fließgrenze w_{Lnat} (nicht getrocknet). Wenn das Verhältnis weniger als 0,75 beträgt, ist der nach USCS beprobte Boden mit "O" (organisch) zu kennzeichnen. Nach HUANG ET AL. (2009) können Böden in Hinblick auf ihren organischen Anteil in vier Gruppen eingeteilt werden: mineralische Böden (organische Bestandteile ≤ 3 M %), mineralische Böden mit organischer Substanz ($3 M < \text{organische Bestandteile} \leq 15$ M %), organische Böden ($15 M < \text{organischer Bestandteile} \leq 30$ M %) und stark organische Böden (organische Bestandteile > 30 M %).

Die in der Neufassung erschienene DIN EN ISO 14688-2:2020-11 teilt mineralische Böden mit organischen Anteilen und Korngrößen ≤ 2 mm anhand des organischen Anteils in der Trockenmasse in schwach organisch (2 bis 6 M.-%), mäßig organisch (6 bis 20 M.-%) und stark organisch (> 20 M.-%) ein. Die Norm schlägt vor, dass die Gruppierung für grob- und gemischtkörnige organische Böden auf der Grundlage der Art der organischen Bestandteile und für organische Böden auf der Grundlage der Entstehung und des Zersetzungsgrades der organischen Bestandteile durchgeführt wird. Dabei wird in der Norm nicht weiter spezifiziert, wie der organische Anteil ermittelt werden soll (z.B. als Glühverlust oder TOC-Wert), lediglich die Angabe des Verfahrens zur Ermittlung des organischen Anteils ist gefordert. Torf, Gytija, Dy und Humus werden als organische Böden dementsprechend nicht nach organischem Anteil unterschieden, sondern sind nach den Vorgaben in DIN EN ISO 14688-1:2020-11 entsprechend der Entstehung und dem Zersetzungsgrad des organischen Anteils einzuteilen.

Böden mit organischen Bestandteilen sind im straßenbautechnischen Regelwerk (TL BuB E-StB 20) nicht als Baustoff für den Erdbau vorgesehen. Liegen sie allerdings als lokales Material innerhalb einer Baumaßnahme vor und wurden die Eignung und die Einbaubedingungen gesondert untersucht und bestätigt, können im Einvernehmen mit dem Auftraggeber Böden der Bodengruppen OU und OT in Schutzwällen oder Dämmen im Straßenunterbau eingesetzt werden. Voraussetzung ist dabei jedoch stets, dass die Eignung nach ZTV E-StB 17 nachgewiesen wurde. Gerade dieser Eignungsnachweis stellt die Baupraxis allerdings vor erhebliche Herausforderungen: einerseits liegen nur wenige bautechnische Erfahrungen mit diesen speziellen Böden vor und andererseits sind die relevanten Regelwerke zur Untersuchung dieser Böden für bautechnische Zwecke nicht auf deren besondere Eigenschaften abgestimmt. Wie sich aus eigenen Erfahrungen und der wissenschaftlichen Literatur ableiten lässt, fehlt es an Vorgaben, die die Anwendung auf Böden mit organischen Anteilen präzisieren und somit zur Vergleichbarkeit von Versuchsergebnissen beitragen:

- *Bestimmung des Wassergehalts:* Dem Wassergehalt als Referenzwert für Zustandseigenschaften von Böden kommt im Erdbau eine besondere Bedeutung zu. Er wird nach DIN EN 17892-1:2015-03 durch Trocknung bis zur Massenkonstanz bei etwa 105 °C ermittelt (dies ist eine Konvention). Dabei ist als Richtwert für die Trocknung bei feinkörnigen Böden eine Mindestdauer von etwa 16 Stunden angegeben. Alternativ dazu kann die Trocknung bis zur Massenkonstanz erfolgen (Änderung der Trockenmasse < 0,1% innerhalb einer Stunde). Für Böden mit organischen Bestandteilen wird darauf hingewiesen, dass der Masseverlust bei der Trocknung bei 105 °C nicht nur durch den Verlust von freiem Wasser entstehen kann, sondern auch durch Oxidation des organischen Anteils. Gemäß DIN EN 17892-1:2015-03 ist es demnach unter Umständen (Trocknung bis zur Massenkonstanz) erlaubt, den Wassergehalt bei niedrigeren Temperaturen zu bestimmen (z. B. bei 50 °C). Dieses Vorgehen kann unter Umständen zu einer fehlerhaften Bestimmung des Wassergehaltes solcher Böden führen O'KELLY (2005a); O'KELLY (2005b) und wirft im Hinblick auf die Vergleichbarkeit von Ergebnissen Fragen auf O'KELLY & LI (2018). Außerdem ist auch ein solches Vorgehen für die Interpretation von Untersuchungsergebnissen problematisch, die sich auf die Trockenmasse von Proben beziehen (z.B. Glühverlust, Korndichtebestimmung).
- *Bestimmung des Glühverlustes:* Als übergeordnetes Dokument gibt TP BF-StB B 10.1 (FGSV, 1999) unterschiedliche Möglichkeiten zur Bestimmung des organischen Anteils in Böden für die Verwendung im Erdbau des Straßenbaus an. Ein darin genanntes Verfahren, das aufgrund seiner Einfachheit in der Baupraxis immer noch sehr verbreitet ist, ist die Bestimmung des Glühverlustes nach DIN 18128:2002-12 bei 550 °C (auch das ist eine Konvention). Alternativ zur Bestimmung des Glühverlustes kann über chemische Verfahren auch der totale organische Kohlenstoffanteil (TOC) bestimmt werden. Unglücklicherweise unterscheiden sich diese beiden Parameter als Maßzahl für den organischen Anteil um einen Faktor von bis zu etwa 2 voneinander z.B. FRANKLIN ET AL. (1973), DE VOS ET AL. (2005), ABELLA & ZIMMER (2007). Wie auch bei der Bestimmung des Wassergehaltes, wird der beim Versuch zur Bestimmung des Glühverlustes von organogenen Böden dokumentierte Versuchswert von der tatsächlichen Glühtemperatur und der Glühdauer beeinflusst z.B. ABELLA & ZIMMER (2007) sowie durch Gewichtsverluste durch chemische Prozesse nichtorganischer Anteile bei den unterschiedlichen Temperaturen z.B. PLANTE ET AL., (2009).
- *Bestimmung der Korngrößenverteilung:* Der organische Anteil in Böden kann bei der Sedimentationsanalyse eine Ausflockung der in Schwebelage befindlichen Teilchen bewirken. Da die koagulierten Teilchen eine andere Sedimentationscharakteristik aufweisen als die einzelnen Teilchen, wird dadurch die Sedimentationsanalyse unbrauchbar. Üblicherweise wird der Suspension zur Verhinderung der Koagulation ein Dispersionsmittel zugegeben z.B. DIN EN ISO 17892-4:2017-04, WINTERMEYER & KINTER (1955). Die aktuelle DIN EN ISO 17892-4:2017-04 sieht außerdem die Entfernung des organischen Anteils vor Untersuchung durch Wasserstoffperoxid vor (dies ist in einem bodenmechanischen Labor bisher allerdings kein üblicher Vorgang). Leider sind die unterschiedlichen Dispergierungsmittel nicht

gleich wirksam (siehe DIN EN ISO 17892-4:2017-04, Anmerkung zu Pkt. 4.5.3) und so kann der Erfolg einer Sedimentationsanalyse an solchen Böden auch hierdurch nicht garantiert werden. Die Laserdiffraktometrie als eine alternative Methode zur Bestimmung der Kornverteilungskurve zeigt für Böden mit organischen Bestandteilen im Vergleich zu herkömmlichen Methoden zwar nicht immer identische Ergebnisse auf z.B. SHEIN ET AL. (2006), besitzt aber trotzdem auch für die Anwendung auf organogene Böden ein großes Potential für den Einsatz im bodenmechanischen Labor.

- *Bestimmung der Korndichte:* Es ist bekannt, dass der organische Anteil in einem Boden dessen messbare Korndichte maßgeblich beeinflusst (z.B. ENGEL 2002, RÜHLMANN ET AL. 2006, SCHJØNNING ET AL. 2017). Die beiden gängigsten Verfahren zur Bestimmung der Korndichte solcher Böden ist das Kapillarpyknometer-Verfahren (trockene oder erdfeuchte Probe zur Versuchsdurchführung) und das Gaspyknometer-Verfahren (trockene Probe zur Versuchsdurchführung). Dabei ist nach DIN EN ISO 17892-3:2016-07 bei Böden mit organischen Anteilen eine höhere Streuung (ohne genauere Angaben) bei der Verwendung des Kapillarpyknometers zu erwarten, als bei mineralischen Böden. Aufgrund der beschriebenen Oxidationsvorgänge beim Trocknen der organogenen Proben kann ohne Weiteres auch nicht davon ausgegangen werden, dass die unterschiedlichen Versuchsdurchführungen identische Ergebnisse liefern. Es fehlen Aussagen zur Vergleichbarkeit/Gleichwertigkeit der Verfahren zur Korndichtebestimmung an organogenen Böden.
- *Bestimmung der Plastizitätsgrenzen (Fließgrenze, Ausrollgrenze):* Bekannte Probleme bestehen zum Beispiel bei der Bestimmung der Fließgrenze nach Casagrande. So lassen sich Böden mit organischen Anteilen nicht mehr problemlos mit dem Furchenzieher teilen (HERRMANN ET AL. 2014). Ein potentielles Problem ergibt sich außerdem aus der Herstellung der unterschiedlichen, erforderlichen Wassergehalte für die Durchführung des Versuchs zur Bestimmung der Fließgrenze: diese können entweder durch Hinzugabe von Wasser oder durch Trocknung hergestellt werden (siehe DIN EN ISO 17892-12 (2020)). Wie auch beim Verdichtungsversuch nach Proctor DIN 18127:2012-09, siehe BIRLE (2012), ist es also durchaus denkbar, dass beide Vorgehensweisen zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Untersuchungen zur Klarstellung existieren allerdings derzeit noch nicht.
- *Bestimmung der Verdichtungseigenschaften:* Es ist nach BIRLE (2012) bekannt, dass die Vorbereitung des Versuchsmaterials für den Verdichtungsversuch vor allem bei organogenen Böden einen markanten Einfluss auf den ermittelten Wert des Verdichtungsoptimums (optimaler Wassergehalt und zugehörige, maximale Trockendichte) hat. Dabei geht es vor allem darum, ob die Variation des Wassergehaltes für die Versuchsdurchführung durch Trocknung allein oder durch Trocknung und Wasserzugabe (Vorgehen nach DIN 18127:2012-09) erfolgt. Nach DIN 18127:2012-09 gilt gem. Pkt. 8.1.3: „Für den ersten Einzelversuch sollte die Bodenprobe einen Wassergehalt haben, der hinreichend weit unter dem geschätzten Wassergehalt liegt. Diese Unterschiede in den Ergebnissen sind vor allem deshalb problematisch, da sie nicht das Vorgehen im Feld widerspiegeln: hier wird der Boden nur soweit getrocknet wie nötig und anschließend verdichtet. Das Vorgehen im Labor ist demnach zu hinterfragen.“
- *Bestimmung der Scherparameter:* Grundsätzlich kann die Bestimmung der Scherparameter von Böden mit dem direkten Scherversuch nach DIN 17892-10:2019-04 oder mit dem Triaxialversuch nach DIN EN ISO 17892-8:2018-07 und -9:2018-07 erfolgen. Die Bestimmung der Scherparameter von organogenen und Böden mit organischen Bestandteilen im Triaxialversuch stellt ein Labor vor besonders viele Herausforderungen, da nahezu bei allen Einzelschritten der Versuchsdurchführung (vor allem Probenherstellung, Sättigung, Konsolidation, Volumen- und Querschnittsbestimmung etc.)¹ Besonderheiten zu beachten sind (GOLD 2017). Gleichzeitig bestehen zu Versuchsergebnissen aus Standardversuchen

¹ Zu den beispielhaft genannten Punkten: Organogene Böden mit hohen organischen Anteilen lassen sich unter Umständen aufgrund von Rissbildung nicht schadlos aus Probeformern auspressen. Die Proben können im Zeitraum zwischen der Entformung und dem Einbau in der Triaxialanlage auch schwellen. Die Sättigung der Probekörper hat aufgrund der vergleichsweise geringen Steifigkeit und der geringen Durchlässigkeit sehr vorsichtig zu erfolgen. Die Konsolidation dauert entsprechend lange und das Ende der Primärkonsolidation ist aufgrund von maßgeblichen Sekundärsetzungen anhand der Zeit-Setzungslinien ggf. schwer zu identifizieren. Die

grundsätzliche Fragen: aus der wissenschaftlichen Literatur ist bekannt, dass der im Labor bestimmbare Reibungswinkel von organogenen und organischen Böden unerwartet groß ist (z.B. EDIL & WANG 2000).² Es ist nach KHATTAK & DAS (1985) durchaus denkbar, dass die hohen (effektiven) Werte typisch für undrained Triaxialversuche (CU) sind und zum Beispiel bei der drainierten Durchführung (CD) nicht auftreten. Ein derartiger Einfluss des Versuchsablaufs (drainiert bzw. undrained) auf die gemessenen, effektiven Scherparameter wäre in der Praxis aus vielerlei Gründen äußerst problematisch, da beide Versuchsarten (CD und CU-Versuch) gleichermaßen als Standard in der Geotechnik etabliert sind.

Bestimmung der Last-Verformungseigenschaften: Der Einfluss des organischen Anteils auf die Last-Verformungseigenschaften wurde von HERRMANN ET AL. (2014) anschaulich gezeigt. Dass sich Böden mit organischen Anteilen im Standard-Kompressionsversuch deutlich anders verhalten können als mineralische Böden wurde zum Beispiel im Rahmen von FE 05.0166/2011/ERB und von BAGHERPOUR (2017) dokumentiert. So kann bei Böden mit maßgeblichen organischen Anteilen (bis etwa 30 M.-%) unter Umständen das Ende der Primärkonsolidation (EOP) nicht wie bei mineralischen Böden üblich aus der Zeit-Setzungslinie abgeleitet werden, da die Kriechverformungen im $e/\log t$ -Diagramm stets zunehmende Werte zeigen. Das hat zusätzlich zur Folge, dass die Kriechsetzungen (die bei organogenen Böden durchaus maßgeblich sein können) nicht mit den in der Norm beschriebenen Ansätzen (Kriechbeiwert) berechnet werden können. Die Auswertung solcher Versuche erfordert für solche Fälle zusätzliche Festlegungen.

Grundsätzlich lässt sich bei der Durchführung von herkömmlichen Laborversuchen zur Bestimmung der Last-Verformungseigenschaften (an gesättigten Proben nach DIN EN ISO 17892-5:2017-08 bzw. früher DIN 18135:2017-08 auch die Situation im Erdbauwerk ggf. nicht ausreichend gut abbilden. Im Bauwerk herrschen, zumindest bis in eine bestimmte Tiefe, vorrangig aerobe Verhältnisse. Es ist bekannt, dass der aerobe Abbau von organischen Anteilen im Boden einen relevanten Anteil an den Gesamtsetzungen einnehmen kann (z.B. PICHAN & O'KELLY 2013 und O'KELLY & PICHAN 2013). Versuche im Rahmen von FE 05.0166/2011/ERB haben darauf hingewiesen, dass eine Versuchsdurchführung ohne Aufsättigung der Proben keine Lösung ist, da in dem zur Erfassung von Sekundärsetzungen vergleichsweise langen Untersuchungszeitraum eine Austrocknung der Proben und eine damit einhergehende Schrumpfung nicht ausgeschlossen werden kann. Es bleibt also zu beurteilen, ob das Standardverfahren zur Bestimmung der Last-Verformungseigenschaften das Verhalten in situ ausreichend gut abbilden kann.

- *Bestimmung der Durchlässigkeit:* Bei der Durchführung von Versuchen zur Bestimmung der Durchlässigkeit in der Triaxialzelle wird mit einem Zelldruck gearbeitet. Durch diesen Zelldruck wird jene die Probe umhüllende Membran an die Probenoberfläche gepresst, womit Randumläufigkeiten bei der Durchströmung verhindert werden. Die DIN EN ISO 17892-11:2021-03 (unter Pkt. 6.3.3.1.1) bleibt diesbezüglich allgemein: „Die Auswahl des Sättigungsverfahrens muss sicherstellen, dass die wirksamen Spannungen im Probekörper nicht auf ein Niveau angehoben werden, das das Verhalten bei der Durchlässigkeitsmessung beeinflusst.“³ Vor allem bei organogenen Böden mit ihrer vergleichsweise geringen Steifigkeit ist es durchaus denkbar, dass die aus verfahrenstechnischen Gründen (Anpressen der

Spannungsermittlung im Probekörper zur Ableitung von Scherfestigkeits-Parametern basiert bei Triaxialversuchen immer auf Angaben zur Probengeometrie bei Versuchsbeginn. In der Regel wird hier angenommen, dass sich die Probengeometrie zwischen Einbau und dem Ende der Sättigungsphase (aufgrund des Differenzdrucks zwischen Porenwasser und Wasser in der Zelle) nicht ändert. Organogene Böden können aufgrund der geringen Steifigkeit im Rahmen des Kraftschlusses des Laststempels und der Sättigungsphase unter Umständen aber bereits maßgebliche Verformungen aufgenommen haben. Eine nicht den Erwartungen entsprechende Probengeometrie würde demnach auch die ermittelten Scherparameter beeinflussen.

² Der Scherwiderstand wächst in solchen Proben stetig mit der Verformung an und wird in der Regel erst bei sehr großen Stauchungen erreicht (z.B. Gold 2017). In der Praxis erfolgt in solchen Fällen bei der Scherparameterbestimmung zur Verformungsbeschränkung eine Auswertung des Scherwiderstandes bei kleinen axialen Stauchungen (von z. B. 4 %). Es ist nicht bekannt, inwiefern das viskose Verhalten der organogenen Böden die Sinnhaftigkeit dieses Ansatzes negativ beeinflussen kann.

³ Zusätzlich wird neben anderen Vorgaben zur Sättigungsphase noch erwähnt: „Die auf den Probekörper während der Sättigung wirkenden wirksamen Spannungen dürfen die für den Versuch festgelegten wirksamen Spannungen nicht überschreiten.“

Membran) erforderlichen Differenzspannungen das Probenvolumen maßgeblich verringern und so die Versuchswerte in einem Bereich oberhalb der natürlichen Streuung der Ergebnisse beeinflussen.

Da der organische Anteil im Boden kleinräumig stark schwanken kann, ist übergreifend über alle Versuche außerdem die hohe Relevanz einer möglichst sortenreinen Entnahme der Materialien (keine Vermischung mit anderen Bodenschichten), einer repräsentativen Probenahme und der Homogenisierung dieser Proben vor der Untersuchung im Labor zu erwähnen.

2 Forschungskonzept

2.1 Forschungsfragen

Organogene Böden bzw. Böden mit organischen Bestandteilen sollen im Sinne der Schonung von Primärressourcen zunehmend am Ort ihres Aufkommens in Erdbauwerken wiederverwendet werden. Die Regelwerke, die die Untersuchung von Böden für geotechnische Zwecke behandeln, wurden hauptsächlich für mineralische Böden entwickelt. Gemäß Projektbeschreibung ist es daher das übergeordnete Ziel, die bestehenden Vorgaben der Regelwerke für die Anwendung auf organogene Böden zu überprüfen und ggf. Vorgehensweisen zu entwickeln, die einerseits die Vergleichbarkeit der Ergebnisse und Wiederholbarkeit der Versuche gewährleisten und andererseits noch die baupraktisch relevanten Parameter realitätsnah abbilden können. Durch die Formulierung von zusätzlichen Anforderungen und Hinweisen zu den geltenden Regelwerken sollen die Grundlagen für die Eignungsuntersuchung von Böden mit organischen Bestandteilen zum Zweck der Verwendung als Erdbaustoff erarbeitet werden. Konkret werden zur Erreichung des im ausgeschriebenen Forschungsvorhaben angegebenen Gesamtziels folgende Forschungsfragen formuliert:

- a) Was genau ist der organische Anteil im Boden, wie und unter welchen Umständen entsteht er und wird er umgewandelt? Was sind die relevanten Eigenschaften dieses organischen Anteils aus bodenmechanischer Sicht?
- b) Auf welche Eigenschaften des organischen Anteils wird in den Regelwerken zur Bestimmung der bodenmechanischen Eigenschaften auf Basis der vorliegenden Informationen nicht ausreichend eingegangen? Welche zusätzlichen Informationen sind zur Deutung von Versuchsergebnissen wichtig?
- c) Kann der potentielle Einfluss mangelnder Festlegungen bezüglich der Eigenschaften des organischen Anteils in den Regelwerken auf die jeweiligen Versuchsergebnisse quantifiziert werden?
- d) Welche zusätzlichen Anforderungen und Hinweise können zu den geltenden Regelwerken bei der Untersuchung von organogenen Böden gegeben werden, um die Wiederholbarkeit der Versuche und die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten?

2.2 Untersuchungskonzept

Im ersten Teil wird der Wissensstand über den Einfluss des organischen Anteils auf die bodenmechanischen Eigenschaften von organogenen Böden oder Böden mit organischen Anteilen im verdichteten Zustand auf der Grundlage einer Literaturstudie dargestellt. Der anschließende experimentelle Teil ist in zwei Teile unterteilt: Der erste Teil beinhaltet die Ergebnisse von klassifizierenden Versuchen, während im zweiten Teil weitergehende Untersuchungen zur Bestimmung der bautechnischen Eigenschaften dargestellt werden.

2.2.1 Klassifizierende Versuche

Auf Basis der Literaturrecherche wurden sechs Böden mit organischen Anteilen von 20 bis 30 M % ausgewählt und für die vorgesehenen Laboruntersuchungen homogenisiert.

Zur Klassifizierung von organogenen Böden oder Böden mit organischen Bestandteilen sind verschiedene bodenmechanische Untersuchungen erforderlich, die an den ausgewählten Böden angewendet wurden. Für die experimentellen Untersuchungen wurden unter Berücksichtigung der Fragestellungen und der Ergebnisse der Literaturrecherche folgende Methoden und Versuchsrandbedingungen festgelegt:

a) Bestimmung des Wassergehaltes

Versuchs-Nr.	Trocknungstemperatur (°C)	Bedingungen
I	105	Proben sollen für 24 Stunden bzw. Massenkonzanz getrocknet werden
II	105	Proben sollen über unterschiedliche Zeiträume (z.B. über 4, 8, 16, 24, 120 Std) bzw. bis zur Massenkonzanz getrocknet werden
III	60	Proben sollen über unterschiedliche Zeiträume (z.B. über 4, 8, 16, 24, 120 Std) bzw. bis zur Massenkonzanz getrocknet werden
IV	60, 65, 70, 82, 95, 105, 128, 150	Proben sollen zu unterschiedlichen Zeitpunkten (z.B. nach 4, 8, 16, 24, 120 Std) bzw. Massenkonzanz getrocknet werden

Tab. 2-1: Versuche zur Wassergehaltsbestimmung

b) Bestimmung des Glühverlustes

Versuchs-Nr.	Glühtemperatur (°C)	Bedingungen
I	550	Die Probe soll über unterschiedliche Zeiträume (z.B. über 4, 8, 12 Std) bzw. bis zur Massenkonzanz gegläht werden
II	200, 300, 400, 500, 600, 700, 800	Die Probe soll jeweils für 8 Std. gegläht werden
III	200, 300, 400, 500, 600, 700, 800	Thermogravimetrische Analyse (Extern)
IV	-	Röntgenografische Analyse (Extern)
V	-	Bestimmung der Total Organic Carbon (Extern)

Tab. 2-2: Versuche zur Bestimmung des Glühverlustes

c) Bestimmung der Kornverteilung

Versuchs-Nr.	Bedingungen
I	Kombinierte Sieb- und Sedimentationsanalyse unter Verwendung von Natriumhexaphosphat als Dispergierungsmittel.
II	Kombinierte Sieb- und Sedimentationsanalyse nach Entfernung des organischen Anteils durch Anwendung von Wasserstoffperoxid.
III	Laserdiffraktometrie mit vorangegangener Entfernung des organischen Anteils mit Wasserstoffperoxid (Extern)
IV	Laserdiffraktometrie ohne vorangegangener Entfernung des organischen Anteils mit Wasserstoffperoxid (Extern)

Tab. 2-3: Versuche zur Bestimmung der Kornverteilung

d) *Bestimmung der Korndichte*

Versuchs-Nr.	Versuch	Bedingungen
I	Kapillarpyknometer	Bestimmung an getrockneten Proben bei 105 °C für 24 h (3 fach)
II	Kapillarpyknometer	Bestimmung an erdfeuchten Proben (3 fach)
III	Gaspyknometer	Bestimmung an getrockneten Proben bei 105 °C für 24 h (3 fach)
IV	Luftpyknometer	Bestimmung an getrockneten Proben bei 105 °C für 24 h (3 fach)

Tab. 2-4: Versuche zur Bestimmung der Korndichte

e) *Bestimmung der Plastizitätsgrenzen*

Versuchs-Nr.	Versuch	Bedingungen
I	Ausrollgrenze	Bestimmung nach DIN EN ISO 17892-12:2020-07
II	Fließgrenze mit Casagrande-Gerät	Bestimmung nach DIN EN ISO 17892-12:2020-07 mit stufenweiser Verringerung des Wassergehaltes
III	Fließgrenze mit Casagrande-Gerät	Bestimmung nach DIN EN ISO 17892-12:2020-07 mit stufenweiser Erhöhung des Wassergehaltes
IV	Fließgrenze mit Fallkugerversuch	Bestimmung nach DIN EN ISO 17892-12:2020-07 mit stufenweiser Verringerung des Wassergehaltes
V	Fließgrenze mit Fallkugerversuch	Bestimmung nach DIN EN ISO 17892-12:2020-07 mit stufenweiser Erhöhung des Wassergehaltes

Tab. 2-5. Versuche zur Bestimmung der Plastizitätsgrenzen

2.2.2 Versuche zur Bestimmung der bautechnischen Eigenschaften

Zur Bestimmung der bautechnischen Eigenschaften wurden Versuche zur Verdichtbarkeit, zur Bestimmung der Scherparameter, zum Spannungs-Verformungsverhalten sowie zur Wasserdurchlässigkeit durchgeführt. Die nachfolgenden Tabellen (Tab. 2-6 bis Tab. 2-9) geben eine Übersicht über die berücksichtigten Versuchsrandbedingungen:

a) Untersuchungen zur Verdichtbarkeit

Versuchs-Nr.	Versuchsdurchführung nach DIN 18127:2012-09 mit folgenden Modifikationen:
I	Bestimmung der Verdichtbarkeit nach Trocknung des Versuchsmaterials auf einen Wassergehalt leicht (etwa 5-10%) unter dem optimalen Wassergehalt und schrittweiser Wasserzugabe.
II	Bestimmung der Verdichtbarkeit nach Trocknung des Versuchsmaterials auf einen Wassergehalt weit ($\geq 20\%$) unter dem optimalen Wassergehalt und schrittweiser Wasserzugabe.
III	Bestimmung der Verdichtbarkeit durch Trocknung des Versuchsmaterials ab einem Wassergehalt von etwa 5-10 M.-% über dem Optimum und schrittweiser Wassergehaltsreduktion durch schonende Trocknung (voraussichtlich bei Trocknungstemperatur $< 60^\circ\text{C}$).

Tab. 2-6. Versuche zur Verdichtbarkeit

b) Bestimmung der Scherparameter

Versuchs-Nr.	Bedingungen
I	Bestimmung der Scherparameter im direkten Scherversuch nach DIN EN ISO 17892-10:2019-04
II	Bestimmung der Scherparameter im CU-Versuch (Triax) nach DIN EN ISO 17892-9:2018-07
III	Bestimmung der Scherparameter im CD-Versuch (Triax) nach DIN EN ISO 17892-9:2018-07

Tab. 2-7: Versuche zur Bestimmung der Scherparameter

c) Bestimmung der Spannungs-Verformungseigenschaften

Versuchs-Nr.	Bedingungen
I	Bestimmung der Spannungs-Verformungseigenschaften gesättigter Proben bei gleichzeitiger Messung des Porenwasserdrucks und Beobachtung der Kriechverformungen bei unterschiedlichen Spannungen
II	Bestimmung der Spannungs-Verformungseigenschaften im teilgesättigten Zustand (Einbauwassergehalt) in einer Rowe-Barden-Zelle und Beobachtung der Kriechverformungen.
III	Bestimmung der Spannungs-Verformungseigenschaften im teilgesättigten Zustand in einer Saugspannungs-kontrollierten Oedometerzelle nach BIRLE (2012) und Beobachtung der Kriechphase

Tab. 2-8: Versuche zur Bestimmung der Spannungs-Verformungseigenschaften

d) *Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit*

Versuchs-Nr.	Versuchsdurchführung nach DIN EN-ISO 17892-11:2021-03 mit folgenden Modifikationen
I	Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit bei 10 kPa Differenzdruck zwischen Porenwasser und Zellenwasser
II	Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit bei 30 kPa Differenzdruck zwischen Porenwasser und Zellenwasser (2-fach)
III	Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit bei 50 kPa Differenzdruck zwischen Porenwasser und Zellenwasser

Tab. 2-9: Versuche zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit

3 Grundlagen und Literaturlauswertung

3.1 Entstehung und Eigenschaften von Böden mit organischen Bestandteilen

Böden mit organischen Bestandteilen umfassen ein breites Spektrum an Geomaterialien, die sich durch unterschiedliche organische Substanz, Textur und Wassergehalt sowie eine sehr variable chemische Zusammensetzung auszeichnen. Organische Stoffe in Böden bestehen aus komplexen Mischungen von pflanzlichen und tierischen Überresten, die in unterschiedlichem Maße zersetzt werden.

Organische Stoffe können in oberirdische und unterirdische Fraktionen unterteilt werden. Oberirdisches organisches Material umfasst Pflanzenreste und tierische Rückstände; unterirdisches organisches Material besteht aus lebender Bodenfauna und Mikroflora, teilweise abgebauten Pflanzen- und Tierresten und Huminstoffen.

3.2 Erdbautechnische Eigenschaften

3.2.1 Allgemeines

Zur Beurteilung der erdbautechnischen Verarbeitbarkeit eines Bodens sowie der Standfestigkeit und der Dauerhaftigkeit von daraus errichteten Bauwerken sind vorrangig Kenntnisse zur Verdichtbarkeit, zur Scherfestigkeit und dem Verformungsverhalten relevant. Über die erdbautechnischen Eigenschaften organogener Böden und von Böden mit organischen Anteilen zwischen 5 % und 30 M.-% ist in der Literatur allgemein wenig bekannt. Nach EDIL (1997) werden die bodenmechanischen Eigenschaften eines Bodens durch organische Anteile im Bereich von 6 bis 20 M.-% zwar beeinflusst, dieser verhält sich jedoch noch wie ein mineralischer Boden. Über 20 M.-% organische Anteile in Böden führen dazu, dass diese die bodenmechanischen Eigenschaften zunehmend dominieren. Organische Anteile in dieser Größenordnung führen in der Regel zu einer hohen Kompressibilität, einem hohen Wassergehalt, geringen Scherfestigkeit, geringen Durchlässigkeit und einer schlechten Verdichtbarkeit der Böden. Oberflächen-Torf weist hohe Porositäten und hydraulische Konduktivitäten auf, die mit feinem Sand vergleichbar sind, während die Porosität bei Konsolidierung schnell abnimmt und die hydraulische Konduktivität mit der von Ton vergleichbar wird (DHOWIAN UND EDIL 1980).

3.2.2 Bestimmung des Wassergehalts

Der Wassergehalt mineralischer Böden wird durch Trocknung bei 105°C bis zur Massenkonstanz über die Bestimmung des Gewichtsverlustes ermittelt. Die Trocknung erfolgt dabei über einen Zeitraum von 16 Stunden oder länger, bis die Differenz zweier aufeinanderfolgender Wägungen 0,1 % nicht übersteigt. Bei Böden, die einen nennenswerten Anteil organischer Bestandteile enthalten, kann der Massenverlust beim Trocknen nicht nur aufgrund des Verlusts von freiem Wasser entstehen, sondern es kann bei Temperaturen über 100°C zur weiteren Verringerung der Trockenmasse einer organischen Probe kommen, die auf Verkohlung und Oxidation empfindlicher organischer Substanz und/oder Verdampfung anderer Substanzen als Porenwasser (MACFARLANE UND ALLEN 1963) zurückzuführen sind. So haben die Autoren eine Verkohlung von Torffasern mit einer Lupe bei Temperaturen von mehr als 85°C beobachtet.

Die Bestimmung des Wassergehalts an organischen Böden oder an Böden mit organischen Bestandteilen durch Trocknung bei 105°C führt deshalb zu einer geringfügigen Überschätzung des tatsächlichen Wassergehalts (O'KELLY 2005a). Es gibt weltweit verschiedene Regelwerke und Veröffentlichungen, die unterschiedliche Trocknungstemperaturen festlegen bzw. empfehlen, z.B von 50°C (DIN EN ISO 17892-

1:2013-04), 60°C (ASTM D2216-10, MIYAKAWA 1959, MARACHI ET AL 1983), 60-70°C (NG UND EISCHENS 1983), 60-80°C (JARETT 1983), 75-80°C (HOSANG UND LOCKER 1971), 80°C (BOYLAN UND LONG 2010), 85°C (GOODMAN UND LEE 1962), and 90°C (LANDVA ET AL. 1983, RILEY 1989). Andererseits fordern einzelne Normen, z. B. ASTM D 2974, und Forscher (HOBBS 1986, SKEMPTON UND PENTLEY 1970, O’KELLY UND SIVAKUMAR 2014), dass organische Böden bei Temperaturen zwischen 100 und 110°C getrocknet werden müssen. In getrockneten Proben verbleiben jedoch bei niedrigeren Trocknungstemperaturen geringe Mengen an Porenwasser, was zu einem niedrigeren Wassergehalt führt. Längere Trocknungszeiten sind erforderlich, um eine konstante Masse bei niedrigeren Trocknungstemperaturen zu erreichen (O’KELLY 2004).

O’KELLY (2004) untersuchte die Empfindlichkeit der Trockenmasse organischer Böden (mit 70 % organischem Anteil) gegenüber steigenden Trocknungstemperaturen von 60 bis 150°C. Die Masse der Probe wurde dabei im Abstand von 4 Stunden aufgezeichnet, um die Massenabnahme zu kontrollieren. Nach der Trocknung bei 150°C wurde der Probe destilliertes Wasser zugegeben und sie wurde über mehrere Tage wiederbefeuchtet. Anschließend wurde die Probe bei 60°C über einen Zeitraum von 14 Tagen bis zur Massenkonstanz getrocknet und die Trockenmasse bestimmt. In Bild 3-1 ist die Reduzierung der Trockenmasse (in Prozent bezogen auf die Trockenmasse bei 60°C) mit zunehmender Trocknungstemperatur dargestellt.

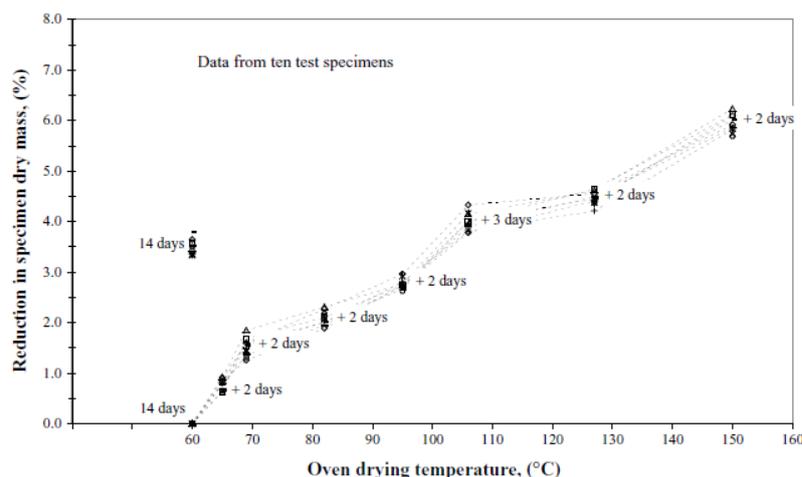


Bild 3-1: Reduzierung der Trockenmasse bei Trocknungstemperaturen nach O’KELLY (2004)

Aus Bild 3-2 ist zu erkennen, dass die Trockenmasse bei einer Trocknungstemperatur von 150°C um 6 % niedriger ist als die zu Beginn bei 60°C ermittelte Trockenmasse. Die Ergebnisse der wiederbefeuchteten Probe ergaben eine Reduktion der Trockenmasse von 3,6 % im Vergleich zur ersten Trocknung bei 60°C. Vergleicht man die Ergebnisse mit der bei 150°C ermittelten Trockenmasse, so zeigt sich, dass die wiederbefeuchtete Probe eine um 2,4 % (6 % - 3,6 %) geringere Reduktion der Trockenmasse erfahren hat. Dies bedeutet, dass bei einer Trocknungstemperatur von 60°C nicht das gesamte Porenwasser verdunstet ist, sondern ein Teil des Wassers in der getrockneten Probe verblieben ist. Über eine grafische Auswertung mit Hilfe der Konstruktion von mehreren Kurven und Tangenten konnte O’KELLY (2004) die Trocknungstemperatur ermitteln, bei der die Oxidation der organischen Substanz beginnt. Bei den von O’KELLY (2004) untersuchten Proben war dies bei 86°C der Fall. Außerdem zeigen die Ergebnisse der Untersuchungen von O’KELLY (2004), dass der Fehler im Wassergehalt, berechnet bei 110°C, deutlich kleiner ist als der Fehler bei einer Trocknungstemperatur von 60°C. Ihre Untersuchungen belegen außerdem, dass der durch

Oxidation bedingte Massenverlust bei der Trocknung mit zunehmendem organischen Anteil und zunehmenden Temperaturen zunimmt. Auch der Grad der Zersetzung der organischen Substanz hat dabei einen Einfluss. So nimmt der beschriebene Massenverlust mit zunehmendem Zersetzungsgrad tendenziell ab.

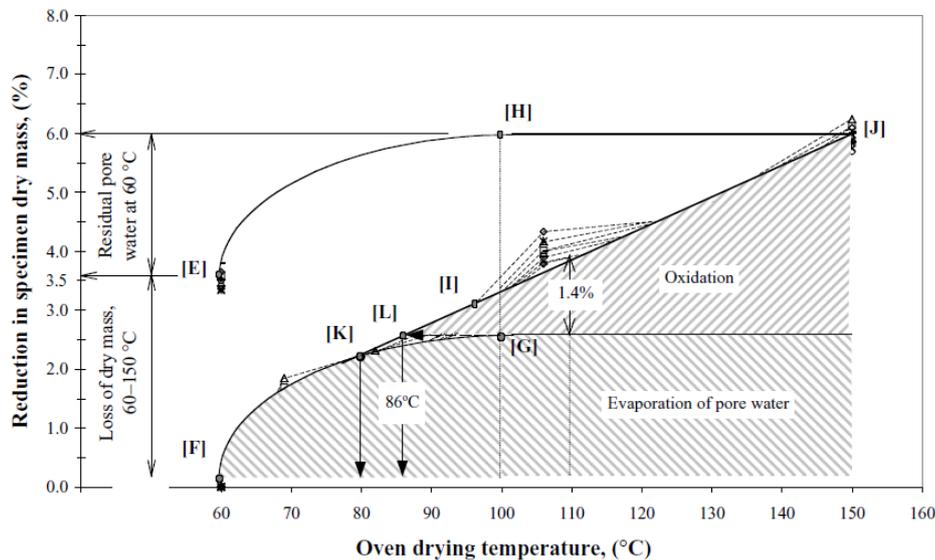


Bild 3-2: Ermittlung der optimalen Trocknungstemperatur nach O'KELLY (2004)

Weiter wurde von O'KELLY eine Beziehung zur Berechnung des Wassergehalts bei einer niedrigeren Temperatur aus dem bei 110°C bestimmten Wassergehalt entwickelt.

$$w_{t^{\circ}C} = \alpha w_{110^{\circ}C} - (1 - \alpha)$$

wobei α das Verhältnis der Trockenmassen bei 110±5°C und einer niedrigeren Trocknungstemperatur t°C im Bereich von 60-110°C ist.

O'KELLY (2005b) berichtete, dass der Fehler bei der Wassergehaltsbestimmung für organische Böden, die bei 80°C getrocknet werden, ähnlich groß ist wie der für anorganische Böden bei einer Trocknungstemperatur von 105°C oder 110°C (abhängig vom jeweiligen Regelwerk). Der Gradient der Trocknungskurve (siehe Bild 3-1) änderte sich von 80 bis 90°C, was auf den Beginn der Oxidation organischer Stoffe hinweist (O'KELLY 2005b). O'KELLY (2005c) entwickelte auch zwei Methoden zum Vergleich des bei verschiedenen Trocknungstemperaturen berechneten Wassergehalts. Das erste Verfahren berechnet den Wassergehalt auf der Grundlage verschiedener Trocknungstemperaturen durch die folgende Gleichung.

$$w_{t2} = \frac{\alpha_{t2}(w_{t1} + 1)}{\alpha_{t1}} - 1$$

wobei α_t das Verhältnis zwischen den Trockenmassen bei den beiden Temperaturen ist. Der Restwassergehalt im Boden nach Trocknung bei einer Temperatur unter 105°C hängt dabei vom organischen Anteil (LOI) ab. Das zweite Verfahren verwendet die folgende Gleichung unter Verwendung eines empirischen Sensitivitätsfaktors β (mit Werten im Bereich von 0,0005 bis 0,0015).

$$\alpha_t = 1 + \beta * LOI(t - 105^{\circ})$$

wobei α_t das Verhältnis der Trockenmassen bei 110±5°C und einer niedrigeren Trocknungstemperatur t im Bereich von 60°C -105°C ist. LOI bezeichnet den Glühverlust (Anwendungsbereich für Werte LOI ≥ 5 %).

O'KELLY UND SIVAKUMAR (2014) folgerten aus Experimenten an Torf, dass die Massenreduktion beim Trocknen bei 80°C bis 110°C so gering ist, dass die Wassergehaltsbestimmung für Böden mit organischem Gehalt $\leq 30\%$ nicht signifikant beeinflusst wird. Daher empfehlen sie, den routinemäßigen Wassergehalt für Böden mit organischen Anteilen bei $105 \pm 5 \text{ °C}$ zu bestimmen.

Zusammenfassend können für den Wassergehalt folgende Tendenzen aus den Literaturwerten abgeleitet werden:

- Bei organogenen Böden wird der bei 105 oder 110°C bestimmte Wassergehalt überschätzt, während der bei niedrigeren Temperaturen (z.B. 60°C) bestimmte Wassergehalt unterschätzt wird.
- Je höher der organische Gehalt (Glühverlust) ist, desto höher ist der Massenverlust beim Trocknen von 60 auf 150°C. Der Massenverlust nimmt mit zunehmendem Grad der Zersetzung ab.
- Leichte Verkohlung der organischen Substanz wird ab 85°C beobachtet.
- Die Menge an Porenwasser, die bei Temperaturen unter 105°C in den Poren verbleibt, ist abhängig vom organischen Gehalt.
- Mit zunehmendem organischen Anteil nimmt die optimale Trocknungstemperatur nach O'KELLY (2005b) leicht zu.
- Obwohl O'KELLY (2005b) eine neue Methode zur Bestimmung der optimalen Trocknungstemperatur entwickelt hat, empfiehlt er routinemäßige Wassergehaltsbestimmungen, die bei $105 \pm 5 \text{ °C}$ durchgeführt werden sollten.

3.2.3 Bestimmung des Glühverlustes

Für die Identifizierung und Klassifizierung organogenen Böden werden verschiedene Parameter herangezogen, wie z.B. Humifizierungsgrad, Wassergehalt, pflanzliche Struktur, Fasergehalt, pH-Wert, Plastizität und Zusammensetzung der organischen Substanz (HUANG ET AL., 2009). In der Ingenieurpraxis ist der organische Gehalt der am häufigsten verwendete Parameter zur Klassifizierung von Böden mit organischen Bestandteilen und die meisten bodenmechanischen Eigenschaften organischer Böden stehen im Zusammenhang mit dem organischen Gehalt. In organischen Böden ist die organische Substanz im Allgemeinen brennbar, während der mineralische Bestandteil nicht brennbar ist.

Eine Überprüfung der vorhandenen Literatur zeigt, dass es keine allgemein anerkannte Methode zur Bestimmung des organischen Gehalts in Böden gibt. Der organische Gehalt im Boden wird gemessen, indem die organische Substanz entfernt und quantifiziert wird. In der Literatur gibt es viele verschiedene Methoden zur Bestimmung des organischen Gehalts, wobei sich diese in direkte und indirekte Methoden unterteilen lassen (siehe Bild 3-3).

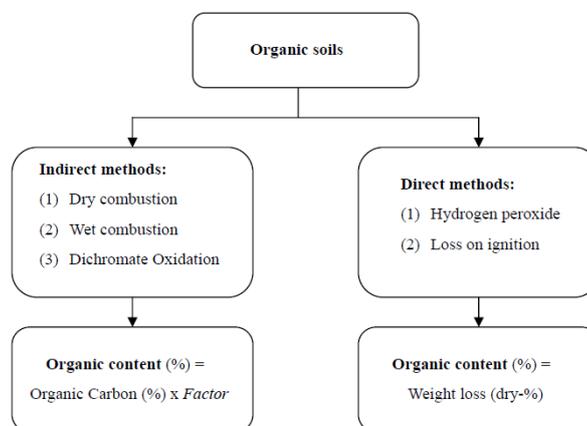


Bild 3-3: Verfahren zur Bestimmung des organischen Gehalts in Böden nach HUANG ET AL. (2009)

Bei den direkten Verfahren wird der organische Gehalt eines Bodens direkt gemessen. Glühverlust und Wasserstoffperoxid-Aufschluss sind die beiden Hauptmethoden dieser Kategorie. Bei den indirekten Verfahren wird die Konzentration des organischen Kohlenstoffs mit chemischen Methoden gemessen. Die Menge der organischen Substanz wird dann bestimmt, indem die Konzentration des organischen Kohlenstoffs mit einem Faktor multipliziert wird, um die in der Regel unvollständige Oxidation zu korrigieren. Der Multiplikationsfaktor hängt dabei von der Bodenart ab (HOOGSTEEN ET AL., 2015). Der Glühverlust ist eine der am häufigsten verwendeten Methoden und basiert auf der thermischen Zersetzung der organischen Substanz. Die Regelwerke geben dabei verschiedene Temperaturen für die Glühverlustbestimmung vor. Nach DIN 18128:2002-12 muss der Boden zuerst bei 105°C und dann bei 550°C bis zur Massenkonzanz getrocknet werden. ASTM D2974-07 und BS 1377-3:1990 gibt Glühtemperaturen von 440°C und 750°C vor. Dabei ist zu beachten, dass die Ergebnisse der Glühverlustversuche empfindlich auf die Glüh-temperatur und die -dauer sind. Der Hauptgrund dafür ist, dass die Trocknung bei 440°C nicht nur zum Abbau der organischen Substanz führt, sondern auch zum Verlust des in einigen Tonmineralen vorhandenen Strukturwassers (HERRMANN ET AL. 2014). Darüber hinaus kann die Trocknung im Ofen auch zur Dehydroxylierung von Aluminosilikaten und zur Zersetzung von anorganischen Karbonaten führen. Dieser zusätzliche Gewichtsverlust wirkt sich zusätzlich auf die Ergebnisse aus, was zu einer Überschätzung des organischen Gehalts des Bodens führt (HUANG ET AL. 2009). DE VOS ET AL. (2005) haben Korrekturfaktoren vorgeschlagen, um den Wasserverlust von Tonmineralien zu berücksichtigen. HOUBA ET AL. (1997) schätzten dafür einen Korrekturfaktor für den Glühverlust empirisch für niederländische Böden für eine Glühdauer von 3 Stunden bei 550°C ab. Da Dehydrierung und Dehydroxylierung sowohl temperatur- als auch zeitabhängig sind (GRIM, 1953), kann der Korrekturfaktor, der von HOUBA ET AL. (1997) vorgeschlagen wurde, nur unter den gleichen Glühbedingungen angewendet werden.

Im Hinblick auf die empfohlene Glüh-temperatur und Glühdauer gibt es in der Literatur eine große Bandbreite zwischen 300°C und 850°C (BALL 1964, ABELLA UND ZIMMER 2007) bzw. 2 Stunden und 28 Stunden (RANNEY, 1969; KONEN ET AL., 2002). BALL (1964) beobachtete, dass eine Glüh-temperatur von 375°C für 16 Stunden genauere Werte liefert als bei 850°C für 0,5 Stunden, da bei höheren Temperaturen mehr strukturelle Wasserverluste auftreten. Unter 375°C besteht jedoch ein großes Risiko einer unvollständigen Verbrennung. HOOGSTEEN ET AL (2015) berichten, dass eine Probenmasse von mindestens 20 g und eine Temperatur von mindestens 550°C verwendet werden sollte. Es sollte immer ein bodenspezifischer Korrekturfaktor für die vorhandenen Tonminerale verwendet werden, um Überschätzungen zu vermeiden. Mehrere Forscher haben deshalb auch vorgeschlagen, dass der Glühverlust im Allgemeinen nur zur Schätzung des organischen Kohlenstoffs im Boden – „Soil Organic Carbon“ (SOC) verwendet werden sollte und nicht zur Bestimmung des organischen Anteils – „Soil Organic Matter“ (SOM), z.B. BROADBENT, 1953; NELSON UND SOMMERS, 1996; SCHULTE UND HOPKINS, 1996). Die Messgenauigkeit des Glühverlustes ist vergleichbar mit der bei der TOC-Bestimmung, wobei mit der TOC-Bestimmung geringe organische Kohlenstoffanteile – „Organic Carbon“ (OC)-Gehalte - zuverlässiger quantifiziert werden können (DE VOS ET AL., 2005).

Die Wasserstoffperoxid (H₂O₂) -Methode basiert auf dem Abbau von organischer Substanz durch eine alkalische Lösung. Wasserstoffperoxid wird der Probe zugegeben, bis die Blasenbildung aufhört, anschließend wird die Probe bei 105°C im Ofen getrocknet. Diese Methode ist schnell und einfach, jedoch kann die Oxidation der organischen Bestandteile unvollständig sein. Die Methode wird deshalb in der Regel nicht verwendet, um die organische Substanz in Böden zu quantifizieren, aber es ist ein Verfahren, das häufig zur Vorbehandlung von Böden vor der Bestimmung der Korngrößenverteilung der anorganischen Fraktion verwendet wird (SCHUMACHER, 2002).

Mit den indirekten Methoden wird die Menge des gesamten organischen Kohlenstoffs bestimmt. Es gibt zwei Verfahren zur Bestimmung des organischen Gehalts durch indirekte Methoden. Bei der ersten indi-

rekten Methode werden der Gesamtkohlenstoffgehalt und der anorganische Kohlenstoffgehalt getrennt ermittelt und die Differenz der beiden ergibt den organischen Kohlenstoffanteil. Bei der zweiten Methode wird der anorganische Kohlenstoff entfernt bevor der Gesamtkohlenstoff bestimmt wird. Der gesamte organische Kohlenstoffgehalt kann dann als gleich dem bestimmten gesamten Kohlenstoffgehalt angenommen werden. Es gibt drei verschiedene Methoden, um den organischen Gehalt zu bestimmen - Trockenverbrennung, Nassverbrennung und Dichromatoxidation. Die Trockenverbrennung ist ein Verfahren, das auf dem Prinzip der Oxidation von organischem Kohlenstoff und der thermischen Zersetzung anderer Karbonatminerale basiert. Die Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs durch trockene Verbrennung wird in der DIN EN 15936:2012 geregelt. Die Böden werden vorbehandelt, um anorganischen Kohlenstoff vor der trockenen Verbrennung zu entfernen. Um den organischen Kohlenstoffgehalt zu ermitteln wird das bei der Verbrennung entstehende Kohlendioxid gesammelt. Die Menge an CO₂ wird durch Titration und gravimetrische Messung quantifiziert. Sowohl bei der Nassverbrennung als auch bei der Dichromatoxidation werden die Böden mit Kaliumdichromat und Schwefelsäure behandelt. Bei der Nassverbrennung wird wiederum das entstandene CO₂ zur Bestimmung der Menge an organischem Kohlenstoff herangezogen. Bei der Dichromatoxidation (auch bekannt als Walkley Black Methode) bleiben die überschüssigen/ungenutzten Chromionen nach der Oxidation in der Lösung und werden durch Titration oder farbgebende Verfahren gemessen, um die Menge an organischem Kohlenstoff zu bestimmen. Die Walkley Black (WB) Methode hat den Nachteil, dass die Ergebnisse im Vergleich zur trockenen Verbrennung im Allgemeinen geringere Werte ergeben (ca. 59 % bis 88 % der Werte der trockenen Verbrennung), sie ist aber relativ schnell, einfach und kostengünstig (KRISTL ET AL., 2016).

Thermische Analysen werden zur Charakterisierung der mineralischen und organischen Komponenten im Boden eingesetzt. Bei der thermogravimetrischen Analyse wird der Massenverlust der Probe im Laufe des Trocknungsprogramms ständig überwacht. PLANTE ET AL. (2009) überprüften die Anwendung von Thermoanalyseverfahren z.B., Thermogravimetrische Analyse (TGA), Differentialthermoanalyse (DTA), dynamische Differenzkalorimetrie (differential scanning calorimetry) in der Bodenkunde. Die Untersuchungen zielten darauf ab, zu verstehen, wie ein Boden auf den Eintrag von thermischer Energie in Form von Massenverlust, Temperaturänderungen und Energieadsorption reagiert. Die Thermoanalyse zeigt, dass bei thermischer Beanspruchung organischen Stoffe durch Oxidation Energie freigesetzt (exotherm), während Minerale bei thermischer Beanspruchung Energie verbrauchen (endotherme Reaktion). Sie kann verwendet werden, um zu beurteilen, ob der Gewichtsverlust durch Oxidation der organischen Substanz oder durch Dehydroxylierung von Mineralen entsteht (HUANG ET AL., 2009). Bei der thermogravimetrischen Analyse wird der Boden in eine Kammer gegeben und beginnend bei Raumtemperatur mit gleichmäßiger Temperaturerhöhung getrocknet. TGA-Analysen belegen, dass der Glühverlust bei niedrigen Werten des organischen Gehalts ungenau sein kann (HUANG ET AL., 2009). Bei der Differentialthermoanalyse (DTA) wird die gleiche Menge an thermischer Energie auf eine Bodenprobe und eine Referenzsubstanz aufgebracht und es wird die Temperaturdifferenz zwischen Probe und Referenzsubstanz gemessen. Diese gibt einen Hinweis auf mögliche exotherme oder endotherme Prozesse in der Bodenprobe. Die Dehydroxylierung von Mineralen und die Verdampfung von Wasser sind endotherme Reaktionen, während die Oxidation von organischer Substanz exotherme Reaktionen sind. Im Hinblick auf die experimentellen Randbedingungen haben sich die Verwendung eines leeren Tieglens (aus Platin/Rhodium) als Referenzmedium und ein Temperaturgradient von 10°C/min als geeignet herausgestellt. Die dynamische Differenzkalorimetrie (Differential Scanning Calorimetry – DSC) ist eine aus der DTA weiterentwickelte Methode und erlaubt die Ableitung kalorischer Kenngrößen. Die Ergebnisse von DTA, DSC wie im Bild 3-4 helfen bei der Unterscheidung zwischen den beiden Reaktionen.

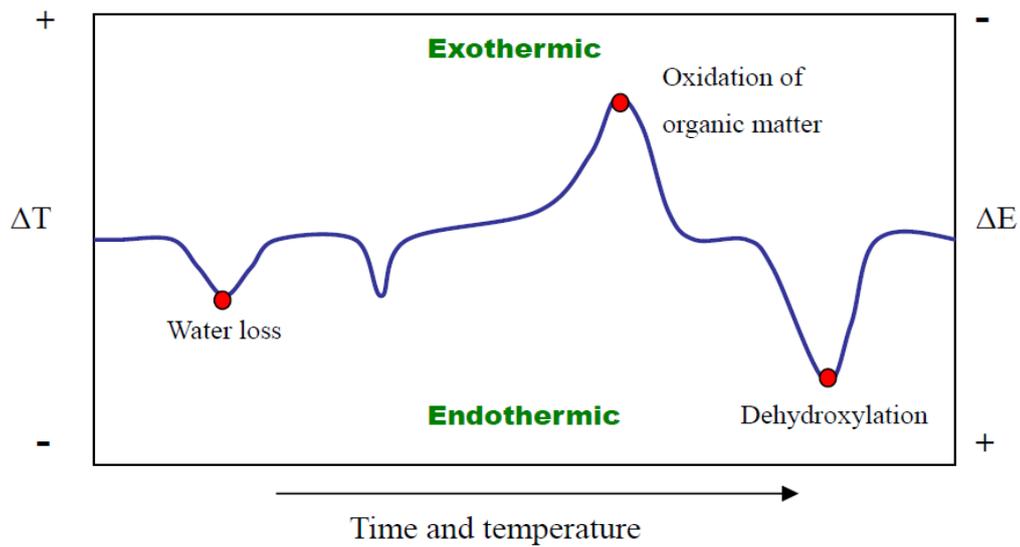


Bild 3-4: Typisches Ergebnis einer Differenz-Thermoanalyse (DTA) bzw. einer dynamischen Kalorimetrie (DSC) nach HUANG ET AL. (2009)

HUANG ET AL. 2009 führten eine Studie an 6 Böden durch, wobei sie Massenverluste bereits vor Erreichen einer Temperatur von 120°C (siehe Bild 3-5) beobachteten. Das Gleiche spiegelte sich in den DSC-Kurven wieder, die einen endothermen Peak (60-70°C) im Zusammenhang mit der Verdampfung von Oberflächenwasser und einen weiteren endothermen Peak (120 -150°C) im Zusammenhang mit der Entwässerung von Zwischenschichtwasser zeigen. Die thermische Analyse ergab zudem einen endothermen Peak bei 480°C bis 500°C. Es wurde auch eine Röntgenografische Analyse- „X Ray Diffraction“ (XRD) durchgeführt, die eine Dehydroxylierung von Kaolinit bei 500°C nachweist.

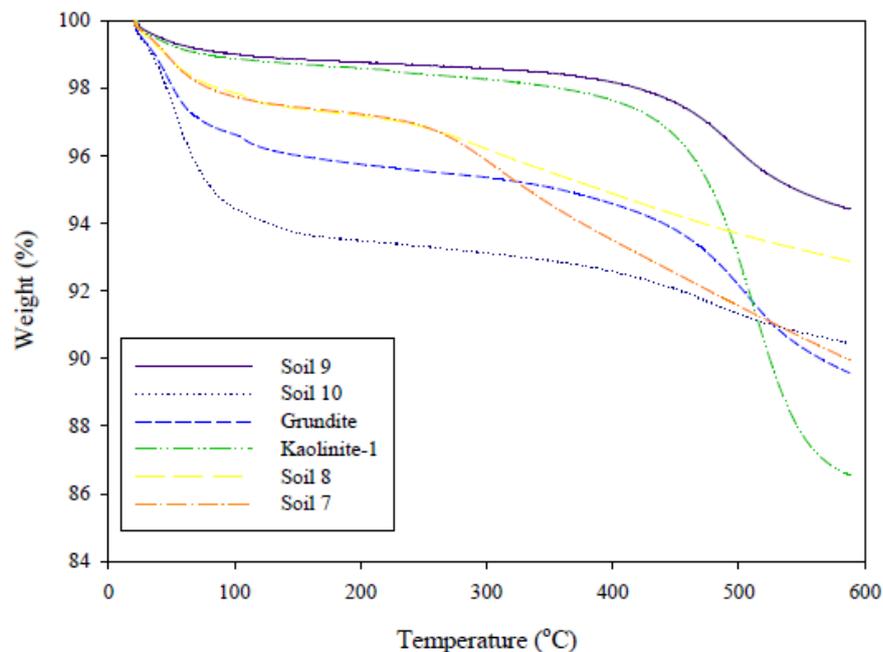


Bild 3-5: Ergebnisse der Thermogravimetrische Analyse (TGA) an organischen Böden nach HUANG ET AL. (2009)

Die experimentellen Bedingungen (Tiegelmaterial, Trocknungsrate, Probenmenge, Verwendung von Referenzmaterial) wurden hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf den exothermen Bereich bei Thermoanalysekurven getestet (FERNÁNDEZ ET AL. 2011).

TURNER UND SCHNITZER (1962), SCHNITZER ET AL. (1964) und SCHNITZER UND HOFFMAN (1965) beobachteten an Bodenumusstoffe zwei exotherme Spitzen zwischen 200°C und 500°C. ESCUDEY ET AL. (1999) beschreiben anhand von Versuchen, dass die Trocknung von organischem Bodenmaterial zu einer Dehydrierung (105-220 °C), einer weiteren Dehydrierung von organischen Stoffen und einer Dehydroxylierung von Allophon (220-280 °C), einer Dehydrierung und Decarboxylierung von organischem Material und einer weiteren Dehydroxylierung von Allophon (280-370 °C), einer Decarboxylierung von organischem Material (370- 420 °C) und schließlich einer Oxidation von organischem Material (420-500 °C) führt. Es wurden zwei exotherme DSC-Hauptspitzen identifiziert, die auf den Verlust organischer Substanz in Böden zurückzuführen sind. Die erste, bei etwa 300-350°C, wurde der Verbrennung von Kohlenhydraten und anderen aliphatischen Verbindungen zugeschrieben, während die zweite Spitze bei 400-450°C dem Verlust von aromatischen Verbindungen zugeschrieben wurde.

MIYAZAWA (2000) berichtete über vier charakteristische Bereiche im thermogravimetrischen Diagramm eines roten Latossolbodens. Der erste Bereich (<100°C) zeigte Massenverlust durch Wasserverflüchtigung; der zweite Bereich (200-280°C) zeigte Massenverlust durch Oxidation von organischem Material; Massenverlust durch Kohlenstoffoxidation organischer Substanz wurde im dritten Bereich beobachtet und im vierten Bereich war der Massenverlust auf die Dehydroxylierung von Metallhydroxiden zurückzuführen (siehe Bild 3-6).

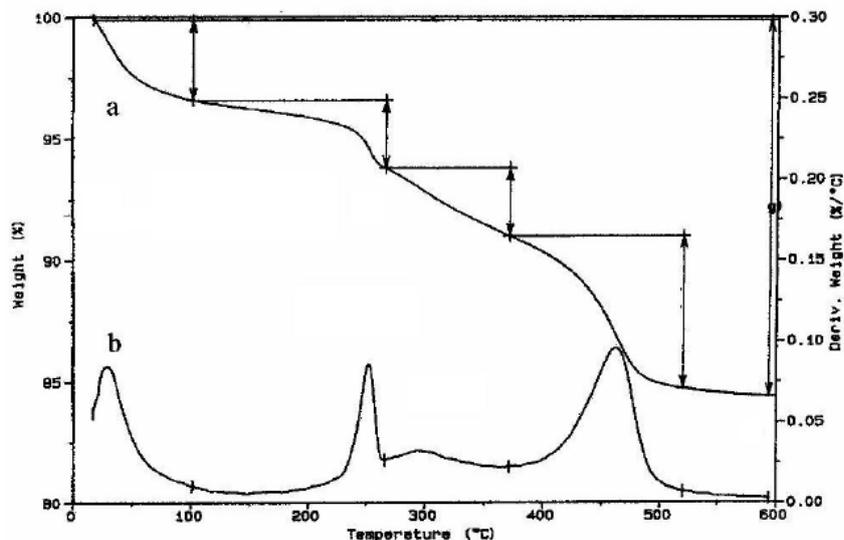


Bild 3-6: Thermogravimetrisches Diagramm für roten Latossol (a) relativer Massenverlust (b) differentieller Massenverlust nach MIYAZAWA ET AL. (2000)

SIEWERT (2004) analysierte TGA-Kurven und teilte den thermischen Zersetzungsprozess von Böden ebenfalls in vier Temperaturintervalle ein. Der in den organischen Böden vorhandene Mineralbestand kann mit einer röntgenografischen Analyse (XRD) analysiert und zur Interpretation der Ergebnisse der thermogravimetrischen Analyse (TGA) verwendet werden. Wenn Röntgenstrahlen mit einer kristallinen Substanz interagieren, entsteht ein Diffraktionsmuster, das als Diffraktogramm bezeichnet wird. Die Intensität des gebeugten Strahls bildet ein Diffraktionsmuster (wie im Bild 3-7), das Informationen über die Probe liefert. Die Position und relative Intensität einer Reihe von Peaks wird herangezogen, um experimentelle Daten

an die Muster der Referenzdatenbank anzupassen. Eine ordnungsgemäße Probenvorbereitung (Trocknen, Zerkleinerung, Vorbehandeln) ist vor der Durchführung der XRD-Analyse unerlässlich.

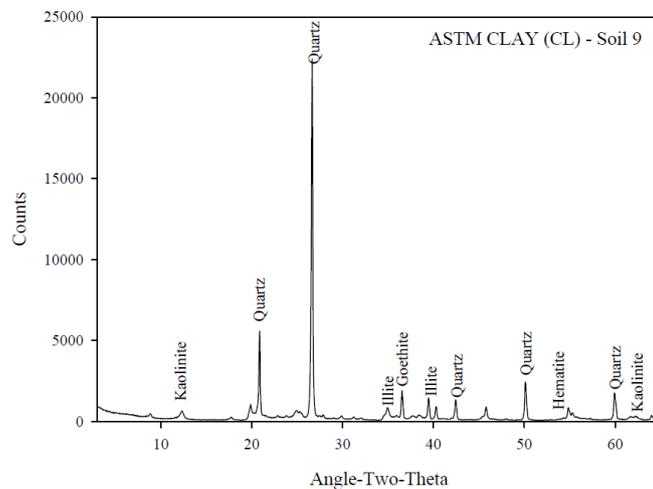


Bild 3-7: Röntgenografische Analyse (XRD)-Spektrum für tonhaltige Böden nach HUANG ET AL. (2009)

Aus der Literatur kann folgendes zusammengefasst werden:

- Der Glühverlustversuch, der zur Bestimmung des organischen Gehalts am weitesten verbreitet ist, ist empfindlich auf die Glühtemperatur und -dauer. Der Massenverlust ist nicht nur auf die Oxidation der organischen Substanz zurückzuführen, sondern auch auf andere Faktoren und kann daher zu einer Überschätzung des organischen Gehalts führen.
- Die Wasserstoffperoxid-Aufschlussmethode ist eine schnelle und einfache Methode, aber die Oxidation der organischen Substanz kann unvollständig sein. Diese Methode kann aber zur Vorbehandlung von Böden vor der Bestimmung der Korngrößenverteilung der anorganischen Fraktion eingesetzt werden.
- Die indirekten Methoden (Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs) können mit einem geringeren Aufwand zur Probenvorbereitung, kürzeren Analysenzeiten und unter Verwendung eines automatisierten Systems durchgeführt werden.
- Thermische Analysen ermöglichen es zu untersuchen, wie andere Prozesse neben der Oxidation zu Massenverlusten von organischen Stoffen bei Temperaturbeanspruchungen von bis zu 800°C beitragen. Die thermische Analyse beruht auf der Analyse exothermer Reaktionen (Oxidation organischer Substanz) und endothermer Reaktionen (Verdampfung von Wasser, Dehydroxylierung von Mineralien). Die Ergebnisse der thermischen Analyse zeigen den Massenverlust bei verschiedenen Temperaturen und können mit den verschiedenen Reaktionen verknüpft werden.
- Die Ergebnisse der thermischen Analyse können mit Hilfe der röntgenografisch (XRD) bestimmten mineralischen Komponenten interpretiert werden.

3.2.4 Bestimmung der Korngrößenverteilung

Die experimentell bestimmten Korngrößen von feinkörnigen Böden, die in der Regel mit Hilfe der Sedimentationstechnik analysiert werden, kann durch das Vorhandensein von organischer Substanz beeinflusst werden. Die ermittelte Korngrößenverteilung wird dabei durch zwei Mechanismen beeinflusst: Aggregation (Verklumpung von Partikeln) und Dispergierung. Das Vorhandensein von organischer Substanz beeinflusst die Aggregation auf drei Arten (HUANG ET AL. 2009):

- (a) organische Substanzen verhalten sich als „Bindemittel“ für Tonpartikel.
- (b) organische Stoffe, die Tonpartikel umgeben, sorgen für eine Art Zementierung und Verkapselung, welche die Tonpartikel zusammenhalten.

(c) Bodenpartikel werden durch Pflanzenwurzeln und Fasern mechanisch zusammengehalten. Infolge der Aggregation wird der Tongehalt unterschätzt und der Schluffgehalt überschätzt, sofern die organische Substanz des Bodens nicht vorab entfernt wurde (JENSEN ET AL. 2017) Als Vorbehandlung kann der organische Stoffe entfernt werden, bevor eine Sedimentationsanalyse durchgeführt wird (DIN EN ISO 17892-4:2017-04).

JENSEN ET AL (2017) verwendeten dazu Wasserstoffperoxid, um die Böden vorzubehandeln, und beobachteten, dass das Vorhandensein von organischer Substanz systematische Fehler bei der Ermittlung von Ton- und Schluffgehalten hervorrief. Die Unterschätzung des Tonanteils und die Überschätzung des Schluffanteils mit steigendem organischem Gehalt ist auf die unvollständige Zerlegung von Bodenaggregaten kleiner als 20 µm zurückzuführen. Schluffgroße Mikroaggregate aus organischer Substanz und Ton setzen sich schneller ab und werden als Schluff quantifiziert, obwohl sie, wenn sie vollständig dispergiert sind, als Ton einzustufen wären. Desweiteren können Tonpartikel und Aggregate aus organischer Substanz und Ton nach der Dispergierung ausflocken und als Schluff eingestuft werden. Die Verwendung von Wasserstoffperoxid führt zur Ablösung von Glimmer, zur Auflösung von Mangandioxid, Karbonaten, Eisen und Aluminium und zur Bildung von Kalzium, Aluminium und Eisenoxalat (MIKHAIL UND BRINER 1978). ANDERSON (1963) hat angegeben, dass Natriumhypochlorit für die Zerstörung organischer Substanz effektiver ist als Peroxid. Das mit dem Einsatz von Wasserstoffperoxid verbundene Aufschäumen und Kochen kann durch den Einsatz von Natriumhypochlorit vermieden werden. Um die Aggregation von Partikeln zu verhindern, können verschiedene Dispergierungsmittel eingesetzt werden. WINTERMEYER UND KINTER (1955) stellten eine Studie über die Wirksamkeit verschiedener Dispergierungsmittel bei einer Vielzahl von Böden vor. Es wurde beobachtet, dass sich Natriumtripolyphosphat, Natriumhexametaphosphat und Natriumtetraphosphat als effektiv erwiesen. DIN EN ISO 17892-4:2017-04 empfiehlt die Verwendung von Natriumhexaphosphat (ca. 40g/l) oder Natriumpyrophosphat (ca. 20g/l) zur Sedimentation, beschreibt aber gleichzeitig, dass es kein optimales Dispergierungsmittel für alle Böden gibt. ROBINSON (1933) hat berichtet, dass das beste Dispergierungsmittel Natriumhydroxid ist, welches zum Erzielen möglichst zutreffender Ergebnisse verwendet werden sollte.

Neben der konventionellen Sedimentationsanalyse und der Pipettiermethode erfreut sich die Laserdiffraktometrie (LDM) großer Beliebtheit, da sie schneller ist und damit das gesamte Korngrößenspektrum erfasst werden kann (FISHER ET AL. 2017). Das Verfahren beruht auf der Analyse des Beugungswinkels des Laserlichtstrahls, wobei der Beugungswinkel einzelner Partikel in umgekehrter Proportion zur Partikelgröße steht und die Intensität des gebeugten Strahls das Maß für die Anzahl der Partikel mit einer bestimmten Querschnittsfläche wiedergibt. Die LDM-Methode verwendet etwa ein Hundertstel der Probenmasse im Vergleich zu Sedimentationstechniken. Die Gewinnung einer zuverlässigen Teilprobe, die repräsentativ für die zu untersuchende Bodenprobe ist, kann jedoch ein Problem darstellen. Die Auswirkung einer Probenvorbehandlung mit Natriumhypochlorit von organischen Böden wurde von FISHER ET AL. (2017) untersucht. Sie führten bei der Laserdiffraktometrie zu geringen Unterschieden im Vergleich zu unbehandelten Proben. Die Ergebnisse der Sedimentationsanalyse und der Laserdiffraktometrie unterscheiden sich aufgrund der unterschiedlichen bodenphysikalischen Eigenschaften, die zur Ermittlung der Partikelgröße herangezogen werden, erheblich. Die Sedimentationsanalyse wertet beispielsweise plättchenförmige Partikel wie z.B. Tonpartikel aufgrund der Anwendung des Stokes'schen Gesetzes als kugelförmige Elemente aus. Die Ergebnisse der Laserdiffraktometrie sind empfindlich gegenüber der zur Auswertung angewendeten Theorie (Fraunhofer-Theorie oder Mie-Theorie), die für die Transformation des Diffraktionsmusters in die Korngrößenverteilung verwendet wird (KONERT UND VANDERBERGHE 1997). FISHER ET AL. (2017) erläutern, dass die Unterschiede zwischen den Ergebnissen der LDM- und der Sedimentationstechnik die verschiedenen physikalischen Prinzipien widerspiegeln, die jeweils verwendet werden, um die tatsächliche dreidimensionale Form der Partikel mit einem eindimensionalen Parameter zu beschreiben. Die verschiedenen Faktoren, die die Ergebnisse einer mit LDM bestimmten Korngrößenverteilung beeinflussen, wurden durch BIEGANOWSKI ET AL. (2018) (siehe Bild 3-8) erläutert.

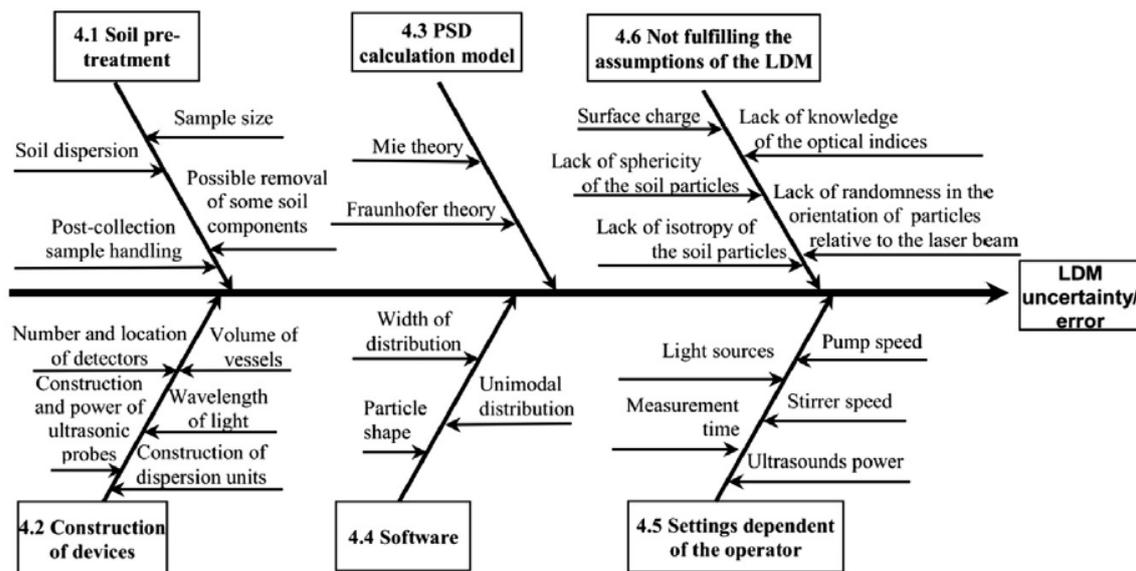


Bild 3-8: Faktoren, die zu Unsicherheiten bzw. Fehlern in den mit der LDM-Methode erhaltenen Ergebnissen führen BIEGANOWSKI ET AL. (2018)

SHEIN ET AL. (2006) erklärten, dass der Unterschied in den Werten zwischen der LDM und Sedimentationsanalyse auf die geringe Festphasendichte organischer Substanz zurückzuführen ist, da die organische Substanz zwar eine Größe von feinem und mittlerem Schluff aufweist, aber bei der Sedimentationsanalyse aufgrund der geringen Dichte in die Kategorie der Tonfraktion fällt.

Zusammenfassend können im Hinblick auf die Bestimmung der Korngrößenverteilung organogenen Böden folgende Tendenzen aus den ausgewerteten Veröffentlichungen abgeleitet werden:

- Organische Stoffe können zu Aggregation oder Dispersion führen, was zu einem unterschätzten Tongehalt und einem zu hohen Schluffgehalt führt.
- Es stehen unterschiedliche Dispergierungsmittel bei der Durchführung der Sedimentationsanalyse zur Verfügung, deren Wirksamkeit aber im Einzelfall überprüft werden muss.
- Ergebnisse der Sedimentationsanalyse (mit/ohne Entfernung von organischem Material) können aufgrund der Aggregation von Partikeln sowie der geringen Dichte der organischen Substanz zu einer fehlerhaften Korngrößenanalyse führen.
- Die Laserdiffraktometrie kann zu reproduzierbaren, hochpräzisen Ergebnissen führen. Die Anwendung auf organische Böden ist aber ähnlich wie die Sedimentationsanalyse mit Schwierigkeiten behaftet.

3.2.5 Bestimmung der Korndichte

Die Korndichte ρ_s der mineralischen Bodenfraktion unterscheidet sich stark von der Dichte pflanzlicher Substanzen. Für Bodenmaterialien, die sowohl organische als auch mineralische Anteile enthalten, hängt die Korndichte des Bodens vom Verhältnis der organischen Substanz zum Mineralstoff ab (RÜHLMANN ET AL. 2006, HERRMANN ET AL. 2014, Bild 3-9). Die Dichte von rein organischen Stoffen ist nicht konstant, sondern variiert je nach Pflanzenart und Grad der Zersetzung. Entsprechend Literaturangaben liegt der Bereich der Korndichte für Torf überwiegend zwischen 1,1 und 2,2 (in Ausnahmefällen bis 2,5) und für Böden mit organischen Anteilen entsprechend höher. Gemäß Engel 2002 kann die Korndichte organischer Böden aus der Korndichte mineralischer Böden und Berücksichtigung des organischen Anteils abgeschätzt werden, sofern der mineralische Boden und der organische Boden ähnliche Konsistenzgren-

zen aufweisen. Unter Berücksichtigung einer Bezugskorndichte für den mineralischen Anteil und den organischen Anteil könnte die Korndichte eines Bodens mit organischen Beimengungen aus dem organischen Gehalt (Glühverlust) bestimmt werden.

Spezifische Korrelationen zwischen Korndichte und Glühverlust bzw. organischem Kohlenstoff (OC) können experimentell für einen bestimmten organischen Boden ermittelt werden (SKEMPTON UND PETLEY, 1970; DEN HAAN UND EL AMIR, 1994, HUAT ET AL. 2011, HERRMANN ET AL. 2014). DEN HAAN UND EL AMIR (1994) haben einen Zusammenhang zwischen Korndichte und dem organischen Kohlenstoffanteil vorgestellt, wobei Tone und Torf von verschiedenen Standorten in den Niederlanden betrachtet wurden. RÜHLMANN ET AL. 2006 und MCBRIDE ET AL. 2011 haben Funktionen zur Abschätzung der Korndichte basierend auf der organischen Substanz des Bodens vorgeschlagen. Es wurde angenommen, dass ein Vorhersagemodell für die Korndichte zutreffendere Prognosen ermöglichen würde, wenn zusätzlich zur organischen Substanz auch der Tongehalt einbezogen würde (SCHJØNNING ET AL 2017).

Die DIN EN ISO 17892-3:2015 empfiehlt die Bestimmung der Korndichte in einem Pyknometer mit einer Kapazität von 100 ml (wenigstens 75 % seines Volumens mit der Probemenge gefüllt) unter Verwendung eines geeigneten organischen Lösungsmittels wie Hexan oder Kerosin. BIELDERS ET AL. (1990) haben die Korndichte eines organischen Bodens mit Hilfe eines Gaspyknometers unter Verwendung von Luft und Helium gemessen. Es zeigte sich dabei, dass bei Versuchen mit Luft keine stabile Messung möglich war, während die Versuche mit Helium als Gasphase stabile Messungen ermöglichten. Die Ursachen beruhen vermutlich auf einem Gasadsorptionsphänomen bei der Verwendung von Luft, was zu höheren Werten führt als die Verwendung der Heliumgasphase.

MACFARLANE UND ALLEN (1965) sprachen sich gegen die Verwendung von Wasser in Untersuchungen zur Korndichte für Ton und feinkörnige Böden aus. Dies ist auf die Kompression von adsorbierten Wasserfilmen durch die Wirkung von austauschbaren Kationen zurückzuführen. Sie empfahlen, anstelle von Wasser die Versuche mit Lösungsmitteln wie Decahydronaphthalin (Decalin) und Tetrahydronaphthalin (Tetralin) durchzuführen. Die Autoren führten Tests mit Wasser, Kerosin und Tetralin durch und stellten fest, dass die Ergebnisse für Kerosin und Tetralin nahe beieinander lagen, während die Ergebnisse für Wasser konstant um bis zu 10 % höhere Werte lieferten. Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass für organische Böden die mit dem Gaspyknometer bestimmte Korndichte zuverlässiger ist als die mit dem Kapillarpyknometer (mit Wasser) bestimmte Korndichte.

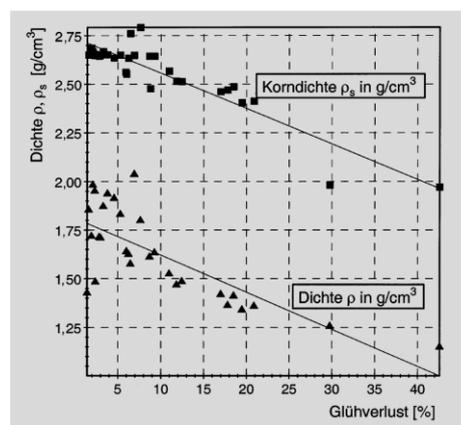


Bild 3-9: Korndichte als Funktion des Glühverlusts nach HERRMANN ET AL. (2014)

Zusammenfassend können für die Korndichte folgende Tendenzen aus den ausgewerteten Veröffentlichungen abgeleitet werden:

- Mit steigendem organischen Anteil nimmt die Korndichte ab.
- Spezielle Lösungsmittel wie Kerosin oder Hexan sind zur Korndichtebestimmung für organische Böden ggf. besser geeignet als Wasser.
- Die Ermittlung der Korndichte mit dem Gaspyknometer führt zu zutreffenderen Ergebnisse im Vergleich zum Kapillarknometer.

3.2.6 Bestimmung der Plastizitätsgrenzen

Die Plastizitätsgrenze eines organogenen Bodens wird im Vergleich zu rein mineralischen Böden durch zwei gegensätzlich wirkende Eigenschaften beeinflusst: einer höheren Wasseraufnahmekapazität und einer Partikelaggregation infolge der organischen Substanz. Die höhere Wasseraufnahmefähigkeit führt zu einer Erhöhung der Plastizitätsgrenzen, während die andere sie verringert. In Summe ist jedoch festzustellen, dass der erste Effekt überwiegt und die Plastizitätsgrenzen sich mit zunehmendem organischen Gehalt erhöhen (HUANG ET AL. 2009). Die Veränderung der Plastizitätsgrenzen mit zunehmendem organischen Anteil ist aus Bild 3-10 ersichtlich.

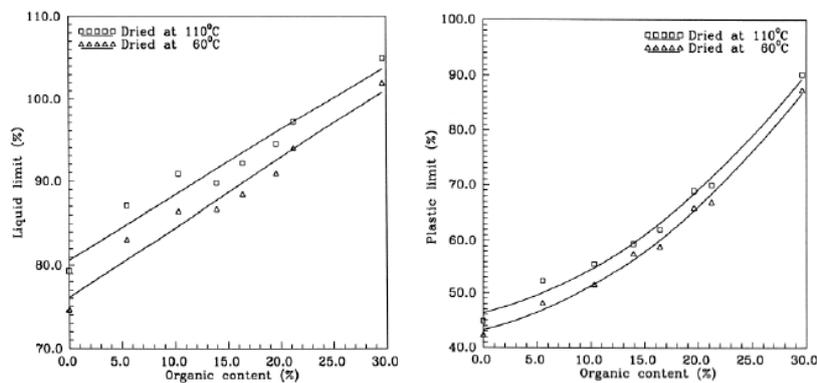


Bild 3-10: Einfluss des organischen Anteils auf die Plastizitätsgrenzen nach ABDALLAH ET AL. (1999)

Die Fließgrenze eines Bodens, der erhebliche Mengen an organischer Substanz enthält, nimmt signifikant ab, wenn der Boden vor Versuchsdurchführung im Ofen getrocknet wird (CASAGRANDE 1948). Dies wurde auf Veränderungen der organischen Kolloide unter der Temperaturbeanspruchung zurückgeführt, dadurch, dass sich die Tonminerale in größeren Aggregaten verbinden und dadurch die Plastizität verringern. Der Vergleich der Fließgrenze vor und nach der Trocknung kann als ein qualitatives Maß für den Gehalt an organischer Substanz verwendet werden (ASTM D2487-10, SN 670 004-2b-NA: 2008.06). Nach ASTM D2487-10 werden Böden als organisch eingestuft, wenn das Verhältnis der Fließgrenze von ofengetrockneten Proben zur Fließgrenze von nicht getrockneten Proben weniger als 0,75 beträgt.

HERRMANN ET AL. (2014) beobachteten, dass nach dem Trocknen bei 105°C eine höhere mechanische Energie zur Homogenisierung der Probe aufgewendet werden muss als für nicht getrocknete Proben. Außerdem wurde festgestellt, dass die Trocknung bei 105°C bei organischen Böden zu einer Abnahme der Fließgrenze führt. So war die Fließgrenze der bei 105°C getrockneten Proben (TOC = 9,97 %) in den Untersuchungen von Hermann ET AL. (2014) um 56 % niedriger als die ohne vorherige Trocknung am Bodenmaterial bestimmte Fließgrenze ($w_L = 120$ %). Bei Böden mit geringeren organischen Anteilen war die durch die Trocknung bedingte Abnahme der Fließgrenze entsprechend geringer.

HUANG ET AL. (2009) entwickelten eine quadratische Gleichung zur Ermittlung des organischen Anteils aus dem Verhältnis der Fließgrenze von ofengetrockneten Proben zur Fließgrenze von nicht getrockneten

Proben (siehe Bild 3-11). Es wurde anhand von experimentellen Untersuchungen festgestellt, dass der organische Gehalt, der bei einem Verhältnis der Fließgrenzen von 0,75 ermittelt wurde, 16,5 % betrug. Das bedeutet, dass Böden, die nach diesem Kriterium (wie in ASTM D2487-10, SN 670 004-2b-NA: 2008.06 beschrieben) als anorganisch eingestuft werden, tatsächlich eine signifikante Menge an organischer Substanz enthalten. Damit ist dieses Klassifizierungskriterium nicht ausreichend für die Bewertung von Böden für Untergrund und Verfüllmaterial, bei denen der zulässige organische Gehalt in vielen Fällen unter 3 % liegt (HUANG ET AL. 2009). Das Fließgrenzenverhältnis ist in Verbindung mit dem Glühverlust zur Klassifizierung organogenen Böden sinnvoll.

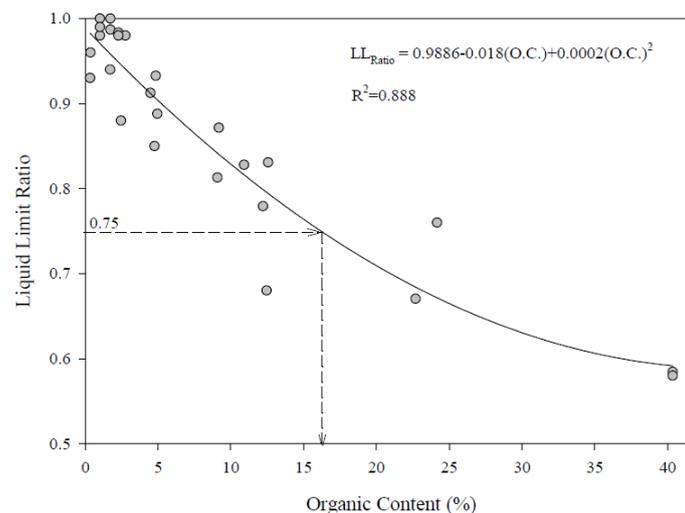


Bild 3-11: Beziehung zwischen organischem Gehalt und Fließgrenzenverhältnis nach HUANG ET AL. (2009)

Die Fließgrenze von Torf und organischen Böden hängt vom Pflanzenmaterial und vom Anteil des vorhandenen Tons ab (HOBBS 1986). Die Fließgrenze steigt in der Regel mit abnehmender Humifizierung und damit steigendem organischen Gehalt. Es wurde außerdem festgestellt, dass sich die Fließgrenze von Torfböden verringert, wenn man die Versuche mit Leitungswasser anstelle von destilliertem Wasser durchführt. Idealerweise werden die Tests mit Wasser durchgeführt, das denselben pH-Wert wie der Boden aufweist. Nach LANDVA ET AL. (1983) weisen Torf und torfhaltige organische Böden mit signifikanten Mengen an Fasermaterial wahrscheinlich keine klar definierten Casagrande-Fließgrenze auf. Viele Forscher (LONG UND BOYLAN 2012, O'KELLY 2013, O'KELLY 2014, MOO-YOUNG UND ZIMMIE 1996) beschreiben, dass Fasern bei der Durchführung des Casagrande-Tests Probleme beim Schneiden der Furche verursachen.

Gemäß O'KELLY (2015) und O'KELLY (2016) korrelieren die Plastizitätsgrenzen für Torf nicht mit dessen mechanischen Festigkeitsverhalten. Plastizitätsversuche an Torf können problematisch sein, da die Torffasern Bewehrungseffekte hervorrufen. Trotz sorgfältiger Probenvorbereitung verbleiben in der Regel Fasern mit mehr als 425 µm Durchmesser in der Probe (O'KELLY 2015).

Trotz der hohen Plastizität des Torfmaterials können Torfproben aufgrund ihrer Faserstruktur bei der Bestimmung der Ausrollgrenze häufig nicht auf einen Durchmesser von 3 mm ausgerollt werden. Die ermittelten Plastizitätsgrenzen sind deshalb abhängig von der Probenvorbereitungsmethode. Daher ist die berechnete Liquiditätszahl kein zuverlässiger Indikator zur Bestimmung der Konsistenz. Index-Tests wie natürlicher Wassergehalt, organischer Gehalt, Fasergehalt und Humifizierungsgrad sind deshalb gemäß O'KELLY (2015) besser zur Materialbeschreibung heranzuziehen.

Aufgrund der beschriebenen Probleme bei der Verwendung von Casagrande-Geräten zur Bestimmung der Fließgrenze wird in letzter Zeit vermehrt der Fallkegelversuche eingesetzt. Die DIN CEN ISO/TS 17892-

12:2004 empfiehlt dabei die Prüfungen vom trockenen Zustand zum nassen Zustand so durchzuführen, dass der Wassergehalt kontinuierlich erhöht wird. Allerdings ist auch eine Durchführung mit abnehmendem Wassergehalt möglich. Jedoch können die beiden Verfahren zu leicht unterschiedlichen Ergebnissen führen, wobei die Bestimmung mit dem Fallkegelgerät gemäß HUANG ET AL. (2009) eine bessere Wiederholbarkeit gewährleistet.

Zusammenfassend können folgende Tendenzen aus den ausgewerteten Literaturquellen abgeleitet werden:

- Die Fließgrenze und die Ausrollgrenze steigen mit zunehmendem organischen Gehalt und nehmen entsprechend mit zunehmendem Zersetzungsgrad ab.
- Die an Proben, die bei 105°C getrocknet wurden, ermittelte Fließgrenze ist deutlich niedriger als die an natürlichen (nicht vorab getrockneten) Proben ermittelte Fließgrenze. Je geringer der organische Gehalt des Bodens ist, umso geringer ist dabei die Differenz zwischen den beiden Werten.
- Die durch Erhöhung des Wassergehalts erhaltene Fließgrenze ist nicht die gleiche wie die durch Verringerung des Wassergehalts bestimmte Fließgrenze. Versuche mit abnehmendem Wassergehalt zeigen zuverlässigere Ergebnisse im Sinne einer besseren Wiederholbarkeit der Ergebnisse.
- Die aus den Plastizitätsgrenzen ermittelten Konsistenzzahl oder Liquiditätszahl sollten nicht als Indikator zur Bestimmung der Konsistenz verwendet werden. Stattdessen sollten andere Indexparameter, wie der natürliche Wassergehalt, der organische Gehalt, der Fasergehalt und der Zersetzungsgrad dazu herangezogen werden.

3.2.7 Bestimmung der Verdichtungseigenschaften

Es ist allgemein bekannt, dass das Vorhandensein von organischer Substanz in Böden ihre technischen Eigenschaften beeinträchtigt. Es wurde von ADAMS (1973) festgestellt, dass die organische Substanz die Dichte des Bodens maßgeblich verringert, wobei das Ausmaß der Verminderung von der Art des organischen Materials abhängt, insbesondere von seiner Trockendichte und Struktur (STONE AND EKWUE 1993).

Der optimale Wassergehalt für die Verdichtung nimmt mit steigendem organischen Gehalt zu, während die Proctordichte abnimmt (HOLTZ UND KRIZEK 1970, SCHMIDT 1965, SOANE 1975, DE KIMPE ET AL. 1982). Der Rückgang der Proctordichte ist auf einen größeren Porenraum und Wassergehalt zurückzuführen, der durch die organische Substanz bedingt wird (DE KIMPE ET AL. 1982). Die Zunahme des optimalen Wassergehalts beruht auf der infolge des organischen Anteils erhöhten Plastizität. Es wurde berichtet, dass ähnlich wie bei mineralischen Böden mit zunehmendem Verdichtungsaufwand die Proctordichte zunimmt, während der optimale Wassergehalt abnimmt (EKWUE UND STONE 1997).

Das Verdichtungsverhalten von Böden wird durch organische Anteile, zusammengefasst nach SOANE (1990) über folgende Eigenschaften und Mechanismen beeinflusst, die je nach Art und Menge des organischen Materials einen unterschiedlich starken Einfluss auf dieses nehmen:

- (a) Bindungskräfte zwischen Bodenpartikeln: Die organische Substanz beeinflusst die Bindung der Bodenpartikel aneinander durch die Form ihrer Moleküle (Kettenmoleküle) sowie durch kapillare Bindungskräfte. Dies führt im bodenmechanischen Verhalten zu einer Erhöhung der Kohäsion zwischen einzelnen Partikeln.
- (b) Elastizität des organischen Materials: Organisches Material weist im Vergleich zu mineralischem Material eine geringere Steifigkeit (höhere Elastizität) auf und beeinflusst so die Steifigkeit des Bodens.
- (c) Verringerung der Dichte: Die Schüttdichte organischer Materialien ist aufgrund der geringeren Korndichte als die von mineralischen Böden.
- (d) Fasern des organischen Materials: Befinden sich faserige Bestandteile im Boden, so können diese durch Aufnahme von Zugkräften der Verformung und Verdichtung des Bodens entgegenwirken.

- (e) Änderung der Oberflächenkräfte: Durch die Anlagerung von organischen Molekülen an der Mineraloberfläche (zum Ausgleich der permanenten Oberflächenladungen) können die zwischen den Bodenpartikeln wirkenden Kräfte beeinflusst werden.
- (f) Einfluss auf die Reibung: Eine organische Beschichtung auf Partikeln und organisches Material zwischen den Partikeln erhöht wahrscheinlich die Reibung zwischen den Partikeln.

ZHAO ET AL. (2008) beobachteten, dass die organische Substanz die Verdichtung auf zwei Arten beeinflusst (a) sie erhöht den Widerstand gegen Verdichtung durch besseren Kontakt zwischen den Bodenpartikeln und (b) ihre geringe Korndichte reduziert die Raumdichte bei hohen organischen Gehalten. In einer Studie von BALL ET AL. (1989) wurde eine Reduktion der Proctordichte von 0,18 g/cm³ pro Anstieg von 1% organischem Kohlenstoff beobachtet.

MALKAWI ET AL. (1999) untersuchten ebenfalls gezielt hergestellte, künstliche Mischungen bis zu organischen Anteilen von mehr als 20 M.-% (Illit/Smektit- Wechsellagerungsmineral und Torf). Von FRANKLIN ET AL. (1973) wurden natürliche Böden mit organischen Anteilen (Oberböden) und Mischungen aus Tonen und Torf untersucht. Auch die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen die oben beschriebenen Tendenzen, wobei das Verdichtungsverhalten der Mischungen und der natürlichen Proben bei vergleichbarem Mineralbestand der anorganischen Anteile (aber abweichender Herkunft des organischen Anteils) von den Autoren als sehr ähnlich bezeichnet wird.

Untersuchungen am Zentrum Geotechnik der TU München bestätigen ebenfalls einen Zusammenhang zwischen Verdichtungsverhalten und organischem Anteil (vgl. HEYER ET AL. 2012 und BIRLE ET AL. 2013). Es handelte sich bei den untersuchten Böden hauptsächlich um organogene Tone aus der Münchner Schotterebene.

BIRLE (2012) führte konventionelle Verdichtungsversuche an Ton mit organischen Beimengungen nach DIN 18127:2012-09 durch. Die Ergebnisse zeigten einen deutlichen Peak mit optimalem Wassergehalt und maximaler Dichte (siehe Bild 3-12a). Zusätzlich wurde ein Proktorversuch ausgeführt, bei dem der erste Prüfkörper beim natürlichen Wassergehalt verdichtet und alle weiteren Prüfkörper vom natürlichen Wassergehalt ausgehend bis zum gewünschten Wassergehalt getrocknet wurden (siehe Bild 3-12b). Aus der Abbildung ist klar zu erkennen, dass bei dieser Versuchsdurchführung kein ausgeprägtes Maximum erkennbar ist. Beim Vergleich eines modifizierten Proctor-Tests mit einem Standardtest wurde keine Zunahme der Trockendichte beobachtet.

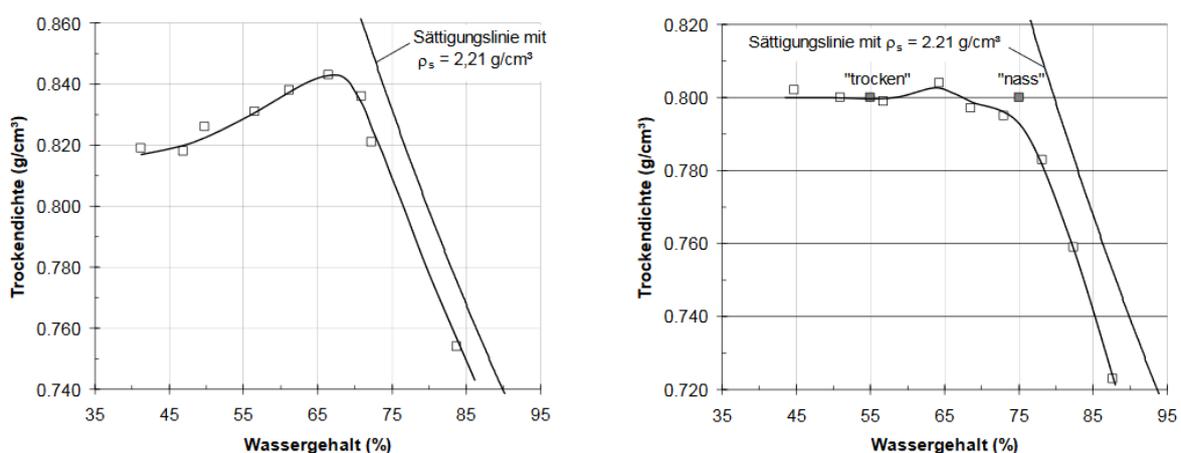


Bild 3-12:(a) Proctorkurve des organogenen Tons (Versuchsdurchführung gemäß DIN 18127:2012-09 mit zunehmendem Wassergehalt) (b) Proctorkurve des organogenen Tons (Versuchsdurchführung mit abnehmendem Wassergehalt (BIRLE 2012))

Zusammenfassend können folgende Tendenzen aus den ausgewerteten Literaturquellen abgeleitet werden:

- Mit steigendem organischen Anteil nimmt die bei der Verdichtung erreichbare Trockendichte ab.
- Der optimale Wassergehalt nimmt mit steigendem organischen Anteil zu.
- Die mit einer Erhöhung des Wassergehalts durchgeführten Proctorversuche ergeben einen anderen Verlauf und andere Verdichtungskennwerte als die mit abnehmendem Wassergehalt (von der nassen Seite aus kommend) durchgeführten Versuche. Bei den Tests, die mit Verringerung des Wassergehalts durchgeführt werden, ist kein ausgeprägtes Maximum ersichtlich.

3.2.8 Bestimmung der Scherparameter

Der Einfluss der organischen Substanz auf die Scherfestigkeit des Bodens wird durch Veränderungen, die während der Zersetzung auftreten, und Unsicherheiten über die aktuelle Identität der organischen Substanz im Bodenprofil erschwert (ANDERSLAND ET AL. 1981). Organogenen Boden zeigte eine höhere effektive Scherfestigkeit als derselbe Boden, der zur Entfernung organischer Stoffe behandelt wurde. (REZVAN 1966, DANIELS 1971).

Bei stark organischen Böden sind große Verformungen erforderlich, um die Scherfestigkeit zu mobilisieren (HANRAHAN UND WALSH 1965). Das Vorhandensein von Fasern kann das aus den verschiedenen Laborversuchen ermittelte Scherverhalten erheblich beeinflussen. Die Fasern wirken als eine Art Bewehrung und die Ausrichtung der Fasern in Bezug auf die Scherfläche bestimmt die Scherparameter (ANDERSLAND ET AL. 1981). LANDVA UND LA ROCHELLE (1986) schlugen vor, dass die großen Dehnungen, die beim Kreisringscherversuch auftreten, den Effekt der Fasern eliminieren können. Zur Charakterisierung des Scherverhaltens können triaxiale Versuche unter dränierten und undränierten Bedingungen eingesetzt werden. Die Interpretation des Versagens ist aufgrund der großen Dehnungen und der übermäßigen Probenverformung / Volumenänderung schwierig (O'KELLY UND ZHANG 2013). Die Ergebnisse der Triaxialversuche ergaben bei ungestörten Proben in der Regel höhere Scherparameter als die der Rahmenscher- oder Ringscherversuche, da die Fasern horizontal ausgerichtet sind, und die Bruchfläche in den Scherversuchen die Fasern dadurch anders als beim Triaxialversuch nicht schneiden (KAZEMIAN ET AL. 2011). Widersprüchliche Forschungsergebnisse wurden von EKWUE (1990) veröffentlicht, aus denen hervorgeht, dass die Art des organischen Materials die Scherfestigkeit des Bodens beeinflusst. EDIL UND DHOWIAN (1981) und LANDVA UND LA ROCHELLE (1983) zeigten, dass der effektive Reibungswinkel von Torf im Allgemeinen höher ist als der von anorganischem Boden.

Untersuchungen zur dränierten Scherfestigkeit:

Aufgrund der geringeren Permeabilität und der stabilisierenden Wirkung der Fasern ergeben sich bei dränierten Versuchsdurchführung lange Versuchsdauern und es wird oftmals kein Scherbruch beobachtet. HANRAHAN UND WALSH (1965) und HANRAHAN ET AL. (1967) untersuchten aufbereitete Torfproben und beobachteten, dass das Scherverhalten von Torf im aufbereiteten und ungestörten Zustand ähnlich war. FARRELL UND HEBIB (1988) berichteten, dass in dränierten triaxialen Druckversuchen die deviatorischen Spannungen mit zunehmender Vertikaldehnung näherungsweise linear zunehmen und keine Peak-Werte erreicht werden. ADAM (1961) fand heraus, dass das Verhalten bei triaxialer Kompression durch eine anisotrope Konsolidierung im Vergleich zu einer isotropen Konsolidierung nicht beeinflusst wurden.

O'KELLY UND ZHANG (2013) führten konsolidierte dränierte (CD) Tests an ungestörtem, aufbereitetem und gemischtem Torf durch und beobachteten, dass das Konsolidierungsverhalten von der Bodenstruktur und dem Fasergehalt abhängt. Ihre Ergebnisse zeigten ähnlich wie die Ergebnisse von FARRELL UND HEBIB (1988), dass die Deviatorspannung q (siehe Bild 3-13) und das Spannungsverhältnis σ'_1/σ'_3 mit zunehmenden Axialdehnungen (ϵ_a) linear zunahm, sogar bei $\epsilon_a > 30\%$. Die Scherparameter aus den CD-

Versuchen sind deshalb keine intrinsischen Materialeigenschaften, sondern eine Funktion der axialen Dehnung (O'KELLY UND ZHANG 2013).

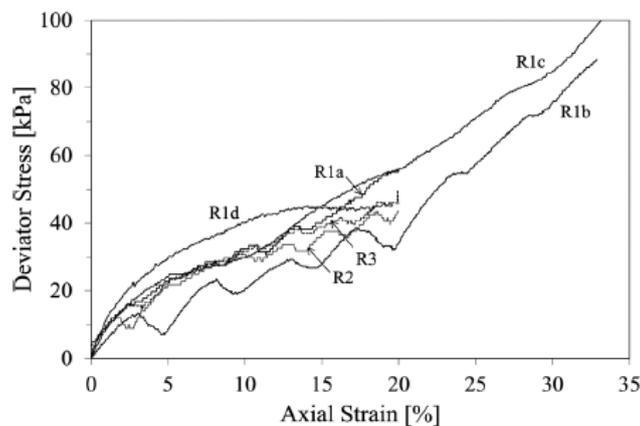


Bild 3-13: Deviatorische Spannung gegen axiale Dehnung mobilisiert in dräniertem Triaxialer Kompression für aufbereiteten organische Böden nach O'KELLY UND ZHANG (2013)

Untersuchungen zur undrännierten Scherfestigkeit:

Neben der Bestimmung der dränierten Scherparameter ist bei organischen Böden auch die Bestimmung der undrännierten Scherfestigkeit wichtig, da Torf im natürlichen Zustand in der Regel immer unterhalb des Grundwasserspiegels vorliegt und damit vollständig gesättigt ist. Zur Bestimmung der undrännierten Scherfestigkeit werden in der Regel Feldversuche durchgeführt, da die ungestörte Probenahme von faserigem Torf für Laboruntersuchungen schwierig ist. Im Labor kann die undrännierte Scherfestigkeit mit Hilfe eines undrännierten Triaxialversuches (CU- oder UU-Versuch) ermittelt werden.

Undrännierte Triaxialversuche wurden von YAMAGUCHI ET AL. (1985) an ungestörten Torfproben durchgeführt, um den Einfluss der Konsolidierungsspannung, des Belastungsweges, der Menge an organischer Substanz und der Faserstruktur zu überprüfen. Wie bei anorganischen Böden wird das undrännierte Scherverhalten von faserhaltigen Torf im unkonsolidierten, undrännierten Zustand nicht durch den Zeldruck beeinflusst. Es wurde auch beobachtet, dass das undrännierte Scherverhalten aufgrund der Faserstruktur von der Art der Scherung (triaxiale Kompression oder Extension) abhängt. Normalkonsolidierter faseriger Torf hat eine Kohäsion und zeigt im Vergleich zu anorganischen Böden sehr große Werte der undrännierten Scherfestigkeit bei vergleichbaren Konsistenzzahlen. Es wurde festgestellt, dass Torf ein höheres Verhältnis zwischen der undrännierten Scherfestigkeit s_u und der effektiven Vertikalspannung (vor Beginn der Scherbeanspruchung) σ'_{v0} (s_u/σ'_{v0}) aufweist als anorganische Tone, und es wurde festgestellt, dass das Verhältnis mit zunehmender Porenzahl zunimmt (LONG 2005).

Es wurde keine direkte Abhängigkeit des Reibungswinkels vom organischen Gehalt für Torf und organische Böden (organischer Gehalt < 25%) beobachtet (KHATTAK UND DAS 1985). Bei organischen Böden kann die Auswertung der Triaxialversuche unter Beachtung der hohen Axialdehnungen von 15 % bis 20 % zu unrealistischen Werten führen (KHATTAK UND DAS 1985). Dies beruht darauf, dass sich im CU-Test bei organischen Böden, die einen hohen Porenanteil und einen hohen natürlichen Wassergehalt aufweisen, hohe Porenwasserdrücke einstellen können, die einen ähnlichen Wert wie der Zeldruck σ_3 erreichen können und bei der Auswertung aufgrund der rechnerisch daraus ermittelten geringen effektiven Spannung zu hohen Reibungswinkeln ϕ' führen (siehe Bild 3-14). Die Autoren beschreiben deshalb, dass die Neigung der Bruchgerade im p-q-Diagramm (Kf-Linie) sowohl von der Scherfestigkeit des Bodens als auch vom

Porenwasserüberdruck abhängig ist. Das undrained Scherverhalten von reinem Kaolinit und Kaolinit, gemischt mit Fasern, dargestellt in Bild 3-15a, belegt dies. Wie aus Bild 3-15a ersichtlich, dreht sich der Spannungspfad bei reinem Kaolinit mit zunehmender Scherbeanspruchung zunächst gegen den Uhrzeigersinn, was auf der Entstehung von Porenwasserüberdrücken beruht. Danach dreht sie sich im Uhrzeigersinn, was auf eine Abnahme der Porenwasserüberdrücke und eine Zunahme der effektiven Spannungen im Boden hinweist. Bei Kaolinit mit Fasern dreht sich der Spannungspfad jedoch bis zum Versagen gegen den Uhrzeigersinn, was zu geringen effektiven Spannungen im Bruchzustand und in der folgenden Auswertung zu hohen Reibungswinkeln ϕ' führt. Ein ähnliches Verhalten ist für die Verflüssigung von Sandproben im undrained Triaxialversuch bekannt.

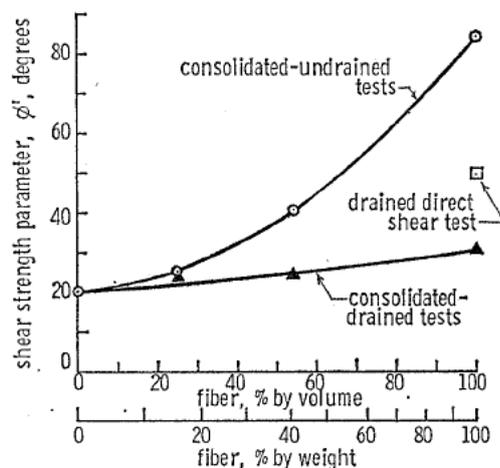


Bild 3-14: Reibungswinkel von Mischungen aus Kaolinit und Fasern nach KHATTAK UND DAS (1985)

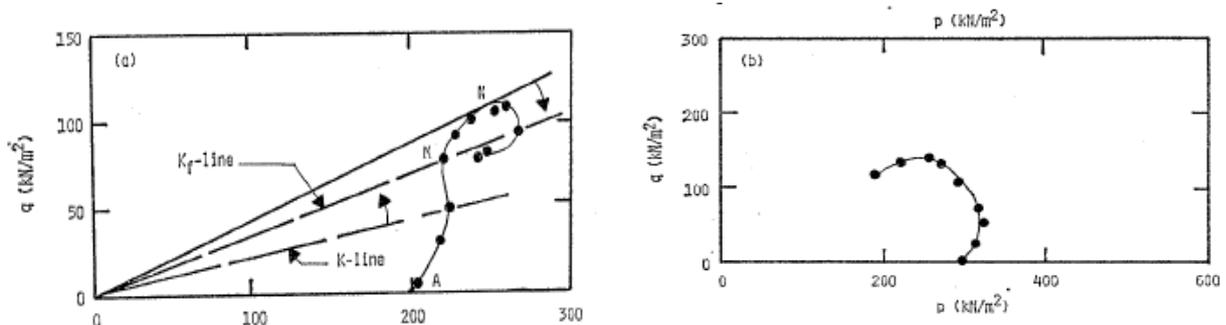


Bild 3-15: Diagramm von p-q für (a) Kaolinit (b) 84% Kaolinit gemischt mit 16% Fasern nach KHATTAK UND DAS (1985)

Als Kriterium zur Ermittlung der Scherparameter wurde von KHATTAK UND DAS (1985) deshalb die Betrachtung der Verhältnisswerte $(\tau/\sigma')_{max}$ vorgeschlagen. Bild 3-16 stellt dazu die Mohr'schen Spannungskreise für einen undrained Triaxialversuch und die sich im Zuge der Scherung ergebenden Maximalwerte τ/σ' dar. Die Autoren schlagen vor, zur Bestimmung der Schergerade den Mohr'schen Spannungskreis mit der höchsten Scherspannung τ (bezogen auf die Verhältnisswerte τ/σ') heranzuziehen. Damit können ihrer Ansicht nach zuverlässigere Ergebnisse erzielt werden als bei Annahme eines Versagenskriteriums von 15 % bis 20 % axialer Dehnung.

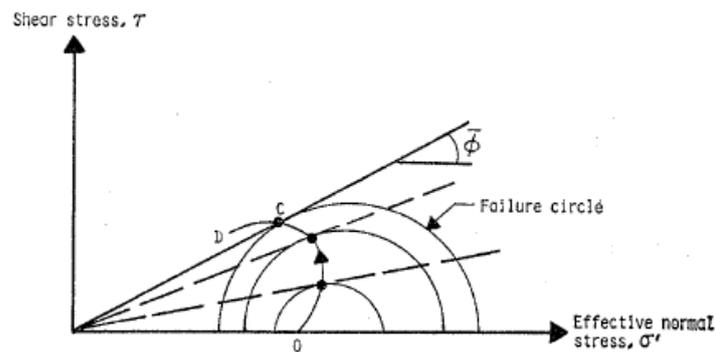


Bild 3-16: Kriterium zur Ermittlung der Scherparameter basierend auf dem maximalen Verhältnis $(\tau/\sigma')_{\max}$ nach KHATTAK UND DAS (1985)

Studien von EDIL UND WANG (2000) zeigen, dass der effektive Reibungswinkel von normal verdichteten Torf und organischen Böden nicht vom organischen Gehalt abhängt. Es wurde auch beobachtet, dass die normalisierte undrained Scherfestigkeit (s_u/σ'_{vo}) nicht von dem organischen Gehalt, der Art und dem Grad der Konsolidierung abhängt. Die Autoren schlagen vor, dass signifikante Änderungen im Scherverhalten zwischen organischen Böden und Torf etwa ab organischen Anteilen von mehr als 20 % auftreten, weshalb zur Unterscheidung zwischen organischen und anorganischen Böden eine Grenze von 20 bis 25 % Glühverlust vorgeschlagen wurde.

Zusammenfassend können folgende Punkte aus den ausgewerteten Literaturquellen für den Einfluss der organischen Bestandteile auf die Scherfestigkeit von Böden festgehalten werden:

- Bei steigendem organischen Anteil des Bodens nimmt der Einfluss des organischen Materials auf den Reibungswinkel zu
- Für ungestörte Proben mit Faserstruktur ergeben sich in Abhängigkeit von der Versuchsart unterschiedlich hohe Reibungswinkel wobei gilt: ϕ' (Triaxialversuch) > ϕ' (Rahmenscher Versuch) > ϕ' (Einfachschерung) > ϕ' (Kreisringscher Versuch)
- Bei drainierten Versuchen nehmen die Deviatorspannungen mit zunehmender axialer Dehnung kontinuierlich zu ohne dass ein Peak-Wert erreicht wird.
- Einzelne CU-Versuchsergebnisse zeigen, dass der Porenwasserdruck bei Torfen ähnlich hohe Werte wie der Zeldruck annehmen kann, woraus sich rechnerisch sehr geringe Effektivspannungen ergeben. Dies führt zu unrealistisch hohen Reibungswinkeln.
- Das undrained Scherfestigkeitsverhältnis (s_u/σ'_{vo}) ist größer als bei mineralischen Böden.

3.2.9 Bestimmung der Last-Verformungseigenschaften

Das Kompressionsverhalten von organischen Böden unterscheidet sich im Allgemeinen deutlich vom Kompressionsverhalten von anorganischen Böden. Die Verformungen in organischen Böden setzen sich aus Anteilen aus der Konsolidation (Primärverformungen), Kriechverformungen (Sekundärverformungen) und der Zersetzung von organischen Bestandteilen zusammen (ANDERSLAND UND AL-KHAFAJI 1980).

So zeichnet sich das Kompressionsverhalten von Torf, das wesentlich vom Gehalt an Pflanzenfasern, dem natürlichen Wassergehalt, der Porenzahl und der Anfangspermeabilität abhängt, durch eine schnelle primäre Konsolidierungsphase und eine signifikante, lange andauernde sekundäre Kompressionsphase (d.h. Kriechen) aus. Im Allgemeinen weist Torf hohe Werte für den primären Kompressionsindex C_c , den Kriechbeiwert C_α und das Verhältnis C_α/C_c auf.

Natürlich abgelagerte organische Böden besitzen bedingt durch die unterschiedlichen Ablagerungsphasen häufig einen geschichteten Aufbau. Dabei weisen die einzelnen Schichten in sich ein stark anisotropes Materialverhalten in horizontaler und vertikaler Richtung auf, da die organischen Bestandteile sowie die plättchenförmigen mineralischen Bestandteile bevorzugt horizontal ausgerichtet sind. Bei tiefer liegenden Schichten ist diese Anisotropie gegenüber höher liegenden Schichten durch die höhere Überlagerungsspannung dabei deutlich stärker ausgeprägt. Dies führt dazu, dass die Konsolidierungsrate bei vertikaler Belastung bei einem derartigen Bodenaufbau in horizontaler Richtung größer ist als in vertikaler Richtung. Die Anisotropie führt zudem zu Unterschieden in der Kompressibilität von Torfproben in horizontaler und vertikaler Richtung, wie O'KELLY (2005d) in seinen Untersuchungen zeigen konnte. Seine Ergebnisse zeigen, dass die Kompressibilität in vertikaler Richtung größer ist als die Kompressibilität in horizontaler Richtung.

Die hohe Kompressibilität von faserigem Torf ist dabei auf seine sehr hohen Porenzahlen zurückzuführen, die eine Folge seiner hochporösen Partikel sind (MESRI UND AJLOUNI 2007, HUAT ET AL 2011). Die hohen Porenzahlen beeinflussen auch die Permeabilität und die sequentielle Ausscheidung von Wasser aus Makro- und Mikroporen. Letztere ist dabei bestimmend für die Rate der Primär- und Sekundärverformungen (HUAT ET AL 2011). Der Zersetzungsprozess kann auch die langfristige Zusammendrückbarkeit verringern, da organische Bestandteile, die eine hohe Porosität und damit eine hohe Zusammendrückbarkeit aufweisen, abgebaut werden.

DHOWIAN UND EDIL (1980) führten Kompressionsversuche an Torf durch und beobachteten, dass sich die gemessenen Dehnungen, die sie über den Logarithmus der Zeit darstellten, aus vier unterschiedlichen Anteilen zusammensetzten (siehe Bild 3-17). Bei diesen vier Anteilen handelt es sich um

- einen Dehnungsanteil ϵ_i aus der Sofortsetzung, die unmittelbar nach dem Aufbringen einer Belastung auftritt,
- einen Dehnungsanteil ϵ_p aus der Primärsetzung,
- einen Dehnungsanteil ϵ_s aus der Sekundärverformung, die einen linearen Verlauf über den Logarithmus der Zeit aufweist, und
- einen weiteren Dehnungsanteil ϵ_t , den sie als tertiäre Verformungen bezeichneten. Diese stammen u.a. aus der Zersetzung organischer Bestandteile.

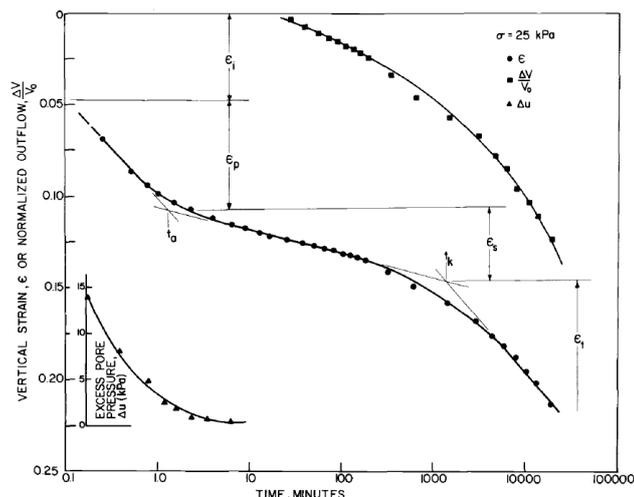


Bild 3-17: Vertikale Dehnung, normierter Abwasserausfluss und überhöhter Porendruck im Vergleich zum Logarithmus der Zeit für eine Portage-Torfprobe unter dem ersten Spannungszinkrement nach DHOWIAN UND EDIL (1980)

DHOWIAN UND EDIL (1980) beobachteten auch die Erzeugung einer bestimmten Gasmenge durch den Abbau von Torf. Das tertiäre Kompressionsverhalten von Torf konnte aufgrund der relativ kurzen Versuchszeiten in konventionellen Versuchen nicht abschließend beurteilt werden. Da die tertiären Verformungsanteile in der Regel erst nach einem vergleichsweise langen Zeitraum einen relevanten Betrag annehmen, argumentieren mehrere Forscher (EDIL UND DHOWIAN 1979, FOX UND EDIL 1994), dass diese Setzungsanteile vernachlässigt werden können.

Ergebnisse von CANDLER UND CHARTRESS (1988) zeigten zwei unterschiedliche Setzungsverläufe, die über die Zeit (logarithmischer Maßstab) jeweils linear verlaufen. Da das Raumgewicht von Torf infolge seiner vergleichsweise geringen Wichte nahe am Raumgewicht von Wasser liegt, sind die effektiven Spannungen in-situ relativ gering. Sie können daher im Labor nicht ohne weiteres anhand von Standardkompressionsversuchen ermittelt werden. (MESRI ET AL. 1997).

Da die Primärsetzungen bei organikhaltigen Böden sehr schnell erfolgen, kann der Beginn der Sekundärsetzungen anhand der Zeit-Setzungskurven (z.B. $e\text{-log}(t)$) nicht ermittelt werden. Es wurde zudem festgestellt, dass die $e\text{-log } p'$ -Kurven eine steile Steigung aufweisen und damit einen hohen Wert des Kompressionsindex C_c anzeigen. Es besteht die Möglichkeit, dass die Sekundärsetzungen (d.h. Kriechen) nicht erst zum Ende der Primärsetzungen (d.h. nach Beendigung der Konsolidation) einsetzen, sondern bereits vor dem vollständigen Abklingen der Konsolidation und dem Abbau der Porenwasserüberdrücke beginnen (LEONARDS UND GIRAULT 1961). Untersuchungen von MESRI&ROKHSAR (1974) und von MESRI und CHOI (1985) zeigten, dass die Konsolidationstheorie nach Terzaghi auf das Kompressionsverhalten von faserigem Torf nicht anwendbar ist, während Untersuchungen von ARMAN (1970) zeigen, dass die Konsolidierungstheorie nach Terzaghi lediglich für organische Böden mit einem Organikanteil von weniger als 20 % realitätsnahe Ergebnisse liefert.

GOFAR UND SUTEJO (2007) beobachteten, dass die sekundäre Kompression nach Abschluss von 65 % der Primärverformungen begann. Ihre experimentellen Ergebnisse zeigten, dass Konsolidationsbeiwert c_v mit zunehmender Konsolidationsspannung abnimmt. Der Kriechbeiwert C_α steigt hingegen mit zunehmender Konsolidationsspannung an. Diese Ergebnisse unterstützen die Ergebnisse von LEA & BROWNER (1963) und FOX ET AL. (1992), die Korrelationen zwischen den beiden Parametern ermittelten MESRI & GODLEWSKI (1977) haben für mineralische Böden festgestellt, dass das Verhältnis C_α/C_c für einen effektiven Spannungszustand und eine Porezahl zu jedem Zeitpunkt während der Sekundärverformung konstant ist. Hingegen konnten FOX ET AL. (1992) beobachten, dass es für organische Böden keinen allgemeingültigen Zusammenhang zwischen C_α und C_c gibt. Sie beobachteten, dass das Verhältnis C_α/C_c mit abnehmender Porezahl zunimmt und folgerten, dass die Annahme eines konstanten Verhältnisses C_α/C_c , wie bei mineralischen Böden, bei organischen Böden wie z.B. Torf zu Fehlern führen kann. FOX ET AL. (1992) empfehlen überdies, das Ende der Konsolidationssetzungen anhand einer Porenwasserdruckmessung, und nicht anhand einer grafischen Konstruktion zu ermitteln.

WILSON ET AL. (1965) führten Konsolidationsversuche an Torf durch und untersuchten die Abhängigkeit des Konsolidationsverhaltens von der Porezahl, der Konsolidationsspannung und der Probenhöhe. Sie beobachteten, dass sich der Torf nach dem Abbau des Porenwasserüberdruckes weiter setzte. Aus ihren Daten leiteten sie Konsolidierungsraten de/dt ab und stellten diese in einem $\log(de/dt) - \log t$ -Diagramm dar (siehe Bild 3-18). Ihre Ergebnisse zeigen, dass nach einer gewissen Zeitspanne eine signifikante Änderung der Konsolidierungsrate de/dt eintritt. Der anfängliche flache Verlauf in der Anfangsphase repräsentiert dabei die Primärverformungen, während der zweite steilere Verlauf nach der starken Krümmung der Kurven die Sekundärverformungen wiedergibt. Der Punkt der maximalen Krümmung der Kurven repräsentiert dabei das Ende der Primärverformungen (d.h. Konsolidierungsgrad $U = 100\%$). Dieser Zeitpunkt wird dabei

nach dieser Methode früher bestimmt, als wie wenn die Konsolidationstheorie nach Casagrande angewendet werden würde. Zu beachten ist allerdings, dass zu diesem Zeitpunkt die Porenwasserüberdrücke noch nicht vollständig abgebaut sind.

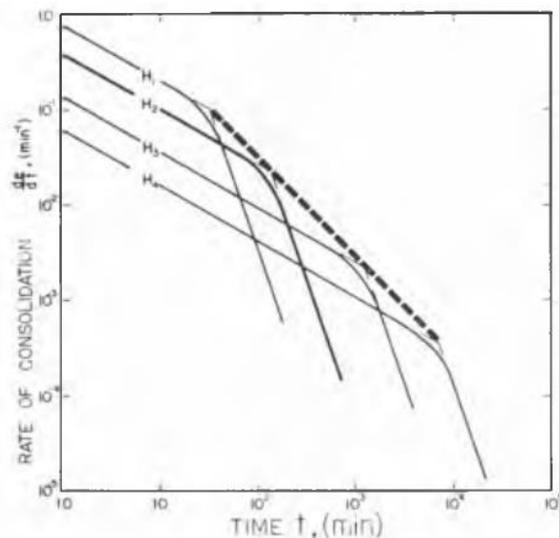


Bild 3-18: Log (de/dt) – log t Diagramm nach WILSON ET AL. (1965)

GABRYŚ UND SZYMAŃSKI (2010) untersuchten ebenfalls die Konsolidation in organischen Böden und berichteten, dass Ödometerversuche, bei denen die Spannung mit konstanter Rate gesteigert wird, zu höheren Kompressionsparametern (Kompressionsbeiwert C_c , Schwellbeiwert C_r , ödometermodul M) führen. Sie berichteten überdies, dass bei höheren Spannungen der Kriechbeiwert C_α zunimmt und der Konsolidationsbeiwert C_v abnimmt. Bei Ödometerversuchen an Torfproben, in denen die Spannung schrittweise erhöht wird, haben sich der Kriechbeiwert C_α sowie der Konsolidationsbeiwert c_v bei höheren Spannungen dagegen verringert.

In der klassischen Bodenmechanik werden Primärkonsolidierung und Kriechen als zwei aufeinanderfolgende Prozesse angenommen, wobei das Kriechen nach der Dissipation des Porenwasserüberdrucks beginnt. In diesem Fall hängt die bis zum Abschluss der Primärkonsolidation aufgetretene Probenstauchung bei gleichartigen Bodenproben nur von der Dicke der Bodenprobe ab (LADD ET AL. 1977). Dieser Ansatz, der primäre und sekundäre Kompression als aufeinanderfolgende Prozesse betrachtet, wird in der Literatur auch als Hypothese A bezeichnet. Gemäß dieser Hypothese wäre die Zeit-Setzungs-Kurve einer dickeren Probe im Vergleich zu einer dünneren Probe nach rechts verschoben, da die dickere Probe eine längere Konsolidationsdauer aufweist, jedoch wäre die Stauchung der Probe dickeren Probe am Ende der Primärkonsolidation ähnlich wie bei der dünneren Probe (siehe dazu auch Bild 3-19). Die Hypothese B dagegen besagt, dass das Kriechen bereits vor dem Ende der Primärkonsolidierung beginnt. Daher ist die Zeit-Setzungs-Kurve für einer dickere Probe steiler und wird eine dickere Probe bis zum Ende der Primärkonsolidation eine größere Stauchung erfahren, da bei der dickeren Probe bereits über einen längeren Zeitraum (nämlich dem der Primärkonsolidation) Kriechverformungen aufgetreten sind .

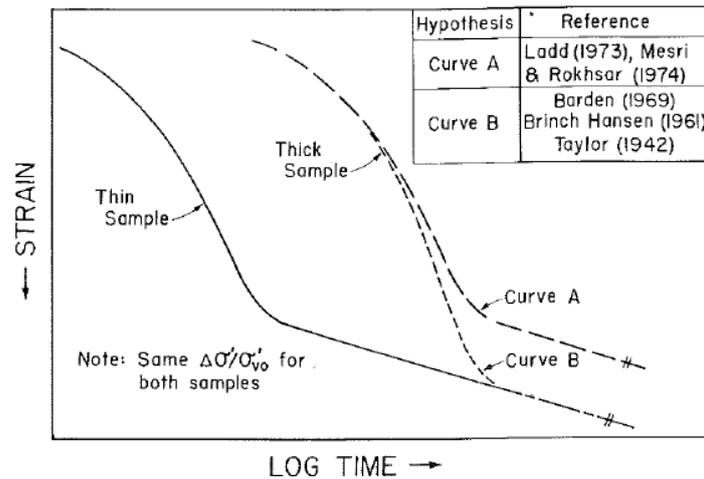


Bild 3-19: Darstellung der Hypothese A und B (LADD ET AL. 1977)

Das von DEN HAAN & EDIL (1994) entwickelte a,b,c-Modell folgt der Hypothese B. DEN HAAN & EL AMIR (1994) berichten, dass die klassische Konsolidierungstheorie viskose Effekte nicht erklären kann und das Bodenverhalten in solchen Fällen mit dem a,b,c-Isotachenmodell modelliert werden kann. DEN HAAN & EL AMIR (1994) schlugen vor, das Kriechen in einem halblogarithmischen Spannungs-Dehnungs-Diagramm durch parallele Linien, sogenannte Isotachen, zu modellieren, wobei jede Linie eine bestimmte Kriechrate darstellt.

Das a,b,c-Modell folgt dem Ansatz, dass sich die Verformungen eines Bodens (ε^H) unter Druck durch die Summe der elastischen (ε_d^H) und der viskoplastischen Dehnungsanteile (ε_{vp}^H) beschreiben lässt (DEN HAAN & EDIL (1994)). Die elastische Verformung (ε_d^H) hängt von der effektiven Spannung ab und wird im a,b,c-Modell folgendermaßen ausgedrückt:

$$\varepsilon_d^H = a \ln \frac{\sigma'_v}{\sigma'_{v0}} \quad (1)$$

Dabei stellt a den Rekompansionsbeiwert (von DEN HAAN & EDIL (1994) als „direct compression index“ bezeichnet) dar, der die Steigung der Geraden im Spannungs-Stauchungsdiagramm bis zum Erreichen der Vorkonsolidierungsspannung p_g beschreibt. Die Vorkonsolidierungsspannung bei Dehnung Null (p_g) ergibt sich als Schnittpunkt zwischen der 1-Tag Referenz-Isotache mit der Steigung b und der effektiven Spannungsachse (siehe Bild 3-20).

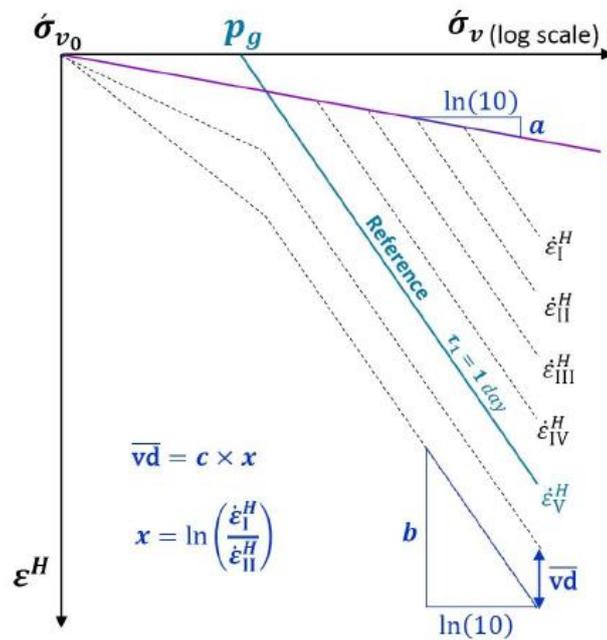


Bild 3-20: Isotachenmodell mit Darstellung der a,b,c Parameter (BAGHERPOUR 2016)

Die Steigung der Isotachen für den Erstbelastungslast wird gemäß Bild 3-20 durch den Parameter b beschrieben. Wie aus Bild 3-20 ersichtlich ist, beträgt der vertikale Abstand zwischen den Isotachen $c \cdot x$. Der Parameter c wird als die Steigung der Beziehung zwischen dem viskoplastischen Anteil der Dehnung ($\dot{\epsilon}_{vp}^H$) und dem natürlichen Logarithmus der intrinsischen Zeit (intrinsic time) ermittelt. Der Parameter x ist abhängig vom Abstand der Isotachen bzw. der zugehörigen Dehnungsrate.

Die intrinsische Zeit (τ) wird dabei folgendermaßen berechnet:

$$\tau = \frac{c}{\dot{\epsilon}_{vp}^H} \quad (2)$$

wobei $\dot{\epsilon}_{vp}^H$ den viskoplastischen Anteil der Dehnung darstellt. Die intrinsische Zeit ist definiert als die äquivalente Zeit, die erforderlich ist, um den aktuellen Grad der Kompression unter der aktuellen vertikalen Spannung zu erreichen, wenn die Spannung zum Zeitpunkt der Bodenbildung angelegt wurde.

Die Parameter b und c werden als sekundärer Kompressionsindex („secular compression index“) bzw. Koeffizient der viskoplastischen Kompression („coefficient of rate of secular (viscoplastic) compression,“) bezeichnet.

Die von DEN HAAN & EDIL (1994) durchgeführte umfangreiche Studie hat gezeigt, dass mit dem a,b,c-Modell die gemessenen inkrementellen ödometrischen Kompressionsdaten für weichen Ton und Torf zufriedenstellend wiedergegeben werden können.

O'LOUGHLIN (2001) führte Studien an faserigem Torf und organischen Böden durch und stellte fest, dass das a,b,c-Modell für Torf geeignet ist, wenn die Hencky-Dehnung (ϵ^H) und die natürliche Dehnungsrate ($\dot{\epsilon}^H$) verwendet wird. Er stellte außerdem fest, dass die Isotachen im Bereich der Erstbelastung parallel und linear sind. Da die Isotachen bei überkonsolidierten Böden jedoch nicht parallel sind, ist das a,b,c-Modell für überkonsolidierte Böden nur bedingt geeignet (DEN HAAN, 1996, ZHANG & O'KELLY 2013),.

Zusammenfassend können folgende Punkte aus den ausgewerteten Literaturquellen festgehalten werden:

- Mit zunehmendem organischen Anteil weisen organische Böden höhere Porenzahlen auf. Die Zusammendrückbarkeit von organischen Böden im Oedometerversuch steigt dadurch mit zunehmendem Organikanteil an.
- Mit zunehmendem organischen Anteil des Bodens nimmt der Konsolidationsbeiwert (c_v) organischer Böden ab und der Kriechbeiwert (C_α) zu.
- Organische Böden können auch durch Kriechen (Sekundärverformung) vergleichsweise große Verformungen erfahren, die bei der Abschätzung der Verformungen neben den Primärverformungen berücksichtigt werden sollten.
- Das Verhältnis C_α/C_c ist bei organischen Böden im Gegensatz zu mineralischen Böden nicht konstant.
- Der Verlauf der Zeit-Setzungskurve von organischen Böden unterscheidet sich bei vergleichsweise niedrigen Spannungen von dem für mineralische Böden bekanntem S-förmigen Verlauf der Zeit-Setzungskurve. Konventionelle Methode zur Bestimmung des Endes der Primärkonsolidierung nach Casagrande (Auftragen der Zeit im logarithmischen Maßstab) oder Taylor (Auftragen der Zeit im Wurzelmaßstab) nach DIN EN ISO 17892-5: 2017 sind für organische Böden daher bei niedrigen Spannungen nicht anwendbar. Die Bestimmung des Endes der Primärkonsolidierung kann bei organischen Böden dagegen durch die Messung des Porenwasserdruckes erfolgen, wobei das Ende der Primärkonsolidation durch den vollständigen Abbau des Porenwasserdruckes gekennzeichnet ist.
- Das Isotachenmodell ist für die Beschreibung des Verformungsverhaltens von natürlich abgelagerten organischen Böden (z. B. Torf) gut geeignet. Das Verformungsverhalten von überkonsolidierten Böden dagegen kann damit nur eingeschränkt wiedergegeben werden.

3.2.10 Bestimmung der Durchlässigkeit

Es ist allgemein bekannt, dass ein organischer Boden bei der Konsolidierung seine Porosität ändert, was zu einer Änderung seiner Wasserdurchlässigkeit führt. Hierdurch nimmt die Konsolidierungsrate mit zunehmendem Konsolidierungsgrad und abnehmender Durchlässigkeit ab. Die Beschleunigung des Konsolidierungsprozesses ist in der späteren Phase der Konsolidierung viel größer, wenn die Durchlässigkeit organischer Böden abnimmt (KODA UND SZYMAŃSKI 1990, KODA ET AL. 1993).

Durchlässigkeitsversuche an organischen Böden mit einem Organikgehalt > 20 % wurden von MALINOWSKA & SZYMAŃSKI (2015) in modifizierten Rowe-Barden-Zellen durchgeführt. In den Versuchen wurden die vertikale und die horizontale Wasserdurchlässigkeit der organischen Böden sowie ihre nichtlinearen Durchlässigkeitseigenschaften bei unterschiedlicher Dichte der Proben untersucht. Dabei ist es bei organischen Böden notwendig, Änderungen der Porosität sowie der Fließgeschwindigkeit während des Konsolidierungsprozesses zu berücksichtigen. Die Strömungseigenschaften sind anisotrop und nicht-linear und hängen von der Porosität und dem hydraulischen Gradienten ab. MALINOWSKA & SZYMAŃSKI (2015) berichteten, dass sich der vertikale Durchlässigkeitsbeiwert ändert und hundertmal niedriger ist als der horizontale Durchlässigkeitsbeiwert.

O'KELLY (2006) untersuchte ebenfalls die Durchlässigkeit von torfhaltigen Böden in vertikaler und horizontaler Richtung unter eindimensionaler Belastung in einer modifizierten Rowe-Barden-Zelle. Er berichtete, dass bei geringen effektiven Vertikalspannungen das Verhältnis zwischen horizontaler zu vertikaler Wasserdurchlässigkeit kleiner als 1 war und bei höheren Vertikalspannungen das Verhältnis größer als 1 war. Er stellte zudem fest, dass das Verhältnis zwischen horizontaler und vertikaler Wasserdurchlässigkeit mit zunehmender effektiver Vertikalspannung zunimmt.

Die Durchlässigkeit von organischen Böden ist dabei deutlich größer als die Durchlässigkeit von mineralischen Böden. Die Durchlässigkeit organischer Böden wird dabei auch durch den Zersetzungsgrad der organischen Substanz und dem Aggregationsgrad der organischen Bodenpartikel beeinflusst (HUANG ET

AL. 2009). Durch den Ablagerungsprozess, den organische Böden häufig erfahren, ist ihre Wasserdurchlässigkeit in vertikaler Richtung meist viel geringer als in horizontaler Richtung. Ihr Kriechverhalten kann über die Zeit zu großen Verformungen und damit zu einer deutlichen Verringerung ihrer vertikalen Wasserdurchlässigkeit führen.

Zusammenfassend werden folgende Ergebnisse beschrieben:

- Die Wasserdurchlässigkeit organischer Böden ist in vertikaler Richtung meist deutlich geringer als in horizontaler Richtung.
- Die Wasserdurchlässigkeit organischer Böden kann infolge von Kriechverformungen und einer damit einhergehenden Verringerung der Porenräume über die Zeit deutlich abnehmen.

4 Laborversuche

4.1 Versuchsböden

4.1.1 Böden aus dem Projekt FE05.0166/2011/ERB

Im Rahmen des Forschungsvorhabens FE 05.0166/2011/ERB wurden die in Tab. 4-1 aufgelisteten Böden untersucht. Die Böden wurden nach ihrer Entnahme umfangreich homogenisiert und zur Lagerung in luftdicht verschlossene Behälter gegeben. Da nur ein Teil der entnommenen Böden im Rahmen des Forschungsvorhabens FE 05.0166/2011/ERB verwendet wurde, ist für die im vorliegenden Forschungsvorhaben vorgesehenen Untersuchungen noch eine ausreichende Probemenge vorhanden.

Herkunft	Proben-Nr.	Kurzbezeichnung
Schwanebeck	84992	BoSc
Grüneberg	84993	BoGr
Straubing	85053	NiSt
Buxtehude 2	85054	KIBu2

Tab. 4-1: Probennummern und Kurzbezeichnungen der Böden aus dem Projekt FE05.0166/2011/ERB

Boden Schwanebeck (BoSc):

Aus dem Landkreis Barnim wurde auf dem Betriebsgelände der Firma TBS Rinne GmbH in Schwanebeck ein gemischtkörniger Boden mit Beimengungen humoser Art (siehe Bild 4-1 (a)) aus einer Tiefe von ca. 1,40 m entnommen.

Boden Grüneberg (BoGr):

Die Probe wurde bei einer Baumaßnahme der Deutschen Bahn AG im Ort Grüneberg (Landkreis Oberhavel) bezogen. Bei diesem Boden handelt es sich vorwiegend um einen gemischtkörnigen Boden mit Beimengungen humoser Art. Dieser wurde oberflächennah aus einer Tiefe von 0,20 bis 0,60 m entnommen (siehe Bild 4-1 (b)).

Boden Niedermoor Straubing (NiSt):

Es handelt sich bei der Entnahmestelle der Probe aus Straubing (Landkreis Straubing-Bogen) um ein trockengelegtes Niedermoor. Der Boden wurde oberflächennah (unter der Grasnarbe) in einer Tiefe von etwa 0,30 bis 0,60 m entnommen (siehe Bild 4-1 (c)).

Klei aus Buxtehude (KIBu2):

Die Bodenproben entstammen einer Straßenbaumaßnahme in der Nähe von Hamburg und werden allgemein als Klei angesprochen (siehe Bild 4-1 (d)).

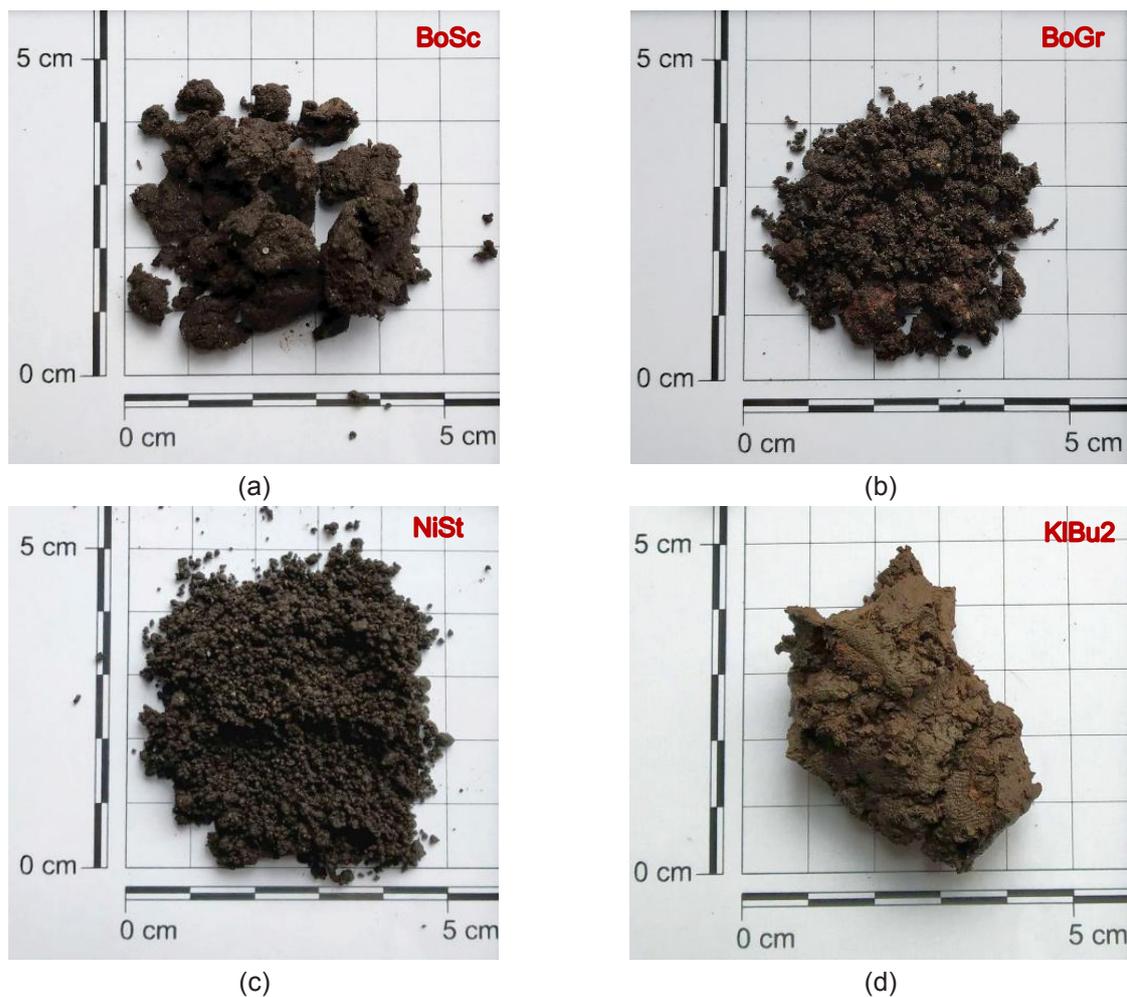


Bild 4-1: Erdfeuchte Ausgangsböden (a) BoSc (b) BoGr (c) NiSt (d) KIBu2

Die Vorversuche wurden an einem homogenisierten Material in Anlehnung an das Vorgehen im Rahmen von FE 05.0166/2011/ERB durchgeführt. Sofern das Bodenmaterial in mehreren Behältern gelagert worden war, wurden Mehrfachversuche (d. h. je 1 Probe aus jedem Behälter) zur Bestimmung der klassifizierenden Bodeneigenschaften (Fließ- und Ausrollgrenze, Wassergehalt, Glühverlust) durchgeführt. Die Ergebnisse der Versuche sind im Detail in Anhang A.1 zu diesem Bericht enthalten.

In

Bild 4-2 sind die vier verwendeten Böden im Plastizitätsdiagramm nach DIN 18196:2011-05 zusammenfassend dargestellt (Darstellung aller Einzelversuche). Die Kornverteilungen der einzelnen Böden sind im Anhang A.1 zu diesem Bericht abgebildet.

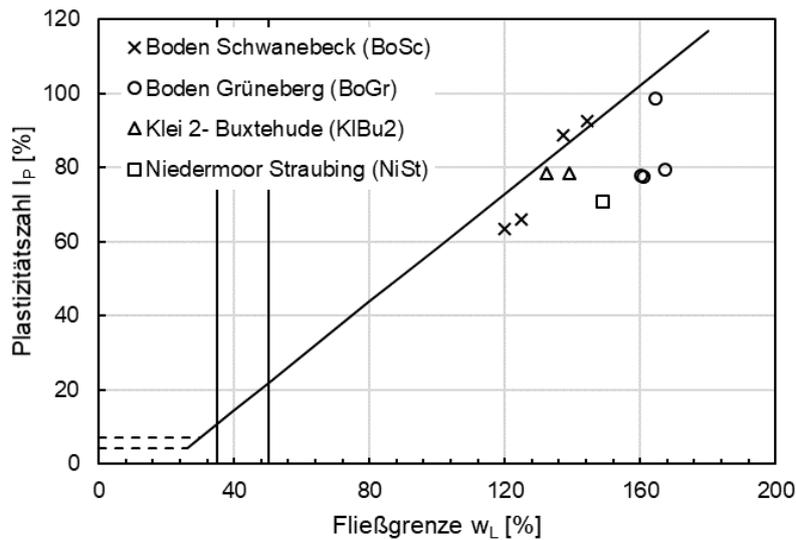


Bild 4-2: Plastizitätsdiagramm der Böden aus dem Projekt FE 05.0166/2011/ERB

Zusammenfassend sind die Ergebnisse der klassifizierenden Untersuchungen in der Tab. 4-2 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Ergebnisse der Einzelversuche nur sehr wenig streuen, woraus gefolgert werden kann, dass die Böden ausreichend homogen sind. Vor der Durchführung der geplanten Laboruntersuchungen (beschrieben unter Abschnitt 2.2) wurde das Material durch abwechselnd manuelle Mischung und der Verwendung eines Kutters erneut homogenisiert. Aus den homogenisierten Versuchsböden wurden an unterschiedlichen Stellen Teilproben entnommen und Versuche durchgeführt.

Kennwert	Boden [EH]	KIBu2	BoSc	BoGr	NiSt
Fließgrenze w_L [DIN 18122:1997-07]	[%]	132-139	119-137	161-167	149
Ausrollgrenze w_P [DIN 18122:1997-07]	[%]	53-60	48-59	66-88	78,1
Plastizitätszahl I_P [DIN 18122:1997-07]	[%]	78,6	63-88	77-98	70,9
Korndichte ρ_s [DIN 18124:2019-02]	[g/cm ³]	2,250	2,255	2,270	2,176
Kornanteil [DIN 18123:2011-04]					
≤ 0,002 mm	[%]	25	1 - 4	4 - 5	11
≤ 0,06 mm	[%]	77	27 - 33	34 - 37	59
≤ 2 mm	[%]	99	97 - 98	95 - 98	93
Glühverlust V_{Gl} [DIN 18128:2002-12]	[%]	16-19	18-21	23-25	25,96
Bodengruppe nach DIN 18196:2011-05		OT	OH	OH	OT

Tab. 4-2: Zusammenfassung der Ergebnisse aus den klassifizierenden Versuchen an den Böden BoSc, BoGr, NiSt, KIBu2

4.1.2 Neu beschaffte Böden

Zusätzlich zu den im Projekt FE 05.0166/2011/ERB untersuchten Böden wurden zwei weitere Böden aus Freising und Wollin und zwei weitere Böden aus Sande beschafft. Die beiden Böden aus Sande (Landkreis Friesland) wiesen jedoch einen Glühverlust von nur 4 % auf, was den Projektanforderungen nicht entsprach. Für die weiteren Untersuchungen wurden deshalb nur die beiden Böden aus Freising und Wollin herangezogen. Die Herkunft, Proben-Nummer und Kurzbezeichnung dieser beiden Böden sind in Tab. 4-3 dargestellt. Im weiteren Text werden die Böden anhand ihrer Kurzbezeichnung genannt.

Herkunft	Proben-Nr.	Kurzbezeichnung
Freising	85914	BoFr
Wollin	86194	BoWo

Tab. 4-3: Probennummern und Kurzbezeichnungen der Böden

Boden aus Freising (BoFr):

Der organikhaltige Boden BoFr stammt aus der Nähe des Freisinger Mooses, wo er im Rahmen einer Infrastrukturmaßnahme aus einer Tiefe von ca. 1,50 bis 2,00 m entnommen wurde. Da die entnommenen Proben organische Fasern enthalten haben, wurden diese durch ein 4 mm Sieb gesiebt.

Böden aus Wollin (BoWo):

Die Bodenproben stammen von einer Straßenbaustelle in Wollin (Landkreis Potsdam-Mittelmark) und wurden aus einer Tiefe von ca. 1,50 bis 2,00 m entnommen (siehe Bild 4-3). Diese werden im Folgenden als BoWo bezeichnet.



Bild 4-3: Erdfeuchte Ausgangsböden (a) BoFr (b) BoWo

Vor Durchführung der klassifizierenden Versuche wurden die Bodenproben umfangreich homogenisiert. Zusammenfassend sind die Ergebnisse der klassifizierenden Untersuchungen (Plastizitätsgrenzen, Korndichte und Glühverlust) in der Tab. 4-4 dargestellt. Ergänzend sind die Ergebnisse der Plastizitätsuntersuchungen in Bild 4-4 abgebildet. Mit einem organischen Anteil von 33 % (BoFr) bzw. 30 % (BoWo) sind die Böden nach DIN 18196 der Bodengruppe OT zuzuordnen.

Kennwert	Boden	BoFr	BoWo
	[EH]		
Fließgrenze w_L [DIN 18122:1997-07]	[%]	174,4	129,1
Ausrollgrenze w_P [DIN 18122:1997-07]	[%]	102,4	64,3
Plastizitätszahl I_P [DIN 18122:1997-07]	[%]	72,0	64,8
Korndichte ρ_s [DIN 18124:2019-02]	[g/cm ³]	2,069	2,24
Glühverlust V_{Gl} [DIN 18128:2002-12]	[%]	33,1	29,6
Bodengruppe nach DIN 18196:2011-05		OT	OT

Tab. 4-4: Zusammenfassung der Ergebnisse aus den klassifizierenden Versuchen an Böden BoFr, BoWo

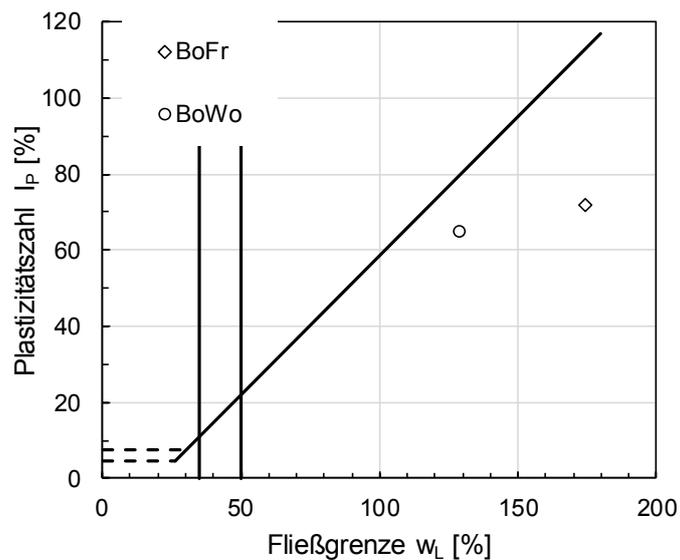


Bild 4-4: Plastizitätsdiagramm der Böden – BoFr und BoWo

Leicht plastischer Ton aus München (TLMü)

Für die Wassergehaltsbestimmung nach O’KELLY (2005b) wurde zu Vergleichszwecken zusätzlich ein mineralischer Boden ohne organische Anteile ausgewählt. Es handelt sich dabei um einen leicht plastischen Ton (TLMü), der als Reststoff bei der Kieswäsche in einer Anlage in der Nähe von München anfällt. Der Boden wird im Folgenden als TLMü benannt. Zusammenfassend sind die Ergebnisse der klassifizierenden Untersuchungen am Boden TLMü in der

Tab. 4-5 dargestellt.

Kennwert	Boden	[EH]	TLMü
Fließgrenze w_L [DIN 18122:1997-07]		[%]	25,2
Ausrollgrenze w_P [DIN 18122:1997-07]		[%]	14,9
Plastizitätszahl I_P [DIN 18122:1997-07]		[%]	10,3
Korndichte ρ_s [DIN 18124:2019-02]		[g/cm ³]	2,73 - 2,75
Kornanteil [DIN 18123:2011-04]			
≤ 0,002 mm			17,4
≤ 0,06 mm			89,9
≤ 2 mm			100
Bodengruppe nach DIN 18196:2011-05			TL

Tab. 4-5: Zusammenfassung der Ergebnisse aus den klassifizierenden Versuchen am Boden TLMü

4.2 Laborversuche zur Bestimmung des Wassergehalts

Der prinzipielle Einfluss der Trocknungstemperatur und der Trocknungszeit bei der Bestimmung des Wassergehalts von organischen Böden oder Böden mit organischen Bestandteilen wurde auf Basis der Literaturrecherche in Abschnitt 3.2.2 beschrieben. Weitere Versuche wurden gemäß dem in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen Versuchsplan durchgeführt. Die Versuche wurden dabei so konzipiert, dass sowohl der Einfluss der Trocknungstemperatur als auch der Trocknungsdauer auf die Wassergehaltsbestimmung ermittelt

werden kann. Zur Verifizierung der Messergebnisse wurden jeweils drei Probekörper untersucht. In Versuchsreihe I wurden die drei Proben für 24 Stunden bei 105 °C getrocknet. Bei der Versuchsreihe II wurden die drei Proben bei 105 °C insgesamt über 120 Stunden getrocknet, wobei die Trockenmassen nach unterschiedlichen Zeitpunkten bestimmt wurden (4 ,8, 16, 24 und 120 Stunden). Bei der Versuchsreihe III erfolgte die Trocknung bei einer Temperatur von 60°C, wobei die drei Proben insgesamt ebenfalls über 120 Stunden getrocknet wurden. Die Trockenmassen wurden dabei nach 4 ,8, 16, 24, 48, 72, 96 und 120 Stunden Trocknungsdauer bestimmt wurden. Alle Proben wurden nach Trocknung zunächst in einem Exsikkator auf Raumtemperatur abgekühlt, bevor die Trockenmasse durch Wägung bestimmt wurde. Die entnommene Probenmasse betrug bei allen Versuchen etwa zwischen 450 und 480 g, um bei einer vergleichenden Bewertung der Ergebnisse den Einfluss der Probenmasse auf die Trocknungsdauer auszuschließen. Die verwendete Waage hatte eine Genauigkeit von 0,01 g, entsprechend den Vorgaben in DIN EN ISO 17892-1:2013-04. Alle Ergebnisse sind in Tab. 4-6 tabellarisch aufgelistet.

Probe	Versuchs-Nr.	Zeit [Std.]	Temperatur [°C]	Wassergehalt [%]			
				1	2	3	Mittelwert
BoSc	I	24	105	120,03	118,13	120,12	119,43
	II	4	105	36,96	42,70	34,48	38,05
		8		79,76	85,89	78,49	81,38
		16		119,61	119,61	120,54	119,92
		24		120,10	119,95	120,98	120,34
		120		120,37	120,23	121,28	120,63
	III	4	60	12,17	14,13	12,86	13,05
		8		26,05	32,41	28,33	28,93
		16		57,02	72,87	62,75	64,21
		24		86,28	104,09	90,60	93,66
		48		110,72	113,38	114,00	112,70
		72		110,72	113,37	114,00	112,70
		96		111,04	113,77	114,35	113,05
		120		105	113,53	116,30	116,90
BoGr	I	24	105	108,46	109,84	109,90	109,40
	II	4	105	26,57	27,84	27,58	27,33
		8		56,87	57,53	59,28	57,89
		16		108,49	107,14	108,49	108,04
		24		109,85	110,24	111,04	110,38
		120		110,45	110,80	111,58	110,94
	III	4	60	9,68	11,09	10,79	10,52
		8		18,87	21,59	21,29	20,58
		16		37,95	41,14	40,33	39,81
		24		57,90	62,42	61,92	60,75
		48		101,25	102,79	104,22	102,75
		72		104,18	104,36	104,87	104,47
		96		104,63	104,82	105,27	104,91
		120		105	108,07	108,26	108,76
NiSt	I	24	105	89,98	89,35	89,50	89,61
	II	4	105	32,36	30,06	30,74	31,05
		8		62,48	60,69	62,80	61,99
		16		89,14	89,05	88,99	89,06
		24		89,88	89,69	89,61	89,73

Probe	Versuchs-Nr.	Zeit [Std.]	Temperatur [°C]	Wassergehalt [%]			
				1	2	3	Mittelwert
		120		90,41	90,22	90,07	90,23
	III	4	60	11,68	9,80	12,71	11,40
		8		22,02	18,64	24,09	21,58
		16		41,42	36,37	45,79	41,19
		24		60,63	54,39	66,18	60,40
		48		85,10	84,47	85,05	84,87
		72		85,57	85,51	85,21	85,43
		96		86,01	85,96	85,59	85,85
		120		105	89,85	89,80	89,37
KIBu2	I	24	105	139,10	141,06	140,37	140,18
	II	4	105	46,86	37,56	42,08	42,17
		8		99,20	89,39	102,07	96,89
		16		137,34	137,24	140,45	138,34
		24		137,92	138,16	140,87	138,98
		120		138,72	138,99	141,68	139,80
	III	4	60	17,03	15,67	16,63	16,44
		8		37,63	39,85	37,04	38,17
		16		91,31	99,17	83,63	91,37
		24		124,50	127,48	121,29	124,42
		48		130,83	132,71	134,42	132,65
		72		130,81	132,71	134,56	132,69
		96		131,36	133,27	135,07	133,23
		120		105	135,57	137,35	139,36
	BoFr	I	24	105	103,65	104,38	106,03
II		4	105	29,99	28,42	27,19	28,53
		8		59,25	60,31	53,91	57,82
		16		100,91	100,42	98,38	99,90
		24		103,81	104,00	104,67	104,16
		120		104,46	104,68	105,50	104,88
III		4	60	9,09	10,74	9,73	9,85
		8		18,03	21,05	18,92	19,33
		16		35,93	40,97	36,34	37,75
		24		55,87	62,44	55,64	57,98
		48		95,45	99,22	95,75	96,81
		72		98,40	100,14	99,29	99,28
		96		98,67	100,34	99,60	99,54
	120	105		102,96	104,61	103,82	103,80
BoWo	I	24	105	90,04	90,17	91,12	90,44
	II	4	105	34,91	34,84	34,33	34,69
		8		65,36	66,16	63,92	65,15
		16		88,73	89,17	87,66	88,52
		24		89,15	89,58	88,13	88,95
		120		89,65	90,09	88,64	89,46
	III	4	60	14,84	14,77	12,72	14,11
		8		27,79	28,37	23,61	26,59
		16		50,00	52,51	43,28	48,60

Probe	Versuchs-Nr.	Zeit [Std.]	Temperatur [°C]	Wassergehalt [%]			
				1	2	3	Mittelwert
		24		70,03	76,35	63,84	70,07
		48		86,18	86,33	85,67	86,06
		72		86,41	86,48	86,14	86,34
		96		86,48	86,55	86,28	86,44
		120	105	89,91	89,88	89,66	89,82

Tab. 4-6: Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Wassergehaltsbestimmungsversuchen

Die Abhängigkeit des Wassergehaltes von der Trocknungsdauer bei den unterschiedlichen Trocknungstemperaturen ist zusätzlich grafisch in Bild 4-5 dargestellt. Aus Bild 4-5 geht hervor, dass die bei 105°C getrockneten Proben eine höhere Massenreduktion und damit einen höheren Wassergehalt erreichen als die bei 60°C getrockneten Proben. Die bei 60°C getrockneten Proben benötigen dabei eine längere Zeit, mindestens ca. 48 Stunden, um eine Massenkonzanz zu erreichen. Die bei 105°C getrockneten Proben benötigen im Vergleich zu den bei 60°C getrockneten Proben weniger Zeit bis zum Erreichen der Massenkonzanz (ca. 16 Stunden). Zum besseren Vergleich der unterschiedlichen Trocknungstemperaturen wurden die bei 60°C bis zur Massenkonzanz getrockneten Proben abschließend bei 105 °C für 24 Stunden getrocknet. Die Ergebnisse werden durch den letzten roten Farbpunkt in den einzelnen Diagrammen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Proben trotz einer vorherigen Trocknung bei 60°C bei der abschließenden Trocknung bei 105°C für 24 Stunden etwa den gleichen Wassergehalt erreichen wie die direkt bei 105°C getrockneten Proben. Aus den Versuchen geht hervor, dass die Trocknung bei Trocknungstemperaturen unter 105°C zu längeren Trocknungszeiten führt. Wie von O'KELLY (2005a) beobachtet, ist entsprechend den Versuchsergebnissen zu erwarten, dass das Porenwasser nicht vollständig entfernt wird, wenn die Probe bei niedrigeren Temperaturen als 105 °C getrocknet wird.

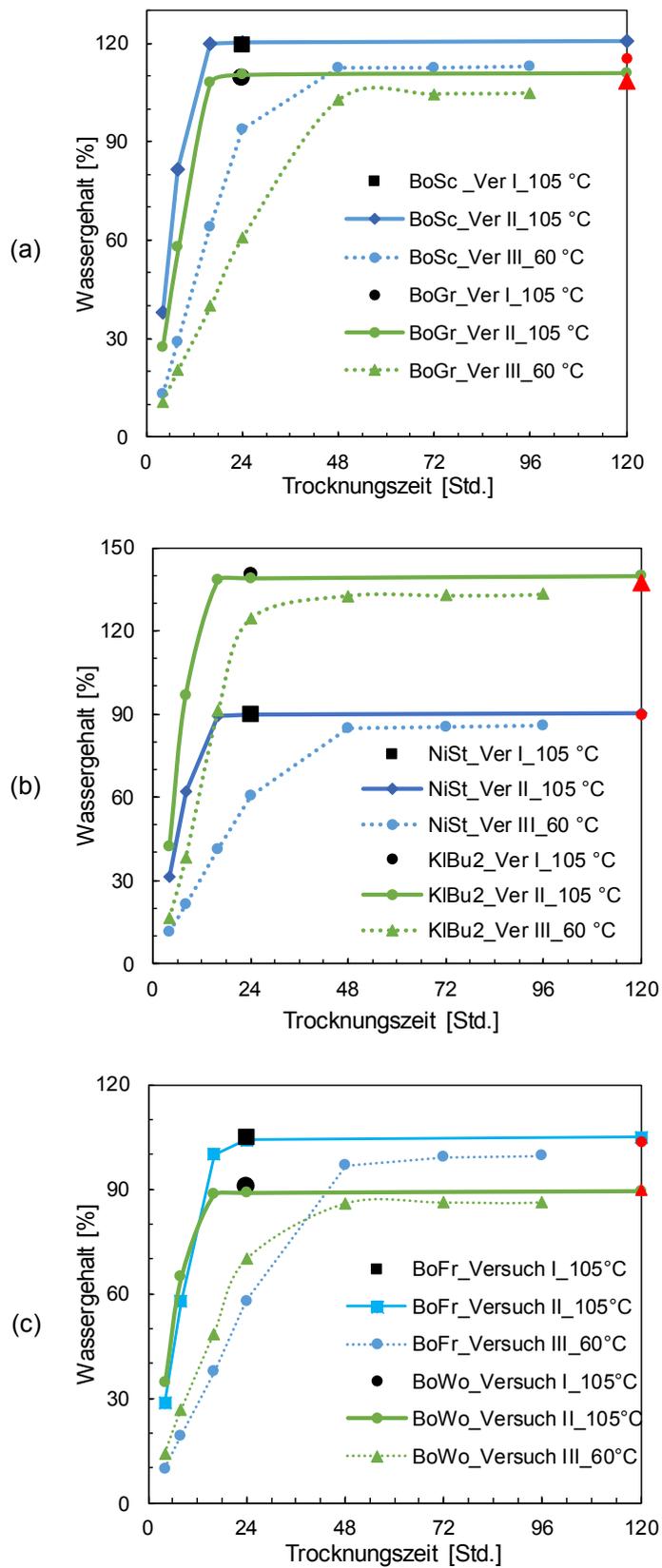


Bild 4-5: Wassergehalt bestimmt bei 105° und 60°C für verschiedene Trocknungszeiten für (a) BoSc und BoGr (b) NiSt und KIBu2 (c) BoFr und BoWo

Wie bereits im Abschnitt 3.2.2 beschrieben, erfordern die Wassergehaltsbestimmungen die Entfernung des gesamten Porenwassers mit Ausnahme von adsorbiertem Wasser an der Oberfläche von Feststoffen und Kristallwasser. Die Menge des aus einem organischen Boden entfernten Porenwassers hängt von der Trocknungstemperatur und der Trocknungszeit ab. Die zur Trocknung eines Bodens erforderliche Trocknungstemperatur und -zeit wiederum sind abhängig von der physikalischen und chemischen Art und Weise, in der das Porenwasser im Boden gehalten wird.

Diese Abhängigkeit der Wassergehaltsabnahme von der Trocknungstemperatur wurde durch Versuche nach dem von O'KELLY (2005b) beschriebenen Verfahren zur Bestimmung der optimalen Trocknungstemperatur untersucht. Dazu wurden aus den 6 Versuchsböden (Böden mit organischen Beimengungen) und aus dem leicht plastischen Ton (TLMü) repräsentative Prüfkörper entnommen (siehe Abschnitt 4.1). Die Proben wurden so vorbereitet, dass die Trockenmasse etwa 5 g betrug. Die Proben wurden jeweils bis zur Massenkonstanz bei verschiedenen Temperaturen von 60°C bis zu einer Maximaltemperatur von 150°C (in Schritten von 60, 65, 70, 85, 95, 105, 125 und 150 °C) getrocknet. Die Temperatur des Ofens wurde innerhalb von ±2 °C reguliert und bei jedem Schritt aufgezeichnet. Die Trockenmassen wurden in 4-Stunden-Intervallen aufgezeichnet, um festzustellen, ob die Proben bei der jeweiligen Trocknungstemperatur eine konstante Masse erreicht haben. Die Probenmassen wurden mit einer Genauigkeit von 0,01 g bestimmt, wie in DIN EN ISO 17892-1:2013-04 angegeben. Nach dem Trocknen bei 150°C wurden die Proben durch Zugabe von destilliertem Wasser über einen Zeitraum von 7 Tagen gesättigt. Anschließend wurden die Trockenmassen bei 60°C bestimmt. Die Ergebnisse werden in Form von Trockenmassenreduktionen, ausgedrückt als Prozentsatz der bei 60°C gemessenen ursprünglichen Trockenmassen, beschrieben.

$$\text{Trockenmassenreduktion} = \left(\frac{m_{60^{\circ}\text{C}} - m_{t^{\circ}\text{C}}}{m_{60^{\circ}\text{C}}} \right) \times 100 \text{ [\%]} \quad (3)$$

wobei $m_{60^{\circ}\text{C}}$ und $m_{t^{\circ}\text{C}}$ die Trockenmassen sind, die bei einer Ofentrocknungstemperatur von 60°C und einer beliebigen Temperatur $t^{\circ}\text{C}$ zwischen 60°C und 150°C aufgezeichnet wurden. Diese Trockenmassenreduktionen sind in Bild 4-9, Bild 4-8, Bild 4-9 und Tab. 4-7 dargestellt. Bei der Auswertung der Versuchsergebnisse wird davon ausgegangen, dass über die abschließende nochmalige Bestimmung der Trockenmasse bei 60°C die bei der vorherigen Trocknung bei Temperaturen bis 150°C möglicher Weise aufgetretene Verkohlung von organischer Substanz quantitativ als Differenz zur Trockenmasse bei der anfänglichen Trocknung bei 60°C bestimmt werden kann. Anhand der so ermittelten Differenz der Trockenmassen lässt sich anschließend die optimale Trocknungstemperatur, bei der gerade noch keine Oxidation von organischer Substanz stattfindet, grafisch bestimmen.

Die Ausgangsproben benötigten eine Trocknungsdauer von 20 Stunden bei 60°C, um eine konstante Masse zu erreichen. Bei höheren Temperaturen war die erforderliche Trocknungsdauer kürzer. Aus Bild 4-6 ist ersichtlich, dass die Massenreduktion im Verhältnis zum Glühverlust steht. Je höher der Glühverlust ist, desto höher ist die Massenreduktion. Der Boden KIBu2 zeigte im Vergleich zu den anderen Proben eine deutlich höhere Massenreduktion nach der abschließenden Trocknung bei 60°C. Dies weist darauf hin, dass im Zuge der vorherigen Trocknung bei Temperaturen bis 150°C entweder organische Substanz verkohlt wurde oder das im enthaltenen Gips eingelagerte Wasser entfernt wurde.

Probe	Temperatur [°C]	Massenveränderung [%]			
		1	2	3	Mittelwert [%]
BoSc	60	0,00	0,00	0,00	0,00
	65	0,63	0,00	0,63	0,42
	70	0,63	0,42	0,63	0,56
	80	1,05	1,05	1,05	1,05
	95	1,05	1,26	1,47	1,26
	105	1,26	1,26	1,47	1,33
	125	1,68	1,68	1,68	1,68
	150	1,89	1,89	1,89	1,89
	60	0,42	0,42	0,63	0,49
BoGr	60	0,00	0,00	0,00	0,00
	65	0,84	0,84	0,84	0,84
	70	0,84	0,84	0,84	0,84
	80	1,47	1,47	1,47	1,47
	95	1,89	1,89	1,68	1,82
	105	2,11	1,89	1,47	1,82
	125	2,53	2,32	2,32	2,39
	150	2,95	2,95	2,74	2,88
	60	0,84	0,84	0,63	0,77
NiSt	60	0,00	0,00	0,00	0,00
	65	1,47	1,05	1,05	1,19
	70	1,47	1,26	1,05	1,26
	80	2,32	1,89	1,89	2,04
	95	2,74	2,32	2,32	2,46
	105	2,95	2,53	2,32	2,60
	125	3,58	3,16	3,16	3,30
	150	4,00	3,79	3,79	3,86
	60	1,47	0,84	1,05	1,12
KIBu2	60	0,00	0,00	0,00	0,00
	65	1,05	0,63	1,05	0,91
	70	1,05	0,63	0,84	0,84
	80	1,89	1,26	1,89	1,68
	95	2,53	1,89	2,53	2,32
	105	2,74	2,11	2,74	2,53
	125	3,58	2,53	3,58	3,23
	150	4,42	3,37	4,21	4,00
	60	2,11	1,89	2,74	2,25
BoFr	60	0,00	0,00	0,00	0,00
	65	1,26	1,26	1,47	1,33
	70	1,47	1,26	1,47	1,40
	80	2,11	2,11	2,32	2,18
	95	2,74	2,53	2,74	2,67
	105	3,16	2,74	3,16	3,02
	125	3,58	3,37	3,79	3,58

Probe	Temperatur [°C]	Massenveränderung [%]			
		1	2	3	Mittelwert [%]
	150	4,21	3,79	4,21	4,07
	60	0,63	0,84	0,84	0,77
BoWo	60	0,00	0,00	0,00	0,00
	65	1,05	1,26	1,26	1,19
	70	1,47	1,47	1,68	1,54
	80	2,11	2,53	2,32	2,32
	95	2,53	2,95	2,74	2,74
	105	2,53	3,16	3,37	3,02
	125	3,37	4,00	4,00	3,79
	150	4,21	4,84	4,63	4,56
	60	1,47	1,26	1,26	1,33
TLMü	60	0,00	0,00	0,00	0,00
	65	0,21	0,42	0,42	0,35
	70	0,42	0,63	0,42	0,49
	80	0,42	0,63	0,63	0,56
	95	0,42	0,63	0,84	0,63
	105	0,63	0,84	1,05	0,84
	125	0,63	1,05	0,84	0,84
	150	1,05	1,26	1,26	1,19
	60	-0,84	-0,63	-0,63	-0,70

Tab. 4-7: Zusammenfassung der Massenreduktion bei Trocknung nach O'KELLY (2005c)

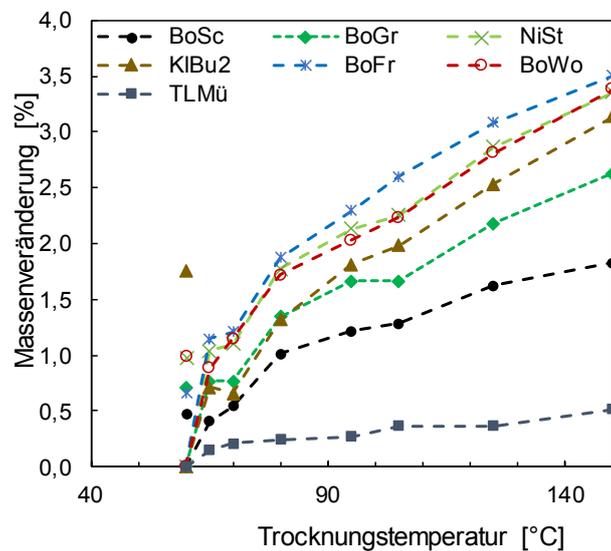
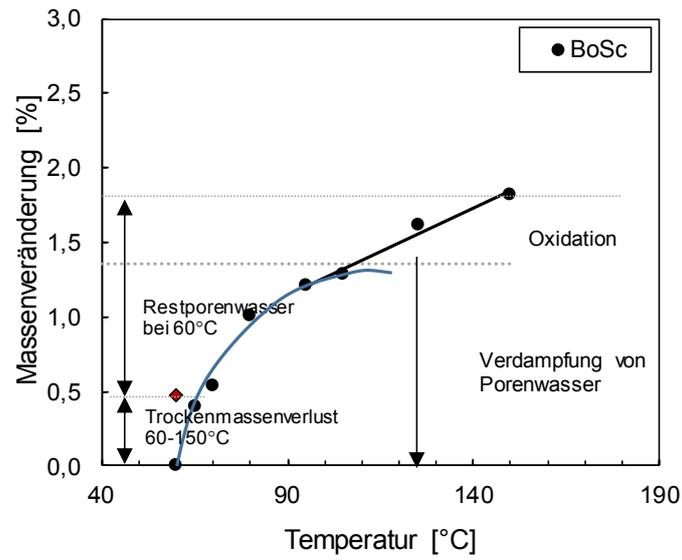
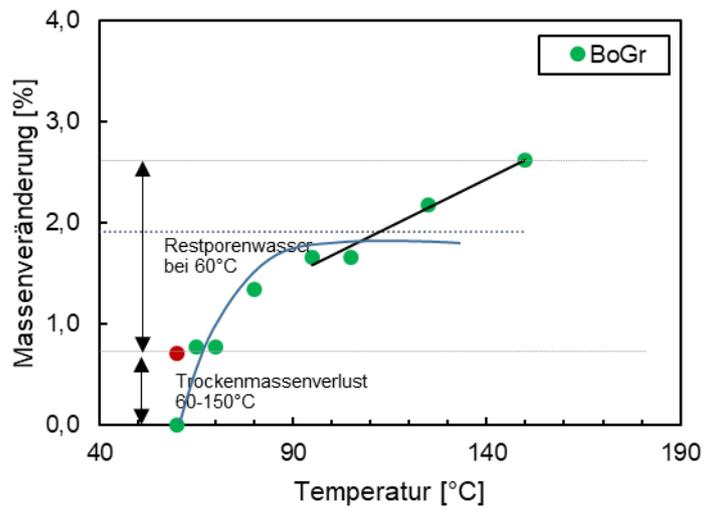


Bild 4-6: Änderung der Probetrockenmasse gegenüber der Ofentrocknungstemperatur

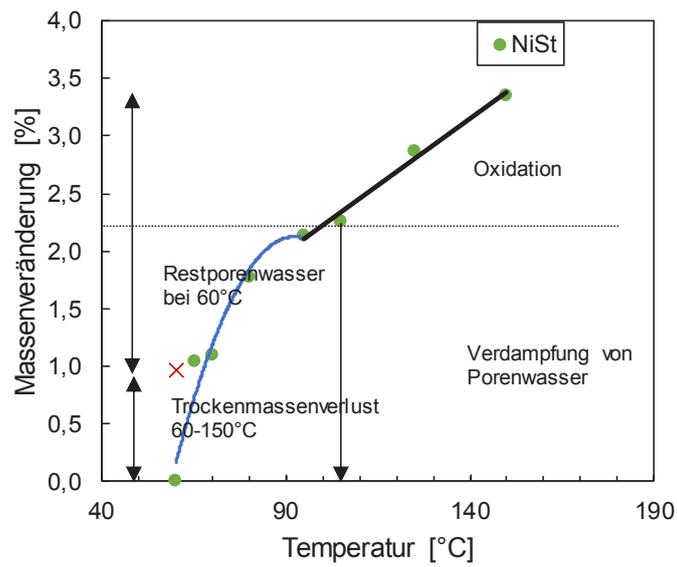


(a)

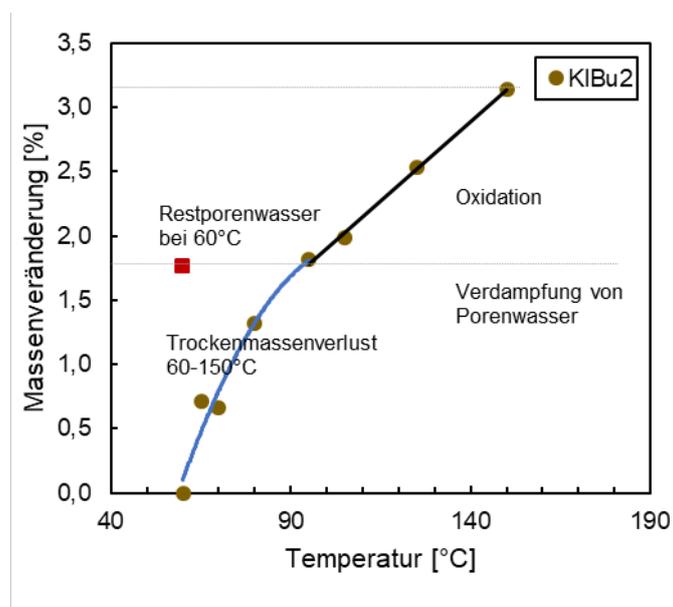


(b)

Bild 4-7: Massenreduktion von Böden BoSc (a) und BoGr (b) mit steigender Temperatur von 60°C bis 150°C

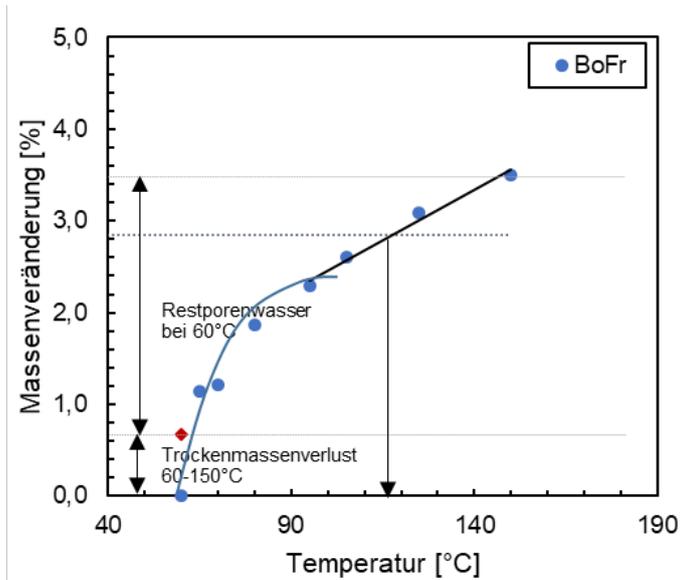


(a)

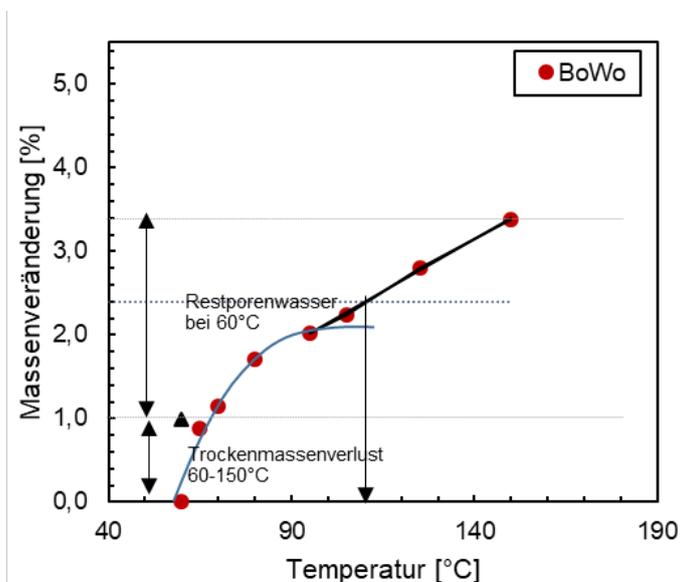


(b)

Bild 4-8: Massenreduktion von Böden NiSt (a) und KIBu2 (b) mit steigender Temperatur von 60°C bis 150°C



(a)



(b)

Bild 4-9: Massenreduktion von Böden BoFr (a) und BoWo (b) mit steigender Temperatur von 60°C bis 150°C

Gemäß dem Vorgehen von O'KELLY (2005b) wurden empirische Trocknungskurven, die die Beiträge von Verdampfungs- und Oxidationsprozessen zur Reduzierung der Probentrockenmasse anzeigen, an die Daten von 60°C bis 100°C angepasst. Desweiteren wurde eine Oxidationstrendlinie tangential an die zwischen 95°C und 150°C ermittelten Messdaten eingetragen. Der Trockenmassenverlust zwischen 60°C und 150°C wurde als gestrichelte Linie bezogen auf den Massenverlust bei 150°C in die Diagramme eingetragen. Darüber lässt sich das über Verdampfungs- und Oxidationsprozesse entwichene Porenwasser unterscheiden und eine Trocknungstemperatur („optimale“ Trocknungstemperatur) ableiten, bis zu welcher noch nicht mit signifikanten Oxidationsvorgängen zu rechnen ist.

Die optimale Trocknungstemperatur für die Böden BoSc, BoGr, NiSt, BoWo und BoFr liegt demnach im Bereich zwischen 105°C und ca. 115°C.

Für den Boden KIBu2 wurde eine deutlich geringere optimale Trocknungstemperatur von ca. 75°C ermittelt. Die Gründe für die Unterschiede zu den übrigen Böden konnten nicht abschließend geklärt werden. Es ist aber zu beachten, dass die Böden KIBu2 und BoFr gemäß der chemischen Analyse (siehe Abschnitt 4.3) Gips enthalten und es durch die Trocknung bei Temperaturen bis 150°C zu einer nicht reversiblen Entfernung des Zwischenschichtwassers aus Gips kommen kann, was die oxidative Zersetzung der organischen Substanz überlagert. Aus den Ergebnissen kann geschlossen werden, dass der auf der Grundlage der Trockenmasse der Probe bei 105°C bis 110°C berechnete Fehler im Wassergehaltswert klein ist, während eine Trocknungstemperatur von 60°C zu einem deutlich größeren Fehler durch die unvollständige Trocknung des Bodens führt. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse von O'KELLY (2005b) ist festzustellen, dass das in den Proben verbleibende Restporenwasser offensichtlich eine Funktion des organischen Anteils ist. So bestimmte O'KELLY (2005b) eine optimale Trocknungstemperatur von 86°C für einen organischen Schlamm mit 70 % organischem Gehalt, während für die hier betrachteten Böden mit nur 20 % bis 30 % Glühverlust deutlich höhere optimale Trocknungstemperaturen bestimmt wurden. (O'KELLY, 2005b) berichtet auch, dass die Genauigkeit der Methode davon abhängt, inwieweit die Bodenproben nach Trocknung bis 150°C wieder aufgesättigt werden können (Reversibilität der Trocknung). Gemäß O'KELLY (2005b) hängt dies u.a. von der Tonmineralogie und einer möglicherweise dauerhaften Entfernung von Zwischenschichtwasser oder auch dem Gipsanteil und der dabei möglicherweise auftretenden nicht-reversiblen Entfernung von Hydratationswasser ab.

4.3 Laborversuche zur Bestimmung des Glühverlustes

4.3.1 Konzeption

Der Gehalt an organischem Material hat einen deutlichen Einfluss auf die bautechnischen Eigenschaften eines Erdbaustoffes, weshalb dessen Bestimmung häufig ein Teil der klassifizierenden Routineuntersuchungen im Labor ist. Die verschiedenen verfügbaren Methoden, die in Abschnitt 3.2.3 beschrieben wurden, führen selbst bei Anwendung auf homogene Proben zu unterschiedlichen Ergebnissen. Das Untersuchungskonzept wurde so konzipiert, dass die in Abschnitt 3.2.3 beschriebenen Methoden angewendet und eine vergleichende Analyse durchgeführt werden konnten.

4.3.2 Bestimmung anhand des Glühverfahrens

In einer ersten Versuchsreihe wurde jeweils der Einfluss der Glühzeit auf die Massenreduktion bei einer Glühtemperatur von 550°C ermittelt. Die Proben wurden dazu zunächst bei 105°C getrocknet, abgekühlt und gewogen. Danach wurden die Proben im Mörser pulverförmig zerkleinert und bei 550°C geglüht. Die Proben wurden über einen Zeitraum von 12 Stunden geglüht und dabei alle 4 Stunden gewogen. Die Ergebnisse sind in Tab. 4-8 und Bild 4-10 dargestellt. Es geht daraus hervor, dass 90 % bis 98 % des Glühverlustes bereits in den ersten 4 Stunden aufgetreten sind und nach 8 Stunden keine weitere Gewichtsabnahme mehr stattfindet. Dies widerspricht der in der DIN 18128:2002-12 enthaltenen Anmerkung, dass bei kleinen Probenmassen eine Glühzeit von 2 Stunden ausreichend ist. Zu beachten ist, dass die Massenreduktion infolge des Glühens bei 550°C nicht nur auf organische Substanz zurückzuführen ist und somit der Glühverlust kein exakter Indikator für den organischen Gehalt ist. Dasselbe kann durch die Ergebnisse der thermogravimetrischen Analyse bestätigt werden, bei der ein Verlust von chemisch gebundenem Wasser im Temperaturbereich des Glühverlustversuches beobachtet werden kann (siehe Abschnitt 4.3).

Probe Nr	Glühtemperatur (°C)	Glühdauer (Std.)	Glühverlust [%]			
			1	2	3	Mittelwert
BoSc	550	0	0,00	0,00	0,00	0,00
		4	19,38	19,72	19,42	19,51
		4	19,52	19,81	19,79	19,71
		4	19,56	19,85	19,83	19,75
	200	8	4,73	5,50	5,94	5,39
	200	4	5,76	6,21	6,34	6,10
	300	8	16,08	16,20	15,83	16,04
	400	8	18,81	19,03	18,81	18,88
	500	8	19,52	19,66	19,39	19,52
	600	8	19,92	20,00	19,71	19,88
	700	8	19,98	20,08	19,81	19,96
800	8	20,00	20,12	19,84	19,99	
BoGr	550	0	0,00	0,00	0,00	0,00
		4	23,22	23,02	22,28	22,84
		4	25,33	24,89	24,77	25,00
		4	25,34	25,09	25,09	25,17
	200	8	7,62	7,34	7,08	7,35
	200	4	8,80	8,30	8,15	8,42
	300	8	20,55	19,96	19,72	20,08
	400	8	24,55	24,46	24,14	24,38
	500	8	25,20	25,20	24,85	25,08
	600	8	25,75	25,80	25,40	25,65
	700	8	26,08	25,90	25,65	25,88
800	8	26,13	25,89	25,68	25,90	
NiSt	550	0	0,00	0,00	0,00	0,00
		4	24,00	26,16	24,27	24,81
		4	26,03	26,86	26,29	26,39
		4	26,11	26,93	26,37	26,47
	200	8	9,08	6,54	7,90	7,84
	200	4	9,72	7,45	9,10	8,76
	300	8	19,04	19,39	19,63	19,35
	400	8	23,56	24,49	24,28	24,11
	500	8	24,59	25,77	25,40	25,25
	600	8	25,67	26,76	26,49	26,31
	700	8	31,16	32,38	31,88	31,81
800	8	32,17	33,66	33,05	32,96	
KIBu2	550	0	0,00	0,00	0,00	0,00
		4	19,60	19,11	19,45	19,39
		4	19,66	19,83	19,71	19,73
		4	19,62	19,75	19,66	19,68
	200	8	7,70	6,71	7,92	7,44
	200	4	8,19	7,27	8,34	7,93
	300	8	15,37	14,52	15,06	14,98

Probe Nr	Glühtemperatur (°C)	Glühdauer (Std.)	Glühverlust [%]			
			1	2	3	Mittelwert
	400	8	18,12	17,55	17,76	17,81
	500	8	19,54	19,03	19,05	19,21
	600	8	19,87	19,39	19,35	19,54
	700	8	20,00	19,58	19,51	19,70
	800	8	20,81	20,25	20,23	20,43
BoFr	550	0	0,00	0,00	0,00	0,00
		4	30,19	31,12	31,57	30,96
		4	33,08	32,56	33,62	33,09
		4	33,21	32,97	33,72	33,30
	200	8	6,74	10,01	9,05	8,60
	200	4	8,04	10,77	10,04	9,62
	300	8	26,95	26,19	24,31	25,82
	400	8	30,85	31,05	30,06	30,65
	500	8	33,15	32,82	31,73	32,57
	600	8	34,06	33,86	32,77	33,56
	700	8	39,36	39,80	38,43	39,20
	800	8	40,86	40,70	39,86	40,47
BoWo	550	0	0,00	0,00	0,00	0,00
		4	22,23	22,23	22,78	22,41
		4	22,66	22,65	22,91	22,74
		4	22,71	22,95	22,94	22,87
	200	8	7,02	8,27	8,56	7,95
	200	4	8,05	9,11	9,38	8,85
	300	8	18,45	18,30	18,20	18,32
	400	8	21,43	21,32	21,47	21,41
	500	8	22,37	22,27	22,46	22,37
	600	8	23,12	23,12	23,31	23,18
	700	8	24,07	23,83	24,00	23,97
	800	8	24,20	23,97	24,13	24,10

Tab. 4-8: Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Glühverlustversuchen

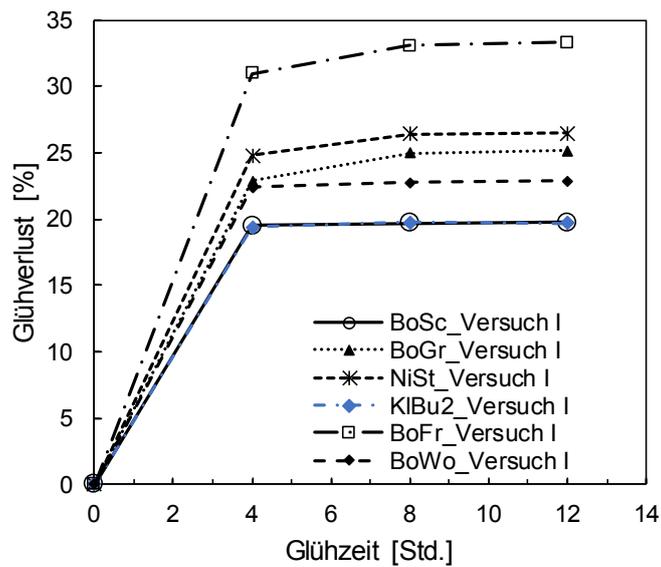


Bild 4-10: Glühverlust bestimmt bei 550°C für verschiedene Trocknungszeiten für alle Böden

Der Einfluss der Glühtemperatur auf die Massenreduktion wurde in einer zweiten Versuchsreihe analysiert. Das dabei angewandte Versuchsverfahren ähnelt einer thermogravimetrischen Analyse, bei der die Temperatur zwischen 200°C und 800°C schrittweise erhöht wurde. Die Glühdauer betrug dabei abgesehen von der ersten Temperatur von 200°C jeweils 8 Stunden. Es zeigt sich, dass der Massenverlust durch Glühen bei Temperaturen zwischen 200°C und 600°C signifikant zunimmt (siehe Bild 4-11). Aus Bild 4-11 ist ersichtlich, dass der Trend bei allen Böden ähnlich war, mit Ausnahme von NiSt und BoFr, bei denen auch bei höheren Temperaturen noch eine deutliche Massenreduktion erkennbar ist. Es wird angenommen, dass bei den Böden NiSt und BoFr bei Temperaturen über 550°C noch Kristallwasser aus den Tonmineralen ausgetrieben wird. Ein sehr ähnliches Verhalten wurde von HOOGSTEEEN, ET AL., 2015 an sandigem Boden und Schluff-Lehm-Boden (ohne nähere bodenmechanische Klassifizierung der Böden) beobachtet. Neben dem Verlust von Kristallwasser kann die Massenreduktion bei Temperaturen über 550°C bei den Böden NiSt und BoFr auch auf eine Zersetzung von Calcit zurückgeführt werden. Darauf weisen auch die Ergebnisse der an den Böden durchgeführten thermogravimetrischen Analyse hin (siehe Bild 4-12, Bild 4-13 und Bild 4-14).

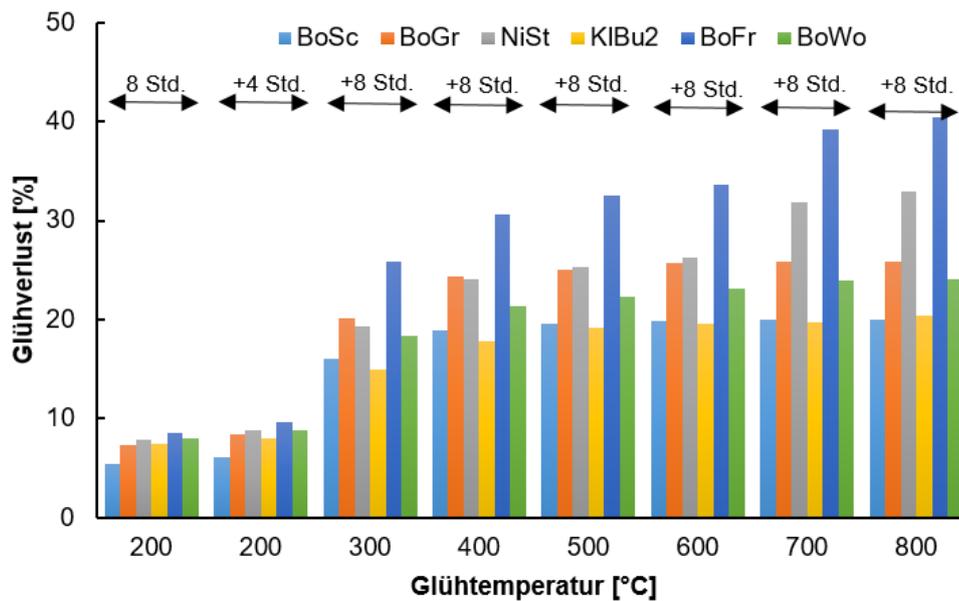


Bild 4-11: Glühverlust bestimmt bei Temperaturen zwischen 200°C und 800°C für alle Böden

4.3.3 Bestimmung mittels thermogravimetrischer Analyse, Röntgendiffraktometrie und chemischer Analyse

Die Menge an organischen Bestandteilen („Organic Matter“ - OM), die in einem Boden vorhanden ist, kann allgemein durch verschiedene Methoden bestimmt werden:

- exakte Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs „Total Organic Carbon“ (TOC) durch einen „Carbon-Hydrogen-Nitrogen (CHN)“-Analysator
- Messung des Glühverlustes bei 550°C
- Beschreibung und Bestimmung der OM durch thermische Analysen (FRANGIPANE, ET AL., 2009)

Der Glühverlust wird entweder durch einen festen Umrechnungsfaktor oder durch Regressionsanalysen in den organischen Kohlenstoffgehalt („total organic content“ – TOC) umgerechnet (DE VOSS ET AL., 2005). OM umfasst alle Elemente (Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff), die Bestandteile von organischen Verbindungen sind nicht nur Kohlenstoff. Es ist deshalb schwierig, den OM direkt zu messen, weshalb ein Umrechnungsfaktor herangezogen wird, um den TOC in OM umzurechnen. Der Umrechnungsfaktor geht davon aus, dass der OM 58 % organischen Kohlenstoff enthält. Dieser Faktor hängt jedoch von der Art der organischen Substanz und der Bodenart ab. Für die konventionell verwendete Methode zur Bestimmung des organischen Gehalts durch Glühverlust sind zwei Nachteile infolge des potenziellen CO₂-Verlusts von Karbonaten und des Verlusts von Strukturwasser bekannt. Diese Nachteile könnten durch die Durchführung einer thermogravimetrischen Analyse überwunden werden. Bei der thermogravimetrischen Analyse werden die Böden geblüht und die Massenreduktionen durch Verdampfung des Porenwassers, Oxidation organischer Stoffe, Entfernung von kristallinem Wasser und anderer Reaktionen aufgezeichnet. Die Massenreduktion infolge der Entfernung von kristallinem Wasser aus vorhandenen Mineralien kann mit Hilfe der Röntgendiffraktometrie (XRD) identifiziert werden. Das Vorhandensein und die Menge von Kalzit, Dolomit und der Kalkgehalt können nach DIN 18129:2011-07 bestimmt werden.

Vor diesem Hintergrund wurde an den Versuchsböden ergänzend eine thermogravimetrische Analyse und eine Analyse mit der Röntgendiffraktometrie sowie eine Bestimmung des Kalkgehaltes nach DIN 18129:2011-07 durchgeführt. Die Massenänderung bei der Thermogravimetrischen Analyse (TGA) wurde im Labor des Centrum Baustoffe und Materialprüfung der TUM mit dem Gerät STA 449 F3 Jupiter des

Herstellers Netzsch erfasst. Etwa 20 g bis 30 g Probenmaterial wurden für die Versuche vorbereitet, indem sie bei 40°C getrocknet und zerkleinert wurden. Gemessen wurde mit einer Heizrate von 20 K/min in Stickstoffatmosphäre im Temperaturbereich von 25°C bis 1000°C.

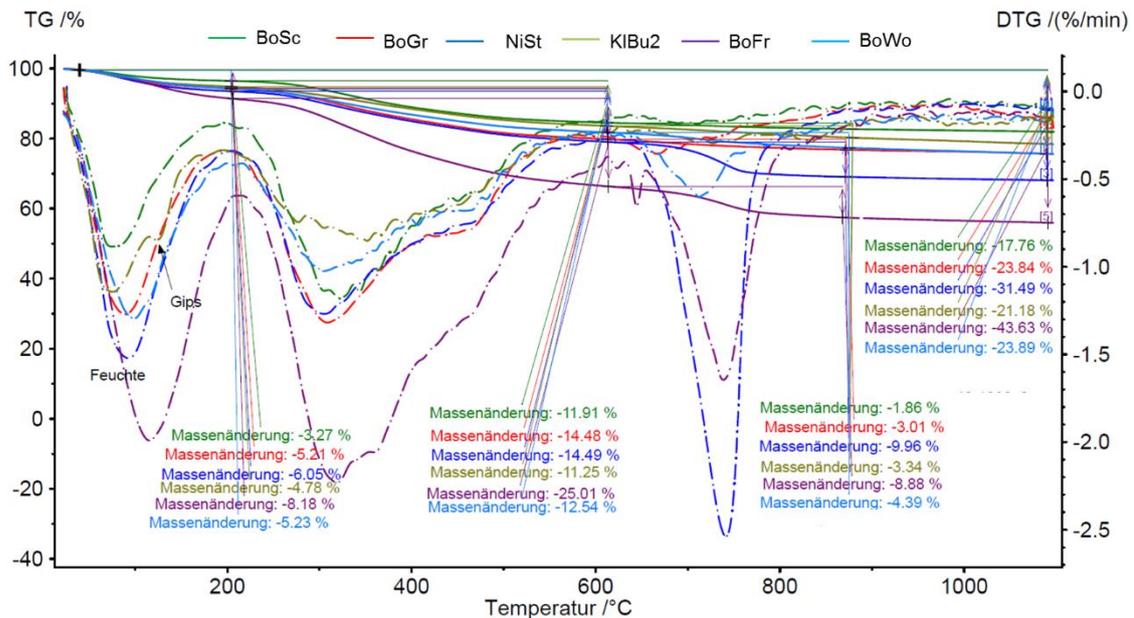


Bild 4-12: Ergebnisse der thermogravimetrischen Analyse: thermogravimetrische Kurven TG (durchgezogene Linie) und differentielle thermogravimetrische Kurven DTG (gestrichelte Linien)

Die Ergebnisse der thermogravimetrischen Analyse sind in Bild 4-12 dargestellt. Die durchgezogenen Linien stellen die thermogravimetrischen Kurven (TG-Kurve) dar, wobei die Ergebnisse als prozentuale Massenreduktion angegeben sind. Die Ableitung der TG-Kurve ist in der Abbildung als gestrichelte Linien (DTG-Kurve) dargestellt und wird in Einheiten von %/min angegeben. Wie in Bild 4-12 dargestellt, zeigt die TG-Kurve einen signifikanten Gewichtsverlust, bevor die Temperatur 120°C erreicht. Dieser Peak ist mit Wasserverdampfung und -desorption verbunden. Alle Böden zeigen bei der differentiellen Analyse der thermogravimetrischen Analyse einen Peak bei etwa Temperaturen zwischen ca. 90°C und 110°C, einzig der Boden KIBu2 weist einen weiteren Peak bei etwa 125°C auf. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Röntgendiffraktometrie (XRD) ist dieser zweite Peak auf das Vorhandensein von Gips zurückzuführen (siehe Bild 4-12), da der Gewichtsverlust des Bodens KIBu2 gut mit der Entwässerung des Gipses übereinstimmt, das bei einer Temperatur zwischen 100°C und 170°C stattfindet. Ein zweiter ausgeprägter Peak in den DTG-Kurven ist für alle Böden bei Temperaturen zwischen ca. 300°C und 350°C festzustellen. Dies ist in der Dehydrierung des Zwischenschichtwassers begründet, die bei etwa 250°C bis 500°C auftritt. Massenverluste oberhalb von 600°C werden im Allgemeinen auf Mineralreaktionen einschließlich Karbonatzerersetzung und Abbau von Tonmineralien zurückgeführt. Die bei den Böden NiSt, BoFr und BoWo zwischen ca. 700°C und 750°C festgestellten Massenreduktionen können mit deren hohem anorganischen Kohlenstoffgehalt TIC und Kalkgehalt (siehe Tab. 4-9) erklärt werden. So zeigten nur diese drei Böden, die einen ausgeprägten anorganischen Kohlenstoffanteil aufweisen, eine signifikante Gewichtsabnahme bei Temperaturen zwischen 705°C und 720°C, während bei Proben mit niedrigerem anorganischen Kohlenstoffgehalt in diesem Temperaturbereich keine vergleichbaren Peaks beobachtet wurden (siehe dazu auch (KRISTL ET AL., 2016)). Aus den vorgestellten Ergebnissen geht hervor, dass die Massenreduktion innerhalb von

550°C nicht nur auf die Oxidation organischer Substanz, sondern auch auf die Entfernung von Kristallwasser zurückzuführen ist. Dies sollte bei der Durchführung und Auswertung von Glühverlustversuchen berücksichtigt werden.

Die Röntgendiffraktometrie wird zur Charakterisierung der mineralogischen Zusammensetzung von Böden häufig verwendet. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden die Messungen mit einem Bruker D8 Advance Diffraktometer mit Cu K α Strahlung und einem hochauflösenden energiedispersiven Detektor LYNXEYE-XE durchgeführt. Dabei wurden die folgenden Einstellungen gewählt: automatischer Divergenzspalt; 5 – 70 ° 2 θ -Winkelbereich; 0,02° 2 θ -Schrittweite; 0,2 s Messzeit pro Schritt; 40 kV Spannung; 40 mA Strom. Die resultierenden Peaks wurden auf der Grundlage vorhandener Datenbanken identifiziert. Die Versuche wurden im Labor des Centrum Baustoffe und Materialprüfung der TUM durchgeführt.

Bild 4-13, Bild 4-14 zeigt die Ergebnisse der XRD-Messung, die an allen Versuchsböden durchgeführt wurde. Die Ergebnisse geben für alle Böden Quarz als Hauptphase, gefolgt von Mikroklin und Albit an. Mikroklin (K[AlSi₃O₈]) ist ein Mineral aus der Gruppe der Feldspate innerhalb der Mineralklasse der Silikate und Albit (NaAlSi₃O₈) ist ein Plagioklas-Feldspatmineral. Die Böden BoSc und BoGr weisen die gleichen Bestandteile in unterschiedlichen Anteilen auf. Die Böden NiSt, BoFr und BoWo enthalten Calcit (CaCO₃), das eine Form von anorganischem Kohlenstoffmineral darstellt. Dies wird auch über den vergleichsweise hohen Gesamtgehalt an anorganischem Kohlenstoff „Total Inorganic Carbon“ (TIC) bei diesen Böden deutlich (siehe Tab. 4-10). Zusätzlich zu den oben genannten Komponenten wurden Gips, Muskovit und Chlinochlorit in den Böden KIBu2 und BoFr identifiziert. Gips (CaSO₄·2H₂O) ist ein weiches Sulfatmineral, welches bei Temperaturen zwischen 100°C und 150°C dehydriert. Muskovit (KAl₂(AlSi₃O₁₀)(F, OH)₂) und Clinochlorit (Mg₃Fe₂Al)(AlSi₃O₁₀)(OH)₈ sind Phyllosilikat-Mineralien. Neben Calcit ist im Boden BoFr auch Dolomit (CaMg[CO₃]₂) enthalten.

Probe-Nr	Kalzitanteil [%]	Dolomitanteil [%]	Kalkgehalt [%]
BoSc	0,56	0,21	0,78
BoGr	0,77	0,06	0,83
NiSt	8,85	5,46	14,31
KIBu2	0,51	0,01	0,52
BoFr	5,51	8,38	14,20
BoWo	2,36	0,17	2,53

Tab. 4-9: Ergebnisse der Kalkgehaltsversuche nach DIN 18129:2011-07

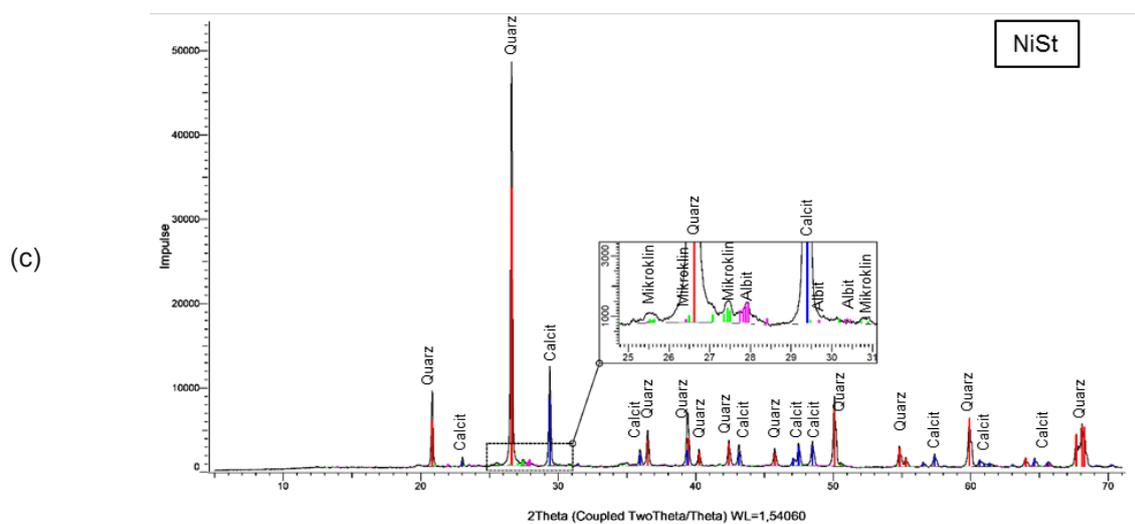
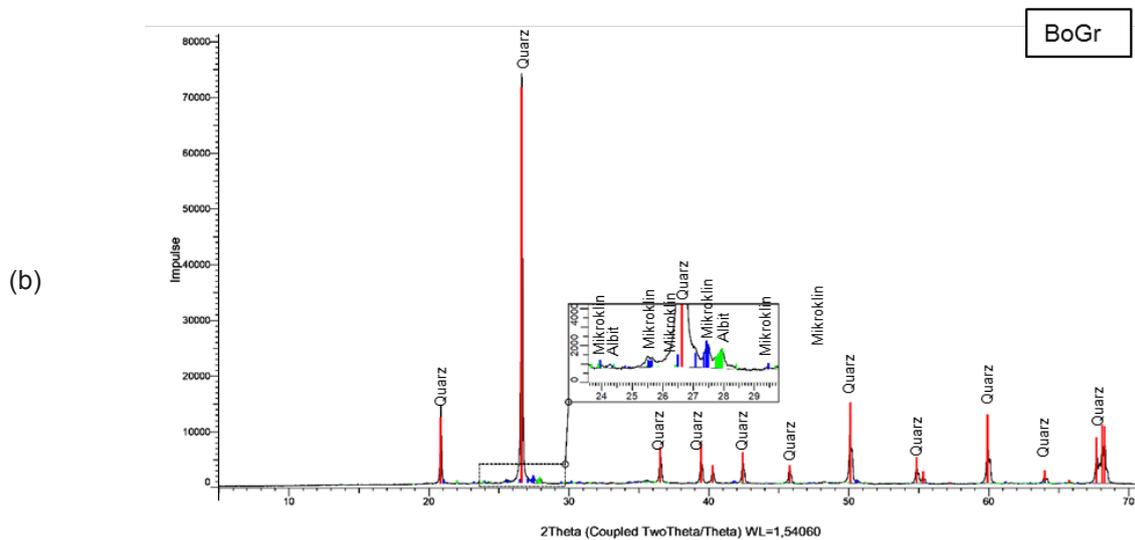
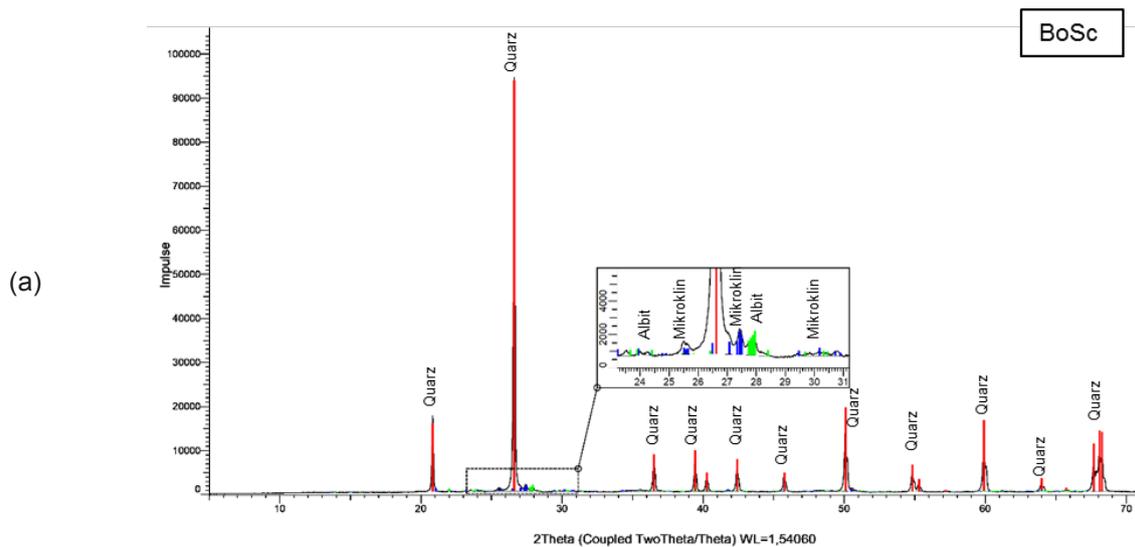


Bild 4-13: XRD-Spektrum des mineralischen Anteils der Versuchsböden BoSc (a), BoGr (b) und NiSt (c)

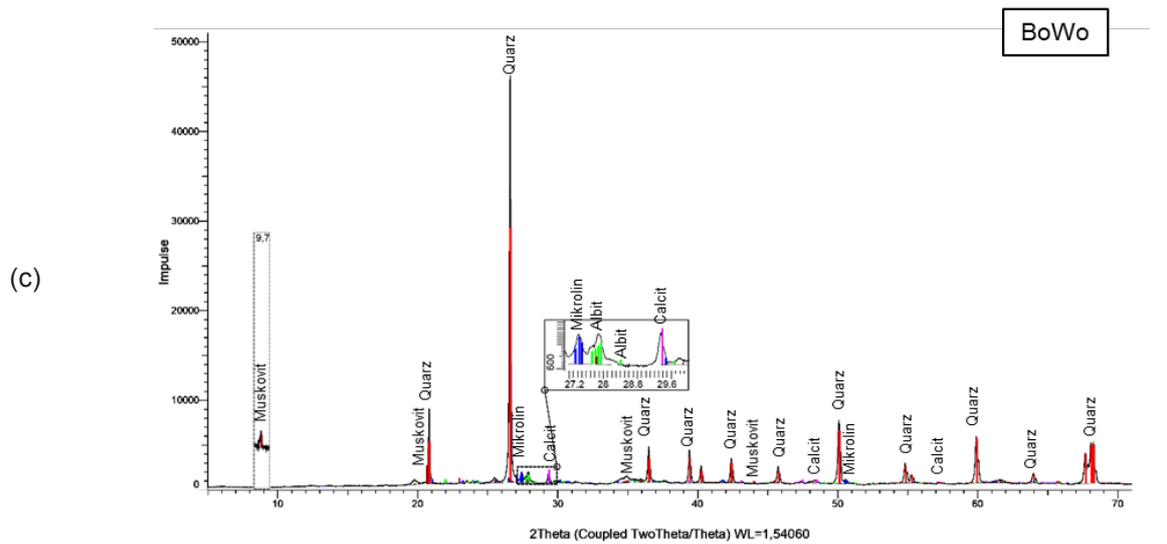
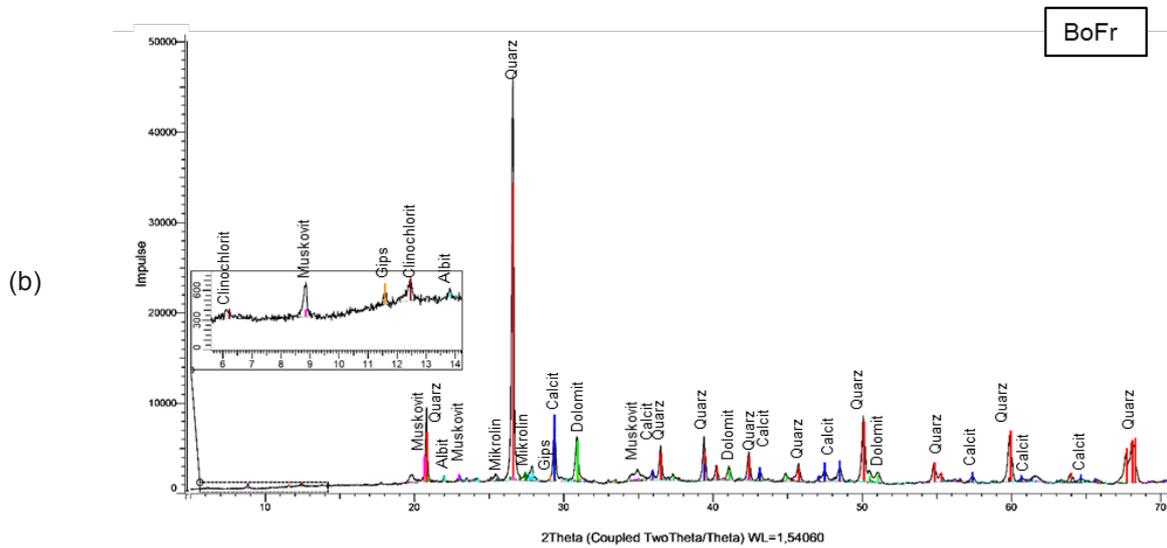
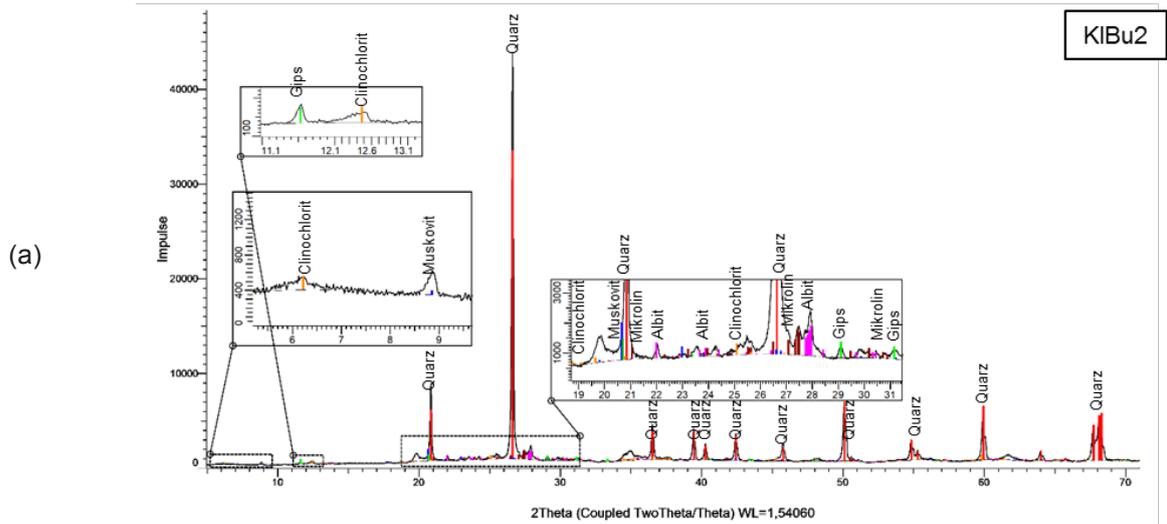


Bild 4-14: XRD-Spektrum des mineralischen Anteils der Versuchsböden KIBu2 (a), BoFr (b) und BoWo (c)

Eine chemische Analyse wurde durchgeführt, um die einzelnen vorhandenen Elemente zu identifizieren und zu quantifizieren. Die Ergebnisse sind in Tab. 4-10 dargestellt. Das zur chemischen Analyse eingereichte Material wurde zunächst 8 Stunden bei 105°C getrocknet und anschließend homogenisiert. Etwa 50 g davon wurden in der Scheibenschwingmühle (Firma Herzog) für 20 Sekunden gemahlen und anschließend der chemischen Analyse zugeführt. Als Teil der chemischen Analyse wurde ein Glühverlusttest durchgeführt. Dazu wurde etwa 1 g Probenmaterial in einen Porzellantiegel auf 0,0001 g eingewogen und 30 Minuten bei 1000°C bis zur Massenkonstanz geglüht. Nach Abkühlung auf Raumtemperatur wurde der Tiegel gewogen und daraus der Glühverlust berechnet. Zur Bestimmung des TC wurde ein Elementaranalysator der Firma Analytik Jena, Modell EA4000 verwendet. Dabei wurde etwa 100 mg der Probe in ein Glühschiffchen auf 0,1 mg eingewogen und dieses dann in 100 % Sauerstoffatmosphäre bei 1350°C thermisch zersetzt. Sämtliche Kohlenstoffverbindungen werden dabei zu CO₂ umgesetzt. Die Menge an entstandenem Kohlendioxid wird von einem NDIR-Detektor quantitativ bestimmt (Flächenintegral aus Messsignal x Zeit). Eine zuvor durchgeführte Kalibrierung mit bekannten TC-Konzentrationen rechnet das gemessene Flächenintegral in Masseprozent TC um. In gleicher Weise wie beim TC wird der TOC bestimmt, allerdings nur bei einer Temperatur von etwa 600°C. Dabei werden nur die organischen Kohlenstoffverbindungen zu CO₂ umgesetzt. Die anorganischen Kohlenstoffverbindungen bleiben erhalten. Etwa 100 mg Probe werden erneut in ein Glühschiffchen eingewogen und mit Quarzsand vermischt. Nachdem das Schiffchen in das Messsystem eingeführt wurde, wird etwa 1 ml 40 prozentige Phosphorsäure auf die Probe aufgegeben.

In einer chemischen Reaktion werden dabei nur die Carbonate zu CO₂ umgesetzt. Die Erfassung erfolgt dann analog wie unter TC/TOC. Die Differenz zwischen TC und TOC führt zum TIC.

Anschließend erfolgt die chemische Analyse mittels ICP-EOS („Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy“), welche im Labor des Centrum Baustoffe und Materialprüfung der TUM durchgeführt wurde. Dazu wird zunächst etwa 0,5 g des Glührückstands aus der Bestimmung des Glühverlust in einem Platintiegel auf 0,0001 g gewogen. Anschließend wird 1,5 g Lithiummetaborat dazugegeben. Die Mischung wird mit einem dünnen Spatel homogenisiert und anschließend bei 1000°C für 20 Minuten geschmolzen. Nach dem Abkühlen liegt dann eine glasartige Tablette vor. Diese wird für 20 Sekunden in einer Kugelmühle gemahlen. Etwa 0,4 g davon wird mit 2 ml 65 prozentiger Salpetersäure quantitativ in einem 100-ml-Messkolben gelöst und auf ein Analysenvolumen von 100,0 ml mit Reinstwasser (Leitfähigkeit < 5 µS/cm) aufgefüllt. Die klare Aufschlusslösung wurde 10-fach verdünnt und anschließend mit ICP-OES auf die im Analysenbericht angegebenen Elemente bestimmt. Zum Einsatz kam ein ICP-OES der Firma PerkinElmer, Modell Avio500.

Für die Gesamtzusammensetzung der Probe wurde die Summe aus Glühverlust und Elementkonzentrationen in Oxidform gebildet. Die absolute Messunsicherheit bezogen auf die 100-Prozent-Summe beträgt +/- 1 M%.

Parameter	[EH]	BoSc	BoGr	NiSt	KIBu2	BoFr	BoWo
Total Carbon (TC)	M%	10,38	15,26	16,12	10,24	19,76	10,44
Total Organic Carbon (TOC)	M%	8,27	14,49	13,83	9,58	17,13	9,24
Total Inorganic Carbon (TIC)	M%	2,11	0,77	2,29	0,66	2,63	1,2
Glühverlust @ 1000°C	M%	18,57	28,7	33,65	22,2	40,62	24,46
Al ₂ O ₃	M%	2,76	3,27	3,14	9,13	5,57	6,36
BaO	M%	0,02	0,04	0,02	0,04	0,02	0,05
CaO	M%	1,49	2,45	10,95	1,46	9,32	3,52
Cr ₂ O ₃	M%	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Fe ₂ O ₃	M%	0,8	3,72	1,25	4,39	2,37	5,45
K ₂ O	M%	0,99	0,9	0,71	1,69	0,95	1,6
MgO	M%	0,18	0,25	0,35	0,89	2,22	0,69
MnO	M%	0,03	0,07	0,06	0,09	0,05	0,29
Na ₂ O	M%	0,51	0,57	0,38	0,74	0,46	0,7
P ₂ O ₅	M%	0,13	0,38	0,19	0,13	0,13	0,45
SO ₃	M%	0,23	0,36	0,48	0,18	1,17	0,3
SiO ₂	M%	73,6	60,01	48,31	60,12	36,02	57,03
SrO	M%	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
TiO ₂	M%	0,19	0,22	0,28	0,59	0,33	0,41
V ₂ O ₅	M%	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
ZnO	M%	0,01	0,02	0,01	0,01	0	0,01

Tab. 4-10: Ergebnisse der chemischen Analyse

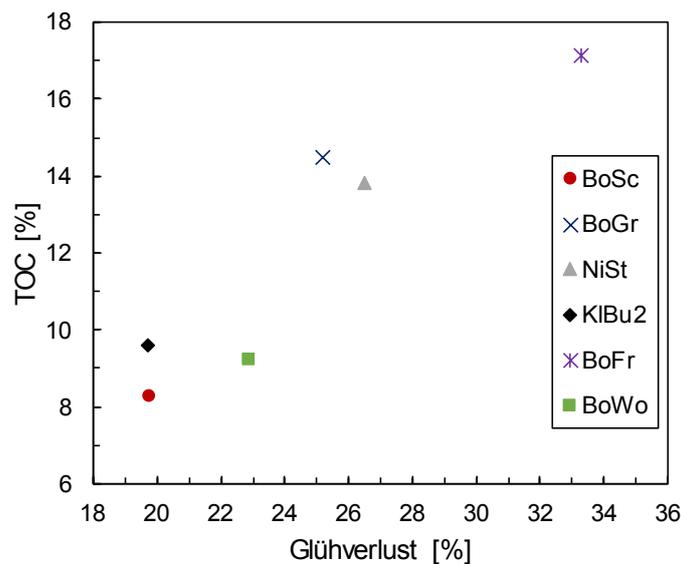
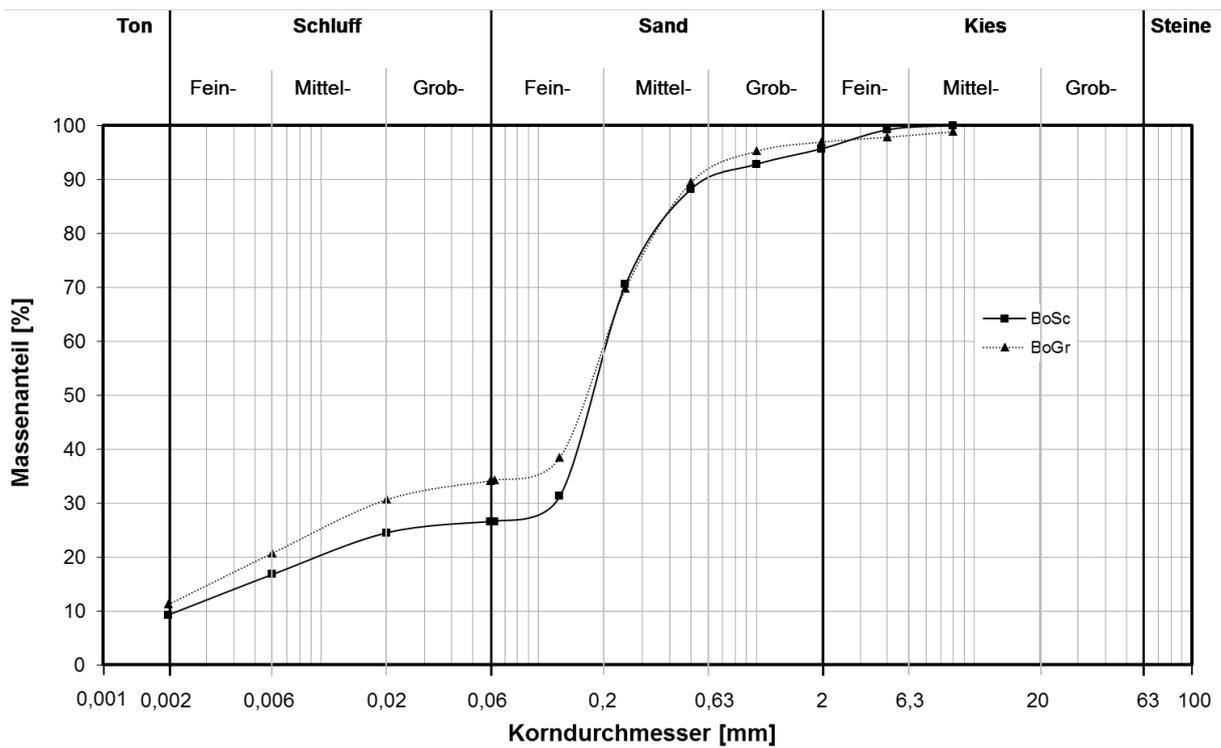


Bild 4-15: Beziehung zwischen TOC und Glühverlust (gemäß den Ergebnissen der chemischen Analyse)

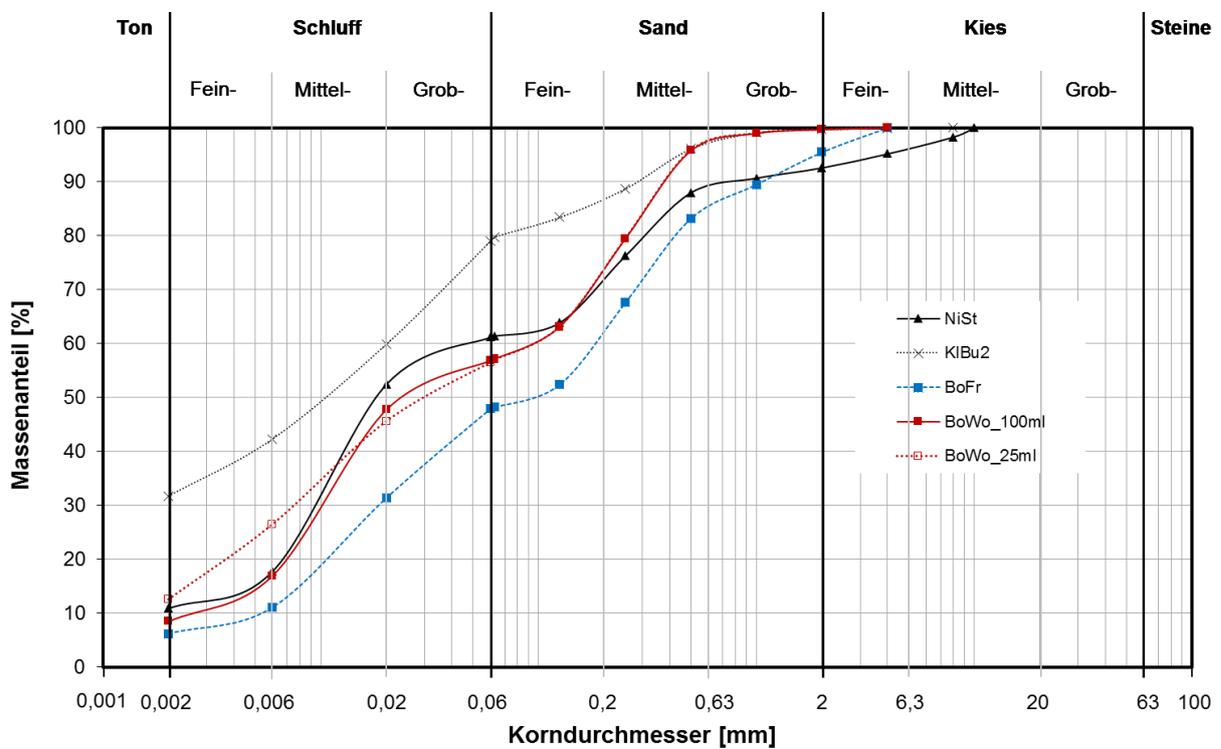
Auffallend sind die deutlichen Unterschiede zwischen den ermittelten Glühverlusten und den TOC-Werten (siehe Tab. 4-10 und Bild 4-15). Diese lassen sich durch die Massenverluste infolge des Entweichens von Kristallwasser und die Zersetzung von Karbonaten während des Glühens erklären (HERRMANN ET AL., 2014). Es wurde berichtet, dass das Verhältnis von TOC- zu Glühverlust-Werten ($\text{TOC}/V_{\text{Gl}550^\circ\text{C}}$) im Bereich zwischen 0,4 und 0,6 liegt. Dieser Wert hängt jedoch unter anderem vom Tongehalt und dem organischen Gehalt ab. Auch in den hier durchgeführten Untersuchungen liegt das Verhältnis ($\text{TOC}/V_{\text{Gl}550^\circ\text{C}}$) innerhalb des oben genannten Bereichs. Dieses Verhältnis kann jedoch nur als Indikator verwendet werden und ist nicht geeignet, um vom TOC-Wert auf den Glühverlust zu schließen oder anders herum, da es weitere Faktoren wie den Tongehalt und die Mineralogie gibt, die dieses Verhältnis beeinflussen.

4.4 Laborversuche zur Bestimmung der Korngrößenverteilung

An allen Versuchsböden wurde eine kombinierte Siebung und Sedimentationsanalyse gemäß DIN EN ISO 17892-4:2017-04 durchgeführt. Die Proben wurden dafür nicht vorbehandelt. Die so bestimmten Korngrößenverteilungen sind in Bild 4-16 dargestellt. Als Dispergierungsmittel wurde in allen Versuchen Natriumpyrophosphat ($\text{Na}_4\text{P}_4\text{O}_7$) in einer Menge von 100 ml verwendet. Während der Versuche wurde beobachtet, dass die Proben BoSc, BoGr, KIBu2 mäßig und die Probe des Bodens BoWo nach Zugabe dieses Dispergierungsmittel stark aufschäumten. Am Boden BoWo wurde daher ein weiterer Versuch mit einer geringeren Menge desselben Dispergierungsmittels (25 ml) durchgeführt (in Bild 4-16(b) durch gestrichelte rote Linie dargestellt). Siehe dazu auch die Fotos in Bild 4-17.



(a)



(b)

Bild 4-16: Korngrößenverteilungskurve aus der kombinierten Siebung und Sedimentationsanalyse für (a) gemischtkörnige Böden BoSc und BoGr und (b) feinkörnige Böden NiSt, KIBu2, BoFr und BoWo



Bild 4-17: Aufschäumen von Sedimentationsanalyseproben von BoWo Böden mit 100 ml Dispergierungsmittel (Natriumpyrophosphat). Bei Zugabe von 25 ml Dispergierungsmittel (Natriumpyrophosphat) wurde kein Aufschäumen beobachtet.

Um zu beurteilen, welchen Einfluss die organischen Anteile auf die Korngrößenverteilung haben, dürfen organische Bestandteile gemäß DIN EN ISO 17892-4:2017-04 vor Durchführung der Siebung und Sedimentationsanalyse unter Verwendung von Wasserstoffperoxid entfernt werden.

Die vier Böden BoSc, BoGr, NiSt und KIBu2 wurden gemäß den Vorgaben der DIN EN ISO 17892-4:2017-04 mit Wasserstoffperoxid behandelt. Die Proben wurden zunächst bei 105°C getrocknet, anschließend wurde der Wassergehalt nach DIN EN ISO 17892-1:2015-03 bestimmt. Von jedem Boden wurde eine Probe von 70 g Trockenmasse entnommen und bei Bedarf zerkleinert. Die Probe wurde in einen Glaskolben gefüllt und es wurde Wasserstoffperoxid (20 Vol.-% nach DIN EN ISO 17892-4:2017-04 in Portionen von 20 ml zugegeben. Nach der Zugabe von mindestens 40 ml wurde eine hitzige Reaktion beobachtet (Bild 4-18 (a), (b)). Als Ergebnis der Reaktion bildeten sich Blasen. Daher wurde die Lösung ständig mit einem Glasstab gerührt, um ein Überschäumen zu vermeiden. Die gleichen Schritte wurden fortgesetzt und es wurde weiter Wasserstoffperoxid hinzugefügt, bis die Reaktion abgeklungen war. So wurde im ersten Versuch Wasserstoffperoxid in Portionen von 20 ml bis zu einer Gesamtmenge von 170 ml hinzugefügt. Dann wurde die Mischung umgerührt, abgedeckt und über Nacht bei Zimmertemperatur stehen gelassen. Nach dem Stehenlassen über Nacht konnten in der Lösung drei verschiedene Schichten beobachtet werden (Bild 4-18(a)). Es wird angenommen, dass die unterste Schicht aus mineralischen Komponenten bestand, die sich abgesetzt haben, die zweite Schicht wahrscheinlich aus Wasserstoffperoxid (dichter als Wasser) und organischen Komponenten, während es sich bei der dritten Schicht wahrscheinlich um eine Lösung aus Wasser und Boden handelte. Die Mischung wurde anschließend unter ständigem Rühren vorsichtig auf eine Temperatur von 90°C erhitzt. Dies soll die Reaktion beschleunigen und bei der Zersetzung von überschüssigem Wasserstoffperoxid helfen. Die Proben wurden dazu so lange erhitzt, bis die Gasentwicklung abgeklungen war. DIN EN ISO 17892-4:2017-04 schlägt vor, dass der Boden im Anschluss durch ein geeignetes Gerät, z.B. eine Zentrifuge, abgetrennt und dann getrocknet wird. Alternativ kann auch eine Vakuumfiltration vorgenommen werden (HEAD, 1980). Bei dieser Methode wird die Probe durch einen mit Filterpapier ausgekleideten Buchner-Trichter unter Vakuum gefiltert, gründlich mit destilliertem Wasser gewaschen und dann getrocknet. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden beide Methoden an zwei Böden (BoSc und NiSt, die als OH bzw. OT klassifiziert wurden) ausgeführt, wobei kein Unterschied in den Ergebnissen festgestellt wurde. Die Vakuumfiltration kann dementsprechend als gleichwertig zur Abtrennung mittels Zentrifuge angesehen werden. Standardmäßig wurde für alle Proben die Vakuumfiltrationsmethode verwendet.

Nach dem Trocknen konnte organische Substanz noch bei allen vier Proben visuell identifiziert werden (siehe Bild 4-18(b)), was bereits auf eine unvollständige Entfernung der organischen Substanz hinwies. Die bei der Behandlung mit Wasserstoffperoxid entfernte Menge an organischer Substanz wurde quantitativ über Wägung wie folgt berechnet:

$$\text{Massenverlust} = \frac{m_{dn} - m_{dv}}{m_{dv}} \times 100\% \quad (4)$$

Dabei sind m_{dn} und m_{dv} die Trockenmasse vor und nach der Vorbehandlung. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tab. 4-11 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Vorbehandlung mit Wasserstoffperoxid zu einer Reduzierung des organischen Anteils führt, jedoch fällt diese im Vergleich zum Gesamtgehalt an organischer Substanz gemäß Glühverlust gering aus. So beträgt der Massenverlust nur zwischen 1 % und 5 %.

Zur Überprüfung inwieweit mit Hilfe einer gegenüber den Empfehlungen der DIN EN ISO 17892-4:2017-04 umfangreicheren Behandlung mit Wasserstoffperoxid eine weitere Reduzierung des organischen Anteils erreicht werden kann, wurden am Boden BoGr weitere Untersuchungen durchgeführt. Es wurde dazu Wasserstoffperoxid wiederholt solange zugegeben, bis eine Reaktion mit dem organischen Anteil visuell nicht mehr nachweisbar war. Insgesamt wurde so eine Gesamtmenge von 450 ml Wasserstoffperoxid über einen Zeitraum von 168 Stunden zugegeben und eine Reduzierung des organischen Anteils um 14 % erreicht (siehe Tab. 4-11).



(a)



(b)



(c)



(d)

Bild 4-18: Reaktion von Wasserstoffperoxid mit Boden (a) BoSc (b) NiSt (c) Suspension während der Vorbehandlung mit Wasserstoffperoxid (d) mit Wasserstoffperoxid behandelte Probe nach Trocknung bei 105°C

Kurzbezeichnung	Probe Nr	Zugabemenge [ml]	Vorbehandlungszeit [Std.]	V _{gl} vor Behandlung [%]	V _{gl} nach Behandlung [%]	Massenverlust [%]
BoSc	84992	170	24	19,75	18,56	4
BoGr	84993-I	170	24	25,17	22,57	5
	84993-II	450	168		14,97	14
NiSt	85053	170	24	26,47	26,25	1
KIBu2	85054	170	24	19,68	16,31	4

Tab. 4-11: Ergebnisse der Vorbehandlung mit Wasserstoffperoxid

Aus den beiden Versuchsreihen kann gefolgert werden, dass die Menge des zugegebenen Wasserstoffperoxids und die Vorbehandlungszeit einen großen Einfluss auf die Menge des entfernbaren organischen Anteils haben.

Zur Kontrolle des entfernten organischen Anteils wurde zusätzlich der Glühverlust nach Durchführung der Vorbehandlung mit Wasserstoffperoxid bestimmt. Die Ergebnisse zeigen nur eine vergleichsweise geringe Reduzierung des Glühverlustes nach Behandlung mit Wasserstoffperoxid. Dies steht in Übereinstimmung mit anderen Forschern (HUANG ET AL. 2009; SCHUMACHER ET AL. 1990), die ebenfalls berichtet haben, dass die Wasserstoffperoxidvorbehandlung zu einer unvollständigen Entfernung organischer Stoffe führt. Entsprechend den im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchungen ist die Wasserstoffperoxid-Methode nicht bzw. nur bedingt zur Entfernung der organischen Substanz und damit der Vorbehandlung von Böden zur anschließenden Bestimmung der Korngrößenverteilung geeignet.

Alle konventionellen Methoden der Korngrößenanalyse basieren auf der Annahme von unterschiedlichen Korndurchmessern. Bei der Sedimentationsanalyse wird ein äquivalenter Korndurchmesser (Korndurchmesser, der durch eine Sedimentationsanalyse unter Anwendung des Stokes'schen Gesetzes und der Annahme von kugelförmigen Körnern ermittelt wird) gemessen, während bei der Siebanalyse ein nominaler Siebdurchmesser (der Durchmesser einer Kugel, die durch eine quadratische Maschenöffnung hindurchgeht) bestimmt wird. In den letzten Jahrzehnten wurde eine neue Methode der Laserdiffraktometrie (LDM) entwickelt, die auf der Ablenkung eines Laserstrahls an Bodenpartikeln beruht. Aus der Ablenkung des Laserstrahls wird ein nominaler Lichtstreuendurchmesser „Nominal Light Scatter diameter“ ermittelt, d. h. es wird der äquivalente Durchmesser eines kugelförmigen Partikels bestimmt, der das gemessene charakteristische Lichtstreuungsmuster erzeugt (FAÉ ET AL. 2019). Im Vergleich zur Siebanalyse werden bei der Laserdiffraktometrie dadurch kleinere Korndurchmesser ausgewiesen, da insbesondere bei länglichen, eher stabförmigen Partikeln der nominale Siebdurchmesser größer ist als der äquivalente Korndurchmesser. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde die Laserdiffraktionsmethode mit dem Malvern Mastersizer 2000 durchgeführt, wobei die Probe (Probemenge 1 – 2g) vorab bei 40°C getrocknet und in Isopropanol dispergiert wurde. Diese Mischung wurde in die Kammer eingebracht, wobei zur Verbesserung der Dispergierung Ultraschallwellen über einen Zeitraum von 90 Sekunden aufgebracht wurden. Zur Berechnung der Korngrößenverteilung wurde die Fraunhofer-Theorie verwendet, die davon ausgeht, dass alle Partikel kugelförmig und viel größer als die einfallende Wellenlänge sind und die Dispersion des Lichts nur vorwärts gerichtet ist. Die Verwendung der Fraunhofer-Theorie wird in Fällen empfohlen, in denen die Probe aus vielen Materialien mit unterschiedlichen optischen Eigenschaften besteht (BIEGANOWSKI ET AL. 2018).

Die mit Hilfe der Laserdiffraktometrie erhaltenen Korngrößenverteilungen sind in Bild 4-19 dargestellt. Vergleichend sind in den Bildern zusätzlich die Ergebnisse der klassischen Sieb- und Sedimentationsanalyse dargestellt, wobei angenommen wurde, dass alle Proben die gleiche Korndichte aufwiesen und somit die mit der Laserdiffraktometrie ermittelte Volumenverteilung gleich der in Bild 4-19 dargestellten Massenverteilung ist. Wie erwartet, sind zwischen den Ergebnissen der konventionellen und der LDM-Methode erhebliche Unterschiede festzustellen. Da den beiden Methoden zwei völlig unterschiedliche Verfahren zur Bestimmung des Korndurchmessers zugrunde liegen, sind die Ergebnisse nicht direkt vergleichbar und ist ein Vergleich der damit ermittelten Kornfraktionen auf der Grundlage der gleichen Durchmesserbereiche (Ton < 0,002mm; Schluff: 0,002 – 0,063mm; Sand: 0,063 – 2mm; Kies: 2 – 63 mm) wenig sinnvoll. Die Korndichte, die bei der Sedimentationsmethode als Konstante angenommen wird, hat keinen Einfluss auf die Ergebnisse der LDM. Wenn die gleichen Größenbereiche für Ton, Schluff und Sand verwendet werden, wie sie in DIN 17892-4:2017-04 festgelegt sind, kann man feststellen, dass die Sedimentationsanalyse im Vergleich zur LDM-Methode einen höheren Tongehalt und einen geringeren Schluffgehalt ergibt. Es ist zu beachten, dass die Überschätzung des Tonanteils auch durch plättchenförmige Partikel bei der Anwendung des Stokes'schen Gesetzes verursacht werden kann. Gemäß BIEGANOWSKI ET AL. (2018) ist die Unter-

schätzung der Tonfraktion bei der LDM-Methode auf eine unregelmäßige Partikelform aber auch eine unzureichende Dispergierung der Bodenaggregate mittels Ultraschall zurückzuführen. Die unterschiedlichen Ergebnisse, die mit der Sedimentationsanalyse und der LDM erzielt wurden, haben dazu geführt, dass in wissenschaftlichem Kontext drei unterschiedliche Wege verfolgt werden. Die erste Gruppe an Forschern lehnt die LDM-Methode als nicht nützlich für die Bodenklassifizierung ab und verwendet weiterhin konventionelle Methoden. Die zweite Gruppe verwendet die LDM, wobei die gleichen Größenbereiche, wie sie für konventionelle Methoden entwickelt wurden, herangezogen werden. Die dritte Gruppe hat versucht, die Größenbereiche der einzelnen Fraktionen so zu verändern, dass die Ergebnisse der beiden Methoden miteinander vergleichbar werden. Zum Beispiel führten FISHER ET AL. (2017) Versuche durch, um die Lasserdiffraktometrieäquivalente zu den Grenzgrößen der Sand-, Schluff- und Tonfraktionen zu bestimmen, und fanden heraus, dass die Größen < 2 , < 20 und $< 200 \mu\text{m}$, die bei der Sedimentationsanalyse herangezogen werden, den Größen < 9 , < 26 und $< 275 \mu\text{m}$ bei der LDM entsprachen. Diese Grenzwerte können nicht für alle Böden verwendet werden, sondern müssen für jede Bodenprobe im Einzelfall untersucht werden.

Desweiteren ist aus den Ergebnissen in Bild 4-19 ersichtlich, dass die Ergebnisse für den Sandgehalt, die durch LDM bestimmt werden, sich von denen der Siebung deutlich unterscheiden. So weist die LDM einen deutlich geringeren Sandanteil als die Siebanalyse auf. Dies könnte auf die Sphärizität und Kornform der Partikel und dabei im Besonderen auf die Abweichung zu einer ideal kugelförmigen Partikelform zurückzuführen sein (KONERT & VANDENBERGHE 1997, BLOTT & PYE 2006). Daneben kann aber auch die bei den verschiedenen Verfahren untersuchte Probemenge Einfluss auf die Ergebnisse haben. So ist die bei der LDM-Methode verwendete Probenmenge etwa 100 Mal geringer als die bei der Sedimentationsanalyse, was die Repräsentativität der LDM-Probe im Vergleich zu der bei der Siebanalyse verwendeten Probe stark einschränkt.

Die Sedimentationsanalyse geht von einer konstanten Partikeldichte für alle Bodenpartikel aus, was bei organogenen Böden zu Fehlern führen kann. Um den Einfluss der organischen Substanz auf die Sedimentationsgeschwindigkeit von Körner beurteilen zu können, müsste die Verteilung der organischen Substanz auf die verschiedenen Korngrößenfraktionen bekannt sein (SHEIN ET AL. 2006). Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass beide Methoden ihre eigenen Vor- und Nachteile haben und ein direkter Vergleich der Ergebnisse nicht sinnvoll ist, sondern je nach Anwendungsfall eine Methode ausgewählt werden sollte. Insbesondere bei gemischtkörnigen Böden mit einem hohen Sand- und Kiesanteil ist die Anwendung der LDM-Methode aufgrund der geringen Probemenge aber als sehr kritisch zu beurteilen. Dies wird durch die Ergebnisse an den Proben BoSc und BoGr bestätigt.

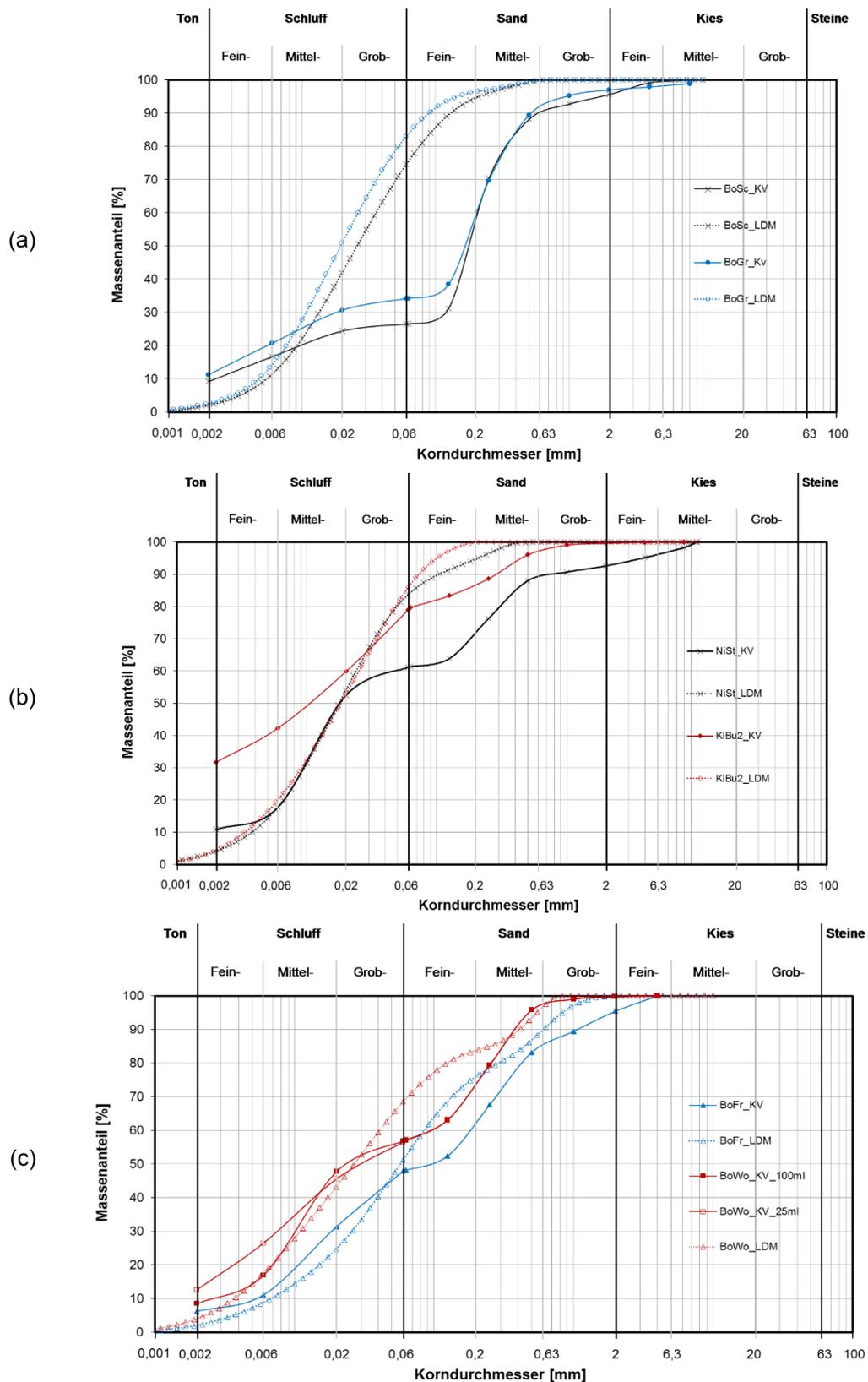


Bild 4-19: Korngrößenverteilungen, erhalten durch konventionelle kombinierte Sieb- und Sedimentationsanalysen (KV) und Laserbeugungsmethode (LDM) für Böden (a) BoSc, BoGr (b) NiSt, KiBu2, (c) BoFr, BoWo

4.5 Laborversuche zur Bestimmung der Korndichte

Die Korndichte des Bodens hängt von der Zusammensetzung sowohl der mineralischen als auch der organischen Bestandteile ab. Die Korndichte der mineralischen Bodenbestandteile ist ein Mittelwert über die Anteile der enthaltenen Bodenminerale. Der Grad der Zersetzung ist einer der wesentlichen Faktoren, die die Partikeldichte der organischen Komponenten beeinflussen. Zur Bestimmung der Korndichte gibt es verschiedene Ansätze, die auf dem Prinzip der Verdrängung von Flüssigkeiten oder Gasen beruhen. Das Probenvolumen wird entweder direkt aus dem verdrängten Volumen oder anhand von physikalischen Gesetzmäßigkeiten bestimmt (im Falle von Gaspyknometern). Die DIN EN ISO 17892-3:2015 erlaubt die Bestimmung der Korndichte entweder mit einem Kapillar-Pyknometer (als Kontrollflüssigkeit kommt hierbau entmineralisiertes Wasser oder ein geeignetes organisches Lösungsmittel wie z.B. Hexan oder Kerosin zum Einsatz) oder einem Gas-Pyknometer (in der Regel mit Helium). Die Bestimmung der Korndichte mit dem Luftpyknometer ist in TP BF StB B3.3 (1988) geregelt. Bei Kapillarpyknometerversuchen darf die Probe feucht oder ofentrocken verwendet werden. Die vorherige Trocknung der Probe kann jedoch für organische/organikhaltige Böden nachteilig sein, bei denen die Möglichkeit einer Oxidation der organischen Substanz bei Temperaturen von 105 °C besteht.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Versuche mit dem Kapillarpyknometer, dem Gaspyknometer und dem Luftpyknometer durchgeführt. Im Kapillarpyknometer wurden sowohl feuchte als auch bei 105°C getrocknete Proben untersucht. Falls erforderlich, wurden die Proben nach dem Trocknen sorgfältig zerkleinert. Bei den Versuchen mit dem Kapillarpyknometer an getrockneten Proben zeigte sich, dass die organischen Substanzen an der Oberfläche schwimmen (siehe Bild 4-20), was zu Problemen bei der Entlüftung der Proben führte. Ähnliches wurde von MACFARLANE & ALLEN (1963) berichtet. Gemäß den Angaben der DIN EN ISO 17892-3:2015 ist das Kapillarpyknometer bis zu 75 % des Volumens zu füllen. Dies war bei den beschriebenen Versuchen jedoch nicht möglich, da es zu einem Aufquellen der Proben nach Wasserzugabe kam und in Verbindung mit der aufschwimmenden organischen Substanz die Pyknometer nicht mehr hätten entlüftet werden können. Die Gaspyknometer-Versuche wurden unter Verwendung von Helium an 105°C getrockneten Proben durchgeführt. Als dritte Versuchsart kam das Luftpyknometer nach DIN 18121-2:2012 zum Einsatz. Die Proben wurden bei Letztem vorab bei 105°C getrocknet und zerkleinert. Das Luftpyknometer wurde anschließend bis zur Hälfte mit Probenmaterial gefüllt und destilliertes Wasser hinzugefügt. Die Mischung wurde gut umgerührt, um die eingeschlossenen Luftblasen zu entfernen. Es wurde beobachtet, dass die Probe schäumte und sich eine Schaumschicht auf der Oberseite bildete. Die Mischung wurde 30 Minuten lang stehen gelassen, dann wurde der Deckel platziert und Druck aufgebracht.



Bild 4-20: Schwimmendes organisches Material während der Kapillarpyknometerversuche

Die Ergebnisse aller Versuche sind in Tab. 4-12 tabellarisch und in Bild 4-21 grafisch dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Kapillarpyknometerversuche höhere Korndichten ergeben als die Versuche mit dem Gaspyknometer. Der Grund dafür lässt sich zum jetzigen Zeitpunkt nicht eindeutig erklären. Gemäß MACFARLANE & ALLEN (1963) ist dieser hohe Wert auf die Kompression der adsorbierten Wasserfilme durch die Wirkung austauschbarer Kationen zurückzuführen. Ob die Proben feucht oder trocken im Kapillarpyknometer untersucht werden, hat dabei keinen systematischen Einfluss auf die Messergebnisse. Die Messungen mit dem Gaspyknometer weisen die geringsten Streuungen auf. Dies beruht auf der Verwendung von Heliumgas, welches mit den organischen Bodenpartikeln nicht reagiert. Entsprechend den Angaben in der Literatur kann es bei Luftpyknometerversuchen zu einer Drift des Differenzdruckindikators während des Versuches kommen, wodurch ggf. kein stabiler Volumenmesswert festgestellt werden kann. Ein solcher Drift wurde jedoch während der Tests nicht beobachtet. Die Probenvorbereitung war schwierig, da eine im Vergleich zu den anderen Versuchen deutlich größere Probenmenge zerkleinert werden musste. Die vollständige Entlüftung war ähnlich wie beim Kapillarpyknometer nicht möglich.

Probe-Nr	Versuch I		Versuch II		Versuch III		Versuch IV	
	Korndichte [g/cm ³]	Mittelwert [g/cm ³]	Korndichte [g/cm ³]	Mittelwert [g/cm ³]	Korndichte [g/cm ³]	Mittelwert [g/cm ³]	Korndichte [g/cm ³]	Mittelwert [g/cm ³]
BoSc	2,37*	2,316	2,355*	2,333	2,248	2,239	2,384 ⁽¹⁾	2,335
	2,281*		2,306*		2,231		2,322 ⁽¹⁾	
	2,297*		2,338*		2,239		2,300 ⁽¹⁾	
BoGr	2,322	2,327	2,293	2,295	2,179	2,177	2,356 ⁽¹⁾	2,333
	2,327		2,290		2,167		2,364 ⁽¹⁾	
	2,332		2,301		2,186		2,280 ⁽¹⁾	
NiSt	2,301	2,295	2,289	2,301	2,171	2,180	2,332	2,328
	2,291		2,301		2,181		2,331	
	2,293		2,312		2,188		2,322	
KIBu2	2,519*	2,446	2,439	2,439	2,278	2,278	2,411	2,413
	2,411*		2,431		2,278		2,393	
	2,408*		2,447		2,278		2,436	
BoFr	2,180	2,192	2,211*	2,182	2,058	2,057	2,205 ⁽¹⁾	2,181
	2,200		2,189*		2,048		2,210 ⁽¹⁾	
	2,197		2,146*		2,067		2,129 ⁽¹⁾	
BoWo	2,377	2,380	2,384	2,400	2,259	2,258	2,460 ⁽¹⁾	2,371
	2,380		2,405		2,256		2,337 ⁽¹⁾	
	2,384		2,411		2,258		2,315 ⁽¹⁾	

Versuch I – Korndichtebestimmung mit Kapillarypyknometer an getrockneter Probe, Versuch II - Korndichtebestimmung mit Kapillarypyknometer an feuchter Probe, Versuch III - Korndichtebestimmung mit Gaspyknometer, Versuch IV - Korndichtebestimmung mit Luftpyknometer

* Die Werte weichen um mehr als 0,03 g/cm³ ab, was über dem in der Norm DIN EN ISO 17892-3:2016-07 angegebenen Grenzwert liegt. Dieser Unterschied könnte auf die unvollständige Entlüftung des Kapillar-Pyknometers durch die aufschwimmenden Partikel zurückzuführen sein.

⁽¹⁾ Die Standardabweichung der Werte weicht um mehr als 0,014 g/cm³ ab, was über dem in der Prüfvorschrift TP BF StB B3.3, 1988 angegebenen Grenzwert liegt. Dieser Unterschied könnte auf die unvollständige Entlüftung zurückzuführen sein.

Tab. 4-12: Zusammenfassung der Korndichte-Ergebnisse

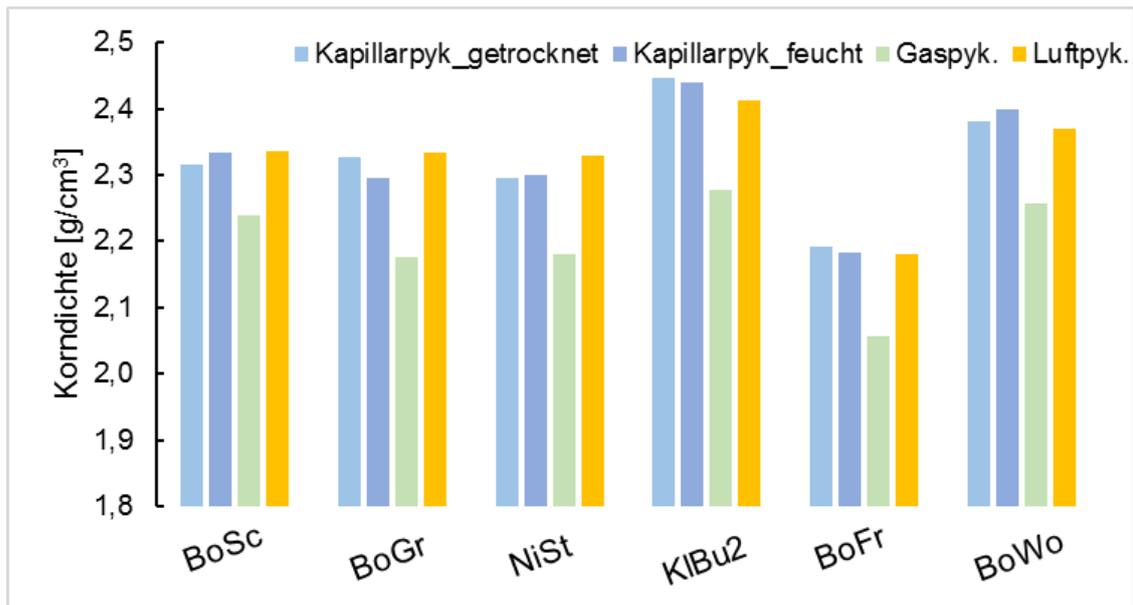


Bild 4-21: Bestimmung der Korndichte mit Kapillarpyknometer an getrockneten und feuchten Proben, Gaspyknometer und Luftpyknometer

4.6 Laborversuche zur Bestimmung der Plastizitätsgrenzen

Gemäß DIN EN ISO 17892-12: 2018 wird die Fließgrenze entweder mit der Fallkegel- oder der Casagrandemethode bestimmt. Die Fallkegelmethode liefert gemäß DIN EN ISO 17892-12:2018 Ergebnisse mit höherer Präzision und stellt deshalb die bevorzugte Methode dar. Die Norm erlaubt dabei sowohl ein stufenweises Erhöhen als auch Verringern des Wassergehaltes, wobei bekannt ist, dass dies zu unterschiedlichen Ergebnissen führt. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden sowohl die Fallkegel- als auch die Casagrande-Methode zur Bestimmung der Fließgrenze mit schrittweiser Erhöhung und Verminderung des Wassergehaltes durchgeführt. DIN EN ISO 17892-12: 2018 schlägt im Hinblick auf die Probemenge vor, dass für Fließgrenzenversuche 200 g Probemenge mit einem Größtkorn von 0,4 mm verwendet werden sollte. Entgegen den Vorgaben der Norm wurden die Anteile größer 0,4mm vor Durchführung der Versuche nicht abgesiebt, da dies aufgrund des kohäsiven Bodenverhaltens nicht möglich war.

Probe	Ausrollgrenze w_P [%]	Fließgrenze – Casagrande [%]		Fließgrenze – Fallkegel [%]	
	Versuch I	Versuch II	Versuch III	Versuch IV	Versuch V
BoSc	73,4	121,8	124,4	129,2	128,1
BoGr	73,8	139,8	138,8	139,6	137,0
NiSt	73,2	127,9	127,7	124,5	124,2
KIBu2	73,3	134,3	128,7	132,5	127,4
BoFr	57,1	161,5	158,0	168,3	168,2
BoWo	66,8	111,0	110,1	111,9	110,7

Versuch I - Bestimmung der Ausrollgrenze, Versuch II - Bestimmung der Fließgrenze nach Casagrande (stufenweises Verringern des Wassergehaltes), Versuch III - Bestimmung der Fließgrenze nach Casagrande (stufenweises Erhöhen des Wassergehaltes), Versuch IV - Bestimmung der Fließgrenze im Fallkegelverfahren (stufenweises Verringern des Wassergehaltes), Versuch V - Bestimmung der Fließgrenze im Fallkegelverfahren (stufenweises Erhöhen des Wassergehaltes)

Tab. 4-13: Zusammenfassung der Zustandsgrenzen, bestimmt mit der Casagrande- und Fallkegel-Methode

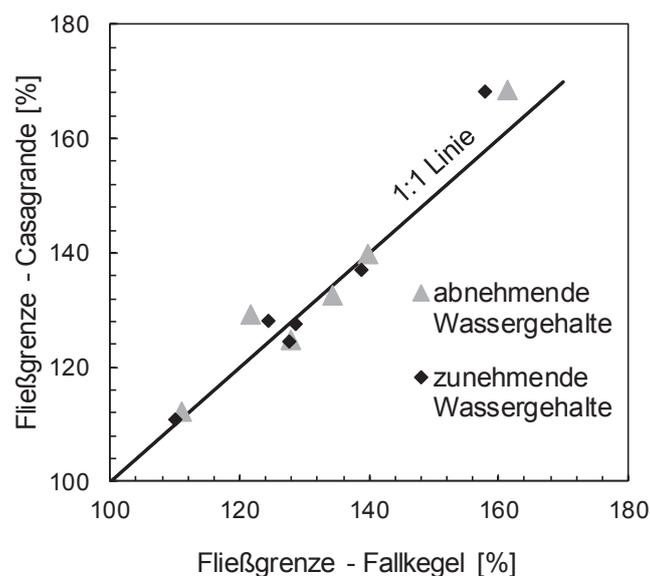


Bild 4-22: Wassergehalte an der Fließgrenze, bestimmt mit der Fallkegel- und der Casagrande-Methode

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tab. 4-13 dargestellt. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass sich die mit der Casagrande- und der Fallkegel-Methode ermittelten Fließgrenzen um bis zu maximal 8 % unterscheiden. Ob die Versuche mit abnehmendem oder zunehmendem Wassergehalt durchgeführt werden, hat keinen relevanten Einfluss auf die Versuchsergebnisse. Dies ist aus Bild 4-22 gut erkennbar, in der die mit beiden Methoden ermittelten Werte etwa auf der Winkelhalbierenden zusammen fallen. Zusammenfassend ist feststellbar, dass die Fallkegel- und Casagrande-Methode für die untersuchten Böden mit organischen Beimengungen weitgehend gut übereinstimmende Wassergehalte an der Fließgrenze ergaben.

4.7 Laborversuche zur Bestimmung der Verdichtungseigenschaften

4.7.1 Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung

Es wurden jeweils drei Versuchsreihen durchgeführt, um das Verdichtungsverhalten von Böden mit organischen Anteilen zu untersuchen. In der ersten Versuchsreihe wurde das Probematerial zunächst auf einen Wassergehalt von ca. 5 % bis 10 % unterhalb des optimalen Wassergehaltes getrocknet, bevor anschließend Wasser zum Erreichen des jeweils gewünschten Verdichtungswassergehaltes zugegeben wurde. Bei der zweiten Versuchsreihe wurden die Proben bis auf einen Wassergehalt von 20 % unterhalb des optimalen Wassergehaltes getrocknet bevor Wasser zugegeben wurde. Dieses Verfahren entspricht den Vorgaben der DIN 18127:2011. Bei der dritten Versuchsreihe wurden die Proben vom natürlichen Wassergehalt ausgehend direkt auf den jeweils gewünschten Wassergehalt getrocknet. Da der natürliche Wassergehalt bei den drei untersuchten Materialien weit oberhalb des optimalen Wassergehaltes liegt, wurden die Proben dementsprechend bei der dritten Versuchsreihe von der nassen Seite der Proctorkurve kommend getrocknet, während die Proben bei der ersten und zweiten Versuchsreihe von der trockenen Seite ausgehend auf den gewünschten Verdichtungswassergehalt gebracht wurden. Die Proben wurden im Trockenschrank bei 60°C auf den gewünschten Wassergehalt getrocknet, der für die Durchführung der Verdichtungsversuche erforderlich war. Die Proben wurden zur Homogenisierung des Wassergehaltes mindestens 24 Stunden in geschlossenen Behältern aufbewahrt. Die Verdichtungsversuche wurden gemäß DIN 18127:2011 im Proctortopf \varnothing 10 cm durchgeführt.

Die dritte Versuchsreihe wird für baupraktische Fragestellungen im Vergleich zu den ersten beiden Versuchsreihen als realitätsnäher erachtet, da Böden mit organischen Beimengungen im natürlichen Zustand einen Wassergehalt deutlich oberhalb des optimalen Verdichtungswassergehaltes aufweisen und für erdbautechnische Zwecke so weit getrocknet werden müssen, dass eine Verdichtung mit üblichen Erdbaugeräten möglich ist.

4.7.2 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die bei den drei Versuchsreihen nach Verdichtung jeweils erreichten maximalen Trockendichten bei den zugehörigen Wassergehalten w_{opt} sind in

Tab. 4-14 zusammengefasst. Zusätzlich sind die Beziehungen zwischen Trockendichte und Wassergehalt (Verdichtungskurven) für die einzelnen Böden in Bild 4-23 (a), (b) und (c) dargestellt.

Probe	Verfahren		ρ_{dmax} [%]	w_{opt} [%]
BoSc	I	5 - 10% unter w_{opt}	0,90	60,00
	II	>20 % unter w_{opt}	0,95	55,00
	III	5 - 10% über w_{opt}	0,90	52,00
BoGr	I	5 - 10% unter w_{opt}	0,89	52,00
	II	>20 % unter w_{opt}	0,94	52,50
	III	5 - 10% über w_{opt}	0,88	50,00
KIBu2	I	5 - 10% unter w_{opt}	0,86	67,00
	II	>20 % unter w_{opt}	0,92	52,50
	III	5 - 10% über w_{opt}	0,89	52,00

Tab. 4-14: Ergebnisse der Verdichtungsversuche an Böden BoSc, BoGr, KIBu2

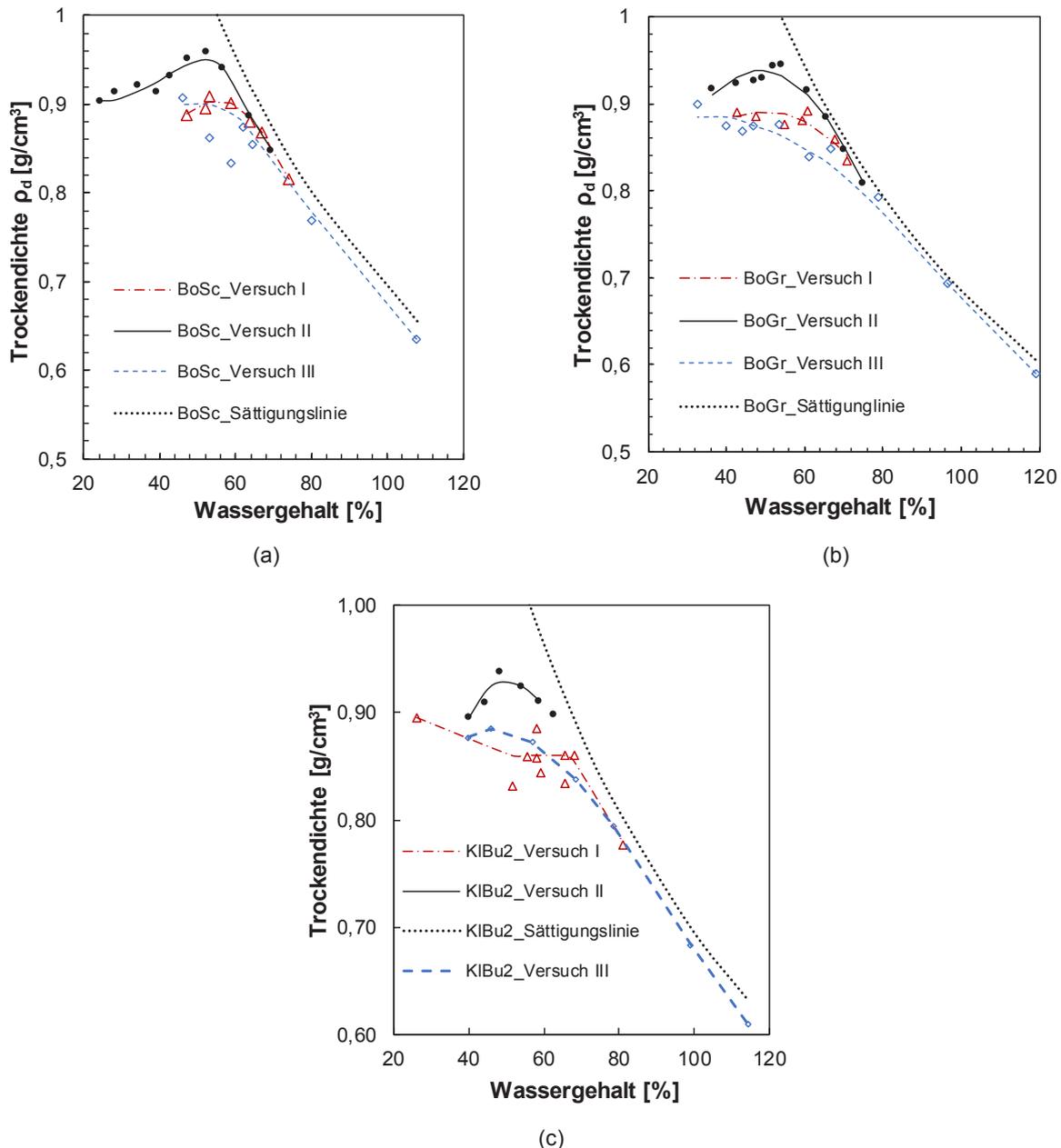


Bild 4-23: Verdichtungseigenschaften von Boden BoSc (a), Boden BoGr (b) und Boden KIBu2 (c).

4.7.3 Interpretation

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die maximalen Trockendichten bei allen drei Böden in den Versuchsreihen II erhalten werden. Beim Verfahren III, bei dem die Proben von der nassen Seite des Proctoroptimums kommend verdichtet werden, ist wie von BIRLE (2012) berichtet kein ausgeprägtes Maximum erkennbar. Vergleicht man die Verfahren I und II miteinander, so zeigt sich, dass die stärkere Trocknung des Probematerials beim Verfahren II im Vergleich zum Verfahren I bei der anschließenden Verdichtung deutlich größere Trockendichten erzielen lässt. Die mit dem Verfahren II erreichten Trockendichten liegen in einer ähnlichen Größenordnung wie beim Verfahren III, wobei bei den Versuchsreihen II im Bereich des Verdichtungsoptimums etwas höhere Trockendichten erreicht werden.

4.8 Bestimmung der Scherparameter - Rahmenscherversuch

4.8.1 Probenvorbereitung and Versuchsdurchführung

Zur Bestimmung der Scherparameter im Rahmenscherversuch gemäß DIN EN ISO 17892-10:2019-04 wurden jeweils vier Proben hergestellt. Die Probekörper wurden etwa am Verdichtungsoptimum entsprechend der Versuchsreihe III (siehe Tab. 4-14) hergestellt. Zur Reduzierung der Einflüsse aus dem Einbau der Proben wurden die Proben zunächst vorkonsolidiert. Dazu wurde unter Berücksichtigung der hohen Dichte der Probekörper nach der Proctor-Verdichtung eine Vertikalspannung von 503,4 kN/m² gewählt. Anschließend wurden die Vertikalspannungen auf das jeweils gewünschte Niveau reduziert (zwischen 50 kN/m² und 300 kN/m²) und die Proben bei einer konstanten Verschiebungsgeschwindigkeit von 0,024 mm/min horizontal abgeschert.

Zusammenfassend sind die Einbaubedingungen und Versuchsrandbedingungen für die Proben der Böden BoSc, BoGr, KIBu2 im Anhang A2.1 bis A2.3 aufgelistet.

4.8.2 Zusammenfassung der Ergebnisse und Interpretation

Die Ergebnisse der Rahmenscherversuche an den Böden BoSc, BoGr, KIBu2 sind in Bild 4-24 dargestellt. Dazu wurden zum einen die unter den jeweils aufgebrachtten Normalspannungen maximal aufgetretenen Scherspannungen („Peakfestigkeit“) und zum anderen die beim maximalen Scherweg von ca. 15 mm erreichten Scherspannungen (Restscherfestigkeit) herangezogen.

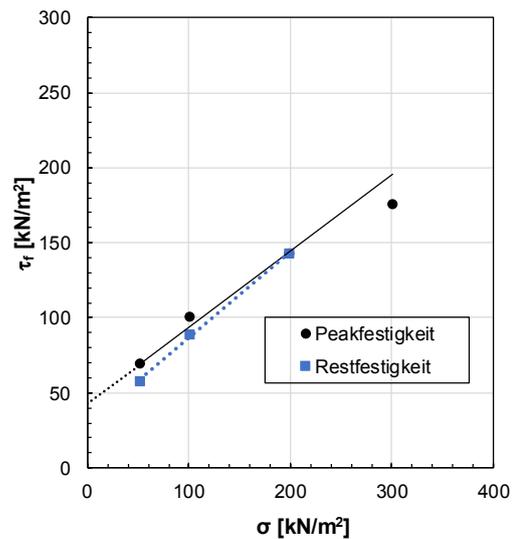
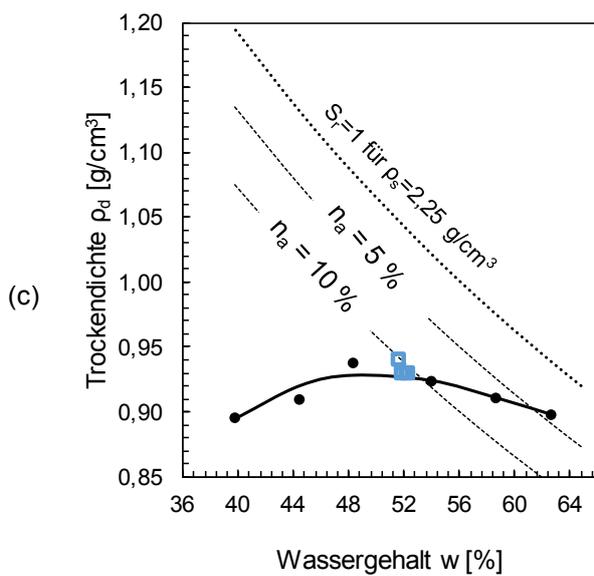
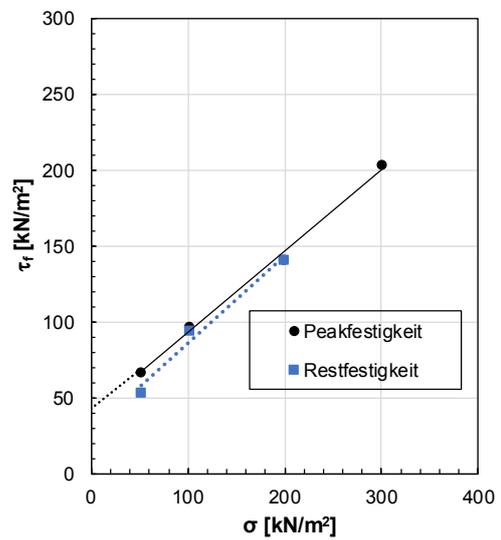
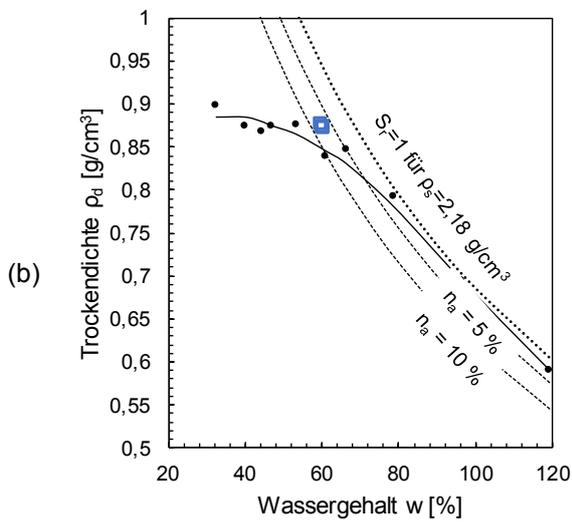
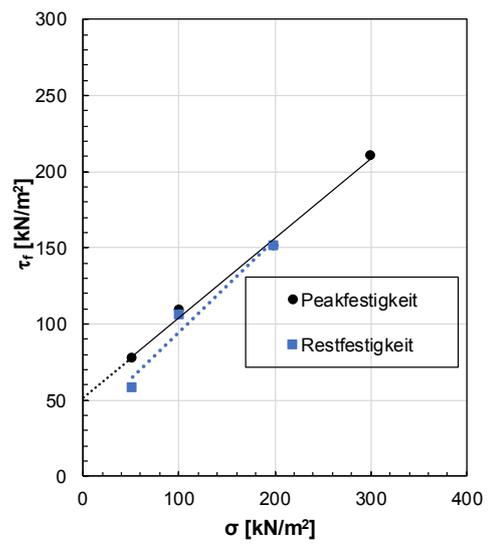
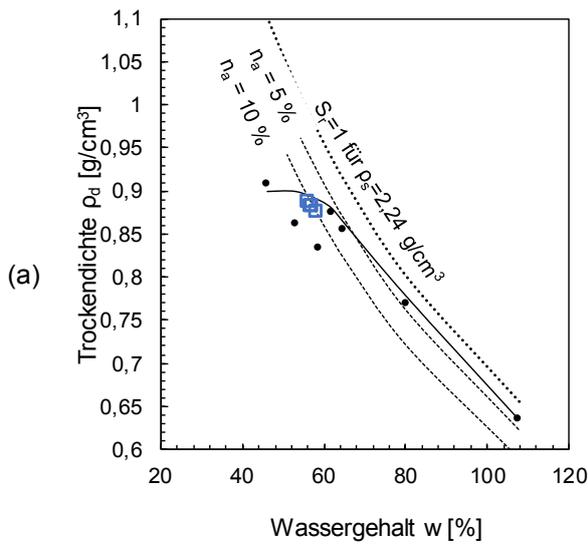


Bild 4-24: Einbaubedingungen und Zusammenhang zwischen Normalspannung und Scherspannung für die Böden BoSc (a) BoGr (b) und KIBu2 (c)

Aus den im Anhang A2.1 bis A2.3 dargestellten Ergebnissen ist ersichtlich, dass die Proben bei niedrigeren Axialspannungen von $\sigma_n = 50 \text{ kN/m}^2$ und 100 kN/m^2 bereits bei einem Scherweg von ca. 2 mm die maximale Scherspannung erreichten. Mit zunehmender Axialspannungen nahmen die Scherwege bis zum Erreichen der maximalen Scherspannung (Peakwert) zu. Unter der höchsten Normalspannung von $\sigma_n = 300 \text{ kN/m}^2$ wurde bei allen drei Böden bis zu einem Scherweg von 20 mm ein Anstieg der Scherspannung beobachtet. Die Ergebnisse der Volumenänderungen zeigten für alle drei Böden ein sehr ähnliches Verhalten, wobei die bei niedrigen Normalspannungen ($\sigma_n = 50 \text{ kN/m}^2$, 100 kN/m^2) abgescherten Probekörper ein dilatantes Verhalten aufwiesen, während die bei hohen Axialspannungen untersuchten Probekörpern ein kontraktantes Verhalten zeigten. Das dilatante Verhalten war bei den niedrigen Axialspannungen (z. B. $\sigma_n = 50 \text{ kN/m}^2$, 100 kN/m^2) stark ausgeprägt und nahm mit zunehmenden Normalspannungen ab. Einzig die Probe des Bodens KIBu2, die unter einer Normalspannung von $\sigma_n = 50 \text{ kN/m}^2$ abgeschert wurde, zeigte eine im Vergleich zu den übrigen Böden unerklärbar geringe Volumenzunahme. Die im Peakzustand ermittelten Scherparametern c und φ sind in der Tab. 4-15 aufgeführt. Die Kohäsionswerte sind im Vergleich zu den an natürlich abgelagerten Böden ermittelten Werten vergleichsweise hoch, was auf die hohe Einbaudichte und die nach Einbau in das Versuchsgerät aufgebrauchte Konsolidationsspannung von 500 kN/m^2 zurückgeführt werden kann.

Böden/Parameter	BoSc	BoGr	KIBu2
$c \text{ [kN/m}^2\text{]}$	51,61	42,50	42,50
$\varphi \text{ [}^\circ\text{]}$	27,76	27,00	27,00

Tab. 4-15: Peakscherparameter aus Rahmenscherversuchen an den Böden BoSc, BoGr und KIBu2

4.9 Bestimmung der Scherparameter – undrÄnierte Triaxialversuche

4.9.1 Probenvorbereitung und Versuchsdurchföhrung

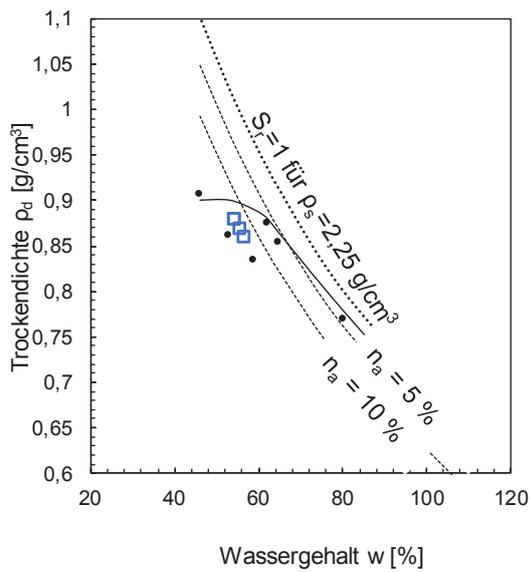
Zur Bestimmung der undrÄnierten Scherparameter wurden dreiaxiale Druckversuche als CU-Versuche durchgeföhrt. Dabei wurden die Proben am Verdichtungsoptimum entsprechend der Versuchsreihe III (siehe

Tab. 4-14) durch statische Verdichtung hergestellt und nach Einbau in das Triaxialgerät zunÄchst bei einem Porenwasserdruck von 500 kN/m² gesättigt. Im Anschluss wurden die Proben unter einer isotropen Belastungsspannung von $\sigma'_3 = \sigma'_1 = 500$ kN/m² überkonsolidiert. Das Abscheren der Einzelproben erfolgte unter Steigerung der Vertikalspannung durch Aufbringen einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit des vertikalen Stempels von 0,036 mm/min bei unterschiedlichen Seitendrücken. Die Seitendrücke betrug $\sigma'_3 = 50, 100, 200, 300$ kN/m².

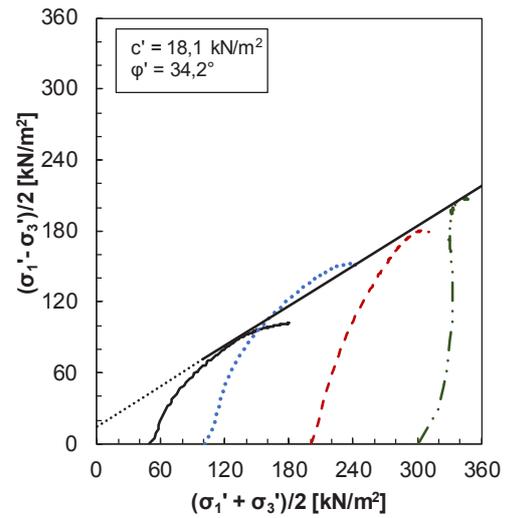
Die Versuchsergebnisse der einzelnen Proben der drei untersuchten Böden mit Angabe der Einbaubedingungen sind im Anhang A2.4-A2.6 enthalten. Nachfolgend werden die Ergebnisse an den drei Böden zusammenfassend dargestellt und beurteilt.

4.9.2 Zusammenfassung der Ergebnisse

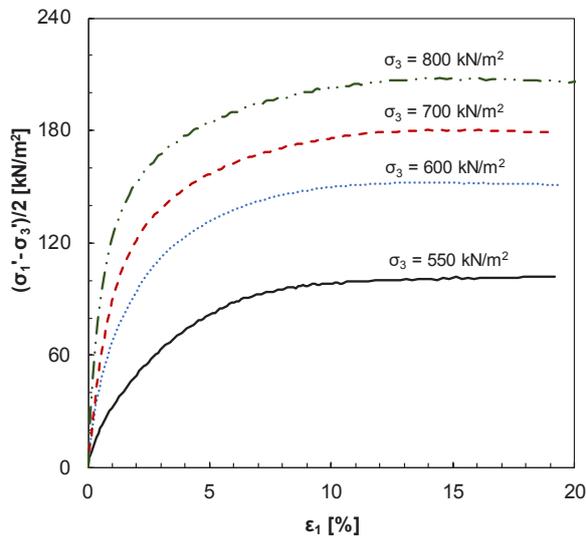
Die erzielten Einbauzustände (Einbaudichten und Wassergehalte) der untersuchten Probekörper sowie die bei den CU-Versuchen ermittelten Spannungspfade sind für die untersuchten Böden BoSc, BoGr, KIBu2 in Bild 4-25, Bild 4-26 und Bild 4-27 dargestellt.



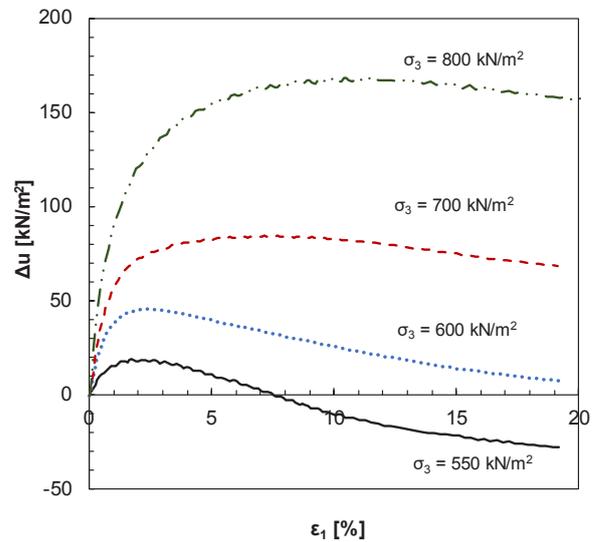
(a)



(b)

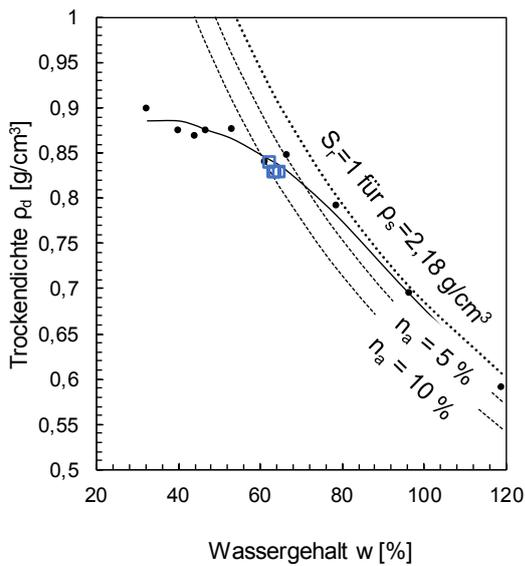


(c)

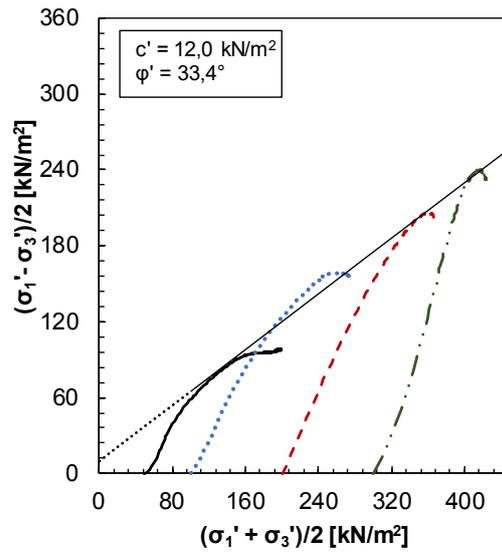


(d)

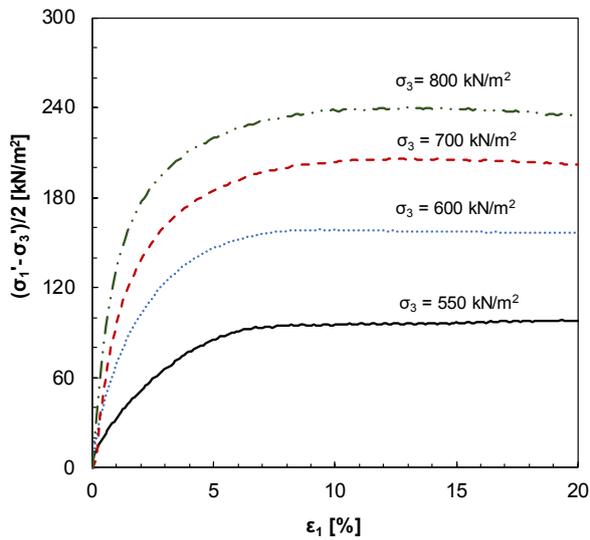
Bild 4-25: Einbaubedingungen (a), Spannungspfade (b), Deviatorspannungs-Dehnungs-Diagramm (c) und Porenwasserüberdruck-Dehnungs-Diagramm des CU-Versuchs am Boden BoSc



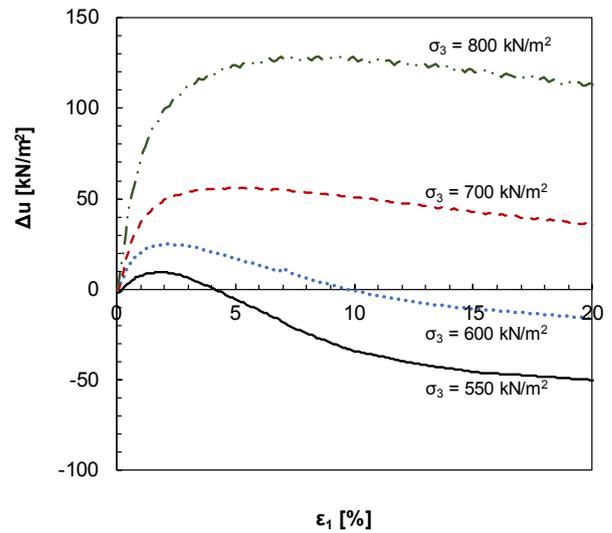
(a)



(b)

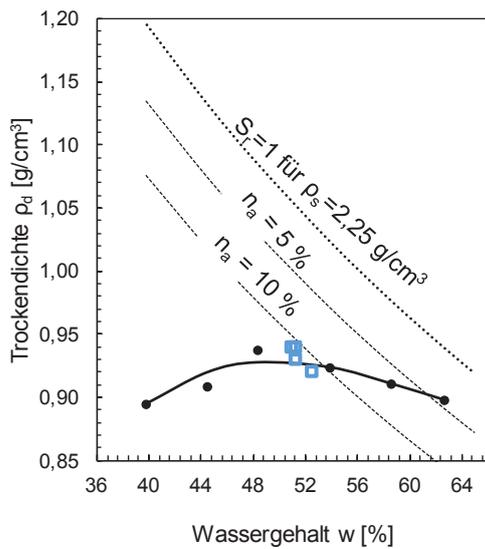


(c)

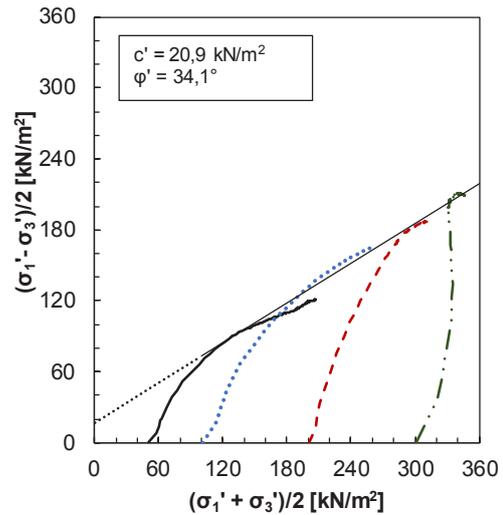


(d)

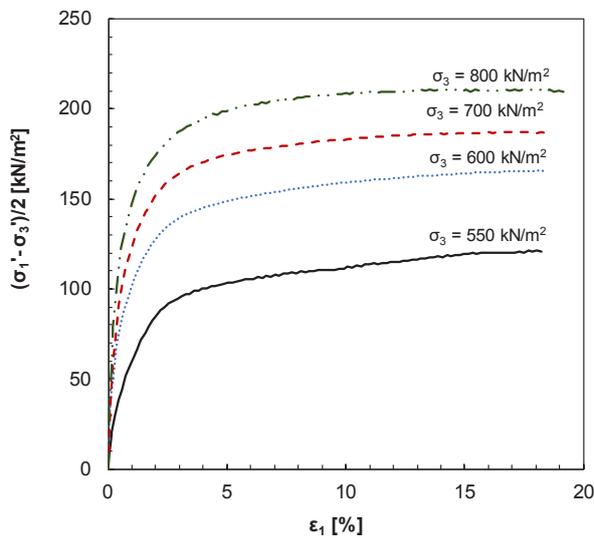
Bild 4-26: Einbaubedingungen (a), Spannungspfade (b), Deviatorspannungs-Dehnungs-Diagramm (c) und Porenwasserüberdruck-Dehnungs-Diagramm des CU-Versuchs am Boden BoGr



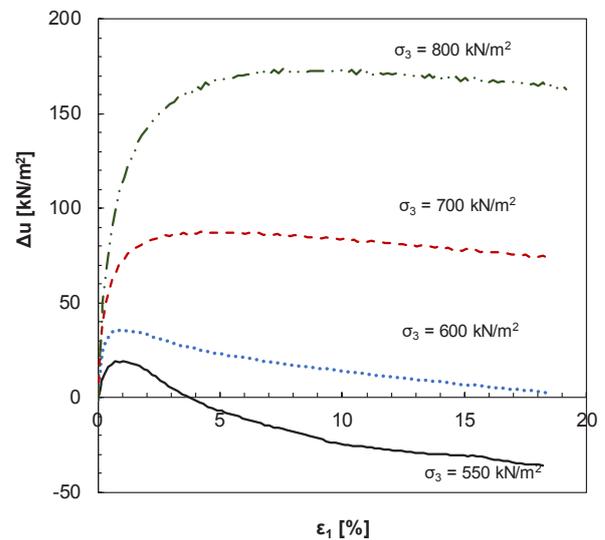
(a)



(b)



(c)



(d)

Bild 4-27: Einbaubedingungen (a), Spannungspfade (b), Deviatorspannungs-Dehnungs-Diagramm (c) und Porenwasserüberdrucks-Dehnungs-Diagramm des CU-Versuchs am Boden KIBu2

4.9.3 Interpretation

Die Böden BoSc und BoGr zeigen prinzipiell ähnliche Verläufe für den Zusammenhang zwischen der Deviatorspannung $(\sigma'_1 - \sigma'_3)/2$ und der vertikalen Stauchung ε_1 . So nehmen die Deviatorspannungen mit zunehmender Stauchung zunächst stark zu und erreichen bei ca. 10 % bis 12 % (bei Boden BoSc) bzw. 8 % bis 10 % (bei Boden BoGr) ein Plateau. Dabei ist auch ein Einfluss der Seitendrücke σ_3 erkennbar. So wird das Plateau mit zunehmenden Seitendrücken σ_3 bei größeren Stauchungen erreicht. Der Boden KIBu2 zeigt im Vergleich zu den beiden anderen Böden bei kleinen Spannungen zunächst ein steiferes Verhalten, was sich in einem stärkeren Anstieg der Deviatorspannung über die axiale Stauchung zeigt. Im Vergleich zu den beiden anderen Böden flacht die Kurve aber bereits bei Stauchungen im Bereich zwischen 3 % und 5 % stark ab.

Weiter zeigen die Ergebnisse, dass die Porenwasserüberdrücke bei kleinen Seitendrücken ($\sigma_3 = 50$ kPa) bei allen Proben zunächst zunehmen und nach Erreichen eines Maximums bei Stauchungen von ca. 1 % bis 2 % aber abnehmen und sich anschließend negative Porenwasserdrücke entwickeln. Dies weist auf eine dilatantes Verhalten der Proben im Zuge der Scherung hin. Bei höheren Seitendrücken $\sigma_3 = 200$ kPa bzw. 300 kPa wurde mit zunehmender Deviatorspannung ein starker Anstieg der Porenwasserüberdrücke festgestellt, was einem kontraktanten Verhalten entspricht.

Die Ergebnisse deuten nicht darauf hin, dass sich bei den Proben, die bei höheren Spannungen konsolidiert wurden, beim undrÄnirten Abschervorgang höhere Porenwasserdrücke ergeben, wie von YAMAGUCHI ET AL. (1985) sowie KHATTAK & DAS (1985) für faserige Torfproben bzw. faserige Kaolinitproben berichtet. Die Auswertung der Scherparameter ergab Reibungswinkel zwischen φ' zwischen 33° und 34° und Kohäsionswerte c' zwischen 12 kPa und 24 kPa (siehe Tab. 4-16).

Böden/Parameter	BoSc	BoGr	KIBu2
c' [kN/m ²]	18,1	12,0	20,9
φ' [°]	34,2	33,4	34,1

Tab. 4-16: Peakscherparametern aus CU-Triaxialversuchen an den Böden BoSc, BoGr und KIBu2

Aus den Spannungsverläufen der CU-Versuche wurde die undrÄnirte Scherfestigkeit $c_u = \frac{(\sigma_1' - \sigma_3')_f}{2}$ der untersuchten Proben ermittelt (siehe Tab. 4-17). Außerdem wurde der Sekanten-Elastizitätsmodul als $E_{50} = \frac{q_{50}}{\varepsilon_{50}}$ aus den Spannungs-Dehnungs-Kurven bestimmt. Es ist zu erkennen, dass die undrÄnirte Scherfestigkeit maßgeblich vom Spannungszustand beeinflusst wird und mit zunehmendem Konsolidierungsdruck zunimmt. Dabei wurden für die beiden gemischtkörnigen Böden BoSc und BoGr ähnliche undrÄnirte Scherfestigkeitswerte c_u im Bereich zwischen ca. 77 kPa und 234 kPa bestimmt. Der Boden KIBu2 weist bei geringen Konsolidierungsdrücken im Vergleich zu den beiden anderen Böden etwas höhere c_u -Werte auf. Die aus den Versuchen abgeleiteten Elastizitätsmoduln E_{50} liegen für die beiden gemischtkörnigen Böden im Bereich zwischen ca. 5 MPa (bei einer Konsolidationsspannung von 50 kPa) und ca. 30 MPa (bei einer Konsolidationsspannung von 300 kPa). Für den Boden KIBu2 wurden im Vergleich dazu etwas höhere Werte ermittelt

σ_c' [kPa]	BoSc		BoGr		KIBu2	
	c_u [kPa]	E_{50} [MPa]	c_u [kPa]	E_{50} [MPa]	c_u [kPa]	E_{50} [MPa]
50	79,00	4,84	77,6	5,28	93	11,58
100	108,00	11,95	106,7	12,88	127	28,60
200	176,00	17,49	203,8	18,46	181,5	33,37
300	201,60	31,17	234,06	29,52	208	54,46

Tab. 4-17: Zusammenfassung der Ergebnisse der CU-Triaxialversuche

Die vorgestellten Ergebnisse wurden mit den Ergebnissen aus dem Forschungsvorhaben FE 05.0166/2011/ERB verglichen. Dabei waren die Proben durch statische Verdichtung hergestellt, bei einem Porenwasserdruck von 500 kPa gesättigt und im Anschluss unter einer isotropen Belastungsspannung von $\sigma_3' = \sigma_1' = 300$ kPa konsolidiert worden. Die Einzelproben wurden anschließend bei Seitendrücken $\sigma_3 = 50$, 100 und 200 kPa abgeschert. Die Einbaubedingungen und Spannungspfade sind im Bild 4-28 dargestellt. Bei den Vergleichen ist zu beachten, dass die Einbaudichten und Einbauwassergehalte der Böden bei den beiden Forschungsvorhaben unterschiedlich sind. Für die Böden BoSc und BoGr, bei denen die Proben mit höheren Dichten im Vergleich zum vorliegenden Vorhaben hergestellt wurden, wurden etwas höhere Deviatorspannungen erreicht, was zu etwas höheren Reibungswinkeln φ' führte. Für den Boden KIBu2 ergaben die in beiden Vorhaben durchgeführten CU-Versuche sehr ähnliche Scherparameter.

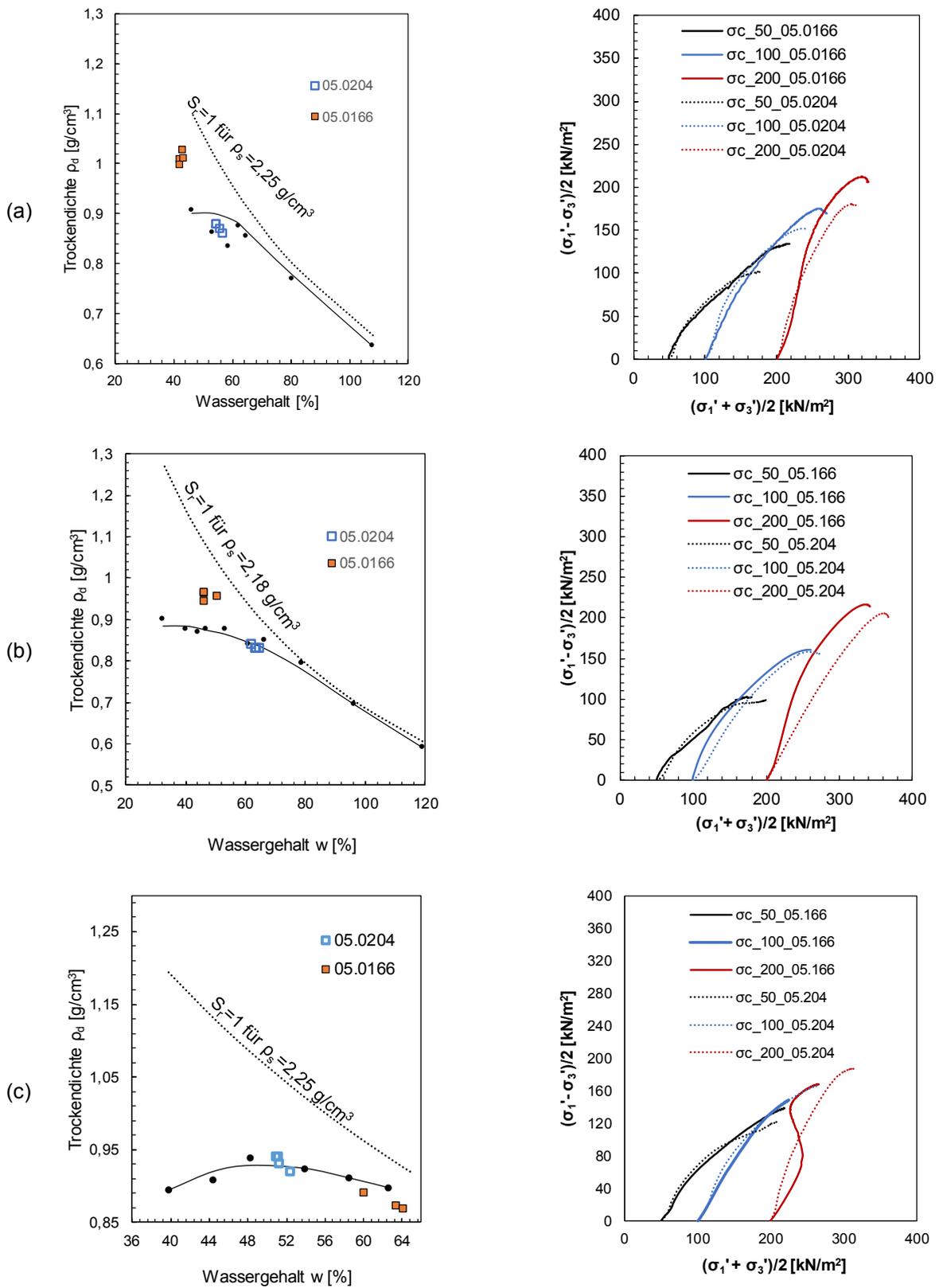


Bild 4-28: Vergleich zwischen den Einbaubedingungen und den Spannungspfaden im CU-Triaxialversuch an den Böden BoSc (a) BoGr (b) und KIBu2 (c) aus den Forschungsvorhaben FE 05.0166/2011/ERB und FE 05.0204/2018/CGB

4.10 Bestimmung der Scherparameter – dränierte Triaxialversuche

4.10.1 Probenvorbereitung and Versuchsdurchführung

Die dränierten Triaxialversuche wurden in einer Triaxialanlage mit Doppelzelle (Bild 4-29) durchgeführt, um die Volumenänderungen der Probe während des Versuches präzise erfassen zu können. Die einzelnen Probekörper wurden statisch verdichtet (am Verdichtungsoptimum entsprechend der Versuchsreihe III (siehe

Tab. 4-14) und nach Einbau in die Triaxialanlage bei einem Sättigungsdruck von 300 kN/m^2 (unten) bzw. 290 kN/m^2 (oben) und einem Zelldruck von 310 kN/m^2 gesättigt. Der an der Probenunterseite anliegende höhere Sättigungsdruck wurde gewählt, um eine Durchströmung der Proben und infolgedessen einen höheren Sättigungsgrad zu erreichen. Zur Überprüfung des erreichten Sättigungsgrades wurde ein B-Test durchgeführt. Die erzielten Werte lagen zwischen 0,86 und 0,96 (siehe Anhang A2.7 –A2.9). Anschließend wurden die Proben bei einem Konsolidierungsdruck von $\sigma'_c = 200 \text{ kN/m}^2$ überkonsolidiert. Die Vertikalspannung wurde dabei gegenüber dem Zelldruck in der Regel geringfügig erhöht (um 5 kN/m^2), um ein Ablösen der Probe vom Stempel im Zuge der Konsolidierung zu vermeiden und das Probenvolumen bestimmen zu können. Während der Konsolidierung wurden die Porenwasserabgabe und die Volumenänderung der Probe (anhand des Wasservolumens der Innenzelle) mit Hilfe von Büretten separat erfasst. Die Seitendrücke während der Scherphase wurden für die einzelnen Probekörper unter Berücksichtigung der Spannungspfade der vorab durchgeführten undrännierten Versuche (dargestellt in Bild 4-28) so festgelegt, dass im Bruchzustand ähnliche effektive Spannungen wie in den undrännierten Triaxialversuchen zu erwarten waren (siehe Tab. 4-18). Das Abscheren der Proben erfolgte entsprechend den Angaben in DIN EN ISO 17892-9: 2018 mit einer konstanten vertikalen Vorschubgeschwindigkeit von $0,007 \text{ mm/min}$. Die Versuche wurden mit offener Drainage an der Probenunterseite durchgeführt. An der Probenoberseite wurden die während des Versuches aufgetretenen Porenwasserdrücke mit einem Porenwasserdruckgeber gemessen.

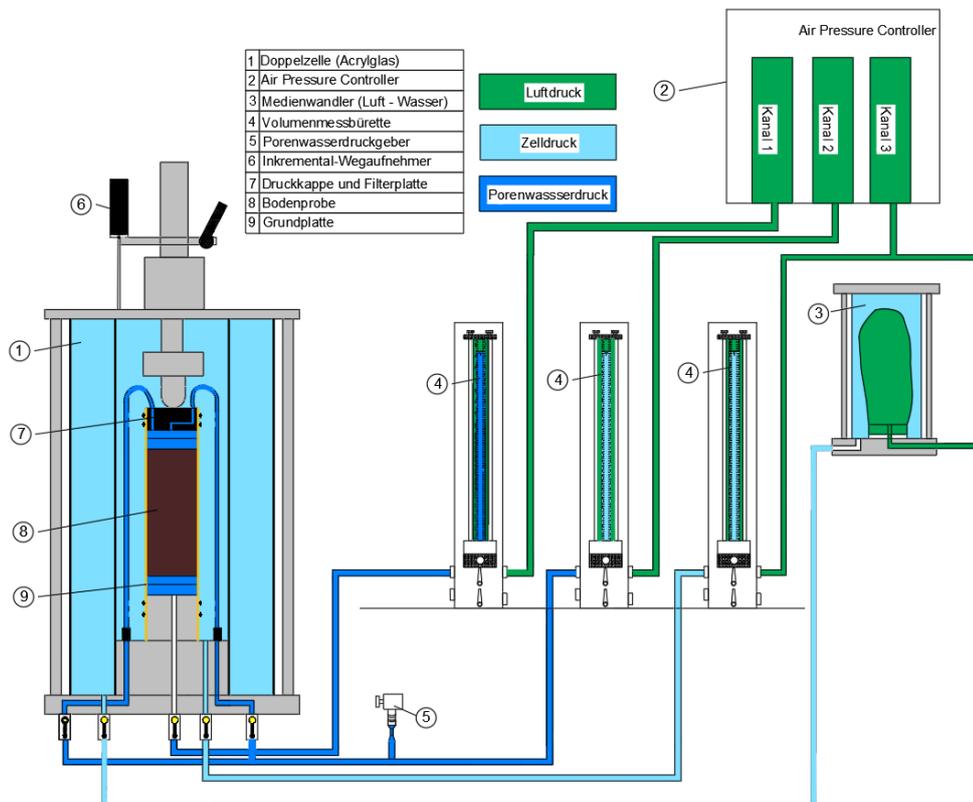


Bild 4-29: Schematische Darstellung des Doppelzellen-Triaxialsystems

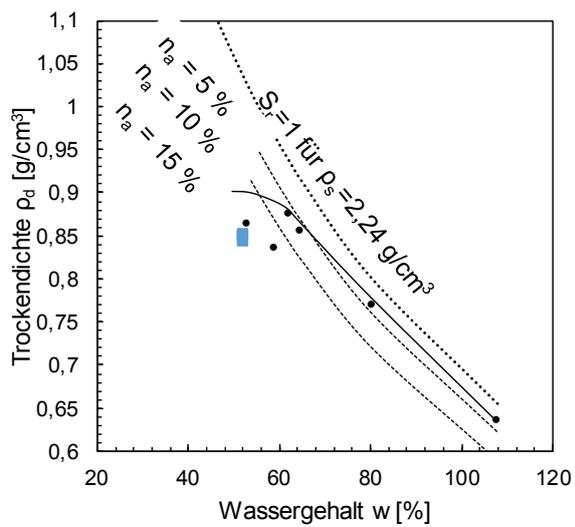
Einzelversuch/ Parameter	$\sigma'_{c,CU,alle}$ [kPa]	$\sigma'_{c,CD,BoSc}$ [kPa]	$\sigma'_{c,CD,BoGr}$ [kPa]	$\sigma'_{c,CD,KIBu2}$ [kPa]
Versuch 1	50	25	40	30
Versuch 2	100	50	75	70
Versuch 3	200	100	145	120

Tab. 4-18: Konsolidierungsspannungen für die Einzelversuche der Triaxialversuche

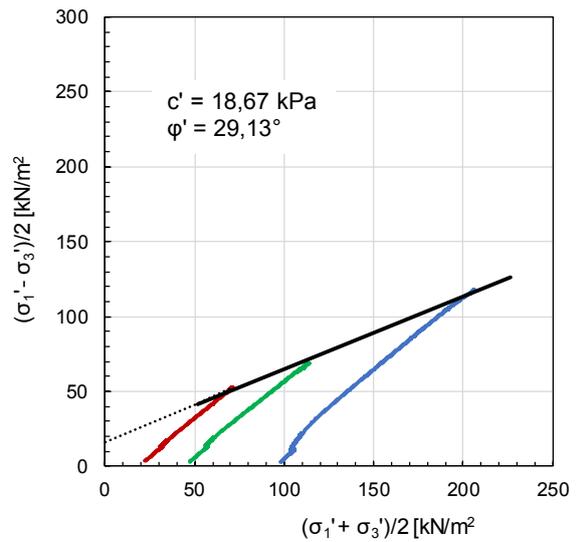
Die Versuchsergebnisse der einzelnen Proben der drei untersuchten Böden mit Angabe der Einbaubedingungen sind im Anhang A2.7 –A2.9 enthalten. Nachfolgend werden die Ergebnisse an den drei Böden zusammenfassend dargestellt und beurteilt.

4.10.2 Zusammenfassung der Ergebnisse und Interpretation

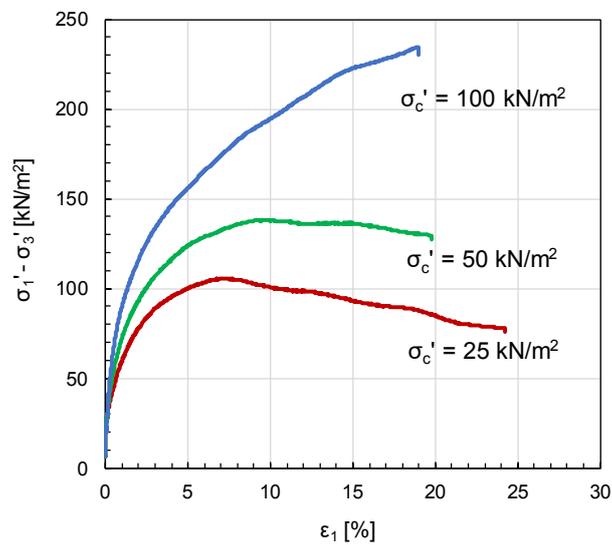
Die erzielten Einbauzustände (Einbaudichten und Wassergehalte) der untersuchten Probekörper sowie die bei den CD-Versuchen ermittelten Spannungspfade sind für die untersuchten Böden in Bild 4-30, Bild 4-31 und Bild 4-32 dargestellt.



(a)

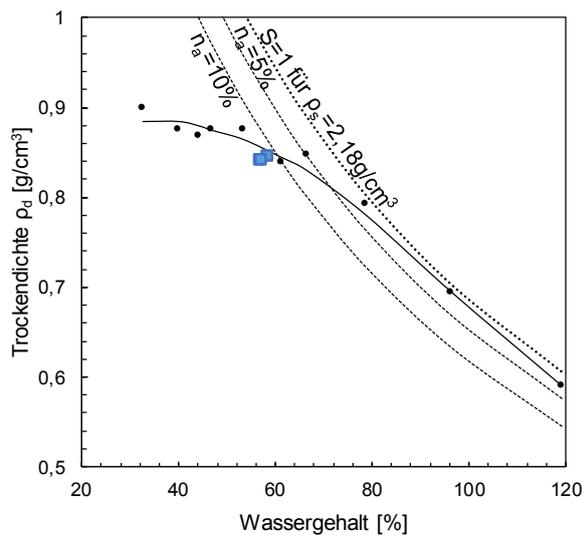


(b)

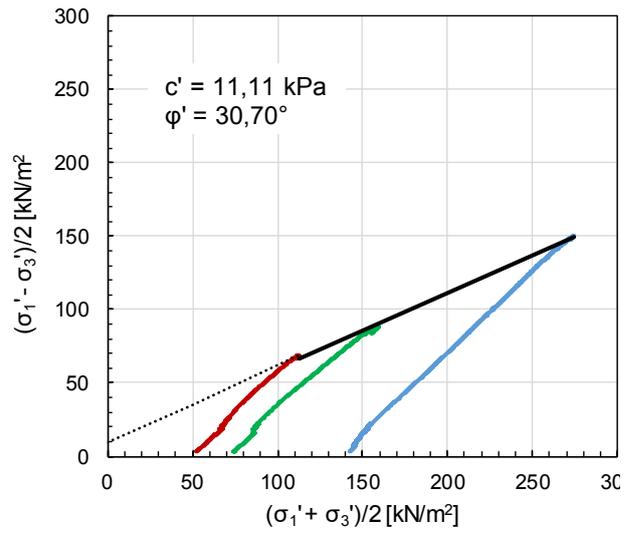


(c)

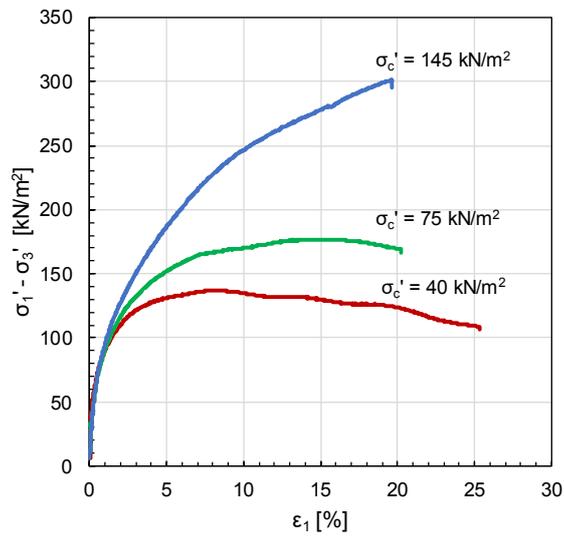
Bild 4-30: Einbaubedingungen, Spannungspfade und Deviatorspannungs-Dehnungs-Diagramm beim CD-Versuch am Boden BoSc



(a)

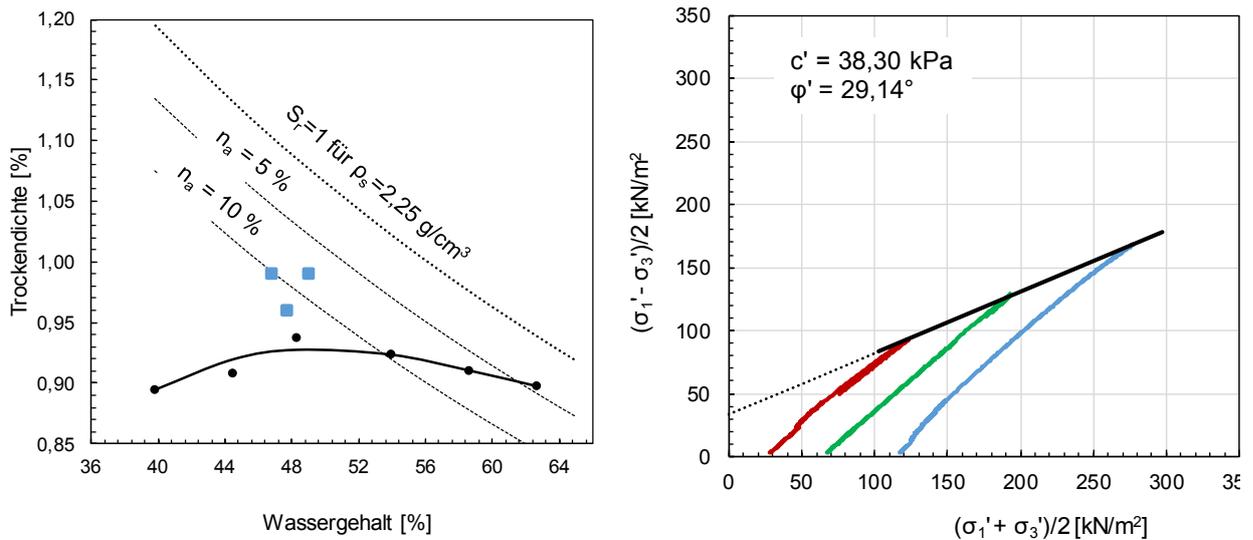


(b)



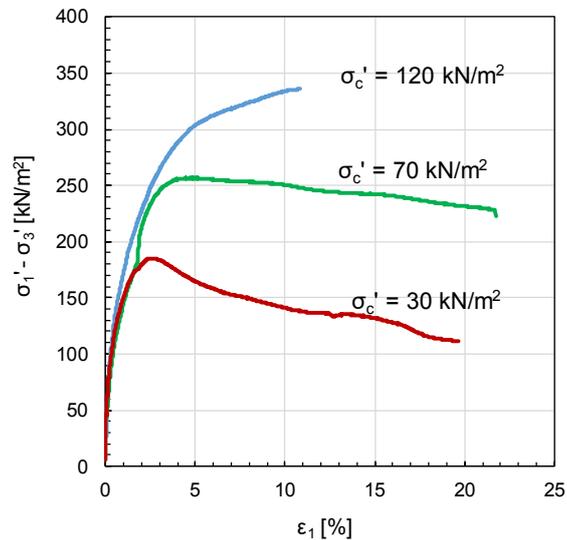
(c)

Bild 4-31: Einbaubedingungen, Spannungspfade und Deviatorspannungs-Dehnungs-Diagramm beim CD-Versuch am Boden BoGr



(a)

(b)



(c)

Bild 4-32: Einbaubedingungen, Spannungspfade und Deviatorspannungs-Dehnungs-Diagramm beim CD-Versuch am Boden KIBu2

Die Ergebnisse zeigen, dass der Maximalwert der Deviatorspannung mit steigendem Zeldruck σ_3 bei allen Proben bei immer größeren Axialstauchungen erreicht wird (siehe Abbildung c) in Bild 4-30). Ein Maximalwert der Deviatorspannung wurde dabei bei allen Proben bei den ersten beiden Laststufen mit geringeren Seitendrücken erreicht, während bei den höchsten Seitendrücken bei allen Proben bis zum Erreichen der versuchstechnisch maximal möglichen Axialstauchung von ca. 20 % noch eine Zunahme der Deviatorspannung aufgezeichnet wurde. Dieses Verhalten ist typisch für faserhaltige Materialien und wurde sowohl an organischen Böden (KHATTAK & DAS, 1985) als auch an unbehandeltem Hausmüll festgestellt (JESSBERGER & KOCKEL, 1993).

Die in Anhang A2.7 dargestellten Ergebnisse zeigen dabei, dass sich an der Oberkante der Probe ein Porenwasserüberdruck von bis zu $\Delta u = 20$ kN/m² bei der höchsten Laststufe entwickelt hat.

Die aus den CD-Triaxialversuchen anhand der Peakwerte der ersten und zweiten Laststufe bzw. des Maximalwertes für die 3. Laststufe abgeleiteten Scherparameter sind in Tab. 4-19 dargestellt. Es wurden für die drei Böden dabei Reibungswinkel zwischen 29° und 30° und Kohäsionswerte zwischen 11 kPa und 38 kPa bestimmt.

Böden/Scherparameter	BoSc	BoGr	KIBu2
c' [kN/m ²]	18,67	11,11	38,30
ϕ' [°]	29,13	30,70	29,14

Tab. 4-19: Peakscherparameter aus CD-Triaxialversuchen an den Böden BoSc, BoGr und KIBu2

Neben den Scherparametern wurde für alle Laststufen der Elastizitätsmodul E_{50} als Sekantenmodul bestimmt. Die ermittelten Werte für den Boden BoSc liegen im Spannungsbereich von $\sigma_c' = 25$ kPa bis 100 kPa zwischen 5 und 7 MPa. Die ermittelten Werte für den Boden BoGr liegen im Spannungsbereich von $\sigma_c' = 25$ kPa bis 100 kPa zwischen 15 und 5 MPa. Für den Boden KIBu2 wurden im Spannungsbereich von $\sigma_c' = 25$ kPa bis 100 kPa Werte zwischen 17 und 35 MPa ermittelt. Bei kleinen Seitendrücken $\sigma_3' = 25, 30, 40$ kPa sind die ermittelten E_{50} -Werte der CD-Versuche größer als die der CU-Versuche. Bei höheren Seitendrücken sind die E_{50} -Werte der CD- und CU-Versuche ähnlich.

Im Vergleich zu den Proben der zweiten und dritten Laststufe zeigten die Proben der ersten Laststufe bei allen drei Böden ein dilatantes Verhalten. Die Auswertung des Dilatanzwinkels ψ ergab dabei Werte zwischen 2° und 7° (siehe Bild 4-33).

Zusätzlich wurde an den Proben der 1. Stufe die Querdehnzahl gemäß den Angaben in Bild 4-33 bestimmt. Dazu wurde die volumetrische Dehnung $\Delta\varepsilon_v$, die bei der axialen Stauchung $\varepsilon_{peak}/2$ (vertikale Stauchung unter der Deviatorspannung $q_{peak}/2$) erreicht wurde, herangezogen. Die Ergebnisse der Elastizitätsmoduln, der Dilatanzwinkel, der Querdehnzahl und der Kompressionsmoduln K (Bulk Modulus) sind in Tab. 4-20 zusammengefasst.

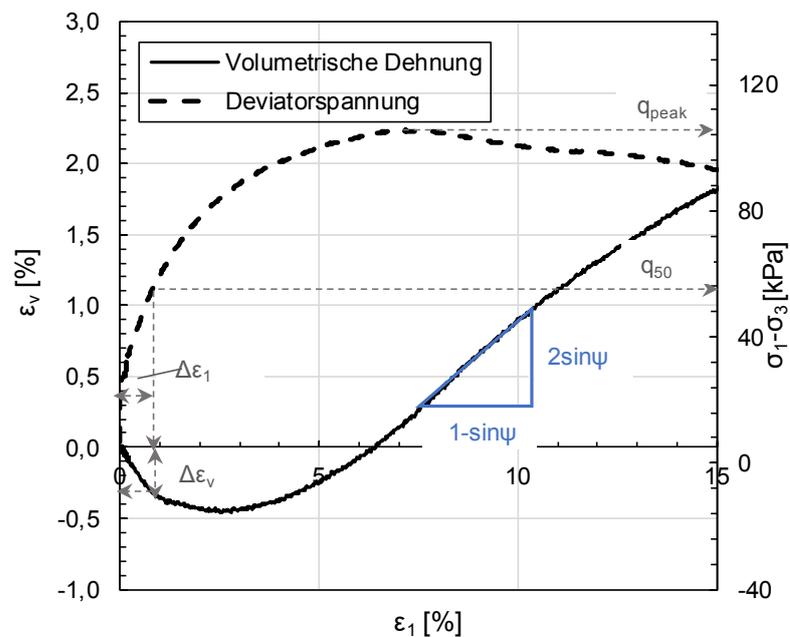


Bild 4-33: Bestimmung der Querdehnzahl v_{50} und des Dilatanzwinkels ψ aus dem ε_1 - ε_v -Diagramm

	$E_{50, 1. Stufe}$ [MPa]	$E_{50, 2. Stufe}$ [MPa]	$E_{50, 3. Stufe}$ [MPa]	$v_{50, 1. Stufe}$	$K_{1. Stufe}$ [MPa]	$\psi_{1. Stufe}$ [°]
BoSc	7,52	7,71	5,73	0,30	6,17	4,87
BoGr	15,65	9,68	5,55	-	-	2,64
KIBu2	26,96	17,19	35,47	0,16	13,22	6,77

Tab. 4-20: Zusammenfassung der Ergebnisse der Triaxialversuche CD

Die Einbaubedingungen und Spannungspfade der CD- und CU-Versuche sind in Bild 4-34 miteinander verglichen. Es ist zu beobachten, dass bei den beiden gemischtkörnigen Böden (BoSc und BoGr) die Spannungspfade der CD-Versuche die aus den CU-Versuchen abgeleiteten Schergeraden nicht erreichen. Nur bei den Proben des Bodens KIBu2 treffen sich die Spannungspfade der CU- und der CD-Versuche an etwa derselben Schergerade. Die aus den CD-Versuchen abgeleiteten Reibungswinkel sind insbesondere für die beiden gemischtkörnigen Böden folglich auch geringer als die aus den CU-Versuchen abgeleiteten Werte. Ähnliche Ergebnisse, bei denen die aus CU-Versuchen ermittelten Scherparameter höher waren als die aus CD-Versuchen, wurden von KHATTAK & DAS (1985) erzielt. Sie stellten dabei fest, dass dieser Effekt umso ausgeprägter ist, je höher der Fasergehalt der Proben ist. KHATTAK & DAS (1985) führten diese Überschätzung der Scherparameter in CU-Tests auf die beim CU-Versuch auftretenden Porenwasserdrücke zurück, die bei faserhaltigen Böden die in der Probe wirkenden effektiven Spannungen nicht in dem Maße reduzieren wie bei rein mineralischen Böden. Die Fasern verleihen der Probe trotz der wirkenden Porenwasserdrücke eine vergleichsweise hohe Scherfestigkeit, was bei der Auswertung der Triaxialversuche unter Anwendung des Prinzips der effektiven Spannungen zu einer Überschätzung der Scherparameter führt (KÖLSCH, 1996). Um diese Hypothese zu verifizieren, wären weitere Versuche mit systematischer Variation des organischen Anteils bzw. Faseranteils erforderlich.

Zusammenfassend sind die aus Rahmenscher-, CU- und CD-Triaxialversuchen bestimmten Scherparameter in Tab. 4-21 dargestellt. Auffallend ist, dass aus den Rahmenscherversuchen deutlich größere Kohäsionswerte als aus den Triaxialversuchen bestimmt wurden. Dies deckt sich mit Ergebnissen an mineralischen feinkörnigen Böden, wonach im Rahmenscherversuch aufgrund der vorgegebenen Lage der Scherfuge größere Scherparameter als aus Triaxialversuchen abgeleitet werden (LONG, 2005). In Böden mit organischen Beimengungen kann dieser Effekt aufgrund der im organischen Anteil enthaltenen Fasern ggf. noch verstärkt werden.

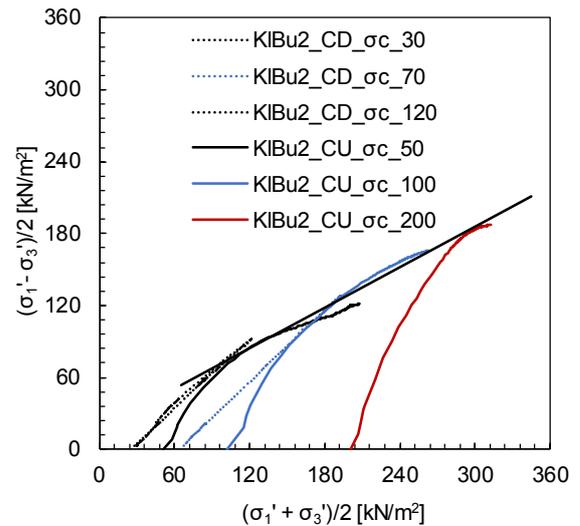
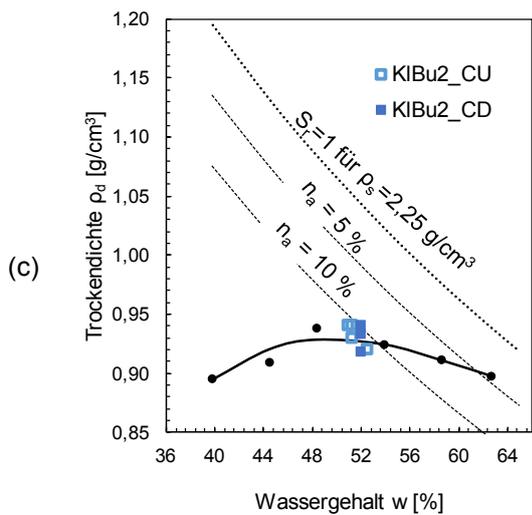
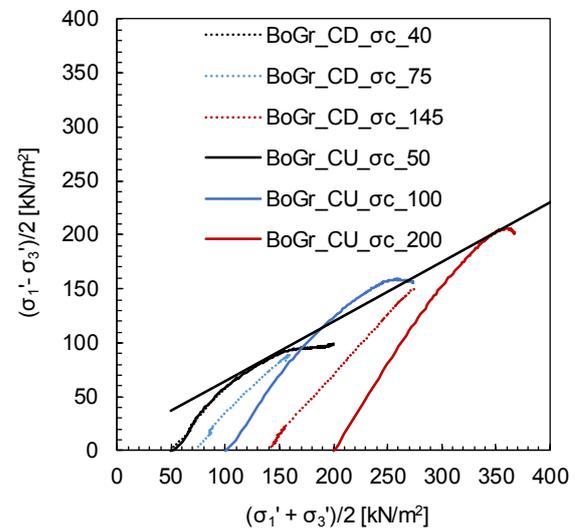
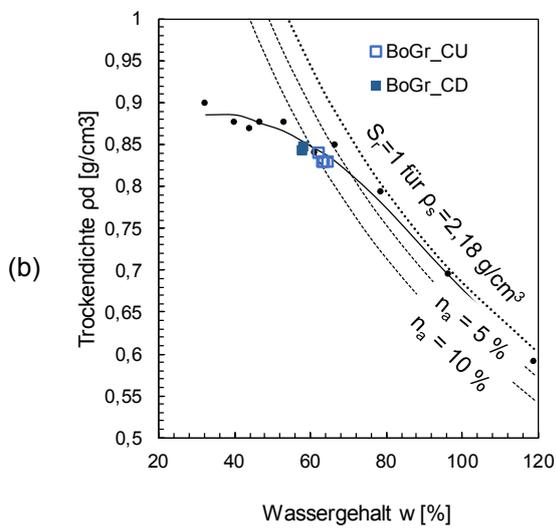
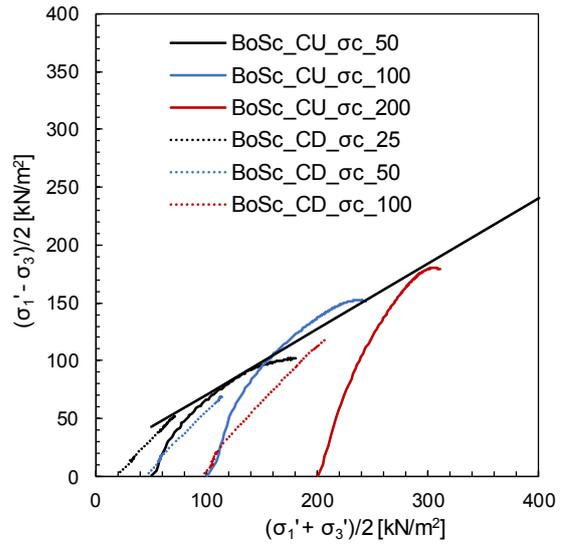
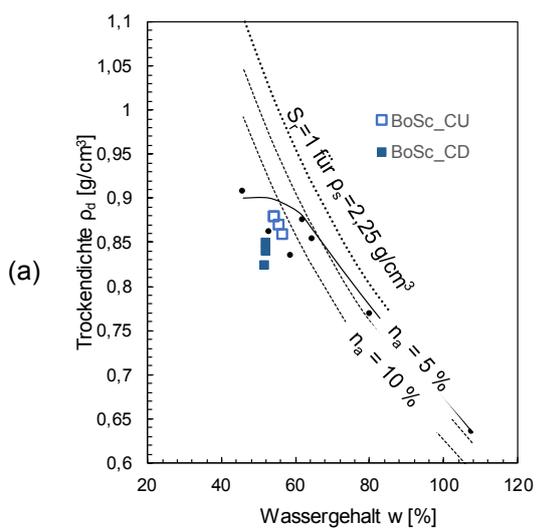


Bild 4-34: Einbaubedingungen und s' - t -Diagramm für CU- und CD-Versuche an den Böden BoSc (a), BoGr (b) und KIBu2 (c)

Versuchsart	BoSc		BoGr		KIBu2	
	c [kN/m ²]	φ [°]	c' [kN/m ²]	φ' [°]	c' [kN/m ²]	φ' [°]
Rahmen-scher	51,61	27,76	42,50	27,00	42,50	27,00
CU-Triax.	18,10	34,20	12,00	33,40	23,90	33,40
CD-Triax.	18,67	29,13	11,11	30,70	19,62	29,14

Tab. 4-21: Zusammenfassung der anhand von Rahmenscher-, CU- und CD-Triaxialversuchen an den Böden BoSc, BoGr und KIBu2 bestimmten Scherparameter

4.11 Bestimmung der Scherparameter – einaxialer Druckversuch

4.11.1 Probenvorbereitung and Versuchsdurchführung

Zur Bestimmung der undränierten Scherfestigkeit wurden ergänzend zu den undränierten Triaxialversuchen einaxiale Druckversuche gemäß DIN EN ISO17892-8:2018 durchgeführt. Die Versuche erfolgten an Proben, die bis zum optimalen Wassergehalt getrocknet und dann in einem Metallzylinder ($d = 5 \text{ cm}$, $h = 10 \text{ cm}$) statisch verdichtet wurden. Jeweils drei Proben wurden bei Verdichtungsgraden von 100 % und 97 % untersucht.

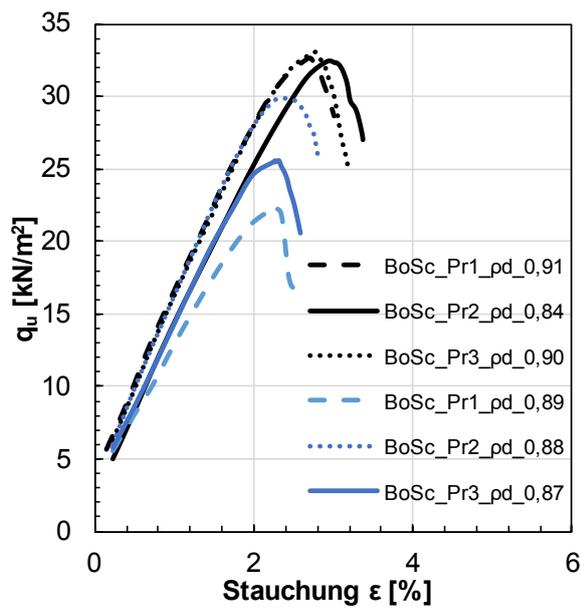
Die Einbaubedingungen und Ergebnisse der Proben der Böden BoSc und KIBu2 sind in Tab. 4-22 zusammengefasst. Einaxiale Druckversuche konnten an dem gemischtkörnigen Boden BoGr nicht durchgeführt werden, da die Probekörper nach der Herstellung nicht standfest waren.

Einzelversuch	Probe		1'	2'	3'	4*	5*	6*
Probendurchmesser	BoSc	d [mm]	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
Probenhöhe		h [mm]	103,40	105,00	104,90	103,90	104,30	103,40
Anfangstrockendichte		ρ_d [g/cm ³]	0,91	0,84	0,90	0,89	0,88	0,87
Erreichter Verdichtungsgrad		D_{Pr} [%]	101,33	92,77	99,89	98,97	98,28	97,54
Anfangswassergehalt		w_a [%]	52,80	63,70	51,60	50,20	50,70	53,20
Einaxiale Druckfestigkeit		q_u [kN/m ²]	32,70	32,40	33,10	25,60	22,40	29,90
Bruchstauchung		ϵ_u [%]	2,71	2,93	2,76	2,27	2,25	2,42
Modul des einaxialen Druckversuchs		E_u [MN/m ²]	1,20	1,10	1,20	1,10	0,90	1,30
Probendurchmesser		KIBu2	d [mm]	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
Probenhöhe	h [mm]		100,30	101,5	101,00	101,5	101,00	101,50
Anfangstrockendichte	ρ_d [g/cm ³]		0,94	0,93	0,94	0,90	0,92	0,91
Erreichter Verdichtungsgrad	D_{Pr} [%]		100,75	100,47	100,55	96,95	98,50	97,96
Anfangswassergehalt	w_a [%]		50,90	51,00	51,10	50,50	50,20	50,70
Einaxiale Druckfestigkeit	q_u [kN/m ²]		150,20	70,10	91,20	70,10	91,20	103,00
Bruchstauchung	ϵ_u [%]		3,04	1,95	1,78	1,95	1,78	2,05
Modul des einaxialen Druckversuchs	E_u [MN/m ²]		6,40	5,10	6,00	5,10	6,00	6,00
' Einbau bei angestrebtem Verdichtungsgrad von 100 %								
* Einbau bei angestrebtem Verdichtungsgrad von 97 %								

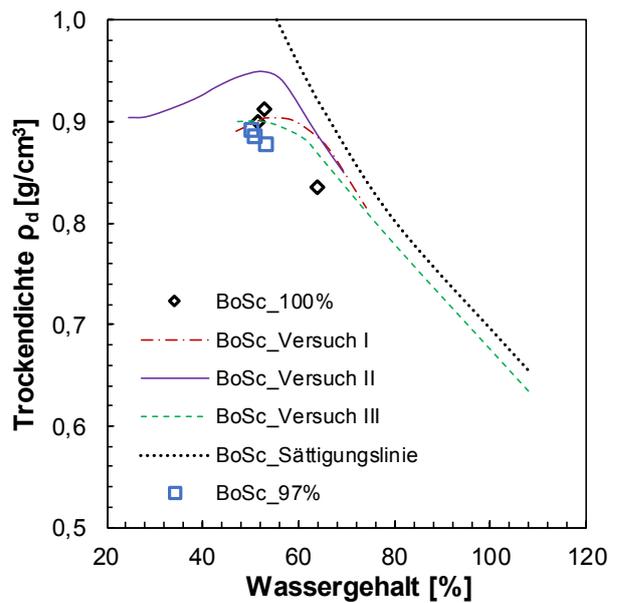
Tab. 4-22: Einaxiale Druckfestigkeit der Böden BoSc und KIBu2

4.11.2 Zusammenfassung der Ergebnisse und Interpretation

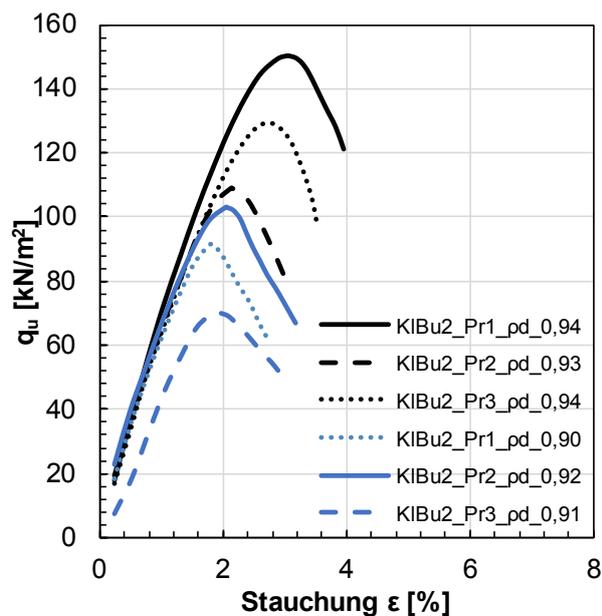
Die Ergebnisse der einaxialen Druckversuche an den Böden BoSc und KIBu2 sind in Bild 4-35 dargestellt.



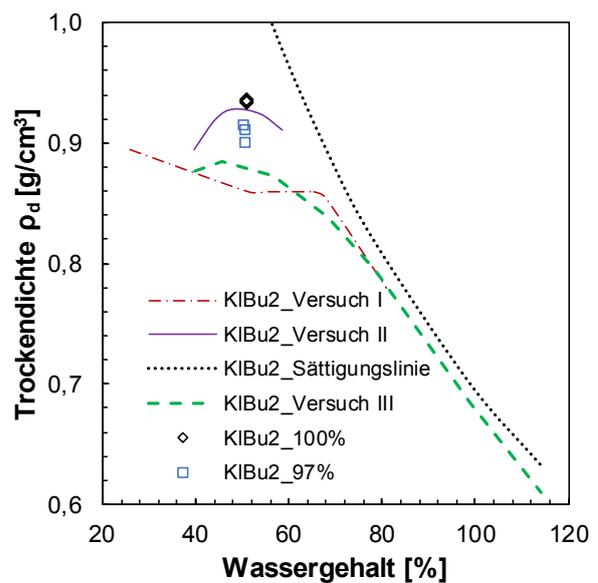
(a)



(b)



(c)



(d)

Bild 4-35: Einbaubedingungen und Ergebnisse der einaxialen Druckversuche an den Böden BoSc (a, b) und KIBu2 (c, d)

Bei den Proben des Bodens BoSc wurden bei den näherungsweise erreichten Verdichtungsgraden von 97 % bzw. 100 % einaxiale Druckfestigkeiten von 22 kN/m² bis etwa 33 kN/m² erreicht. Im Vergleich dazu wurden an den Proben des Bodens KIBu2 mit Werten von 70 kN/m² bis 150 kN/m² deutlich größere Festigkeiten bestimmt. Die Unterschiede zwischen den beiden Böden beruhen im Wesentlichen auf der unterschiedlichen Korngrößenverteilung. So handelt es sich beim Boden KIBu2 um einen feinkörnigen Boden, während der Boden BoSc gemischtkörnig ist. Desweiteren zeigen die Ergebnisse erwartungsgemäß einen Einfluss der Einbaudichte auf die einaxiale Druckfestigkeit. So nimmt die einaxiale Druckfestigkeit mit zunehmender Einbaudichte zu, wobei die Steifigkeit der Proben bis zu einer Dehnung von ca. 2 % unabhängig von der Einbaudichte sehr ähnlich ist.

4.12 Bestimmung der Last-Verformungseigenschaften - im gesättigten Zustand ohne gleichzeitige Messung des Porenwasserdrucks

4.12.1 Probenvorbereitung and Versuchsdurchführung

In diesen Versuchsreihen wurden die Last-Verformungseigenschaften der Böden bei vollständiger Sättigung nach DIN EN ISO 17892-5:2017 in einem eindimensionalen Kompressionsversuch untersucht. Die Versuchsrandbedingungen und die Laststufen sind in Tab. 4-23 dargestellt.

Probe	Sättigung	Laststufen [kPa]
BoSc	Ja	25/50//S//100/200/400/ E / W / En
BoGr	Ja	25/50//S//100/200/400/ E / W / En
KIBu2	Ja	25/50//S//100/200/400/ E / W / En
Anmerkung:		
E	Entlastung [100/25]	
W	Wiederbelastung [50/100/200/400]	
En	2. Entlastung [100/25/12,5]	

Tab. 4-23: Versuchsrandbedingungen der gesättigten Ödometerversuche (ohne gleichzeitige Messung des Porenwasserdrucks) an den Böden BoSc, BoGr und KIBu2

Die Versuchsergebnisse der einzelnen Proben der drei untersuchten Böden mit Angabe der Einbaubedingungen sind im Anhang A3.1 bis A3.3 enthalten.

4.12.2 Zusammenfassung der Ergebnisse und Interpretation

Die Spannungs-Zusammendrückungs-Diagramme, Spannung-Porenzahl-Diagramme und Zeit-Stauchungs-Diagramme für die drei Böden sind in Bild 4-36 und Bild 4-37 dargestellt.

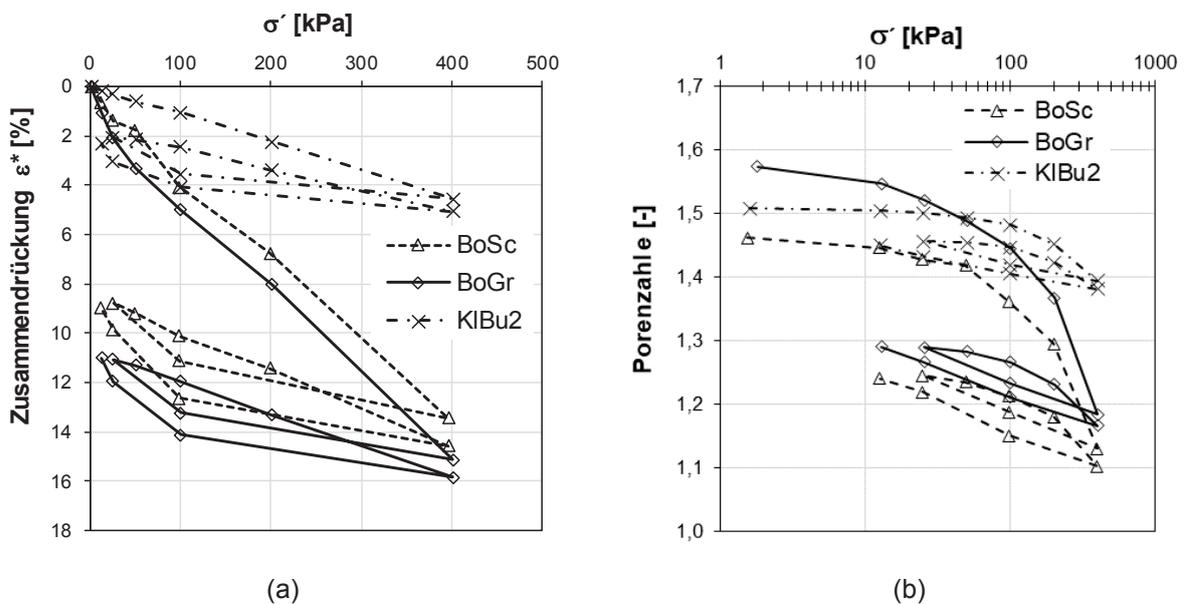
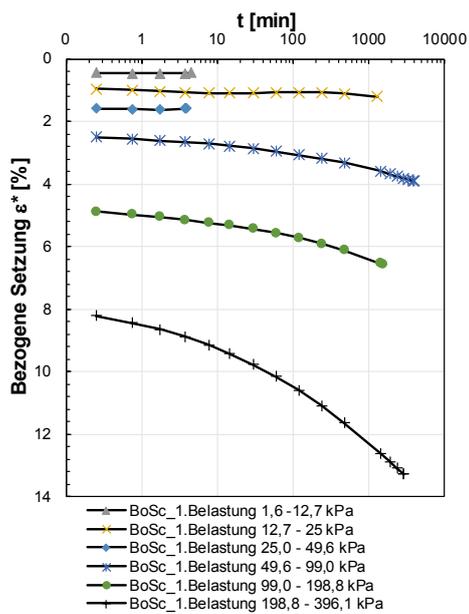
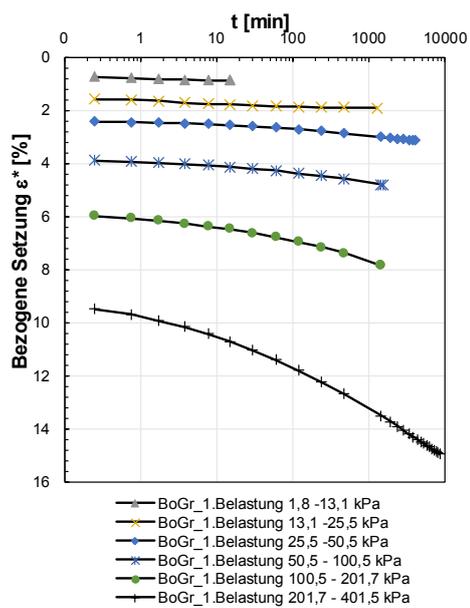


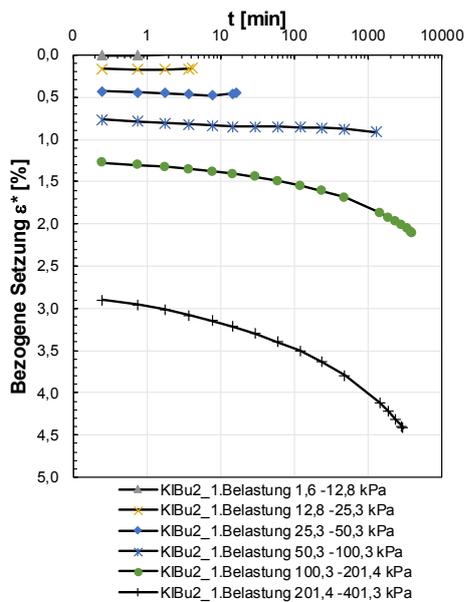
Bild 4-36: Spannungs-Zusammendrückungs-Diagramme (a), Spannungs-Porenzahl-Diagramme (b) der untersuchten Böden



(a)



(b)



(c)

Bild 4-37: Zeit-Stauchungs-Diagramme der untersuchten Böden BoSc (a) BoGr (b) KIBu2 (c)

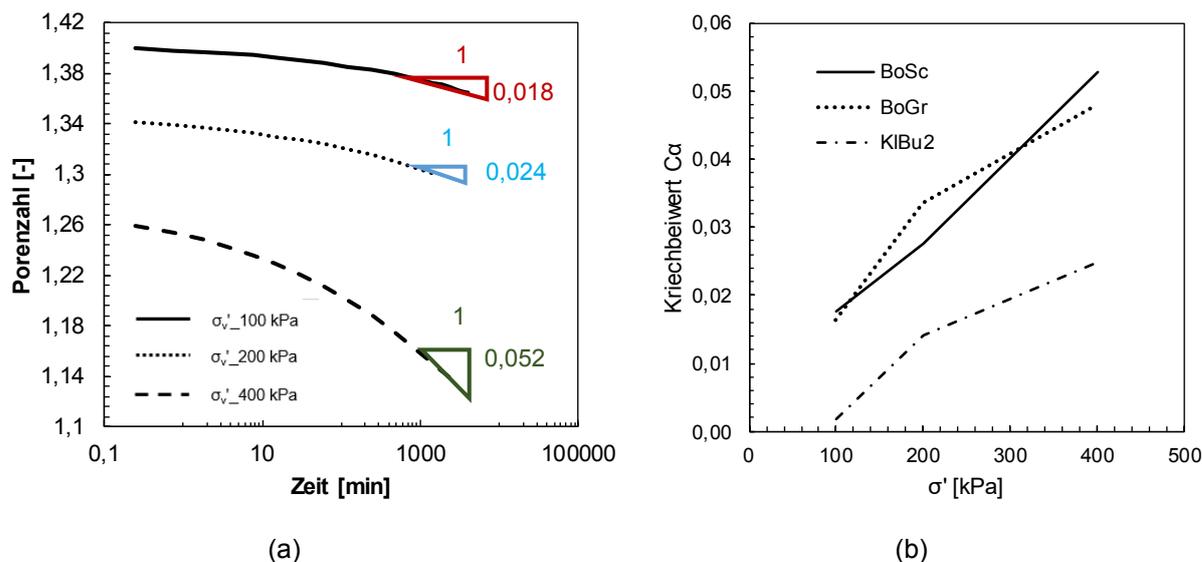


Bild 4-38: Abhängigkeit der Porenzahl von der Zeit für den Boden BoSc und exemplarische Bestimmung des Kriechbeiwertes C_α (a) sowie Abhängigkeit zwischen C_α und σ'_v für die Böden BoSc, BoGr, KIBu2 (b)

Die erreichten Einbaubedingungen der einzelnen Proben sind in der Spalte V1 der Tab. 4-24 aufgelistet. Die Kennwerte der spannungsabhängigen Zusammendrückung für die drei Böden wurden aus den Versuchsergebnissen gemäß DIN EN ISO 17892-5:2017 ermittelt und sind in der Zeile V1 der Tab. 4-25 aufgeführt. Der Kompressionsbeiwert C_c wurde dabei für den Spannungsbereich zwischen 200 kPa und 400 kPa bestimmt, da die Verläufe in diesem Bereich im halblogarithmischen Maßstab näherungsweise linear verlaufen. Aus Bild 4-37 und der Tab. 4-25 ist zu erkennen, dass die Böden BoSc und BoGr ein ähnliches Verformungsverhalten aufweisen, während sich der Boden KIBu2 im Vergleich dazu deutlich steifer verhält. HUBER (2016) hat einen Steifemodul von 2,5 – 5,0 MPa bei 100 kPa und 3,0 – 10,0 MPa bei 200 kPa für Böden mit einem organischen Gehalt von 10 bis 25 % angegeben. Die berechneten Steifemodulwerte der drei untersuchten Böden liegen abgesehen vom Boden KIBu2 in dem von HUBER (2016) angegebenen Bereich. Die Steifigkeit des Boden KIBu2 ist bei geringen Spannungen etwas höher als von Huber angegeben.

Aus den Zeit-Stauchungs-Diagrammen im Bild 4-37 (c) –(e) ist zu erkennen, dass die Verläufe nicht S-förmig sind. Zur Ermittlung des Konsolidationsbeiwertes c_v kann das Verfahren nach Casagrande mit logarithmischer Auftragung der Zeit daher nicht angewendet werden. Stattdessen wurde das Ende der Primärkonsolidation („End of primary consolidation“, EOP) mit Hilfe der Methode nach Taylor unter Auftragung der Zeit im Wurzelmaßstab für die jeweilige Laststufe berechnet. Die Konsolidierungszeiten t_{90} , d. h. die Zeit, bis zu der 90 % der Konsolidationsetzungen aufgetreten sind, sind in der Zeile V1 der Tab. 4-26 angegeben. Diese betragen zwischen 5 und 10 min, was auf einen schnellen Konsolidierungsprozess der Böden hinweist.

Der Kriechbeiwert C_α wurde für jeden Belastungsschritt aus der Steigung der Spannungs-Porenzahl-Beziehung für den Zeitraum zwischen 8 Stunden und 24-Stunden berechnet. Aus den gekrümmten Verläufen der Spannungs-Porenzahl-Beziehungen (siehe Bild 4-37 (c) – (e)) ist ersichtlich, dass die Kriechbeiwerte mit zunehmender Spannung zunehmen (siehe auch Bild 4-38). In Tab. 4-26 ist der aus den Versuchen dokumentierte Verhältniswert C_α/C_c , dargestellt. Gemäß MESRI & GODLEWSKI (1997) bleibt der C_α/C_c -Wert unabhängig von der Zeit, der Porenzahl und der Auflast weitgehend konstant. Der aus den eigenen

Versuchen ermittelte Verhältniswert liegt innerhalb des von MESRI & GODLEWSKI (1997) angegebenen Wertebereichs für Böden mit organischen Beimengungen bzw. organischen Böden.

So variieren die Verhältnisse für Oedometerversuche im gesättigten Zustand ohne Messung des Porenwasserdrucks zwischen 0,05 und 0,14. Für die Oedometerversuche im gesättigten Zustand mit Messung des Porenwasserdrucks und für die Oedometerversuche im teilgesättigten Zustand liegen die Verhältniswerte im Bereich zwischen 0,08 und 0,36. Es konnte dabei innerhalb der genannten Spannweite keine Tendenz mit der Zeit und der effektiven Spannung festgestellt werden.

Kennwert		Probe	V1	V2	V3	SC
Probendurchmesser	d [mm]	BoSc	100,65	71,40	71,40	71,35
Probenhöhe	h [mm]		32,20	20,00	19,90	19,75
Anfangstrockendichte	ρ_d [g/cm ³]		0,91	0,89	0,87	0,83
Erreichter Verdichtungsgrad	D_{Pr} [%]		101,11	98,33	97,11	92,67
Anfangswassergehalt	w_a [%]		50,23	60,91	51,72	48,95
Probendurchmesser	d [mm]	BoGr	100,00	71,40	71,40	70,00
Probenhöhe	h [mm]		26,00	20,00	20,00	19,75
Anfangstrockendichte	ρ_d [g/cm ³]		0,85	0,89	0,85	0,80
Erreichter Verdichtungsgrad	D_{Pr} [%]		94,11	98,89	94,22	88,89
Anfangswassergehalt	w_a [%]		63,04	55,65	59,99	55,48
Probendurchmesser	d [mm]	KIBu2	100,00	71,40	100,00	71,35
Probenhöhe	h [mm]		32,30	20,00	32,00	19,75
Anfangstrockendichte	ρ_d [g/cm ³]		0,90	0,87	0,90	0,93
Erreichter Verdichtungsgrad	D_{Pr} [%]		96,24	93,12	97,20	99,68
Anfangswassergehalt	w_a [%]		48,15	55,99	48,15	48,86

Anmerkung:

V1 – Oedometerversuche im gesättigten Zustand ohne Messung des Porenwasserdrucks

V2 – Oedometerversuche im gesättigten Zustand mit Messung des Porenwasserdrucks

V3 – Oedometerversuche im teilgesättigten Zustand

SC – Oedometerversuche im teilgesättigten Zustand in Saugspannungs-kontrollierten Oedometerzellen

Tab. 4-24: Erreichte Einbaubedingungen bei den verschiedenen Oedometerversuchen

Ver- suchs- art	σ' [kPa]	BoSc			BoGr				KIBu2				
		E_{oed} / E_{ms} [MPa]	C_c	C_R	C_s	E_{oed} / E_{ms} [MPa]	C_c	C_R	C_s	E_{oed} / E_{ms} [MPa]	C_c	C_R	C_s
V1	50			0,12	0,10			0,10	0,09			0,06	0,05
	100	2,08	0,19			2,85	0,15			10,99	0,04		
	200	3,62	0,22			3,17	0,26			8,38	0,10		
	400	2,74	0,55			2,59	0,61			8,46	0,19		
V2	50			0,07	0,002			0,06	0,02			0,04	0,001
	100	1,51	0,28			3,31	0,11			9,27	0,07		
	200	1,68	0,40			2,34	0,35			6,03	0,14		
	400	5,21	0,25			3,92	0,33			3,90	0,44		
V3	25			0,12	0,09			0,14	0,11			0,05	0,03
	50	1,48	0,14			1,48	0,18			6,31	0,03		
	100	1,18	0,34			1,18	0,32			5,66	0,07		
	200	1,45	0,52			1,45	0,52			7,96	0,1		
	400	2,12	0,66			2,12	0,62			4,40	0,36		
SC	12,5												
	25	2,95				4,42				10,74			
	50	3,23				4,34				17,89			
	100	3,65	-	-	-	5,37	-	-	-	17,00	-	-	-
	180	4,93				6,90				19,43			
	300	7,79				10,33				23,94			
	480	11,38				12,73				21,94			

Anmerkung:
V1 – Oedometerversuche im gesättigten Zustand ohne Messung des Porenwasserdrucks
V2 – Oedometerversuche im gesättigten Zustand mit Messung des Porenwasserdrucks
V3 – Oedometerversuche im teilgesättigten Zustand
SC – Oedometerversuche im teilgesättigten Zustand in Saugspannungs-kontrollierten Oedometerzellen

**Tab. 4-25: Ermittelte Steifemoduln E_{oed} , Kompressionsbeiwert C_c , Schwellbeiwert C_s , Rekompres-
sionsbeiwert C_R für die Böden BoSc, BoGr und KIBu2 im gesättigten Zustand ohne (V1) -
und mit Messung des Porenwasserdrucks (V2) und im teilgesättigten Zustand (V3)**

Ver- suchs- art	σ_v' [kPa]	BoSc				BoGr				KIBu2			
		t_{90} [s]	C_v $\cdot 10^{-5}$ [m ² /s]	C_α	C_d/C_c	t_{90} [s]	C_v $\cdot 10^{-5}$ [m ² /s]	C_α	C_d/C_c	t_{90} [s]	C_v $\cdot 10^{-5}$ [m ² /s]	C_α	C_d/C_c
V1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	100	345,60	35,77	0,02	0,09	614,40	12,81	0,02	0,11	240,00	54,38	0,002	0,05
	200	405,60	28,92	0,03	0,13	453,75	16,44	0,03	0,13	540,00	23,76	0,01	0,14
	400	470,40	22,38	0,05	0,10	375,00	17,72	0,05	0,08	470,40	26,20	0,02	0,13
V2	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	100	0,60	39,65	0,03	0,11	1,84	14,27	0,04	0,36	1,84	16,02	0,02	0,24
	200	1,35	16,59	0,09	0,23	2,40	10,45	0,06	0,16	2,40	11,94	0,03	0,24
	400	2,40	8,64	0,07	0,27	5,40	4,32	0,08	0,23	3,75	7,21	0,04	0,10
V3	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	50	88,84	16,00	0,02	0,15	1058,40	4,21	0,03	0,16	1058,40	12,14	0,01	0,21
	100	70,62	22,56	0,04	0,13	20,25	3,43	0,10	0,31	843,75	15,01	0,02	0,21
	200	87,09	12,25	0,05	0,10	10,56	5,85	0,06	0,11	735,00	16,83	0,02	0,17
	400	127,45	10,56	0,05	0,08	6,25	8,40	0,05	0,08	183,75	63,14	0,04	0,12
Anmerkung:													
V1 – Oedometerversuche im gesättigten Zustand ohne Messung des Porenwasserdrucks													
V2 – Oedometerversuche im gesättigten Zustand mit Messung des Porenwasserdrucks													
V3 – Oedometerversuche im teilgesättigten Zustand													

Tab. 4-26: Ermittelte Konsolidationszeiten t_{90} , Konsolidationsbeiwerte C_v und Kriechbeiwerte C_α für die Böden BoSc, BoGr und KIBu2 im gesättigten Zustand ohne- und mit Messung des Porenwasserdrucks und im teilgesättigten Zustand

4.13 Bestimmung der Last-Verformungseigenschaften - im gesättigten Zustand mit gleichzeitiger Messung des Porenwasserdrucks

Zur Bestimmung des Last-Verformungs-Verhaltens der Proben im gesättigten Zustand mit gleichzeitiger Messung des Porenwasserdruckes wurde die in Bild 4-39 dargestellte Zelle verwendet. Zur Probensättigung wurde die Zelle über die angeschlossene Bürette mit entlüftetem Wasser befüllt, bevor anschließend ein Sättigungsdruck durch Erhöhung des auf die Bürette wirkenden Luftdruckes erzeugt wurde. Die Messung des Sättigungsdruckes erfolgte mit einem Drucksensor (Messbereich bis 5 bar) Nach Abschluss der Sättigung wurden die Proben unter schrittweiser Erhöhung der Spannungen einaxial belastet. Die Proben konnten dabei über die Oberseite entwässern, während an der Probenunterseite mit einem Drucksensor (Messbereich bis max. 16 bar) die auftretenden Porenwasserdrücke gemessen wurden.

Das Ziel des Versuchs war, die zeitabhängigen Verformungen der Proben unter Messung der auftretenden Porenwasserüberdrücke infolge einer sofort aufgebrachten Belastung zu ermitteln. In Vorversuchen wurde dazu zunächst geprüft, inwieweit die Vertikalspannung unter Verwendung von Volumen-Kontrolleinheiten (VPC-Systeme) sofort aufgebracht werden kann. Hierbei zeigte sich, dass bis zum Erreichen der angestrebten Spannungen ein Mindestzeitraum von jeweils ca. 20 Sekunden erforderlich war und die angestrebte Spannung, nachdem sie erreicht wurde, anfänglich überschritten wurde. Mit den damit erhaltenen Ergebnissen war es nicht möglich, den zeitabhängigen Verlauf des Porenwasserdruckabbaus infolge der aufgebrachten Spannungen zutreffend zu analysieren, da die Zeit zur Lastaufbringung im Vergleich zur Konsolidierungsdauer zu groß war. Daher wurde der Versuchsaufbau so modifiziert, dass die Kompressionszelle in eine konventionelle Oedometerbank integriert werden konnte, bei dem die vertikale Kraft über einen Belastungsstempel mittels Totlast händisch und sofort aufgebracht wird. Die vertikalen Verformungen wurden mit Hilfe von Wegaufnehmer aufgezeichnet.

Zur Durchführung der Versuche wurden Teilproben der drei Böden mittels Ofentrocknung auf deren jeweiligen optimalen Wassergehalt (entsprechend den Ergebnissen der Verdichtungsuntersuchungen, siehe Abschnitt 4.7.2) getrocknet. Die Probe wurde so in den Ring eingepresst, dass die Einbaudichte der optimalen Trockendichte entsprach. Der Ring mit der Probe wurde anschließend in der Zelle installiert. Zur Verbesserung der Wassersättigung wurde die Probe mit Kohlendioxid für 10 Minuten gespült. Dabei wurde eine Vertikalspannung von ca. 5 kPa auf die Zelle aufgebracht, damit der Stempel den Kontakt zur Probe nicht verliert. Anschließend wurde die Vertikalspannung auf 10 kPa erhöht und der Wegaufnehmer auf Null gestellt. Zur Sättigung der Probe wurde die Zelle mit entlüftetem Wasser gefüllt und alle Schlauchverbindungen entlüftet. Die Probe wurde bei einer Auflastspannung von 50 kPa gesättigt, um Hinweise auf mögliche Sackungs- und Quellerscheinungen zu erhalten. Um eine möglichst vollständige Sättigung zu erreichen, wurde ein Sättigungsdruck (back pressure) von 300 kPa auf die Probe aufgebracht. Das Aufbringen des Sättigungsdruckes erforderte parallel dazu eine Erhöhung der vertikalen Spannung, was mit dem verwendeten Totlastsystem nur stufenweise erfolgen konnte. Im Einzelnen wurde zum Aufbringen des Sättigungsdruckes folgendermaßen verfahren: Zunächst wurde der Sättigungsdruck soweit erhöht, bis eine Effektivspannung von 5 kPa vorlag (Entlastung von 50 kPa auf 5 kPa). Im nächsten Schritt wurde die Vertikalspannung angehoben, so dass eine Effektivspannung von wiederum 50 kPa erreicht wurde (Wiederbelastung). Dieser Vorgang aus Entlastung und Belastung wurde mehrmals wiederholt, bis ein Sättigungsdruck von 300 kPa erreicht worden war. Nach Aufbringen des Sättigungsdruckes wurde die Probe unter Anlegen eines hydraulischen Gradienten von 30 von unten nach oben durchströmt. Die Durchströmung erfolgte über einen Zeitraum von 2 Tagen, um eine möglichst vollständige Wassersättigung der Probe durch Austrag der noch vorhandenen Porenluft zu gewährleisten. Ein bei Triaxialversuchen üblicher B-Test konnte aufgrund der Eigenschaften der Zelle nicht durchgeführt werden.

Die Versuchsrandbedingungen und die aufgebrachten Laststufen können zusammenfassend der Tab. 4-27 entnommen werden. Während jeder Belastungsphase wurde das Aufzeichnungsintervall auf 0,2 Sekunden eingestellt, um den schlagartigen Aufbau des Porenwasserüberdrucks nach instantaner Lasterhöhung möglichst genau erfassen zu können. Nach dem Abbau des Porenwasserüberdrucks wurde das Messintervall auf 10 Sekunden und später auf 120 Sekunden eingestellt. Die Vertikalspannung wurde bei jeder Belastungsstufe bzw. jeder Entlastungsstufe über einen Zeitraum von 24 Stunden konstant gehalten.

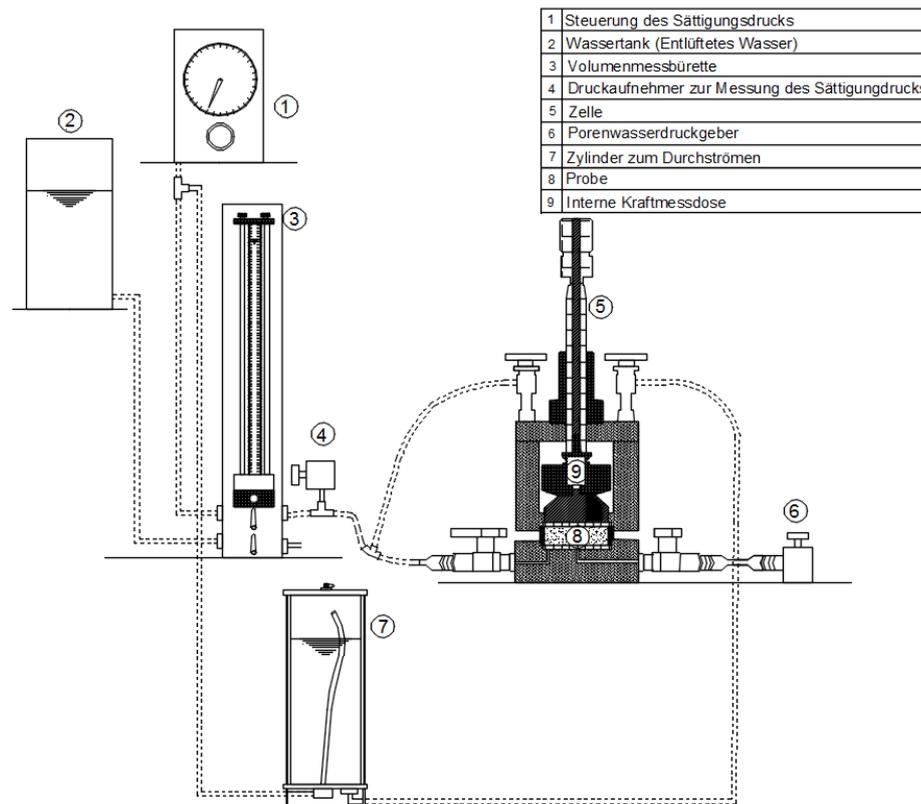


Bild 4-39: Schematische Darstellung des Versuchszustandes zur Durchführung von gesättigten Kompressionsversuchen mit Erfassung der Porenwasserdruckentwicklung

Einbaubedingung	Laststufen [kN/m ²]
Einbaubedingung; D _{PR} = 100 %	10/25/50//S//100/200/400//E//W//En
Anmerkung:	
S	Wassersättigung
E	Entlastung [200/100/25]
W	Wiederbelastung [50/100/200/400]
En	2. Entlastung [100/25/12,5]

Tab. 4-27: Versuchsrandbedingungen der gesättigten Oedometerversuche (mit gleichzeitiger Messung des Porenwasserdrucks) an den Böden BoSc, BoGr und KIBu2

4.13.1 Zusammenfassung der Ergebnisse und Interpretation

In Bild 4-40 sind die Zusammenhänge zwischen der effektiven Vertikalspannung und der Zusammendrückung bzw. der Porenzahl für die drei Böden dargestellt. Die ermittelten Kennwerte der Zusammendrückung sind in Zeile V2 der Tab. 4-25 aufgeführt. Es ist zu erkennen, dass sich die Steifemoduln, Kompressionsbeiwerte und Schwellbeiwerte von denen der Versuchsreihe V1 (gesättigte Oedometerversuche ohne

Messung der Porenwasserdrücke) unterscheiden. Dies könnte auf die unterschiedlichen Einbaubedingun- gen zurückzuführen sein, die in den verschiedenen Versuchen erreicht wurden und in der Tab. 4-24 darge- stellt sind.

Das zeitabhängige Verformungsverhalten der drei Böden ist in Bild 4-41 und Bild 4-42 dargestellt. In Bild 4-42 sind dabei zusätzlich zur Probenverformung die gemessenen Porenwasserüberdrücke aufgetragen.

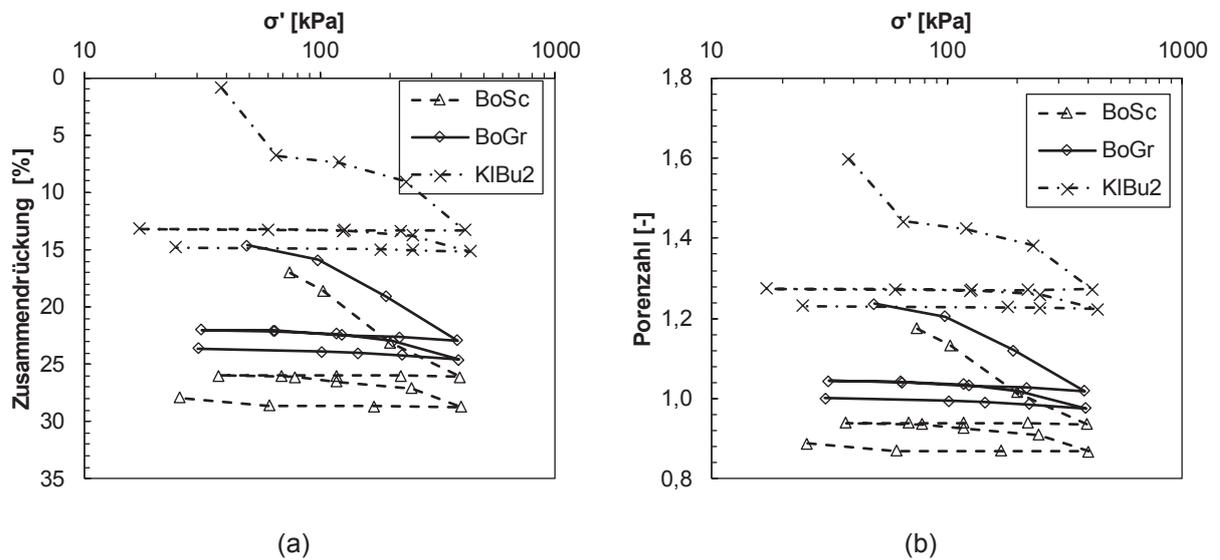
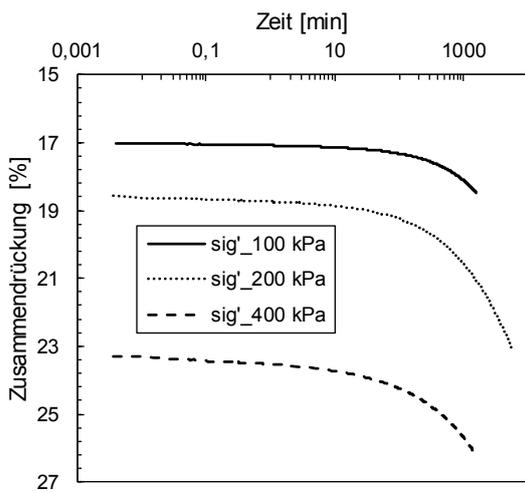
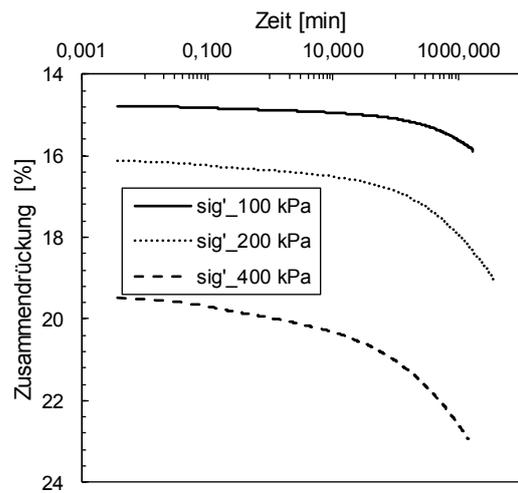


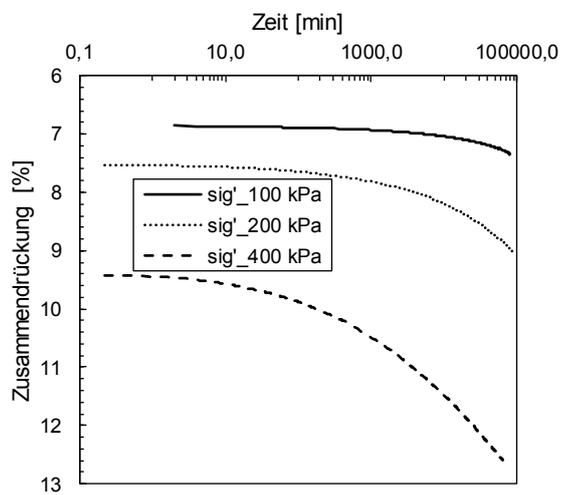
Bild 4-40: Darstellung des Zusammenhangs zwischen effektiver Vertikalspannung und Zusam- mendrückung (a) sowie zwischen effektiver Vertikalspannung und Porenzahl (halbloga- rithmische Darstellung) (b) für die Böden BoSc, BoGr und KIBu2



(a)



(b)



(c)

Bild 4-41: Zeitliche Entwicklung der Stauchungen bei verschiedenen Laststufen für den Boden BoSc (a), BoGr (b) und KIBu2 (c)

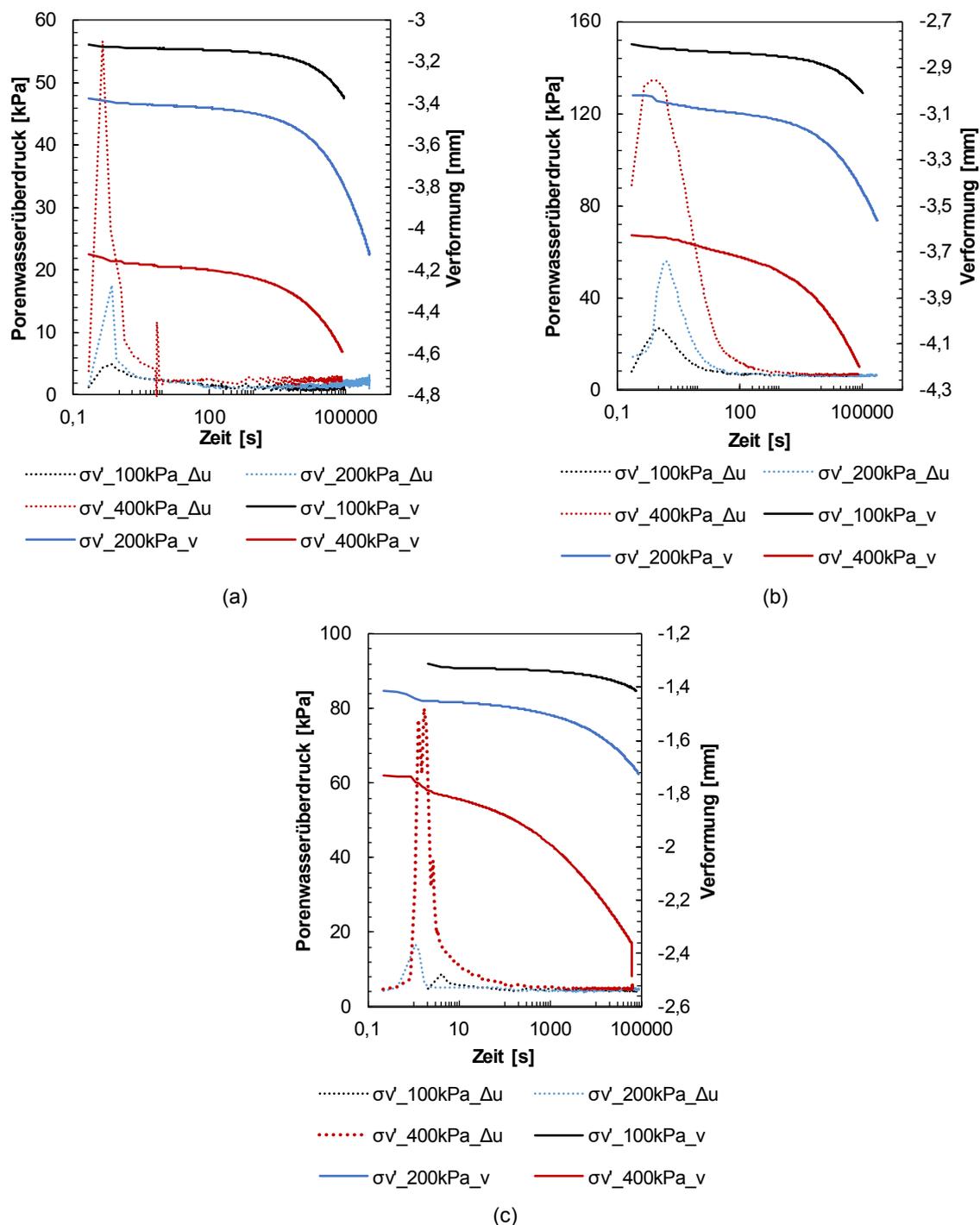


Bild 4-42: Zeitliche Entwicklung der Porenwasserüberdrücke und der Axialverformungen bei verschiedenen Laststufen für die Böden BoSc (a), BoGr (b) und KIBu2 (c)

Die aus den Versuchen abgeleiteten Werte für die Konsolidierungszeit t_{90} , den Konsolidationsbeiwert C_v und den Kriechbeiwert C_α sind in Zeile V2 der Tab. 4-26 angegeben. Aus den t_{90} -Werten ist ersichtlich, dass die Konsolidierung vergleichsweise schnell erfolgt und in wenigen Sekunden abgeschlossen ist. Dies führt zu vergleichsweise hohen C_v -Werten. Die C_v -Werte können nicht direkt mit den herkömmlichen Oedometerversuchen verglichen werden, da die Entwässerungslängen in beiden Fällen unterschiedlich sind. So betrug die Entwässerungslänge bei den herkömmlichen Oedometerversuchen ca. 15 mm (zweiseitige

Entwässerung bei Anfangsprobenhöhe von 30 mm) und bei den Oedometerversuchen mit Porenwasserdruckmessung 20 mm (einseitige Entwässerung bei Anfangsprobenhöhe von 20 mm). Aufgrund der größeren Entwässerungslänge wäre für die Proben des Oedometerversuches mit Porenwasserdruckmessung eine größere Konsolidierungsdauer zu erwarten gewesen. Hier zeigen sich jedoch die Folgen der Standardmäßigen Versuchsdurchführung bei den herkömmlichen Oedometerversuchen, bei denen die Zeit-Setzungen gemäß den Vorgaben der DIN EN ISO 17892-5:2017 nur zu festgelegten Zeitintervallen (15 s, 30 s, 1 min, 2 min. usw.) gemessen wurden. Da sich der Konsolidierungsvorgang im Wesentlichen innerhalb der ersten 60 s abspielt, kann die Zeit-Setzungs-Kurve während der Konsolidierungsphase mit den wenigen Messwerten nicht ausreichend genau abgebildet werden. Dies führt bei der Ermittlung der Konsolidationsdauern t_{90} nach Taylor zu vergleichsweise großen Werten und einer Überschätzung der Konsolidationsdauer (siehe Tab. 4-26).

Bei den Versuchen mit Porenwasserdruckmessung wurden die Porenwasserdrücke in allen Belastungsphasen kontinuierlich aufgezeichnet, was die Berechnung der Konsolidierungszeit t_{98} als Zeitraum bis zum 98-prozentigen Abbau des Porenwasserüberdrucks ermöglicht. Der Porenwasserüberdruck wird dabei als Differenz zwischen dem vom Sensor gemessenen Porenwasserdruck an der Probe und dem auf das System aufgetragenen Sättigungsdruck bestimmt. Ein Vergleich zwischen dem nach der Taylor-Methode berechneten $t_{100, \sqrt{t}}$ und dem aus dem Porenwasserdruckabbau berechneten Wert $t_{98, PWP}$ ist in der Tab. 4-28 zu finden. Die t_{100} -Werte zeigen, dass das Ende der Primärkonsolidierung, das nach der Taylor-Methode berechnet wurde, nicht mit den Werten übereinstimmt, die aus den Porenwasserdrücken berechnet wurden. So ergeben sich bei der Auswertung nach Taylor etwas geringere Konsolidationsdauern als wie über die gemessenen Porenwasserdrücke abgeleitet wurde. Unabhängig davon zeigen sowohl die mittels Taylor bestimmten Konsolidationsdauern als auch die aus den Porenwasserdruckmessungen abgeleiteten Konsolidationsdauern tendenziell eine Zunahme mit der Spannung, was auf die Reduzierung der Wasserdurchlässigkeit der Proben mit zunehmender Belastung zurück zu führen ist.

Boden	σ'_v _100 kPa		σ'_v _200 kPa		σ'_v _400 kPa	
	$t_{100, \sqrt{t}}$ [s]	$t_{98, PWP}$ [s]	$t_{100, \sqrt{t}}$ [s]	$t_{98, PWP}$ [s]	$t_{100, \sqrt{t}}$ [s]	$t_{98, PWP}$ [s]
BoSc	1,35	3,00	2,40	5,00	3,75	10,00
BoGr	2,40	15,00	3,75	20,00	9,60	200,00
KIBu2	2,90	8,00	3,75	3,00	7,35	19,20

Tab. 4-28: Konsolidationsdauern berechnet mit der Taylor-Methode und aus dem Abbau des Porenwasserüberdrucks

Gemäß der klassischen Bodenmechanik werden die zeitabhängigen Setzungen in Primär- und Sekundärkonsolidation unterschieden. Die Primärkonsolidation ist durch den Abbau von Porenwasserüberdrücken gekennzeichnet, während die Sekundärkonsolidation die sich daran anschließenden zeitabhängigen Verformungen beschreibt, die nicht durch den Abbau von Porenwasserüberdrücken hervorgerufen werden. Die Sekundärkonsolidation resultiert aus dem viskosen Bodenverhalten und wird auch als Kriechen bezeichnet. Die Steigung der Sekundärverformungen im Zeit-Porenzahl-Diagramm (in halblogarithmischer Darstellung) lässt sich anhand des Kriechbeiwertes beschreiben, wobei dieser bei mineralischen Böden nur eine vergleichsweise geringe Abhängigkeit von der Spannung aufweist.

Der Kriechbeiwert der Böden wurde zunächst wie bei den Oedometerversuchen ohne Messung des Porenwasserdruckes unter Betrachtung der im Zeitraum zwischen 8 Stunden und 24-Stunden aufgetretenen Stauchungen bestimmt. Wie aus Tab. 4-26 ersichtlich wird, nehmen die so ermittelten Kriechbeiwerte für

alle Proben mit der Zeit und mit der effektiven Spannung zu. Im Vergleich zu den herkömmlichen Oedometerversuchen wurden aus den Kompressionsversuchen mit Messung der Porenwasserdrücke für alle Böden und Spannungszustände etwas größere C_α -Werte abgeleitet.

Aus Bild 4-41 und Bild 4-42 ist jedoch ersichtlich, dass bei den hier untersuchten Böden nach Beendigung der Primärkonsolidierung die Setzungen bis zu einer bestimmten Zeit zunächst moderat (im halblogarithmischen Maßstab näherungsweise linear) zunehmen bevor die Krümmung der Kurven zunimmt und sich die Kurvenverläufe bis zum Ende der Belastungsdauer von 1 Tag deutlich versteilen. Ein ähnliches Verhalten wurde von DHOWIAN & EDIL (1980), EDIL & DHOWIAN (1979) und FOX ET AL. (1992) beobachtet, weshalb diese das zeitabhängige Verformungsverhalten derartiger Böden in vier unterschiedliche Bereiche, nämlich der Sofortsetzung, der Primärsetzung (v_p), der Sekundärsetzung (v_s) und der Tertiärsetzung (v_t) unterteilen (siehe Bild 3-17). Eine ähnliche Kurve (Typ III gemäß LEONARDS & GIRAULT (1961)) lässt sich aus den Ergebnissen des Experiments V2 erkennen und ist in Bild 4-43 dargestellt. Der Zeitpunkt für das Ende der Sekundärkompression kann dabei durch den Schnittpunkt der Tangenten berechnet werden, die an den beiden linearen Abschnitten vor und nach dem Punkt der maximalen Krümmung angelegt werden (siehe Bild 4-44). Die so ermittelten t_s -Werte sind in Tab. 4-29 dargestellt. Aus den in der Tab. 4-29 aufgeführten Werten ist ersichtlich, dass die t_s -Werte mit zunehmender Spannung abnehmen. Gleichzeitig zeigen die Verläufe in Bild 4-44, dass die Unterscheidung zwischen sekundärer zu tertiärer Verformung bei der höchsten Spannung von 400 kPa weniger ausgeprägt ist. DHOWIAN & EDIL (1980) berichtet auch von einem Verschwinden der tertiären Kompression bei höheren Spannungsniveaus für Torf-Proben. Für die Bereiche der sekundären und tertiären Kompression lassen sich aus der Steigung der Tangenten jeweils getrennt Kriechbeiwerte ($C_{\alpha 1}$ und $C_{\alpha 2}$) ermitteln (siehe Tab. 4-29). Entsprechend der Vorgehensweise entspricht der Kriechbeiwert $C_{\alpha 2}$ etwa dem bei den vorherigen Auswertungen bestimmten Wert C_α . Das Verhältnis $C_{\alpha 2} / C_{\alpha 1}$ variiert zwischen 4 und 40. Welche bodenmechanischen Ursachen zur Erscheinung der beschriebenen Kurvenform führen, ist noch ungeklärt. Die Zersetzung organischer Substanz kann aufgrund der geringen Versuchsdauern im Labor als Ursache aber ausgeschlossen werden. Es wird vermutet, dass die Überkonsolidierung der verdichteten Proben maßgeblich zu diesem Verhalten beiträgt. Dies steht in Übereinstimmung mit Untersuchungen von DEN HAAN & EDIL (1994), wonach die Kurve vom Typ III (wie im Bild 4-41) insbesondere bei einem hohen OCR-Wert („Over consolidation ratio“) in Verbindung mit einem niedrigen Lastinkrementverhältnis auftritt.

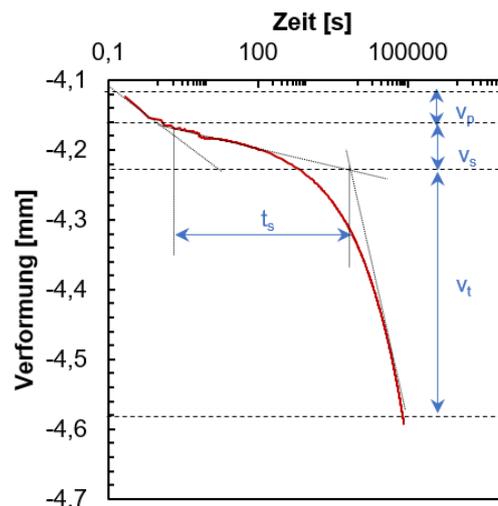


Bild 4-43: Zeitabhängiges Verformungsverhalten des Bodens BoSc unter einer Spannung von 400 kPa mit Darstellung der primären (v_p), sekundären (v_s) und tertiären (v_t) Verformungen

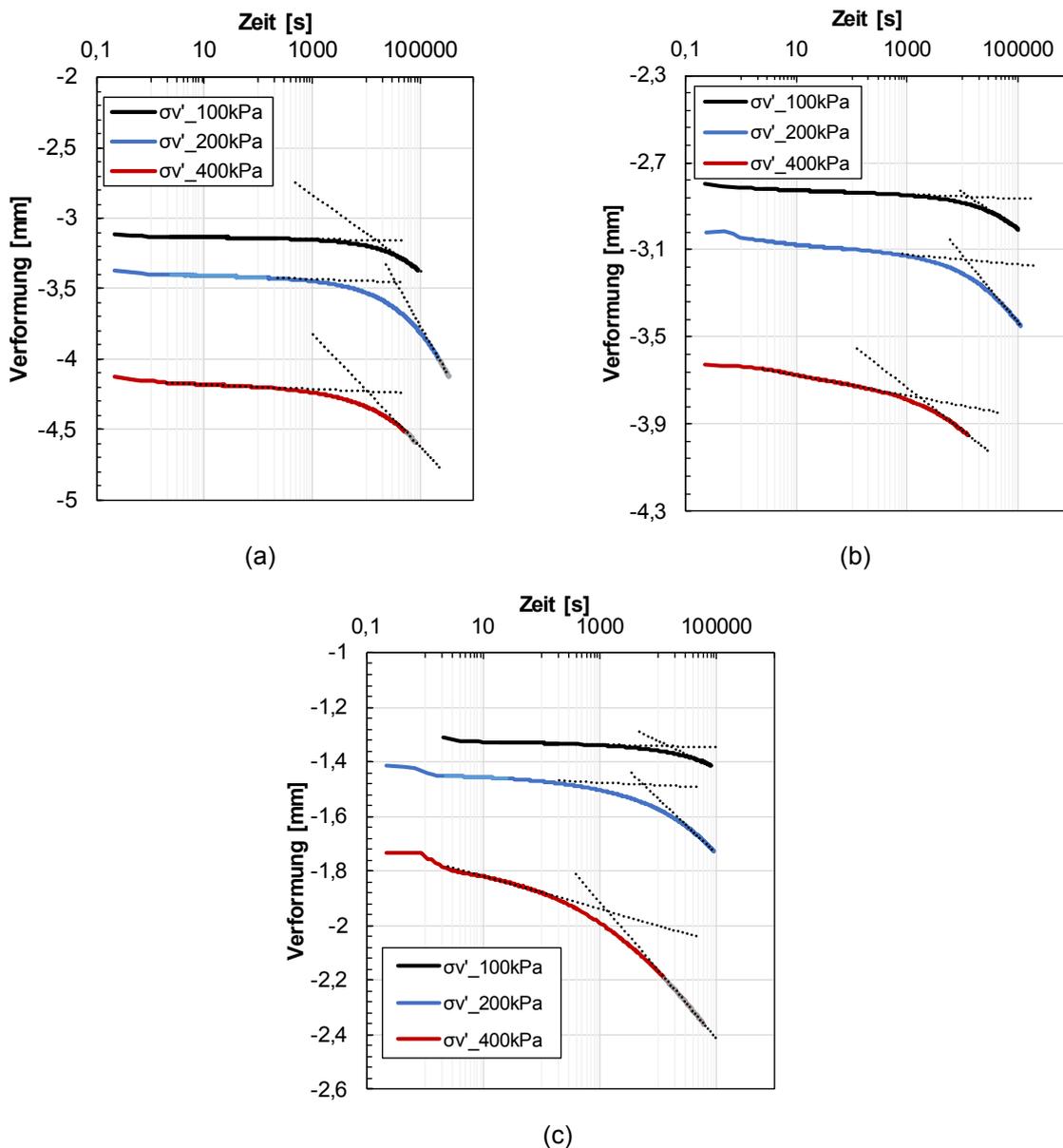


Bild 4-44: Verformungs-Zeit-Diagramm und Bestimmung des Zeitpunktes t_s (Ende der Sekundärkompression) für die Böden BoSc (a), BoGr (b) und KIBu2 (c)

σ'_v [kPa]	BoSc			BoGr			KIBu2		
	t_s [s]	$C_{\alpha 1}$	$C_{\alpha 2}$	t_s [s]	$C_{\alpha 1}$	$C_{\alpha 2}$	t_s [s]	$C_{\alpha 1}$	$C_{\alpha 2}$
100,00	14999,40	0,001	0,039	14998,16	0,002	0,024	14998,16	0,001	0,014
200,00	34998,65	0,002	0,110	10497,6	0,004	0,047	5497,6	0,001	0,027
400,00	9997,6	0,003	0,064	1794,6	0,007	0,031	1496,25	0,007	0,037

Tab. 4-29: Zeitpunkte t_s als Übergang von der sekundären zur tertiären Kompression ($C_{\alpha 1}$ und $C_{\alpha 2}$) für die Böden BoSc, BoGr und KIBu2

Das zeitabhängige Verformungsverhalten bei Entlastung ist in Bild 4-45 und Bild 4-46 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Proben infolge der Entlastung zunächst eine sofortige Hebung erfahren, die einige Minuten andauert, bevor sich anschließend wiederum Stauchungen zu entwickeln beginnen. Dies betrifft

insbesondere die Böden BoSc und KIBu2, bei denen vor allem bei der Entlastung von 400 kPa auf 200 kPa im Anschluss an die beschriebenen Hebungen weitere Stauchungen auftreten. Das bedeutet, dass die Setzungsgeschwindigkeit bei der Entlastung langsamer wird, der Boden aber weiterhin kriecht. Ein ähnliches Verhalten wurde von MESRI ET AL. (2001) an weichen Tonen und von MADASCHI & GAJO (2015) an Torf beobachtet.

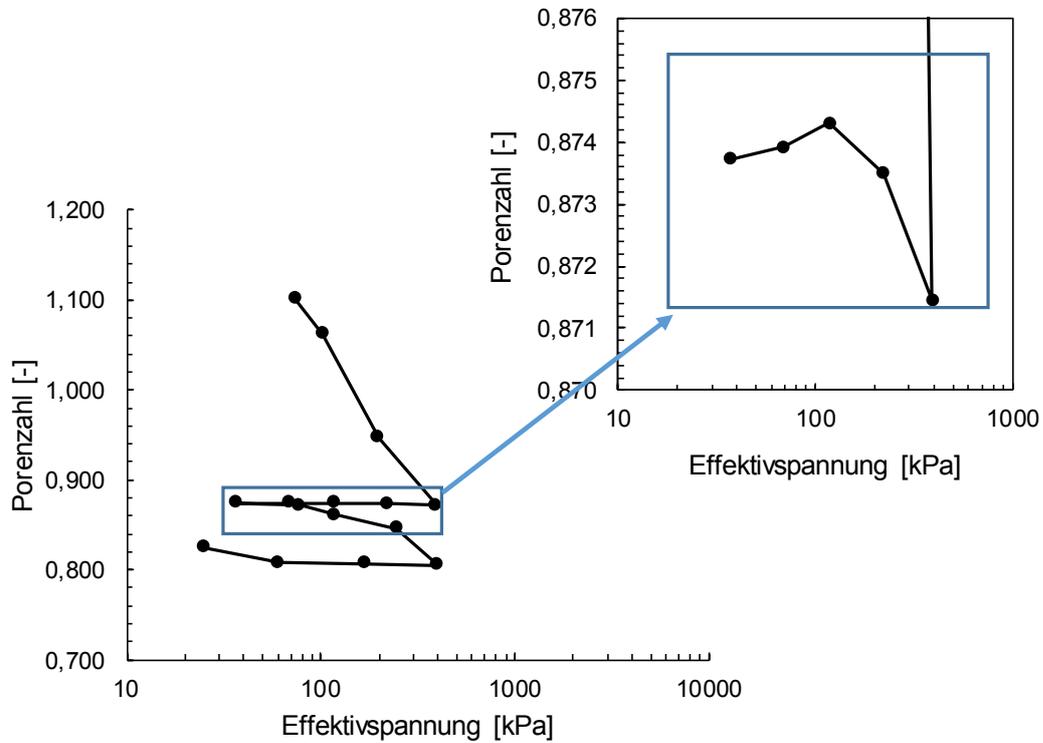


Bild 4-45: Änderung der Porenzahl bei der Entlastung

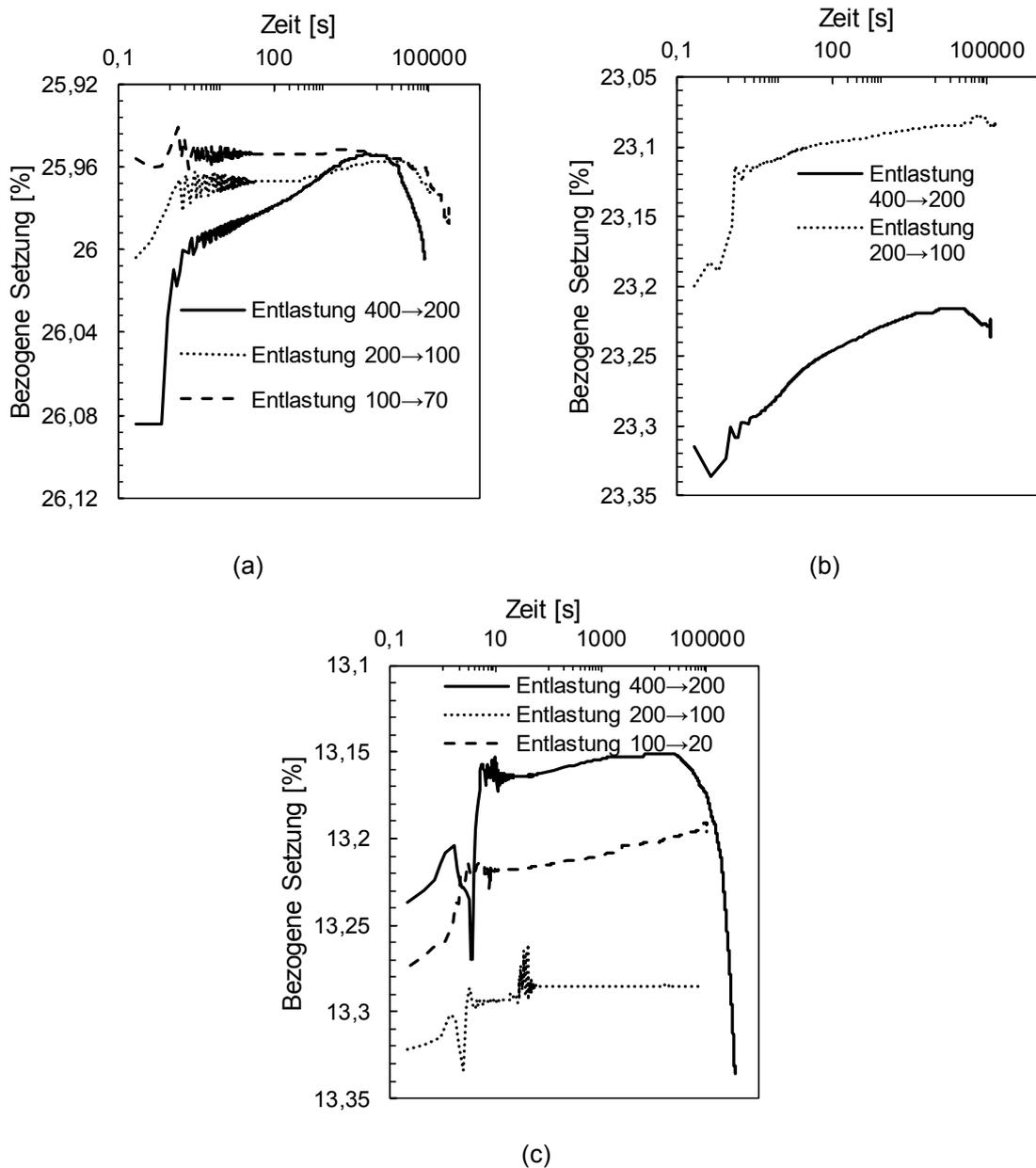


Bild 4-46: zeitabhängiger Verlauf der bezogenen Setzungen für die Böden BoSc (a), BoGr (b) und KIBu2 (c) während der 1.Entlastungsphasen

Wie bereits in Abschnitt 3.2.9 berichtet, können derartige viskose Effekte mit der klassischen Konsolidierungstheorie nicht erklärt werden und hat sich das a,b,c-Isotachenmodell nach DEN HAAN (1996) diesbezüglich im Zusammenhang mit der Untersuchung von Torfen und organischen Böden als geeignet erwiesen.

Zur Ermittlung der Isotachen aus den durchgeführten Oedometerversuchen, wurde zunächst die logarithmische Stauchung für jede Belastungsstufe berechnet und anhand der ersten Ableitung die Kriechrate zu jedem Messzeitpunkt ermittelt. Um die in Abhängigkeit von der Spannung für eine gewählte Kriechrate

aufgetretene Stauchung zu ermitteln wurden, wurde ein MATLAB Algorithmus verwendet. Die damit erhaltenen Werte wurden anschließend im doppellogarithmischen Spannungs-Dehnungs-Diagramm aufgetragen, woraus sich die einzelnen Isotachen ergeben.

Die so ermittelten Isotachen sind für die Böden BoSc, BoGr und KIBu2 im Bild 4-47, Bild 4-48 und Bild 4-49 dargestellt. Die auf Basis der abgeleiteten Isotachen bestimmten Parameter a , b und c , welche entsprechend ihrer Ableitung prinzipiell ähnlich den Kennwerten C_s , C_c und C_α , sind in Tab. 4-30 aufgeführt. Es zeigt sich, dass die Kennwerte für die Böden BoSc und BoGr sehr ähnlich sind. Die Parameter des Isotachenmodells unterscheiden sich jedoch von den in Tab. 4-25 und Tab. 4-26 angegebenen Kennwerten C_s , C_c und C_α . Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Kennwerte des Isotachenmodells auf Basis der natürlichen Dehnung bestimmt wurden, während zur Ermittlung der Kennwerte C_s , C_c und C_α die lineare Dehnung („engineering strain“) herangezogen wird.

Aus Bild 4-47, Bild 4-48 und Bild 4-49 ist zu erkennen, dass die Isotachen bei niedrigeren Spannungen etwa parallel zueinander verlaufen, während sie sich mit zunehmender Spannung auffächern. Das bedeutet, dass die Isotachen zwar linear, aber nicht parallel zueinander sind. Da die zeitabhängigen Verformungen anhand des Kennwertes c über den vertikalen Abstand der Isotachen beschrieben werden, zeigt sich daraus, dass sich der Kriechbeiwert bei den untersuchten Böden mit der Spannung und der Zeit ändert. Wie beschrieben ist dieses Verhalten vermutlich auf die Überkonsolidierung der Proben zurückzuführen und wurde in ähnlicher Weise auch schon von DEN HAAN & EDIL (1994) und ZHANG & O'KELLY (2013) beschrieben. Infolgedessen ist die Anwendbarkeit des Isotachenmodells für verdichtete Böden mit organischen Beimengungen stark eingeschränkt.

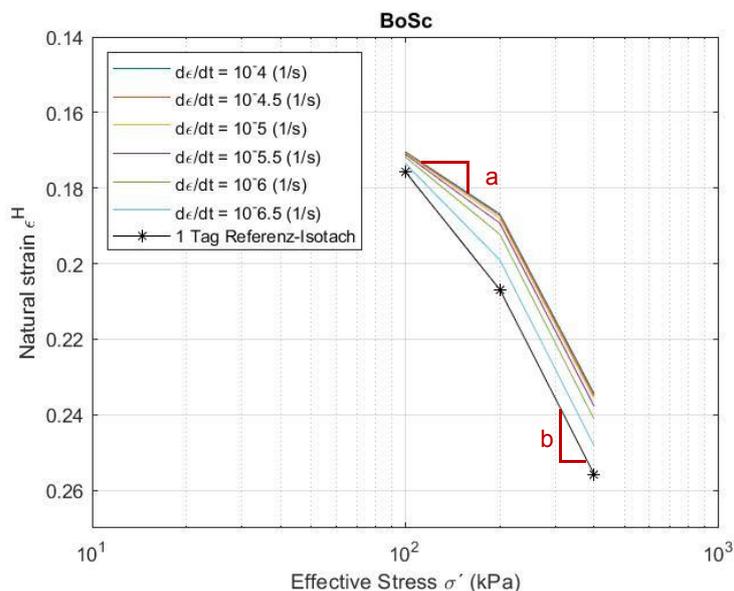


Bild 4-47: Isotachen für Boden BoSc

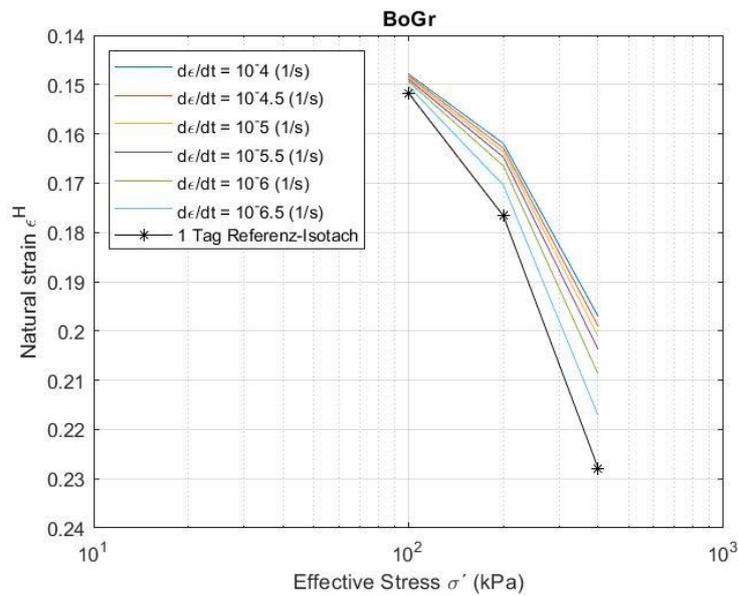


Bild 4-48: Isotachen für Boden BoGr

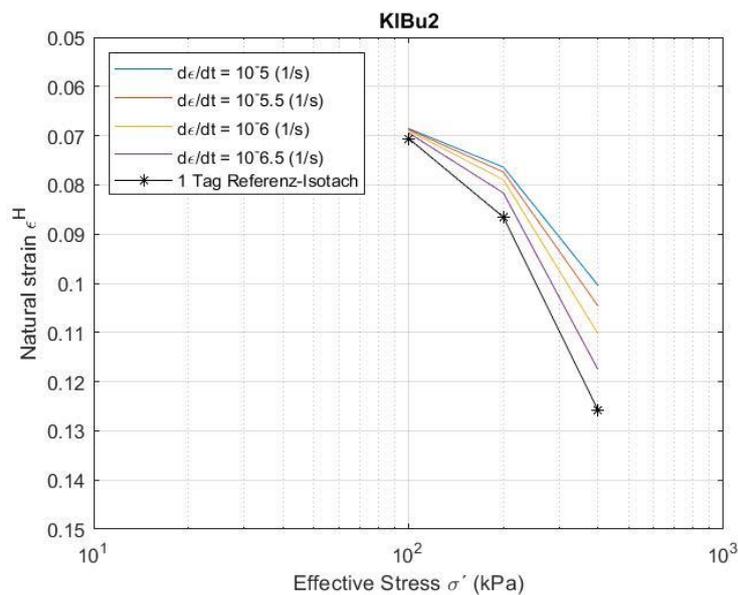


Bild 4-49: Isotachen für Boden KIBu2

Parameter	BoSc	BoGr	KIBu2
a	0,024	0,020	0,011
b	0,071	0,074	0,057
c	0,011	0,011	0,007
p_g [kPa]	10,100	18,340	43,500

Anmerkung:
a,b,c → Parameter des Isotachen-Modells
 p_g → Vorkonsolidierungsspannung bei einer Stauchung von 0

Tab. 4-30: Parameter des Isotachenmodells

4.14 Bestimmung der Last-Verformungseigenschaften - im teilgesättigten Zustand

4.14.1 Probenvorbereitung and Versuchsdurchführung

Die Kompressionsversuche zur Ermittlung des spannungs- und zeitabhängigen Verformungsverhaltens der Proben im teilgesättigten Zustand wurden in Anlehnung an DIN EN ISO 17892-5:2017 in einer Totlast-Oedometeranlage durchgeführt. Im Vergleich zu den in Abschnitt 4.12 und 4.13 beschriebenen Kompressionsversuchen wurden die Proben nach Einbau nicht wassergesättigt. Zur Durchführung der Versuche wurden Teilproben der drei Böden durch Ofentrocknung auf deren jeweiligen optimalen Wassergehalt (entsprechend den Ergebnissen der Verdichtungsuntersuchungen, siehe Abschnitt 4.7.2) getrocknet. Die Verdichtung erfolgte für jede Einzelprobe durch statische Verdichtung in einem Zylinder („Rohling“). Anschließend wurde aus diesem „Rohling“ jede einzelne Probe für die Ödometeruntersuchungen mittels Ausstechring herausgearbeitet und in das Versuchsgerät eingebaut. Die erzielten Einbaudichten und Einbauwassergehalte können Tab. 4-24 entnommen werden.

Die Versuchsrandbedingungen und die aufgetragenen Laststufen sind in Tab. 4-31 aufgelistet.

Probe	Sättigung	Laststufen [kPa]
BoSc	Nein	25/50/100/200/400/ E / W / En
BoGr	Nein	25/50/100/200/400/ E / W / En
KIBu2	Nein	25/50/100/200/400/ E / W / En
Anmerkung:		
E	Entlastung [100/25]	
W	Wiederbelastung [50/100/200/400]	
En	2. Entlastung [100/25/12,5]	

Tab. 4-31: Übersicht über die teilgesättigten Kompressionsversuche an den Böden BoSc, BoGr und KIBu2

4.14.2 Zusammenfassung der Ergebnisse und Interpretation

Die an den Böden BoSc, BoGr und KIBu2 erzielten Ergebnisse sind in den Diagrammen Bild 4-50 und Bild 4-51 dargestellt.

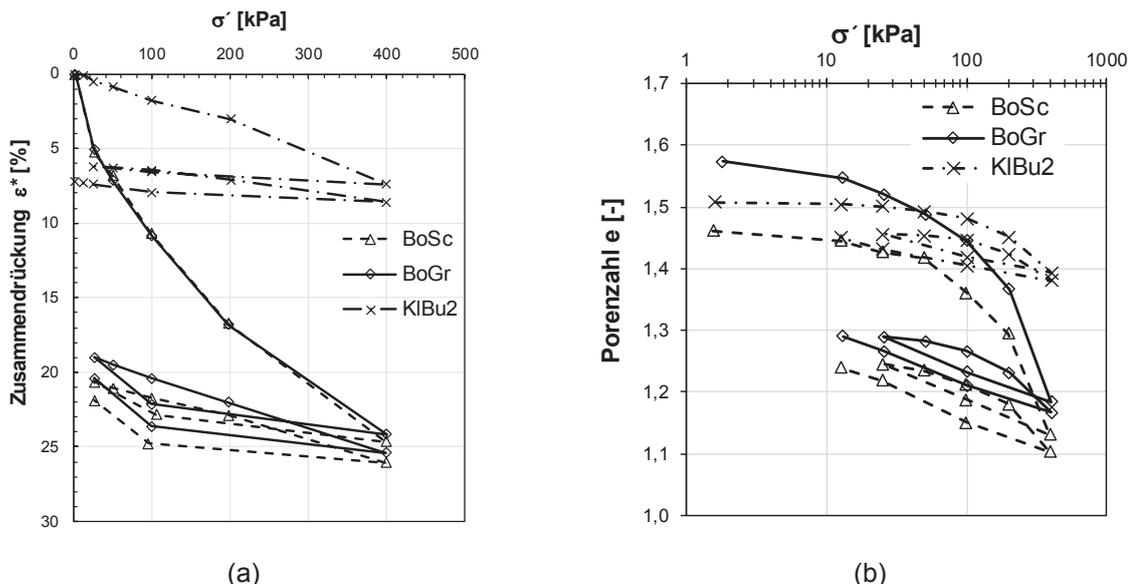
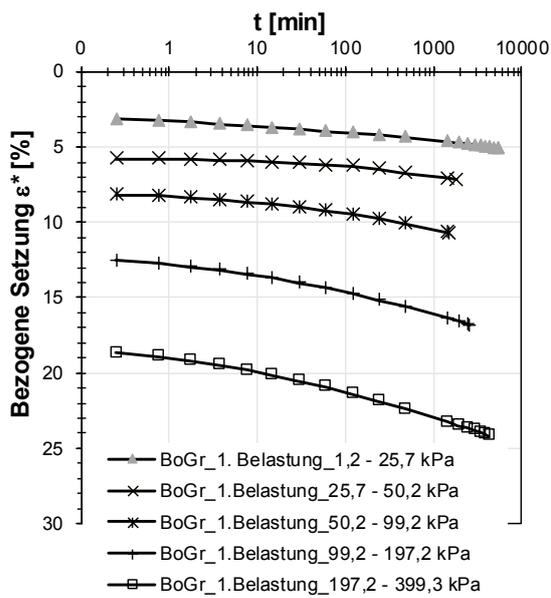
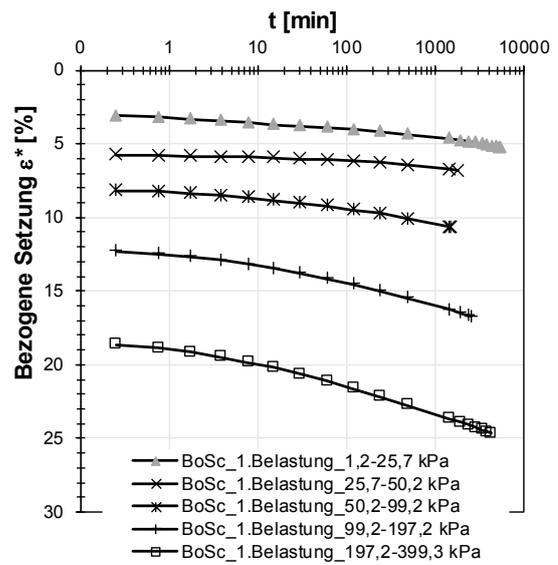


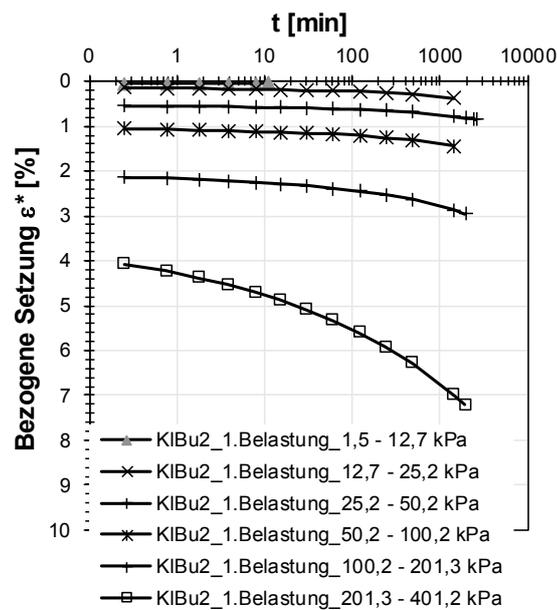
Bild 4-50: Spannungs-Zusammendrückungs-Diagramm (a), Spannungs-Porenzahl-Diagramm (b) und Zeit-Stauchungs-Diagramme der untersuchten Böden im teilgesättigten Zustand



(a)



(b)



(c)

Bild 4-51: Zeit-Stauchungs-Diagramme der untersuchten Böden BoSc (a) BoGr (b) KIBu2 (c), untersucht im teilgesättigten Zustand

Die Spannungs-Zusammendrückungs- und Spannungs-Porenzahl-Diagramme Bild 4-50(a) und (b) zeigen für die drei Proben ein ähnliches Verhalten wie im gesättigten Zustand (siehe Bild 4-37). Ebenfalls wie im gesättigten Zustand zeigt der Boden KIBu2 auch bei den teilgesättigten Kompressionsversuchen ein steiferes Verhalten als die Böden BoSc und BoGr.

Die Zeile V3 in der Tab. 4-25 enthält den Steifemodul und die Koeffizienten C_C , C_R , C_S , die für die Böden im teilgesättigten Zustand berechnet wurden. Alle Böden zeigen im teilgesättigten Zustand ein etwas weiches Verhalten, d. h. kleinere Steifemoduln bzw. größere Kompressionsbeiwerte, im Vergleich zum gesättigten Zustand.

Aus dem Zeit-Zusammendrückungs-Diagramm im Bild 4-51 ist zu erkennen, dass die Kurven nicht S-förmig verlaufen. Die Zeit bis zum Ende der Primärkonsolidierung wurde deshalb mit Hilfe des Verfahrens nach Taylor ausgewertet. Die damit bestimmte Konsolidationszeit t_{90} sowie der Kriechbeiwert C_α sind in der Zeile V3 der Tab. 4-26 aufgeführt. Die Primärkonsolidierung erfolgt schneller als im gesättigten Zustand, was zu größeren C_V -Werten führt. Der Kriechbeiwert C_α nimmt wie bei den gesättigten Versuchen mit der effektiven Spannung zu.

4.15 Bestimmung der Last-Verformungseigenschaften - im teilgesättigten Zustand in Saugspannungs-kontrollierten Oedometerzellen

4.15.1 Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung

Die Last-Verformungseigenschaften im teilgesättigten Zustand wurden in einer Saugspannungs-kontrollierten Oedometerzelle nach BIRLE (2012) bestimmt. Dabei wurde die Saugspannung unter Anwendung der Achsen-Translations-Technik kontrolliert. Die Vertikalspannungen wurden konstant gehalten, während die Saugspannungen variiert wurden. Der Versuchstand für die Untersuchungen ist schematisch in Bild 4-52 dargestellt.

Die Saugspannung wurde als Matrixspannung über die Differenz zwischen dem in der Zelle herrschenden Luftdruck und dem an der Basis der Probe angelegten Wasserdruck vorgegeben. Der Luftdruck wurde mit Hilfe von Präzisionsreglern eingestellt und durch Drucksensoren aufgezeichnet. Zur Ermittlung des sich bei einer vorgegebenen Saugspannung einstellenden Wassergehaltes wurde das in die Probe ein- bzw. aus der Probe ausströmende Wasser mit Hilfe von Standrohren quantifiziert. Die Höhe des Wasserstandes in den Standrohren wurde durch die Ablesung des Wasserstandes ermittelt. Die Vertikalkraft wurde über einen Rollmembranzylinder aufgebracht. Die Änderung der Probenhöhe wurde mit Hilfe von einem elektronischen Wegaufnehmer aufgezeichnet.

Die statisch verdichteten Probekörper („Rohlinge“) hatten einen Durchmesser von 100 mm und eine Höhe von 25 mm. Aus diesen wurden für die Untersuchung in den Saugspannungs-kontrollierten Oedometerzellen Prüfkörper mit Hilfe eines Ausstechzylinders entnommen. Anschließend wurde das System mit entlüftetem Wasser befüllt und die Probe eingebaut. Die Proben wurden zunächst bewässert (Erstbewässerung) und danach entwässert. Während der Bewässerung konnte keine vollständige Sättigung der Proben erreicht werden, da die Saugspannung aufgrund versuchstechnischer Randbedingungen nur auf einen Minimalwert von ca. 5 kPa reduziert wurde. Zunächst wurde eine Vertikalspannung von 10 kPa mit Hilfe der Rollmembranzylinder aufgebracht, um den Kontakt zwischen dem Stempel und der Probe sicherzustellen. Der Wegaufnehmer wurde auf Null gestellt und die Vertikalspannung auf 25 kPa erhöht. Danach wurde der Zellenluftdruck auf 30 kPa angehoben. Anschließend wurde der Zellenluftdruck auf 330 kPa und parallel dazu der Wasserdruck auf 300 kPa erhöht. Im nächsten Schritt wurde die Vertikalspannung auf 50 kPa angehoben, während der Luftdruck und der Wasserdruck konstant gehalten wurden. Durch eine stufenweise Reduzierung des Zellenluftdruckes wurde von diesem Zustand ausgehend zunächst das Verformungsverhalten bei einem Bewässerungspfad untersucht. Anschließend wurden die Proben durch Anheben des Zellenluftdruckes stufenweise entwässert. Ein Gleichgewichtszustand unter einer Saugspannungsstufe wurde etwa nach 4 bis 6 Tagen erreicht. Infolgedessen betrug die Versuchsdauer für einen Einzelversuch bis zu 3 Monate. Nach der letzten Saugspannungsstufe wurde zunächst die Vertikalspannung schrittweise auf 12,5 kPa reduziert, bevor die Probe anschließend komplett entlastet und ausgebaut wurde.

Die einzelnen Laststufen sind im Detail in Tab. 4-32 angegeben. Eine Übersicht über den zeitlichen Verlauf der aufgebrachten Vertikalspannungen σ_v , der Saugspannungen u_a - u_w und der gemessenen Stauchungen ist getrennt für die einzelnen Versuche in Bild 4-53 enthalten.

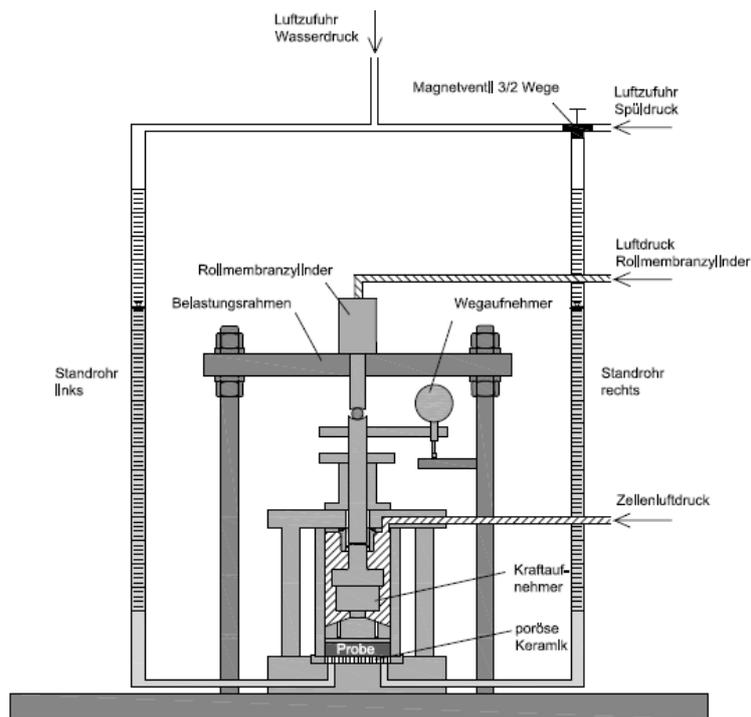


Bild 4-52: Schematische Darstellung des Saugspannungs-kontrollierten Versuchstandes (BIRLE 2012)

Probe	$\sigma_v - u_a$ [kPa]	Laststufen $u_a - u_w$ [kPa]
BoSc	50	12,5/5/12,5/25/50/100/180/300/480
BoGr	50	12,5/5/12,5/25/50/100/180/300/480
KIBu2	50	12,5/5/12,5/25/50/100/180/300/480

Tab. 4-32: Übersicht über die Vertikalspannungen und Saugspannungen in den SC-Ödometerversuche an den Böden BoSc, BoGr und KIBu2

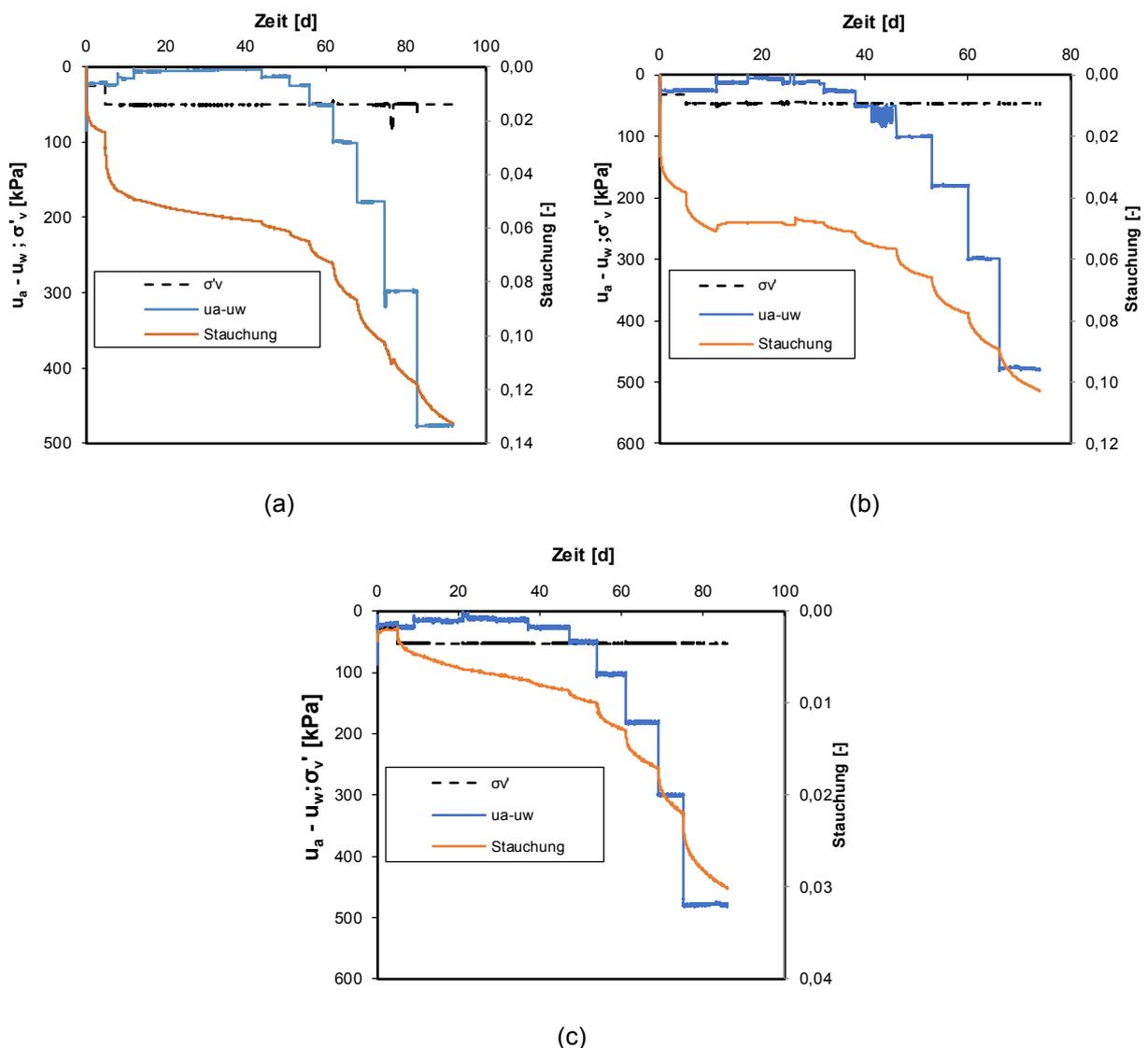


Bild 4-53: Darstellung von Vertikalspannung σ'_v , Saugspannung $u_a - u_w$ und Stauchung bei den Saugspannungs-kontrollierten Oedometerversuchen an den Böden BoSc (a), BoGr(b) und KIBu2 (c)

Ein Teil der Probe wurde für weitergehende Saugspannungsuntersuchungen mit dem Feuchtigkeitsmessgerät nach der Taupunktmethode (WP 4) verwendet. Am übrigen Material wurde der Wassergehalt mittels Ofentrocknung bestimmt.

Für die Bestimmung der Saugspannungen im hohen Saugspannungsbereich (ab 1000 kPa) wurde ein Feuchtigkeitsmessgerät verwendet, das auf dem Prinzip der Taupunktmethode basiert und mit dem totale Saugspannungen als Summe aus Matrixspannungen und osmotischen Saugspannungen gemessen werden. Weitere Angaben zum verwendeten Messgerät sind in BIRLE (2012) zu finden. Die Proben für das Feuchtigkeitsmessgerät wurden aus der ausgebauten Probe der Saugspannungs-kontrollierten Oedometerzellen herausgearbeitet und in ein Probengefäß mit einem Durchmesser von 4 cm und einer Höhe von 1,2 cm eingebaut. Die Proben wurden anschließend an der Luft auf den gewünschten Wassergehalt getrocknet und zur Homogenisierung 7 Tage lang im klimatisierten Bereich im geschlossenen Behälter aufbewahrt. Anschließend wurde die Saugspannungsmessung im Feuchtigkeitsmessgerät durchgeführt. Zur

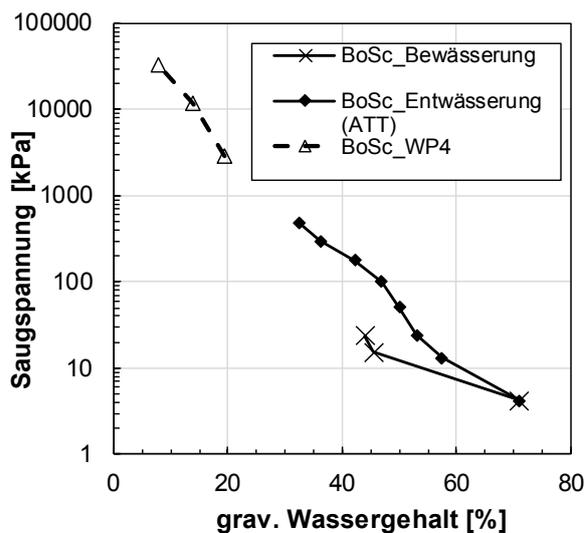
Durchführung weiterer Messungen wurde die Trocknungs- und Homogenisierungsphase wiederholt. Nach der letzten Messung wurde der gravimetrische Wassergehalt durch Ofentrocknung bestimmt.

4.15.2 Zusammenfassung der Ergebnisse und Interpretation

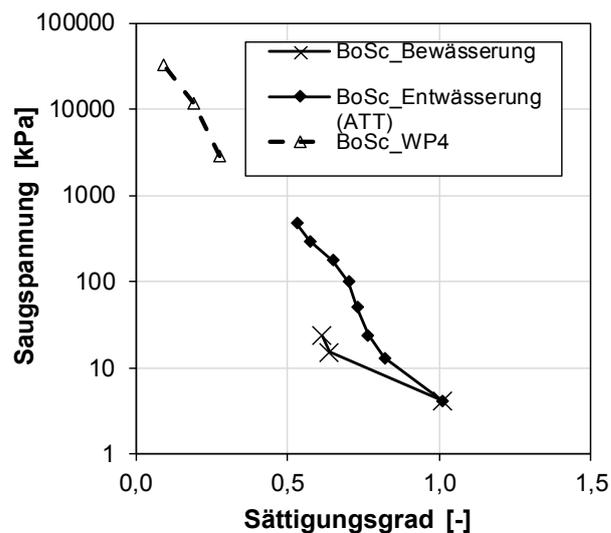
Die anhand der Saugspannungs-kontrollierten Oedometerversuche erzielten Ergebnisse an den Böden BoSc, BoGr und KIBu2 sind in Bild 4-54, Bild 4-55 und Bild 4-56 dargestellt. In den Abbildungen (a) und (b) sind dabei die Zusammenhänge zwischen der Saugspannung und dem Wassergehalt bzw. dem Sättigungsgrad für die Böden BoSc, BoGr und KIBu2 dargestellt. Für den Boden BoSc wurde eine Differenz von 17 % zwischen dem Ausbauwassergehalt und dem Wassergehalt, der anhand der Änderung des abgelesenen Wasserstands in den Rohren berechnet wurde, festgestellt. In der Regel sind die aus den Wasserständen in den Standrohren abgeleiteten Wassergehalte der Proben am Ende der Oedometerversuche zu hoch, da es in den vergleichsweise langen Versuchszeiträumen zu Verdunstungsvorgängen kommt. Im Rahmen der Auswertung der Versuche wurden die unter Berücksichtigung der Standrohre ermittelten Wassergehalte der Proben unter Berücksichtigung des Ausbauwassergehaltes korrigiert. Dabei wurde angenommen, dass im zeitlichen Verlauf der Versuche ein gleichmäßiger Wasserverlust, beispielsweise infolge von Verdunstungsprozessen, auftritt.

Der Verlauf der in Bild 4-54 dargestellten Saugspannungs-Wassergehaltsbeziehung („Soil water retention curve SWRC“) für den Boden BoSc zeigt zwei Wendepunkte, was auf eine bimodale Porengrößenverteilung hinweist. So findet bei niedrigen Saugspannungen bis ca. 20 kPa eine signifikante Entwässerung statt, bevor die SWRC etwas steiler ansteigt und dann im Bereich von ca. 100 kPa bis 500 kPa wiederum eine stärkere Entwässerung zeigt. Da es sich beim Boden BoSc um ein gemischtkörniges Material handelt, ist anzunehmen, dass die Entwässerung bei Saugspannungen unterhalb von 20 kPa auf Makroporen zwischen den grobkörnigen Partikeln (Sandpartikel) zurückzuführen ist, während das sich daran anschließende höhere Wasserrückhaltevermögen durch die von der organischen Substanz gebildeten feineren Matrix bedingt wird. Vergleicht man die SWRC des Bodens BoSc mit dem eines reinen Sandes, so ist insbesondere der beschriebene Anstieg der Saugspannungen im mittleren Bereich auffällig, was auf den Einfluss der organischen Substanz zurückgeführt werden kann.

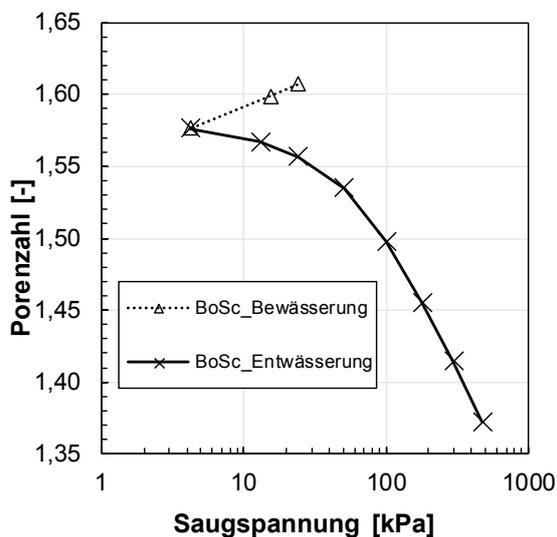
Die Beziehung zwischen Saugspannung und Porenzahl zeigt, dass es beim Bewässerungspfad unter der anliegenden Vertikalspannung von 50 kPa zu einer Reduzierung der Porenzahl, d. h. zu einer Kompression der Probe kam. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die erreichte Einbautrockendichte unterhalb der angestrebten Einbautrockendichte lag (siehe Tab. 4-24). Während des Entwässerungsvorganges wurde, wie zu erwarten, eine Kompression der Probe festgestellt. Die Form der Kompressionskurve weist dabei eine große Ähnlichkeit zur Kompressionskurve infolge einer Erhöhung der Vertikalspannungen auf. So kann der Kurvenverlauf mit zwei Parametern beschrieben werden, die ähnlich wie der Kompressionsbeiwert und Schwellbeiwert bzw. Rekompansionsbeiwert aus den Steigungen der Kurve im halblogarithmischen Maßstab ermittelt werden können (BIRLE 2012). In Bild 4-54 (d) ist zusätzlich der zeitabhängige Verlauf der Stauchungen dargestellt. Ähnlich wie bei den Ergebnissen der klassischen Oedometerversuche, bei denen die Vertikalspannungen erhöht wurden, zeigt sich im halblogarithmischen Maßstab ein gekrümmter Verlauf. Die Form der Kurve wird hierbei maßgeblich von der hydraulischen Leitfähigkeit beeinflusst, da es im Zuge der Erhöhung der Saugspannungen zu einer Wasserabgabe aus der Probe kommt.



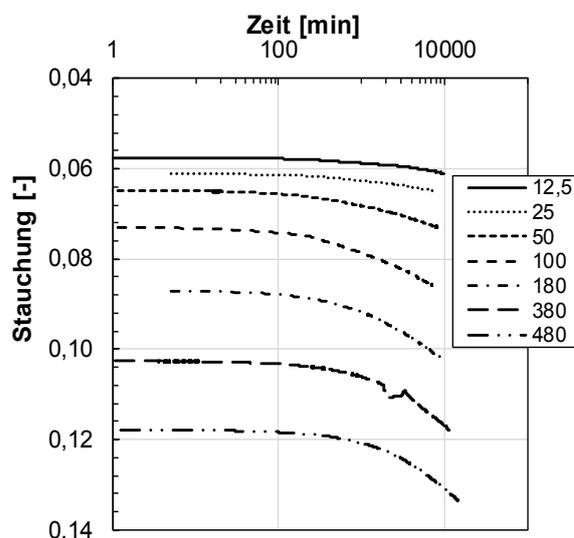
(a)



(b)



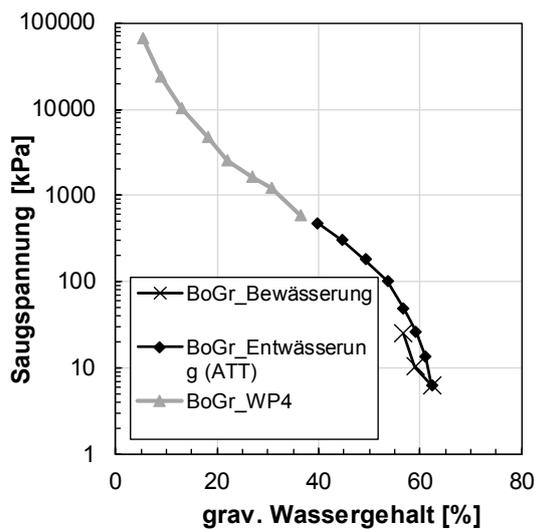
(c)



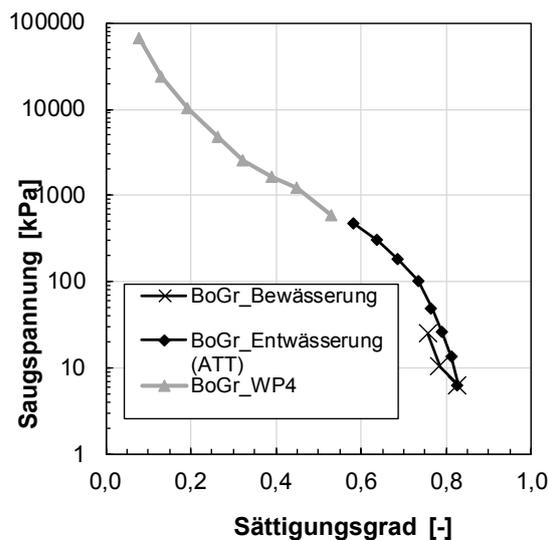
(d)

Bild 4-54: Beziehung zwischen Saugspannung und grav. Wassergehalt (a) bzw. Sättigungsgrad (b), Saugspannung und Porenzahl (c) sowie Zeit und Zusammendrückung (d) für den Boden BoSc.

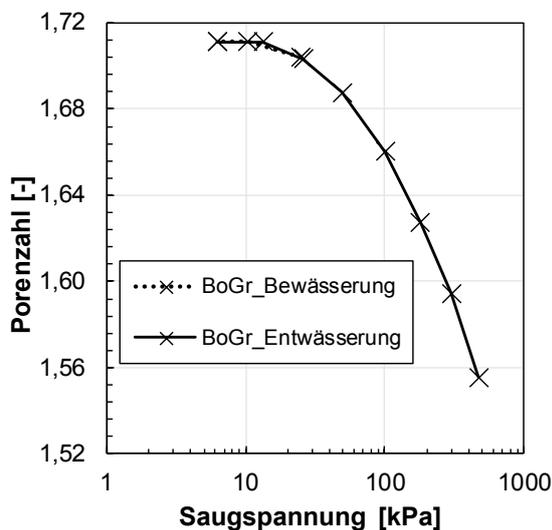
Der Verlauf der SWRC für den Boden BoGr ist im Bild 4-55 dargestellt. Auffällig ist, dass im Zuge der Bewässerung nur ein Sättigungsgrad von 85% erreicht wurde (siehe Bild 4-55 (b)). Dies deutet darauf hin, dass in der Probe ein Makroporengefüge vorliegt, welches erst bei geringeren Saugspannungen (unterhalb von 5 kPa) gefüllt werden kann. Der Verlauf der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung weist ansonsten einen typischen Verlauf auf, was abgesehen von dem beschriebenen Makroporenanteil auf eine unimodale Porengrößenverteilung hinweist. Aus Bild 4-55 (c) ist zu erkennen, dass es im Zuge der Bewässerung zu einer leichten Volumenzunahme der Probe kam, wobei die anschließende Entwässerung etwa auf demselben Pfad verläuft. Erwartungsgemäß führt die weitere Kompression zu einer deutlichen Reduzierung der Porenzahl. Die Stauchungs-Zeit-Diagramme sind im Bild 4-55 (d) dargestellt. Ähnlich wie bei den Ergebnissen der klassischen Oedometerversuche, bei denen die Vertikalspannungen erhöht wurden, zeigt sich auch hier im halblogarithmischen Maßstab ein gekrümmter Verlauf.



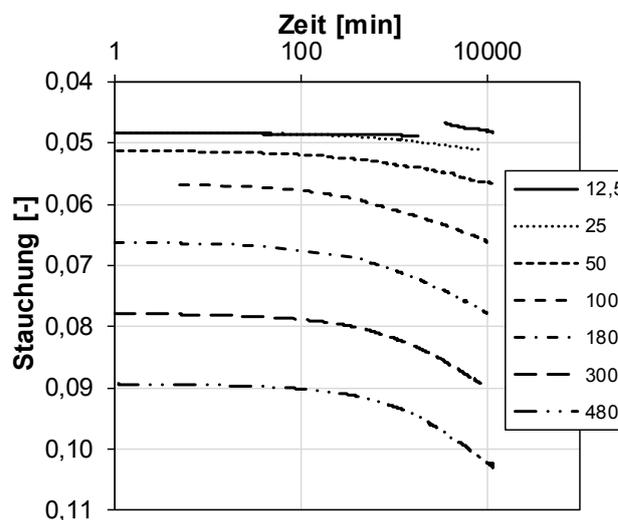
(a)



(b)



(c)



(d)

Bild 4-55: Beziehung zwischen Saugspannung und grav. Wassergehalt (a) bzw. Sättigungsgrad (b), Saugspannung und Porenzahl (c) sowie Zeit und Zusammendrückung (d) für den Boden BoGr.

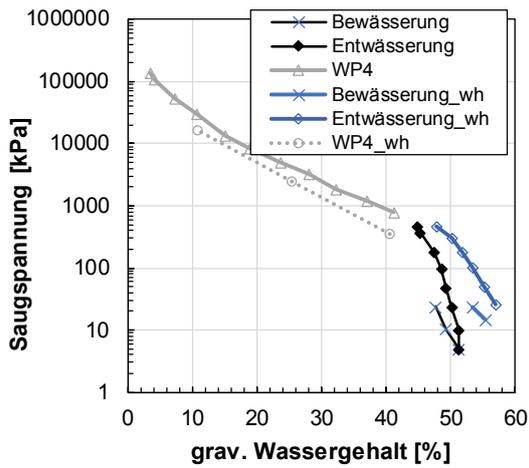
Die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung für den Boden KIBu2 ist in Bild 4-56 dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass am Boden KIBu2 zwei Versuche durchgeführt wurden. Aus Bild 4-56 (a) ist zu erkennen, dass die erste Probe (in schwarz) während des Versuches nur eine vergleichsweise geringe Wassermenge abgegeben bzw. aufgenommen hat. Der im Zuge des Bewässerungspfad es erreichte maximale Sättigungsgrad betrug nur ca. 73 %. Es wird angenommen, dass die Probe eine ausgeprägte Makroporenstruktur besitzt, und diese Poren bei der minimalen Saugspannung von ca. 5 kPa noch nicht gefüllt werden konnten. Um diese Annahme zu überprüfen, wurde der Versuch am Boden KIBu2 wiederholt. Beim Wiederholungsversuch wurde die Saugspannung während des Bewässerungspfad es soweit reduziert, dass es zu einer Durchströmung der Probe von unten nach oben kam. Anschließend wurde die Saugspannung stufenweise

erhöht und die Probe entwässert. Die Ergebnisse des Wiederholungsversuches sind auch in Bild 4-56 dargestellt.

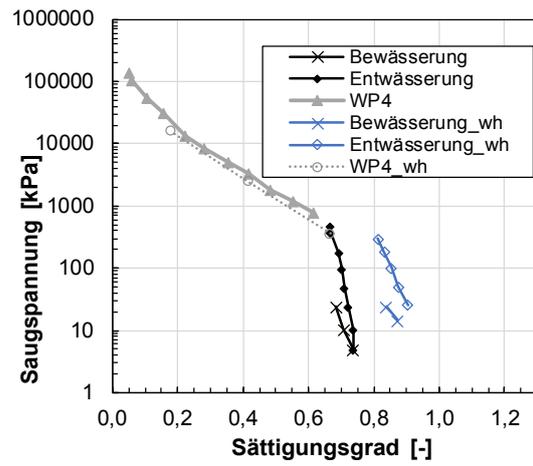
Auch der Wiederholungsversuch zeigt prinzipiell ein ähnliches Verhalten wie der erste Versuch, wobei maßgebliche Unterschiede auf die deutlich höhere Dichte der Probe des Wiederholungsversuches zurückzuführen sind. Im Vergleich zu den an den Böden BoSc und BoGr durchgeführten Versuchen zeigen die SWRC der beiden Proben im Zuge der Entwässerung zunächst einen vergleichsweise steilen Verlauf, was auf eine verhältnismäßig geringe Wasserabgabe hinweist. Dies deutet darauf hin, dass die untersuchten Proben des Bodens KIBu2 ein deutlich größeres Wasserrückhaltevermögen als die Böden BoSc und BoGr besitzen. Die Beziehung zwischen Saugspannung und Porenzahl zeigt bei beiden Proben keine signifikante Änderung der Porenzahl im Zuge der Aufsättigung. Im Zuge der Entwässerung stellt sich bei beiden Proben erwartungsgemäß eine Abnahme der Porenzahl ein, wobei auch hier die absoluten Verformungen deutlich geringer sind als bei den Böden BoSc und BoGr.

Vergleichend sind die Zusammenhänge zwischen der Vertikalspannung bzw. der Saugspannung für alle Kompressionsversuche in Bild 4-57 dargestellt. Da die Proben nicht dieselbe Einbaudichte aufwiesen, sind die Kurvenverläufe zueinander versetzt und weisen die Proben unterschiedliche Anfangsporenzahlen auf. Vergleicht man die Verläufe der einzelnen Kurven miteinander, zeigt sich, dass bei allen drei Proben die Porenzahländerungen infolge einer Erhöhung der Vertikalspannungen deutlich größer ausfallen als bei einer Erhöhung der Saugspannungen (Austrocknung). Betrachtet man die Saugspannung im Sinne des Spannungskonzeptes nach FREDLUND & MORGENSTERN (1976) als unabhängige Spannungsvariable, können die infolge einer Saugspannungserhöhung auftretenden Verformungen mit Hilfe eines Verformungsmoduls E_{ms} , ähnlich dem Steifemodul E_s , beschrieben werden. Die ermittelte E_{ms} -Werte sind in der Zeile SC in Tab. 4-25 aufgeführt. Die Auswertung der Versuche ergab für den auf die Saugspannungen bezogenen Verformungsmodul E_{ms} im Vergleich zum Steifemodul E_s etwa um den Faktor 2 - 5 höhere Steifigkeiten.

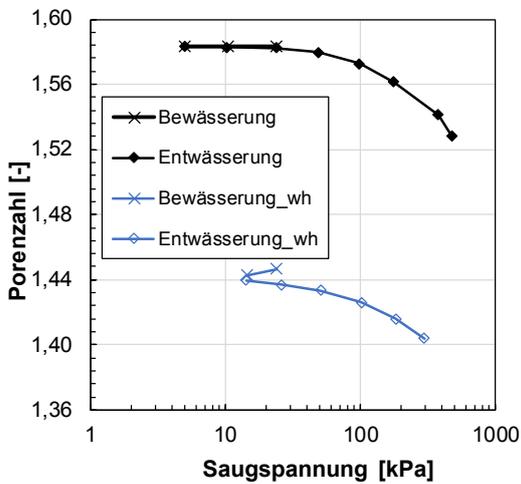
Betrachtet man nur die Kurvenverläufe für den Zusammenhang zwischen den Vertikalspannungen und der Porenzahl, ist zu erkennen, dass die beim Einbauwassergehalt eingebauten Proben, die im Zuge der Kompressionsversuche nicht gesättigt wurden („teilgesättigte“ Versuch) größere Stauchungen als die gesättigten Proben aufweisen. Obwohl die Proben zur Vermeidung von Verdunstungsvorgängen während der Versuche abgedeckt wurden, kam es zu einer Austrocknung der Probe, was durch einen Vergleich des Einbau- und Ausbauwassergehaltes quantifiziert werden konnte. So betrug der Wassergehaltsunterschied bei den Böden BoSc und BoGr zwischen 14 % und 16 %. Infolgedessen kam es im Zuge der Versuche zusätzlich zu austrocknungsbedingten Volumenänderungen, was im Vergleich zu den gesättigten Proben letztendlich zu größeren Porenzahländerungen führte.



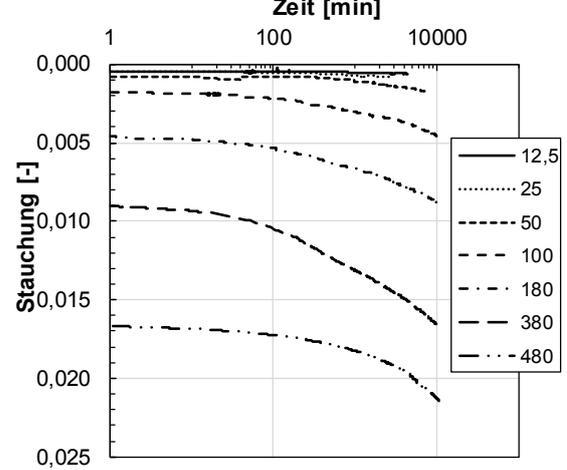
(a)



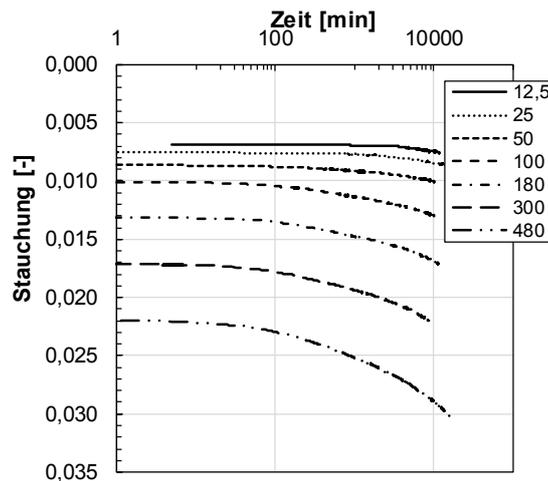
(b)



(c)

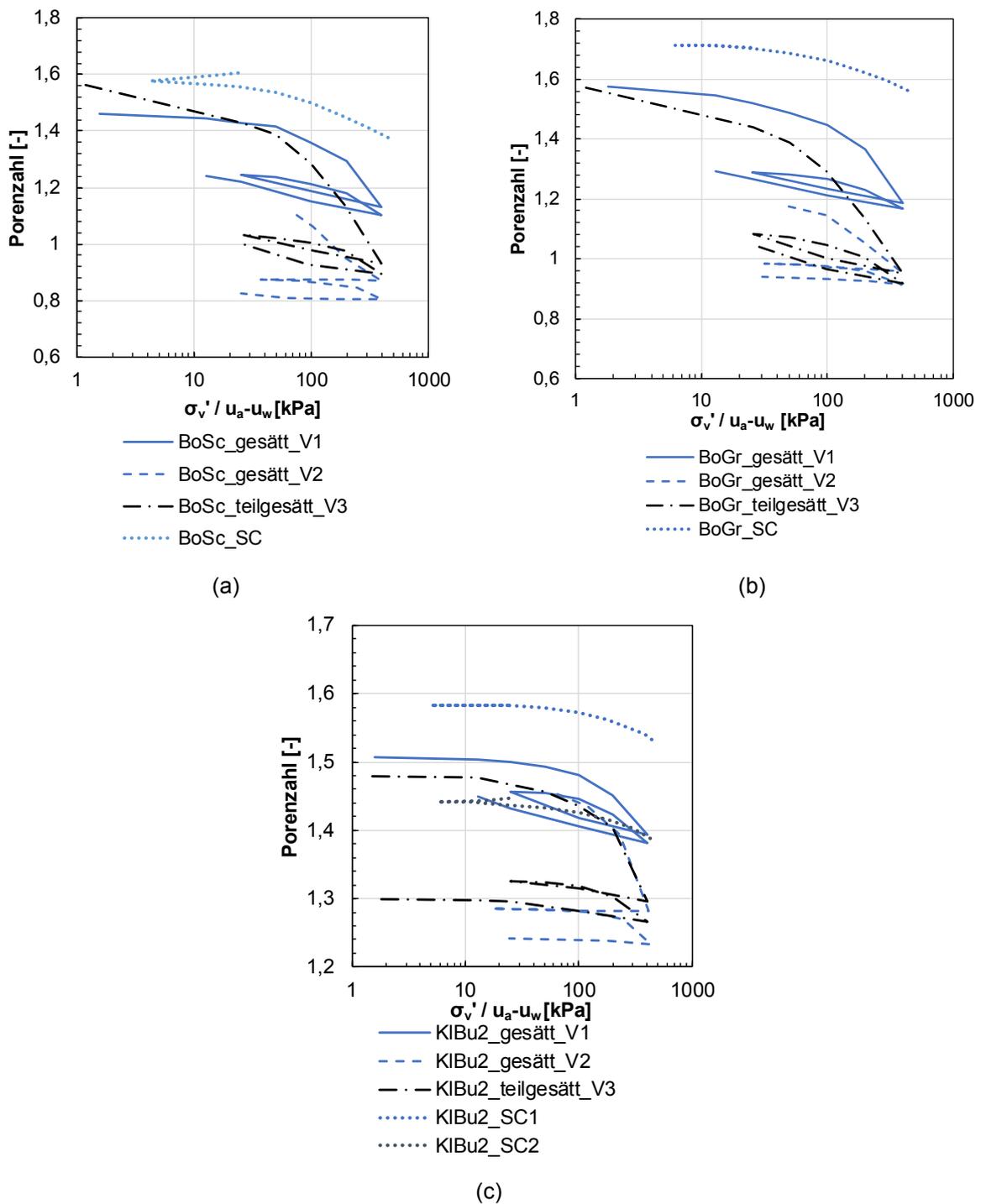


(d)



(e)

Bild 4-56: Beziehung zwischen Saugspannung und grav. Wassergehalt (a) bzw. Sättigungsgrad (b), Saugspannung und Porenzahl (c) sowie Zeit und Zusammendrückung (d – erster Versuch) und (e - Wiederholungsversuch) für den Boden KIBu2.



Anmerkung:

- V1 – Oedometerversuche im gesättigten Zustand ohne Messung des Porenwasserdrucks
- V2 – Oedometerversuche im gesättigten Zustand mit Messung des Porenwasserdrucks
- V3 – Oedometerversuche im teilgesättigten Zustand
- SC – Oedometerversuche im teilgesättigten Zustand in Saugspannungs-kontrollierten Oedometerzellen

Bild 4-57: Zusammenhang zwischen Vertikalspannungen bzw. Saugspannungen und Porenzahl unter gesättigten und teilgesättigten Zuständen für die Böden BoSc (a), BoGr (b) und KIBu2 (c).

4.16 Laborversuche zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit

4.16.1 Probenvorbereitung and Versuchsdurchführung

Die Versuche zur Bestimmung der Durchlässigkeit der im Proctoroptimum verdichteten Proben wurden nach DIN EN ISO 17892-11:2019 in der Triaxialzelle durchgeführt. Für jeden Boden wurden insgesamt 6 Proben bei gleichen Einbaubedingungen hergestellt. Jeweils zwei Proben wurden bei einer effektiven Konsolidationsspannung von 10 kPa, 30 kPa und 50 kPa untersucht. Dies wurde durch die Wahl der Sättigungsdrücke von 490 kN/m², 470 kN/m² und 450 kN/m² bei einem Zelldruck von 500 kN/m² erreicht. Die Durchlässigkeitsversuche wurden mit fallender Druckhöhe durchgeführt, wobei der Unterwasserdruck konstant gehalten wurde. Das hydraulische Gefälle variierte zwischen 0,5 und 5.

4.16.2 Zusammenfassung der Ergebnisse und Interpretation

Die Ergebnisse der an den Böden BoSc, BoGr und KIBu2 durchgeführten Durchlässigkeitsversuche sind zusammenfassend in Tab. 4-33, Tab. 4-34 und Tab. 4-35 und Bild 4-58 dargestellt.

Boden	BoSc					
Probe	1	2	3	4	5	6
Einbaudichte [g/cm ³]	0,88	0,88	0,89	0,88	0,89	0,89
Einbauwassergehalt [%]	55,35	54,72	53,93	55,12	53,61	53,14
Konsolidationsspannung [kPa]	10,00	10,00	30,00	30,00	50,00	50,00
Durchlässigkeitsbeiwert $k \cdot 10^{-7}$ [m/s]	55,90	44,60	29,40	26,70	15,00	15,70

Tab. 4-33: Ergebnisse der Durchlässigkeitsversuche an den Boden BoSc

Boden	BoGr					
Probe	1	2	3	4	5	6
Einbaudichte [g/cm ³]	0,85	0,86	0,87	0,86	0,87	0,87
Einbauwassergehalt [%]	63,11	61,93	60,51	61,18	60,61	60,35
Konsolidationsspannung [kPa]	10,00	10,00	30,00	30,00	50,00	50,00
Durchlässigkeitsbeiwert $k \cdot 10^{-7}$ [m/s]	58,7	69,3	40,4	37,3	17,8	32,4

Tab. 4-34: Ergebnisse der Durchlässigkeitsversuche an den Boden BoGr

Boden	KIBu2					
Probe	1	2	3	4	5	6
Einbaudichte [g/cm ³]	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
Einbauwassergehalt [%]	51,19	51,31	50,97	50,39	50,29	51,02
Konsolidationsspannung [kPa]	10,00	10,00	30,00	30,00	50,00	50,00
Durchlässigkeitsbeiwert $k \cdot 10^{-7}$ [m/s]	9,8	9,0	4,4	3,7	2,8	2,4

Tab. 4-35: Ergebnisse der Durchlässigkeitsversuche an den Boden KIBu2

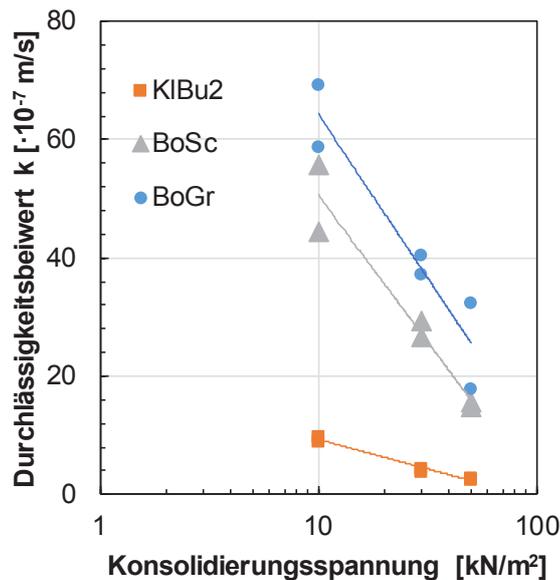


Bild 4-58: Abhängigkeit der Wasserdurchlässigkeit vom Differenzdruck für die Böden BoSc, BoGr und KIBu2

4.16.3 Interpretation

Wie aus der Tab. 4-35 ersichtlich wird, nimmt die Wasserdurchlässigkeit mit zunehmender Konsolidationsspannung bei allen Böden deutlich ab. So reduziert sich der Durchlässigkeitsbeiwert bei einer Erhöhung der Konsolidationsspannung von 10 kPa auf 30 kPa etwa um die Hälfte. Stellt man die Ergebnisse wie in Bild 4-58 im halblogarithmischen Maßstab dar, so ist mit zunehmender Spannung ein etwa linearer Abfall des Durchlässigkeitsbeiwertes erkennbar. Dieser Zusammenhang ist analog zur Beziehung zwischen der Vertikalspannung und der Porenzahl im Kompressionsversuch, was darauf hindeutet, dass die Reduzierung der Durchlässigkeit durch die Reduzierung der Porenzahl bedingt wird.

Die Versuche zeigen, dass die aufgebrachten Spannungen einen signifikanten Einfluss auf den versuchs-technisch bestimmten Durchlässigkeitsbeiwert haben. Dies deckt sich mit Erkenntnissen von DHOWIAN & EDIL (1980), die berichten, dass die Erhöhung der effektiven Spannungen bei Torf eine signifikante Reduzierung der Durchlässigkeit nach sich zieht.

Die DIN EN ISO 17892-11:2021-03 empfiehlt ein maximales hydraulisches Gefälle von 10 für Böden mit einer Wasserdurchlässigkeit im Bereich von 10^{-7} bis 10^{-8} m/s. Dabei wurde berücksichtigt, dass das hydraulische Gefälle ausreichend gering sein muss, um laminare Strömungsbedingungen sicherzustellen und um einen Materialtransport innerhalb des Probekörpers zu verhindern. Entsprechend dem angestrebten Gradienten ist der Porenwasserdruck an der Unterseite der Probe höher als an der Probenoberseite und nimmt die Konsolidationsspannung als Differenz zwischen Zelldruck und Porenwasserdruck über die Probenhöhe zu. Um zu gewährleisten, dass die Grummimembran seitlich an der Probe satt anliegt, ist ein Mindestdifferenzdruck von ca. 20 kPa zwischen dem Zelldruck und dem Porenwasserdruck erforderlich. Dies bedeutet, dass an der Probenunterseite während des Versuches mindestens ein .h. Differenzdruck von 20 kPa vorliegt. An der Probenoberseite beträgt der Differenzdruck bei Anliegen eines Gradienten von 10 und unter Annahme einer Probenhöhe von 5 cm dann noch 15 kPa.

5 Folgerungen aus den Ergebnissen und Empfehlungen

5.1 Allgemeines

Nachfolgend werden die Ergebnisse der bodenmechanischen Untersuchungen getrennt für die einzelnen Versuchsarten zusammenfassend dargestellt und Folgerungen im Hinblick auf die Durchführung von Eignungsuntersuchungen an Böden mit organischen Beimengungen bzw. organogenen Böden beschrieben.

Da der organische Anteil im Boden kleinräumig stark schwanken kann, ist übergreifend für die Durchführung von Eignungsuntersuchungen zu beachten, dass reproduzierbare Ergebnisse nur nach gründlicher Homogenisierung der Proben im Labor zu erreichen sind. Gleichzeitig muss im Rahmen der Eignungsuntersuchungen auch die mögliche Bandbreite der Eigenschaften von Böden mit organischen Bestandteilen abgedeckt werden, um für weitergehende Eignungsuntersuchungen ein repräsentatives Probenmaterial auswählen zu können. Dies erfordert eine vergleichsweise umfangreiche Probenahme und ein 2-stufiges Untersuchungskonzept. In der ersten Untersuchungsphase (Voruntersuchungen) sollten die entnommenen Proben abgesehen von der granulometrischen Zusammensetzung und der Plastizitätsgrenzen primär hinsichtlich ihres organischen Anteils und ihres Wassergehalts untersucht werden. In der zweiten Untersuchungsphase werden dann an repräsentativen und gründlich homogenisierten Proben weitergehende Untersuchungen zur Verdichtbarkeit und zum bodenmechanischen Verhalten (Scherfestigkeit, Verformungseigenschaften, Durchlässigkeit) erforderlich.

5.2 Wassergehalt

5.2.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Der Einfluss der Trocknungsdauer und der Trocknungstemperatur wurde anhand der in Abschnitt 4.2 beschriebenen Versuchsreihe untersucht. Für die bei 105°C getrockneten Proben wurden dabei erwartungsgemäß höhere Wassergehalte als für die bei 60°C getrockneten Proben bestimmt. Zum Erreichen einer Massenkonstanz war bei einer Trocknungstemperatur von 60°C dabei eine Mindesttrocknungsdauer von ca. 48 Stunden erforderlich, während für die bei 105°C getrockneten Proben im Vergleich dazu bereits nach ca. 16 Stunden eine Massenkonstanz erreicht wurde. Fasst man die Erkenntnisse aus der Literatur und den eigenen Versuchen zusammen (insbesondere die gemäß der Vorgehensweise von O'KELLY 2005b durchgeführten Versuche), ist ersichtlich, dass das Porenwasser nicht vollständig entfernt wird, wenn die Probe bei niedrigeren Temperaturen als 105 °C getrocknet wird. Gemäß der von O'KELLY (2005b) vorgeschlagenen Methode zur Bestimmung der optimalen Trocknungstemperatur wurde die optimale Trocknungstemperatur für die Böden BoSc, BoGr, NiSt, BoWo und BoFr im Bereich zwischen 105 und ca. 115°C berechnet. Außerdem hat sich gezeigt, dass der Fehler in der Bestimmung des Wassergehaltes bei einer Trocknungstemperatur von 60°C deutlich größer ist als bei einer Temperatur von 105°C.

5.2.2 Folgerungen

Bei einer Trocknungstemperatur von ca. 60°C ist eine Unterschätzung des Wassergehaltes zu erwarten. Bezüglich der Trocknungsdauer sollte in der Regel ein Zeitraum von 24 h zum Erreichen der Massenkonstanz genügen. Für die Durchführung von bodenmechanischen Laborunteruntersuchungen im Rahmen von Eignungsprüfungen wird empfohlen, Böden mit organischen Beimengungen bzw. organogene Böden, die einen Glühverlust bis ca. 30 M.-% aufweisen, bei einer Temperatur von 105°C zu trocknen. Längere

Trocknungsdauern, als wie bis zum Erreichen der Massenkonstanz, sollten vermieden werden, da längere Trocknungszeiträume zu einer Zersetzung der organischen Substanz und einer Überschätzung des Wassergehalts führen können.

5.3 Organischer Anteil

5.3.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der organische Anteil anhand des Glühverfahrens, mittels thermogravimetrischer Analysen sowie anhand des TOC bestimmt (siehe Abschnitt 4.3). Während des Glühversuchs unter Anlegen einer Temperatur von 550°C wurde eine Massenveränderung von 90 % bis 98 % bereits innerhalb der ersten 4 Stunden beobachtet. Beim Glühversuch mit schrittweise steigenden Temperaturen, der einer thermogravimetrischen Analyse ähnelt, nimmt der Massenverlust durch Glühen bei allen Böden bei Temperaturen zwischen 200°C und 600°C signifikant zu. Die Böden NiSt und BoFr zeigen dabei eine deutliche Massenreduktion bei höheren Temperaturen im Bereich von ca. 600°C bis 800°C, welche auf eine Austreibung von Kristallwasser aus den Tonmineralen bei Temperaturen über 550°C und auf eine Zersetzung von Calcit zurückgeführt werden kann. Darauf weisen auch die Ergebnisse der an den Böden durchgeführten thermogravimetrischen Analysen hin.

Die aus den Ergebnissen der thermogravimetrischen Analyse ermittelte TG-Kurve zeigt drei verschiedene Bereiche: Ein erster Peak ist im Temperaturbereich zwischen 90°C und 120°C erkennbar, was auf die Wasserverdampfung und -desorption zurückzuführen ist. Ein zweiter ausgeprägter Peak zeigt sich zwischen ca. 300°C und 350°C, was in der Dehydrierung des Zwischenschichtwassers begründet ist. Der dritte Peak im Bereich oberhalb von 600°C kann auf Mineralreaktionen einschließlich Karbonatzersetzung und Abbau von Tonmineralien zurückgeführt werden. Der Boden KIBu2 weist einen weiteren Peak bei etwa 125°C auf, was gemäß der Ergebnisse der Röntgendiffraktometrie (XRD) auf das Vorhandensein von Gips zurückzuführen ist. Die bei den Böden NiSt, BoFr und BoWo zwischen ca. 700°C und 750°C festgestellten Massenreduktionen können mit deren hohen anorganischen Kohlenstoffgehalten TIC und dem Kalkgehalt erklärt werden. Aus der Literatur und den eigenen Versuchen geht hervor, dass die Massenreduktion unterhalb von 550°C nicht nur auf die Oxidation organischer Substanz, sondern auch auf die Entfernung von Kristallwasser und eine Zersetzung von Calcit zurückzuführen ist. Dies sollte bei der Durchführung und Auswertung von Glühverlustversuchen berücksichtigt werden. Die beiden genannten Prozesse führen zu einem Unterschied in den ermittelten Werten für Glühverlust und TOC. Das Verhältnis ($\text{TOC}/V_{\text{Gl}550^\circ\text{C}}$) liegt zwischen 0,4 und 0,6. Da das Verhältnis u.a. vom Tongehalt und der Mineralogie beeinflusst wird, kann es jedoch nur als Indikator verwendet werden und ist nicht geeignet, um vom TOC-Wert auf den Glühverlust zu schließen oder anders herum.

5.3.2 Folgerungen

Die Glühverlustmethode ist die in der erdbautechnischen Praxis am häufigsten verwendete Methode zur Bestimmung des organischen Anteils. Wie bereits erläutert, sind mit ihrer Anwendung potenzielle Fehler verbunden, da der Verlust von in Tonmineralien vorhandenem Strukturwasser, und die Zersetzung von anorganischen Karbonaten zum Gewichtsverlust nach dem Glühen bei 550 °C beitragen können, was zu einer Überschätzung des organischen Gehalts führt. HUANG ET AL. (2009) berichten, dass dieser Fehler signifikant werden kann, wenn der organische Gehalt des Bodens weniger als 15 % beträgt. Die Autoren empfehlen in diesen Fällen eine detaillierte Analyse wie z. B. eine trockene Verbrennung, wie in DIN 15936:2012-11 beschrieben, zur Bestimmung des TOC.

Da der organische Anteil einen signifikanten Einfluss auf die bodenmechanischen Eigenschaften hat, wird für Eignungsuntersuchungen die Bestimmung des organischen Anteils sowohl anhand des Glühverlustes

als auch des TOC empfohlen. Wie die durchgeführten Untersuchungen gezeigt haben, ist die Umrechnung des Glühverlustes auf den TOC mit Unsicherheiten behaftet.

5.4 Korngrößenverteilung

5.4.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Korngrößenverteilung wurde mittels einer kombinierten Siebung und Sedimentationsanalyse nach DIN EN ISO 17892-4:2017-04 bestimmt. Als Dispergierungsmittel wurde dabei Natriumpyrophosphat in einer Menge von 100 ml verwendet. Nur für den Boden BoWo wurde die Menge aufgrund der starken Aufschäumung auf 25 ml reduziert. Entsprechend den visuellen Beobachtungen konnte durch die Zugabe von Natriumpyrophosphat bei allen Proben eine Klumpenbildung oder Aggregation verhindert werden.

Da die vorhandene organische Substanz zu einer Aggregation und Dispersion führen kann, wurde der Boden, wie in DIN EN ISO 17892-4:2017-04 empfohlen, mit Wasserstoffperoxid vorbehandelt, um die vorhandene organische Substanz zu entfernen. Die durchgeführten Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass trotz Vorbehandlung der Proben mit Wasserstoffperoxid ein Großteil der organischen Substanz im Boden verbleibt. Die Methode ist dementsprechend nicht bzw. nur bedingt zur Entfernung der organischen Substanz geeignet.

Die Kornverteilung wurde zusätzlich mittels Laserdiffraktometrie (LDM) bestimmt. Dabei wurden erhebliche Unterschiede zwischen den Ergebnissen der klassischen Methode (kombinierte Siebung und Sedimentationsanalyse) und der Laserdiffraktometrie festgestellt, da die beiden Methoden zwei völlig unterschiedliche Korndurchmesser messen und daher ein Vergleich der Ergebnisse wenig sinnvoll ist. Die Sedimentationsanalyse ergibt im Vergleich zur LDM-Methode einen höheren Tongehalt und einen geringeren Schluffgehalt. Die Überschätzung des Tonanteils ist auf die Anwendung des Stokes'schen Gesetzes für plättchenförmige Partikel und auf eine unregelmäßige Partikelform, aber auch eine unzureichende Dispergierung der Bodenaggregate mittels Ultraschall zurückzuführen. Die Ergebnisse für den Sandgehalt, die durch LDM bestimmt werden, unterscheiden sich deutlich von denen der Siebung. Dies könnte auf die Sphärizität und Kornform der Partikel und dabei im Besonderen auf die Abweichungen zu einer ideal kugelförmigen Partikelform zurückzuführen sein. Auch die untersuchte Probemenge kann zu den unterschiedlichen Ergebnissen der beiden Verfahren beitragen, da für die LDM-Probe eine etwa 100 Mal geringere Probemenge als für die Sedimentationsanalyse verwendet wird. Aufgrund der geringen Probemenge kann die Repräsentativität der LDM-Probe stark eingeschränkt sein. Bei der Auswertung der Sedimentationsanalyse wird außerdem von einer konstanten Korndichte für alle Bodenpartikel ausgegangen, was bei Böden mit organischen Beimengungen zu Fehlern führen kann.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Ergebnisse der klassischen Sieb- und Sedimentationsanalyse und der Laserdiffraktometrie nicht miteinander verglichen werden können. Je nach Anwendung sollte eine Methode gewählt werden. Insbesondere bei gemischtkörnigen Böden mit einem hohen Sand- und Kiesanteil ist die Anwendung der LDM-Methode aufgrund der geringen Probemenge aber als sehr kritisch zu beurteilen.

5.4.2 Folgerungen

Entsprechend den vorliegenden Ergebnissen stellt sich die LDM-Methode im Vergleich zur klassischen Siebung und Sedimentationsanalyse für Böden mit organischen Beimengungen nicht als geeigneter dar. Da die Siebung und Sedimentationsanalyse in der Bodenmechanik zur Ermittlung der Korngrößenverteilung etabliert und im Regelwerk verankert ist, wird auf Basis der vorliegenden Untersuchungsergebnisse auch für Böden mit organischen Beimengungen, unabhängig ob diese fein- oder gemischtkörnig sind, die

Anwendung dieser klassischen Methode empfohlen. Als Dispergierungsmittel hat sich in den durchgeführten Versuchen die Zugabe von Natriumpyrophosphat in einer Menge von 100 ml als geeignet erwiesen.

Eine Entfernung der organischen Substanz mittels Wasserstoffperoxid war bei den untersuchten Böden mit organischen Anteilen zwischen ca. 20 M.-% und 30 M.-% nicht erfolgreich und kann als Vorbehandlung der Proben mit dem Ziel der Entfernung der organischen Substanz nicht empfohlen werden.

5.5 Korndichte

5.5.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Korndichte der untersuchten Böden wurde mit Hilfe des Kapillarykymometers, des Gaspyknometers und des Luftpyknometers bestimmt. Kapillarykymometerversuche wurden an feuchten und bei 105°C getrockneten Proben durchgeführt. Bei den Kapillar- und Luftpyknometertests wurde beobachtet, dass die organische Substanz an der Oberfläche schwamm und die Probe aufschäumte, sobald Wasser zugegeben wurde.

Die Kapillarykymometerversuche ergaben in den durchgeführten Untersuchungen höhere Korndichten als die Versuche mit dem Gaspyknometer. Ob die Proben feucht oder trocken im Kapillarykymometer untersucht werden, hatte dabei keinen systematischen Einfluss auf die Messergebnisse. Die Messungen mit dem Gaspyknometer wiesen die geringsten Streuungen auf.

5.5.2 Folgerungen

Da das Gaspyknometer bei den durchgeführten Untersuchungen die einzige Messung zur Ermittlung der Korndichte ohne besondere Auffälligkeiten in der Versuchsdurchführung war, wird die Verwendung des Gaspyknometers für die Ermittlung der Korndichte von Böden mit organischen Beimengungen empfohlen. Es ist aber weiterhin ungeklärt, worauf die Unterschiede in den mittels Kapillarykymometer und Luftpyknometer einerseits und dem Gaspyknometer andererseits ermittelten Ergebnissen zurückzuführen sind. Zur Klärung dieser Fragestellung wären weitere Untersuchungen mit unterschiedlichen organischen bzw. mineralischen Materialien durchzuführen.

5.6 Plastizitätsgrenzen

5.6.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Der Wassergehalt an der Fließgrenze wurde mit der Fallkegel- und der Casagrandemethode an den Versuchsböden bestimmt, wobei der Wassergehalt schrittweise sowohl erhöht als auch verringert wurde. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass unabhängig von der Methode sowohl mit der Casagrande- als auch der Fallkegel-Methode sehr ähnliche Werte für den Wassergehalt an der Fließgrenze ermittelt wurden. Ob die Versuche mit abnehmendem oder zunehmendem Wassergehalt durchgeführt werden, hatte keinen erkennbaren Einfluss auf die Versuchsergebnisse. Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Fallkegel- und Casagrande-Methode für die untersuchten Böden mit organischen Beimengungen gut übereinstimmende Wassergehalte an der Fließgrenze ergeben. Für den Fall, dass die beim Casagrande-Versuch zu ziehende Furche in der Bodenprobe aufgrund faseriger organischer Bestandteile nicht realisiert werden kann, stellt der Fallkegelversuch eine gleichwertige Alternative dar.

5.6.2 Folgerungen

Im Hinblick auf die Ermittlung der Fließgrenze an Böden mit organischen Beimengungen bzw. organogenen Böden haben sich in den durchgeführten Untersuchungen sowohl das Verfahren nach Casagrande als auch der Fallkegelversuch als geeignet erwiesen.

5.7 Verdichtbarkeit

5.7.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Wie aus vorhergehenden Untersuchungen bekannt, hat die Vorbereitung des Versuchsmaterials (Erhöhung oder Verringerung des Wassergehaltes) bei Böden mit organischen Beimengungen einen Einfluss auf die im Proctorversuch erzielbaren Trockendichten. Um die Unterschiede quantifizieren zu können, wurden die Proben bei der ersten und zweiten Versuchsreihe entsprechend den Vorgaben der Norm von der trockenen Seite ausgehend auf den gewünschten Wassergehalt gebracht (Trocknung auf 5 – 10 % unter w_{opt} bzw. auf >20 % unter w_{opt}), während die Proben bei der dritten Versuchsreihe von der nassen Seite der Proktorkurve kommend jeweils auf den Zielwassergehalt getrocknet wurden.

Die stärkere Trocknung bei Versuch II im Rahmen der Probenvorbehandlung auf Wassergehalte, die mindestens 20 % unterhalb des Optimums liegen, führte zu größeren Trockendichten als bei den Versuchsreihen I und III. Beim Verfahren III war kein ausgeprägtes Maximum erkennbar. Die mit dem Verfahren I erreichten Trockendichten lagen in einer ähnlichen Größenordnung wie beim Verfahren III, wobei bei den Versuchsreihen I im Bereich des Verdichtungsoptimums etwas höhere Trockendichten erreicht wurden.

5.7.2 Folgerungen

Da Böden mit organischen Beimengungen im natürlichen Zustand einen Wassergehalt deutlich oberhalb des optimalen Verdichtungswassergehaltes aufweisen und für erdbautechnische Zwecke so weit getrocknet werden müssen, dass eine Verdichtung mit üblichen Erdbaugeräten möglich ist, erscheint die Versuchsreihe III, bei der die Einzelproben zur Durchführung des Proctorversuches vom natürlichen Wassergehalt ausgehend direkt auf den Verdichtungswassergehalt heruntergetrocknet werden, für baupraktische Fragestellungen als realitätsnäher. Für die Durchführung von Eignungsuntersuchungen wird empfohlen, in Abhängigkeit vom natürlichen Wassergehalt die Art der Versuchsdurchführung festzulegen. Zur Abschätzung des optimalen Proctorwassergehaltes können die Ergebnisse von BIRLE (2012) herangezogen werden. Sofern der natürliche Wassergehalt oberhalb des abgeschätzten optimalen Wassergehaltes liegt, wird eine Trocknung der Einzelproben direkt auf den jeweiligen Verdichtungswassergehalt empfohlen. Ist der natürliche Wassergehalt geringer als der optimale Wassergehalt, so ist gemäß den Vorgaben der Norm zunächst eine Trocknung des Materials auf den für den Proctorversuch vorgesehenen geringsten Wassergehalt und eine anschließende Wasserzugabe zielführend.

5.8 Scherfestigkeit

5.8.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Zur Ermittlung der Scherparameter der untersuchten Böden wurden Rahmenscherversuche, konsolidierte, dränierte (CD) und konsolidierte, undrännierte (CU) Triaxialversuche sowie einaxiale Druckversuche durchgeführt. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass die aus den Rahmenscherversuchen ermittelten Kohäsionswerte deutlich höher sind als die aus den Triaxialversuchen ermittelten Werte. Dies deckt sich

mit Ergebnissen an mineralischen feinkörnigen Böden, wonach im Rahmenscherversuch aufgrund der vorgegebenen Lage der Scherfuge größere Scherparameter als aus Triaxialversuchen abgeleitet werden (LONG, 2005). In Böden mit organischen Beimengungen kann dieser Effekt aufgrund der im organischen Anteil enthaltenen Fasern ggf. jedoch sogar noch verstärkt werden. Außerdem zeigen die Versuche, dass die aus CU-Triaxialversuchen abgeleiteten Reibungswinkel höher sind als die aus CD-Triaxialversuchen bestimmten Werte. Ähnliche Ergebnisse, bei denen die aus CU-Versuchen ermittelten Scherparameter höher waren als die aus CD-Versuchen, wurden von KHATTAK & DAS (1985) erzielt. Sie stellten dabei fest, dass dieser Effekt umso ausgeprägter ist, je höher der Fasergehalt der Proben ist. Die Fasern verleihen der Probe trotz der wirkenden Porenwasserdrücke eine vergleichsweise hohe Scherfestigkeit, was bei der Auswertung der Triaxialversuche unter Anwendung des Prinzips der effektiven Spannungen zu einer Überschätzung der Scherparameter führt (KÖLSCH, 1996). Die vorliegenden Versuchsergebnisse deuten darauf hin, dass dieser, für organische Böden beschriebene Effekt, auch bei Böden mit organischen Beimengungen auftreten kann. Um diese Hypothese zu verifizieren, wären weitere umfangreiche Triaxialversuche mit systematischer Variation des organischen Anteils bzw. Faseranteils erforderlich.

Eine weitere Schwierigkeit bei der Ermittlung der Scherparameter kann sich aus der Form der Beziehung zwischen der Deviatorspannung und der axialen Stauchung ergeben, wenn diese keinen Peakwert aufweist, sondern bis zum Erreichen der maximalen Stauchung (in der Regel zwischen 15 % bis 20 %) eine Zunahme der Deviatorspannung vorliegt. Unter Ansatz der bei der maximalen Stauchung erreichten maximalen Deviatorspannung ergibt sich damit ein vergleichsweise großer Reibungswinkel, zu dessen vollständiger Aktivierung entsprechend große Verformungen erforderlich sind. Dieses Verhalten, welches auch für unbehandelten faserhaltigen Hausmüll bekannt ist, kann in der Praxis zu ungewollten Plastifizierungen und damit Verformungen von Erdbauwerken führen. Wie die durchgeführten Triaxialversuche zeigen, ist dieser Effekt insbesondere bei größeren Seitendrücken zu erwarten, während bei geringen Seitendrücken (bis ca. 70 kPa) in der Regel ein Peakwert der Deviatorspannung vor Erreichen der maximalen axialen Stauchung erreicht wird.

5.8.2 Folgerungen

Zur Bestimmung der effektiven Scherparameter bei Böden mit organischen Beimengungen wird auf Basis der vorliegenden Ergebnisse die Durchführung von konsolidierten, dränierten Triaxialversuchen empfohlen. Bei undränierten Triaxialversuchen kann es bei Böden mit organischen Beimengungen zu einer Überschätzung des Reibungswinkels kommen. Bei Rahmenscherversuchen kann es aufgrund der vorgegebenen Lage der Scherfuge ebenfalls zu einer Überschätzung der Scherparameter kommen. Bezüglich der Probensättigung hat sich in den durchgeführten Untersuchungen eine Durchströmung der Proben von unten nach oben während der Sättigungsphase als zielführend erwiesen, um die in der Probe befindliche Porenluft nach oben auszutragen. Dazu wurde an der Probenunterseite ein um 10 kPa höherer Wasserdruck als an der Probenoberseite angelegt, was bei den verwendeten 10 cm hohen Proben einem Gradienten von 10 entsprach. In jedem Fall sollte zur Überprüfung der Probensättigung im Anschluss daran ein B-Test durchgeführt werden. Zur Bestimmung des volumetrischen Verhaltens bei Scherung im dränierten Triaxialversuch wird die Verwendung einer Doppelzelle empfohlen, da damit unabhängig von der ausgepressten Porenwassermenge das Probenvolumen während des Versuches bestimmt werden kann.

Zur Bestimmung der undränierten Scherfestigkeit können undränierte Triaxialversuche herangezogen werden. Bei feinkörnigen Böden mit organischen Beimengungen empfiehlt sich zusätzlich die Durchführung von einaxialen Druckversuchen, da damit einfach und zeitnah Informationen zur undränierten Scherfestigkeit gewonnen werden können. Jedoch ist zu beachten, dass bei einaxialen Druckversuchen eine Probenentwässerung nicht ausgeschlossen ist und es sich deshalb nicht um einen vollständig undränierten Versuch handelt. Vielmehr liegen in der Probe teildränierte Verhältnisse vor, wobei der mögliche Abbau von

Porenwasserüberdrücken stark von der Belastungsrate abhängt. Aufgrund dieses Effektes kann es bei einaxialen Druckversuchen zu einer Überschätzung der undrännierten Scherfestigkeit kommen.

5.9 Spannungs-Verformungs-Eigenschaften

5.9.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten Kompressionsversuche haben gezeigt, dass Böden mit organischen Beimengungen ein zeitabhängiges Verformungsverhalten aufweisen, welches sich von dem mineralischer Böden signifikant unterscheidet. Aufgrund der hohen Dichte der Proben nach Herstellung unter Proctorverdichtung und des daraus resultierenden überkonsolidierten Zustandes weisen Böden mit organischen Beimengungen im Kompressionsversuch im gesättigten Zustand nach Belastung eine vergleichsweise geringe Entwicklung von Porenwasserüberdrücken und eine kurze Konsolidationsdauer auf. Das zeitabhängige Verformungsverhalten wird dementsprechend vorrangig durch Sekundärsetzungen (Kriechen) beeinflusst, wobei die zeitabhängigen Verformungen im halblogarithmischen Maßstab einen gekrümmten Verlauf einnehmen und damit nicht mit einem konstanten Kriechbeiwert beschrieben werden können. Ähnliche Ergebnisse zum zeitabhängigen Verhalten von organischen Böden sind in der Literatur u. a. von DHOWIAN & EDIL (1980) beschrieben, die das zeitabhängige Verformungsverhalten aufgrund des beschriebenen stark gekrümmten Verlaufs in Sekundär- und Tertiärsetzungen unterteilen.

Auch das spannungsabhängige Verformungsverhalten weist aufgrund der hohen Dichte im halblogarithmischen Maßstab einen gekrümmten Verlauf auf, was bei der Ermittlung des Kompressionsbeiwertes zu einer Zunahme desselben mit der Spannung führt. In Übereinstimmung mit dem Konzept von MESRI & CASTRO (1987) bleibt das Verhältnis des Kriechbeiwertes zum Kompressionsbeiwert bei den untersuchten Böden aber näherungsweise konstant.

Bezüglich der Versuchsdurchführung hat sich gezeigt, dass die Versuche im teilgesättigten Zustand, bei denen die Proben nach Einbau nicht wassergesättigt werden, in der Auswertung ein weiches Verhalten ergeben, da es während der Versuchsdurchführung zu einer Wassergehaltsreduzierung der Proben kommt. Infolge der Wassergehaltsabgabe kommt es zu einer Erhöhung der Saugspannungen, die zu einer Volumenreduzierung, und damit zu zusätzlichen Setzungen im Kompressionsversuch führen. Wie die Kompressionsversuche mit Kontrolle der Saugspannungen gezeigt haben, können Saugspannungserhöhungen bei Böden mit organischen Beimengungen zu signifikanten Verformungen führen. Im Vergleich zur Volumenreduzierung infolge äußerer Lasten verhalten sich die Proben dabei aber steifer.

5.9.2 Folgerungen

Für die Bestimmung des zeit- und spannungsabhängigen Verformungsverhaltens im Rahmen von Eignungsuntersuchungen wird die Durchführung von klassischen, gesättigten Kompressionsversuchen empfohlen. Da das zeitabhängige Verformungsverhalten nicht mit einem konstanten Kriechbeiwert beschrieben werden kann, sollte das zeitabhängige Verformungsverhalten unter einer Laststufe über einen Mindestzeitraum von 24 h, möglichst jedoch noch länger, beobachtet werden. Bei zu kurzen Versuchszeiträumen besteht die Gefahr, dass aus den Kompressionsversuchen ein zu geringer Kriechbeiwert abgeleitet wird, da der Kriechbeiwert mit zunehmender Zeit zunimmt. Im Hinblick auf die Prognose der Kriechsetzungen von Erdbauwerken aus Böden mit organischen Beimengungen bestehen Unsicherheiten, inwieweit diese mit üblichen Kriechmodellen beschrieben werden können, da das zeitabhängige Verhalten in den Kompressionsversuchen eine Veränderung des Kriechbeiwertes mit der Zeit ergab. Diesbezüglich besteht noch Forschungsbedarf. Für baupraktische Fragestellungen wird deshalb empfohlen, das Setzungsverhalten der Bauwerke messtechnisch ggf. zu überwachen und mit den Prognosen abzugleichen.

Sofern eine Austrocknung der Böden nach Einbau im Feld zu erwarten ist, sind zusätzlich Saugspannungskontrollierte Kompressionsversuche sinnvoll. Da diese jedoch versuchstechnisch sehr aufwändig sind, können ersatzweise Schrumpfversuche zur Ermittlung der Volumenabnahme bei Austrocknung durchgeführt werden.

Zur Untersuchung möglicher Sackungs- bzw. Quellerscheinungen bei Wasserzutritt im Feld können klassische Kompressionsversuche durchgeführt werden, wobei die Proben unter repräsentativen Spannungen gesättigt werden.

5.10 Durchlässigkeit

5.10.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Durchlässigkeitsversuche in Druckzellen, d.h. ohne feste Umrandung, durchgeführt, wobei die Differenz zwischen dem Zelldruck und dem Porenwasserdruck variiert wurde. Die Versuche zeigen, dass diese Differenz zu einer Konsolidation der Proben führt und erwartungsgemäß mit zunehmender Konsolidationsspannung die Wasserdurchlässigkeit infolge der Kompression der Probe abnimmt. Der Zusammenhang zwischen dem Durchlässigkeitsbeiwert k und der Konsolidationsspannung stellt sich dabei qualitativ ähnlich wie der Zusammenhang zwischen der Porenzahl und der Konsolidationsspannung dar. Entsprechend den Ergebnissen führt eine Erhöhung der Konsolidationsspannung von ca. 10 kPa auf ca. 30 kPa bei den untersuchten Böden mit organischen Beimengungen bereits zu einer Halbierung des Durchlässigkeitsbeiwertes.

5.10.2 Folgerungen

Bei der Ermittlung des Durchlässigkeitsbeiwertes von Böden mit organischen Beimengungen im Rahmen von Eignungsuntersuchungen ist die Spannungsabhängigkeit des Durchlässigkeitsbeiwertes zu beachten. Die Konsolidationsspannung der Proben in Druckzellen (d. h. die Differenz zwischen dem Zelldruck und dem Porenwasserdruck) sollte entsprechend den im Feld vorliegenden bzw. zu erwartenden Spannungen gewählt werden. Ggf. sollten Versuche mit unterschiedlichen Konsolidationsspannungen durchgeführt werden.

6 Zusammenfassung

Böden mit organischen Bestandteilen sind im straßenbautechnischen Regelwerk (TL BuB E-StB 20) als Baustoff für den Erdbau nicht vorgesehen. Fallen sie allerdings als Aushubmaterial lokal innerhalb einer Baumaßnahme an und wurden die Eignung und die Einbaubedingungen gesondert untersucht und bestätigt, können nach ZTV E-StB 17 im Einvernehmen mit dem Auftraggeber Böden der Bodengruppen OU und OT in Schutzwällen oder Dämmen im Straßenunterbau eingesetzt werden. Voraussetzung ist dabei stets, dass die Eignung nachgewiesen wurde. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass Böden der Bodengruppe OH und OK in den ZTV E-StB 17 nicht erwähnt sind, diese aus fachlicher Sicht aber in derselben Weise wie die Böden OU und OT behandelt werden können. Gerade die geforderten Eignungsnachweise stellen die Baupraxis allerdings vor erhebliche Herausforderungen, da einerseits nur wenige bautechnische Erfahrungen mit diesen speziellen Böden vorliegen und andererseits die relevanten Regelwerke zur Untersuchung dieser Böden für bautechnische Zwecke nicht auf deren besondere Eigenschaften abgestimmt sind. Wie sich aus eigenen Erfahrungen und der wissenschaftlichen Literatur ableiten lässt, fehlt es an Vorgaben, die die Anwendung auf Böden mit organischen Anteilen präzisieren und somit zur Vergleichbarkeit von Versuchsergebnissen beitragen.

Im vorliegenden Forschungsvorhaben wurden vor diesem Hintergrund umfangreiche Laboruntersuchungen an Böden mit einem organischen Anteil (Glühverlust) von 20 M.-% bis 30 M.-% (Bodengruppen OT und OH) durchgeführt, um die Anwendbarkeit der für eine erdbautechnische Beurteilung erforderlichen bodenmechanischen Untersuchungen zu prüfen. Die Untersuchungen umfassten zum einen Versuche zur Klassifizierung (Wassergehalt, Glühverlust, Korngrößenverteilung, Plastizitätsgrenzen, Korndichte) und zum anderen Untersuchungen zur Verdichtbarkeit, zum Scherverhalten, zum Last-Verformungs-Verhalten und zur Wasserdurchlässigkeit. Für die klassifizierenden Untersuchungen wurden sechs Versuchsböden herangezogen, wobei es sich um vier feinkörnige Böden (Bodengruppe OT nach DIN 18196:2011-05) und zwei gemischtkörnige Böden (Bodengruppe OH nach DIN 18196:2011-05) handelte. Die weitergehenden bodenmechanischen Untersuchungen wurden an drei Böden, einem feinkörnigen und zwei gemischtkörnigen Böden, durchgeführt. Anhand der vorliegenden Ergebnisse wurden Besonderheiten bei der Versuchsdurchführung an Böden mit organischen Beimengungen herausgearbeitet und Empfehlungen für Eignungsuntersuchungen gegeben. Dabei wurden im Detail folgende Erkenntnisse gewonnen:

Wassergehalt: Die Versuche zur Wassergehaltsbestimmung zeigten, dass die Trocknungsdauer und die Trocknungstemperatur den ermittelten Wassergehalt maßgeblich beeinflussen. Es hat sich gezeigt, dass der Wassergehalt von Böden mit organischen Beimengungen bei einer Trocknungstemperatur von 60°C unterschätzt wird, da das Porenwasser bei 60°C nicht vollständig entfernt wird. Die gemäß dem Verfahren von O'KELLY (2005b) abgeleitete optimale Trocknungstemperatur für die untersuchten sechs Böden liegt im Bereich von 105°C bis 115°C. Vor diesem Hintergrund wird für Böden mit organischen Beimengungen eine Trocknungstemperatur von 105°C empfohlen, wobei entsprechend den durchgeführten Untersuchungen davon ausgegangen werden kann, dass eine Trocknungsdauer von 24 h in der Regel ausreichend ist, um eine Massenkonstanz zu erreichen.

Organischer Anteil: Im Rahmen dieser Arbeit wurde der organische Anteil anhand des Glühverfahrens, mittels thermogravimetrischer Analysen sowie anhand des TOC bestimmt. Die Ergebnisse der thermogravimetrischen Analyse zeigen, dass es zwischen ca. 300°C und 350°C bei tonmineralhaltigen Böden zu einer Gewichtsabnahme kommt, die vermutlich auf die Dehydrierung des Zwischenschichtwassers beruht. Darüber hinaus kann bei einer Glühtemperatur von 550°C auch ein Masseverlust infolge der Zersetzung

von Calcit auftreten. Die beiden genannten Prozesse führen zu einer Überschätzung des organischen Anteils anhand des Glühverlustes und begründen u. a. die Unterschiede in den ermittelten Werten für Glühverlust und TOC. So liegt das Verhältnis ($\text{TOC}/V_{\text{GI}550^\circ\text{C}}$) meist zwischen 0,4 und 0,6. Da der organische Anteil einen signifikanten Einfluss auf die bodenmechanischen Eigenschaften hat, wird für Eignungsuntersuchungen die Bestimmung des organischen Anteils sowohl anhand des Glühverlustes als auch des TOC empfohlen. Wie die durchgeführten Untersuchungen gezeigt haben, ist die Umrechnung des Glühverlustes auf den TOC mit Unsicherheiten behaftet.

Korngrößenverteilung: Die Korngrößenverteilung der Versuchsböden wurde mittels einer kombinierten Siebung und Sedimentationsanalyse nach DIN EN ISO 17892-4:2017-04 sowie mittels Laserdiffraktometrie (LDM) bestimmt. Zusätzlich wurde die Eignung der Vorbehandlung der Proben mittels Wasserstoffperoxid entsprechend den Angaben der DIN EN ISO 17892-4:2017-04 zur Entfernung der vorhandenen organischen Substanz überprüft. Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass trotz Vorbehandlung der Proben mit Wasserstoffperoxid ein Großteil der organischen Substanz im Boden verbleibt und die Methode zur Entfernung der organischen Substanz bei Böden mit entsprechenden organischen Anteilen im Bereich zwischen 20 M.% und 30 M.-% nicht geeignet ist. Die LDM-Methode stellte sich im Vergleich zur klassischen Siebung und Sedimentationsanalyse für Böden mit organischen Beimengungen nicht als geeigneter dar. Da die Siebung und Sedimentationsanalyse in der Bodenmechanik zur Ermittlung der Korngrößenverteilung etabliert und im Regelwerk verankert ist, wird auf Basis der vorliegenden Untersuchungsergebnisse auch für Böden mit organischen Beimengungen, unabhängig ob diese fein- oder gemischtkörnig sind, die Anwendung dieser klassischen Methode empfohlen.

Korndichte: Die Korndichte der untersuchten Böden wurde mit Hilfe des Kapillarpyknometers, des Gaspyknometers und des Luftpyknometers bestimmt. Bei den Kapillar- und Luftpyknometer tests wurde beobachtet, dass die organische Substanz an der Oberfläche schwamm und die Probe aufschäumte, sobald Wasser zugegeben wurde. Die Kapillarpyknometerversuche ergaben in den durchgeführten Untersuchungen höhere Korndichten als die Versuche mit dem Gaspyknometer. Ob die Proben feucht oder trocken im Kapillarpyknometer untersucht werden, hatte dabei keinen systematischen Einfluss auf die Messergebnisse. Da das Gaspyknometer bei den durchgeführten Untersuchungen die einzige Messung zur Ermittlung der Korndichte ohne besondere Auffälligkeiten in der Versuchsdurchführung war und die Messergebnisse die geringsten Streuungen aufwiesen, wird die Verwendung des Gaspyknometers für die Ermittlung der Korndichte von Böden mit organischen Beimengungen empfohlen. Es ist aber weiterhin ungeklärt, worauf die Unterschiede in den mittels Kapillarpyknometer und Luftpyknometer einerseits und dem Gaspyknometer andererseits bestimmten Korndichten zurückzuführen sind.

Plastizitätsgrenzen: Im Hinblick auf die Ermittlung der Fließgrenze an Böden mit organischen Beimengungen bzw. organogenen Böden haben sich in den durchgeführten Untersuchungen sowohl das Verfahren nach Casagrande als auch der Fallkegelversuch als geeignet erwiesen. Ob die Versuche mit abnehmendem oder zunehmendem Wassergehalt durchgeführt werden, hatte dabei keinen erkennbaren Einfluss auf die Versuchsergebnisse.

Verdichtbarkeit: Zur Untersuchung der Verdichtbarkeit wurden jeweils drei Serien von Proctorversuchen durchgeführt, wobei die Proben dabei jeweils unterschiedlich vorbehandelt wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Trocknung des Ausgangsmaterials auf einen Wassergehalt, der mindestens 20 % unterhalb des Proctoroptimums liegt, zu signifikant größeren Trockendichten führt, als wenn die einzelnen Teilproben für den Proctorversuch von der nassen Seite des Proctoroptimums kommend direkt auf den jeweiligen Versuchswassergehalt getrocknet werden. Da Böden mit organischen Beimengungen im natürlichen Zustand in der Regel einen Wassergehalt deutlich oberhalb des optimalen Verdichtungswassergehaltes aufweisen und für erdbautechnische Zwecke so weit getrocknet werden müssen, dass eine Verdichtung mit üblichen Erdbaugeräten möglich ist, erscheint die Versuchsdurchführung gemäß DIN 18127: 2012-

09 mit vorheriger Trocknung des Materials als nicht sinnvoll. Vielmehr wird für die Durchführung von Eignungsuntersuchungen empfohlen, die Art der Versuchsdurchführung in Abhängigkeit vom natürlichen Wassergehalt festzulegen. Sofern der natürliche Wassergehalt oberhalb des abgeschätzten optimalen Wassergehaltes liegt, wird eine Trocknung der Einzelproben direkt auf den jeweiligen Verdichtungswassergehalt empfohlen. Ist der natürliche Wassergehalt geringer als der optimale Wassergehalt, so ist gemäß den Vorgaben der Norm zunächst eine Trocknung des Materials auf den für den Proctorversuch vorgesehenen geringsten Wassergehalt und eine anschließende Wasserzugabe zielführend.

Scherfestigkeit: Zur Ermittlung der Scherparameter der untersuchten Böden wurden Rahmenscherversuche, konsolidierte, dränierte (CD) und konsolidierte, undränierte (CU) Triaxialversuche sowie einaxiale Druckversuche durchgeführt. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass die aus den Rahmenscherversuchen ermittelten Kohäsionswerte deutlich höher sind als die aus den Triaxialversuchen ermittelten Werte. Außerdem zeigen die Versuche, dass die aus CU-Triaxialversuchen abgeleiteten Reibungswinkel höher sind als die aus CD-Triaxialversuchen bestimmten Werte. Ähnliche Ergebnisse, bei denen die aus CU-Versuchen ermittelten Scherparameter höher waren als die aus CD-Versuchen, wurden von KHATTAK & DAS (1985) erzielt. Sie stellten dabei fest, dass dieser Effekt umso ausgeprägter ist, je höher der Fasergehalt der Proben ist. So verleihen die Fasern der Probe trotz der wirkenden Porenwasserdrücke eine vergleichsweise hohe Scherfestigkeit, was bei der Auswertung der Triaxialversuche unter Anwendung des Prinzips der effektiven Spannungen zu einer Überschätzung der Scherparameter führt (KÖLSCH 1996). Die vorliegenden Versuchsergebnisse deuten darauf hin, dass dieser, für organische und faserhaltige Böden beschriebene Effekt, auch bei Böden mit organischen Beimengungen auftreten kann. Zur Bestimmung der effektiven Scherparameter bei Böden mit organischen Beimengungen wird deshalb die Durchführung von konsolidierten, dränierten Triaxialversuchen empfohlen.

Spannungs-Verformungs-Verhalten: Die im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten Kompressionsversuche haben gezeigt, dass Böden mit organischen Beimengungen ein zeitabhängiges Verformungsverhalten aufweisen, welches sich von dem mineralischer Böden signifikant unterscheidet. Aufgrund der hohen Dichte der Proben nach Herstellung unter Proctorverdichtung und des daraus resultierenden überkonsolidierten Zustandes weisen Böden mit organischen Beimengungen im Kompressionsversuch im gesättigten Zustand nach Belastung eine vergleichsweise geringe Entwicklung von Porenwasserüberdrücken und eine kurze Konsolidierungsdauer auf. Das zeitabhängige Verformungsverhalten wird dementsprechend vorrangig durch Sekundärsetzungen (Kriechen) beeinflusst, wobei die zeitabhängigen Verformungen im halblogarithmischen Maßstab einen gekrümmten Verlauf einnehmen und damit nicht mit einem konstanten Kriechbeiwert beschrieben werden können. Auch das spannungsabhängige Verformungsverhalten weist aufgrund der hohen Dichte im halblogarithmischen Maßstab einen gekrümmten Verlauf auf, was bei der Ermittlung des Kompressionsbeiwertes zu einer Zunahme desselben mit der Spannung führt. Für die Bestimmung des zeit- und spannungsabhängigen Verformungsverhaltens im Rahmen von Eignungsuntersuchungen wird die Durchführung von klassischen, gesättigten Kompressionsversuchen empfohlen. Da das zeitabhängige Verformungsverhalten nicht mit einem konstanten Kriechbeiwert beschrieben werden kann, sollte das zeitabhängige Verformungsverhalten unter einer Laststufe über einen Mindestzeitraum von 24 h, möglichst jedoch noch länger, beobachtet werden. Bei zu kurzen Versuchszeiträumen besteht die Gefahr, dass aus den Kompressionsversuchen ein zu geringer Kriechbeiwert abgeleitet wird, da der Kriechbeiwert mit der Zeit zunimmt. Im Hinblick auf die Prognose der Kriechsetzungen von Erdbauwerken aus Böden mit organischen Beimengungen bestehen Unsicherheiten, inwieweit diese mit üblichen Kriechmodellen beschrieben werden können, da das zeitabhängige Verhalten in den Kompressionsversuchen eine Veränderung des Kriechbeiwertes mit der Zeit ergab. Diesbezüglich besteht noch Forschungsbedarf. Werden Kompressionsversuche an Böden im teilgesättigten Zustand durchgeführt, bei denen die Proben nach Einbau nicht wassergesättigt werden, ist zu beachten, dass es durch die in der Regel unvermeidbare Probenaustrocknung zu zusätzlichen Verformungen kommt, was in der Auswertung zu einem weicherem Verhalten (d. h. geringere Steifemoduln und höherer Kriechbeiwert) führt.

Das Verformungsverhalten infolge von Wassergehaltsänderungen kann detailliert mit saugspannungs-kontrollierten Oedometerversuchen untersucht werden. Aufgrund der Komplexität der Versuche ist die Anwendung dieser Methodik in der Ingenieurpraxis jedoch bisher nicht etabliert. Als Alternativen können zur Bestimmung des Verformungsverhaltens bei Wasserzutritt (Sacken oder Quellen) bzw. bei Austrocknung klassische Kompressionsversuche, bei denen die Proben unter definierter Spannung gesättigt werden, bzw. Schrumpfversuche durchgeführt werden.

Durchlässigkeit: Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Durchlässigkeitsversuche in Druckzellen, d. h. ohne feste Umrandung, durchgeführt, wobei die Differenz zwischen dem Zelldruck und dem Porenwasserdruck variiert wurde. Die Versuche zeigen, dass diese Differenz zu einer Konsolidation der Proben führt und erwartungsgemäß mit zunehmender Konsolidationsspannung die Wasserdurchlässigkeit infolge der Kompression der Probe abnimmt. Bei der Ermittlung des Durchlässigkeitsbeiwertes von Böden mit organischen Beimengungen im Rahmen von Eignungsuntersuchungen ist dementsprechend die Spannungsabhängigkeit des Durchlässigkeitsbeiwertes zu beachten. Die Konsolidationsspannung der Proben in Druckzellen (d. h. die Differenz zwischen dem Zelldruck und dem Porenwasserdruck) sollte entsprechend den im Feld vorliegenden bzw. zu erwartenden Spannungen gewählt werden.

Die durchgeführten Untersuchungen belegen, dass der organische Anteil in mineralischen Böden im untersuchten Bereich von 20 M.-% bis 30 M.-% einen signifikanten Einfluss auf die bodenmechanischen bzw. erdbautechnischen Eigenschaften hat und die Eignungsuntersuchungen diesbezüglich entsprechend ausgerichtet sein sollten. Noch nicht geklärt werden konnte in den durchgeführten Untersuchungen, inwieweit und unter welchen Verhältnissen die organische Substanz nach Einbau in Erdbauwerken zersetzt wird und welche Auswirkungen dies auf das Verformungsverhalten der Bauwerke hat. Dazu wären weitergehende Untersuchungen, die ggf. über entsprechend lange Zeiträume ausgerichtet sein sollten, erforderlich.

Literatur

- ABDALLAH, I., AHMED, S. & OSAMA, T. (1999): Effects of organic matter on the physical and physico-chemical properties of an Illitic Soil. *Applied Clay Science*, Vol 14, pp. 257-278.
- ABELLA, S. & ZIMMER, B. (2007): Estimating organic carbon from loss-on-ignition in northern Arizona forest soils. *Soil Science Society of America Journal*, 71, pp. 545-550.
- ADAM, J. (1961): Shear Behaviour of Canadian Muskeg. s.l., Proc. 7th Muskeg Research Conference, No, 71, pp. 36-54.
- ADAMS, W. (1973): The effect of organic matter on the bulk and true densities of some uncultivated podzolic soils. *Journal of Soil Science* Vol 24, pp. 10-17.
- ANDERSLAND, O., KHATTAK, A. & AL-KHAFAJI, A. (1981): The effect of organic material on soil shear strength. *Laboratory Shear Strength of Soil*, ASTM STP 740, pp. 226-242.
- ANDERSON, J. (1963): An improved pretreatment for mineralogical analysis of sample containing organic matter. s.l., s.n.
- TP-BF-StB-B3.3. (1988): Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe "Erd- und Grundbau".
- ARMAN, A. (1970): Engineering Classification of Organic Soils. *Highway Research Record* No. 310, pp. 75-89.
- ASTM-D2216-10 (2010): Standard test methods for Laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass.
- ASTM-D2487-10 (2010): Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System).
- ASTM-D2974-07a (2007): Standard test methods for Moisture, ash and organic matter of Peat and other Organic soils.
- BAGHERPOUR, I. (2016): Long-term volume change behaviour of an unsaturated compacted organic soil under oedometric conditions.
- BALL, B., LANG, R., O'SULLIVAN, M. & FRANKLIN, M. (1988): Cultivations and nitrogen requirements for continuous winter barley on a Gleysol and a Cambisol. *Soil Tillage Res.*, Vol 13, pp. 333-352.
- BALL, D. (1964): Loss-on-ignition as an estimate of organic matter and organic carbon in non-calcareous soils. *Journal of Soil Sciences*, Vol 15, pp. 84-92.
- BIEGANOWSKI, A., RYZAK, M., SOCHAN, A., BARNA, G., HERNADI, H., BECZEK, M., POLAKOWSKI, C., MAKO, A. (2018): Laser Diffractometry in the Measurements of Soil and Sediment Particle Size distribution. *Advances in Agronomy*, Volume 151.
- BIELDERS, C., DE BACKER, L. & DELVAUX, B. (1990): Particle density of Volcanic soils as measured with a Gas Pycnometer. *Soil Science Society of America Journal* 54, pp. 822-826.
- BIRLE, E. (2012): Geohydraulische Eigenschaften verdichteter Tone unter besonderer Berücksichtigung des ungesättigten Zustandes, s.l.: Zentrum Geotechnik – Lehrstuhl und Profamt für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau.

- BIRLE, E., HEYER, D. & BAUMGÄRTEL, T. (2013): Erdbautechnische Eigenschaften organogener Böden der Münchener Schotterebene. s.l., s.n.
- BLOTT, S. & PYE, K. (2006): Particle size distribution analysis of sand-sized particles by laser diffraction: an experimental investigation of instrument sensitivity and the effects of particle shape. *Sedimentology*, pp. 671-685.
- BOYLAN, N. & LONG, M. (2010): An investigation of two peat slope failures in the Wicklow Mountains. *Proceedings of the Royal Irish Academy*, 110B (3), pp. 173-184.
- BROADBENT, F. (1953): The soil organic fraction.. *Advances in Agronomy*, Volume 5,, pp. 153-183.
- BRÜGGEMANN, K. & MORITZ, K. (1979): Verwendbarkeit von Böden mit organischen Bestandteilen, s.l.: Bundesanstalt für Straßenwesen.
- BS-1377-3 (1990): Methods of test for Soils for civil engineering purposes- Part 3: Chemical and electro-chemical tests.
- CANDLER, C. & CHARTRESS, F. (1988): Settlement measurement and analysis of three trial embankments on soft peaty ground. s.l., Baltic Conference.
- CASAGRANDE, A. (1948): Classification and Identification of Soils. ASCE, Vol 113, pp. 901-930.
- DANIELS, E. (1971): Shear properties of an organic soil and the same soil with the organic matter removed, s.l.: University of Missouri-Rolla.
- DE KIMPE, C., BERNIER-CARDOU, M. & JOLICOEUR, P. (1982): Compaction and settling of Quebec soils in relation to their soil-water properties. *Canadian Journal of Soil Science*, 62(1), , pp. 165-175.
- DE VOSS, B., VANDECASTEELE, B., DECKERS, J. & MUYS, B. (2005): Capability of Loss-on-Ignition as a Predictor of Total organic carbon in Non-Calcareous Forest Soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36:19-20, pp. 2899-2921.
- DEN HAAN, E. (1996): A compression model for non-brittle soft clays and peat. *Géotechnique* 46, No.1, pp. 1-16.
- DEN HAAN, E. & EDIL, T. (1994): Secondary and tertiary compression of peat. In: *Advances in understanding and modelling the mechanical behaviour of peat*. s.l.:s.n.
- DEN HAAN, E. & EL AMIR, L. (1994): A simple formula for final settlement of surface loads on peat. s.l., s.n., pp. 35-48.
- DHOWIAN, A. & EDIL, T. (1980): Consolidation behaviour of Peats.. *ASTM Geotechnical Testing Journal*, Vol 3(3), x, pp. 105-114.
- DIN 18129 (2011): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben-Kalkgehaltsbestimmung. s.l.:s.n.
- DIN-1054 (2021): Baugrund-Sicherheitsnachweise im Erd und Grundbau-Teil 101: Er-gänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1.. Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN-18121-2 (2012): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Wassergehalt - Teil2: Bestimmung durch Schnellverfahren.
- DIN-18127-2011 (2012): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Proctorversuch. Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN-18128 (2002): Untersuchung von Bodenproben- Bestimmung des Glühverlustes.. Deutsches Institut für Normung e.V.

- DIN-18196 (2011): Erd und Grundbau-Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke. Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN-EN-15936 (2012): Schlamm, behandelter Bioabfall, Boden und Abfall-Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) mittels Trockener Verbrennung.. Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN-EN-ISO:17892-1:2013-04 (2013): Geotechnische Erkundung und Untersuchung-Laborversuche an Bodenproben- Teil 1: Bestimmung des Wassergehalts.. Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN-EN-ISO:17892-10:2019-04 (2019): Geotechnische Erkundung und Untersuchung-Laborversuche an Bodenproben-Teil 10: Direkte Scherversuche. Deutsches Institut für Normung.
- DIN-EN-ISO:17892-11 (2019): Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben-Teil 11: Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit. Deutsches Institut für Normung.
- DIN-EN-ISO:17892-12 (2018): Geotechnische Erkundung und Untersuchung- Laborversuche an Bodenproben – Teil 12: Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenzen. Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN-EN-ISO:17892-3:2015 (2015): Geotechnische Erkundung und Untersuchung- Laborversuche an Bodenproben – Teil 3: Bestimmung der Korndichte.. Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN-EN-ISO:17892-4:2017-04 (2017): Geotechnische Erkundung und Untersuchung- Laborversuche an Bodenproben-Teil 4: Bestimmung der Korngrößenverteilung.. Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN-EN-ISO:17892-8 (2018): Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 8: Unkonsolidierter undrännierter Triaxialversuch. Deutsches Institut für Normung.
- DIN-EN-ISO:17892-9 (2018): Geotechnische Erkundung und Untersuchung-Laborversuche an Bodenproben - Teil 9: Konsolidierte triaxiale Kompressionsversuche an wassergesättigten Böden. Deutsches Institut für Normung.
- DIN-EN-ISO-17892-5 (2017): Geotechnische Erkundung und Untersuchung-Laborversuche an Bodenproben- Teil 5: Ödometerversuch mit stufenweiser Belastung. Deutsches Institut für Normung.
- EDIL, T. (1997): Construction over Peats and organic soils.. Proceedings of Conference on Recent advances in Soft soil Engineering, Vol 1., pp. 85-108.
- EDIL, T. & DHOWIAN, A. (1979): Analysis of Long term compression of Peats. Geotechnical Engineering, 10.
- EDIL, T. & DHOWIAN, A. (1981): At-rest lateral pressure of peat soils.. Proc. Conf. Sediment. Consolidation Model, ASCE, , pp. 411-424.
- EDIL, T. & WANG, X. (2000): Shear strength and K_0 of peats and organic soils.. Geotechnics of High Water Content Materials, ASTM STP 1374.
- EKWUE, E. (1990): Organic matter effects on Soil strength properties. Soil & Tillage Research, Vol 16, pp. 289-297.
- ENGEL, J. (2002): Berechnungskennwerte feinkörnig-bindiger, gesättigter Böden- Näherungsverfahren.. Bautechnik 79, Heft 3: , pp. 167-177.
- ESCUDEY, M., DÍAZ, P., GALINDO, G. & CHANG, A. (1999): Differential thermogravimetric analysis of oxalate in hydrogen peroxide-treated allophanic soils.. Communications in Soil Science and Plant Analysis, Vol 30, pp. 937-946.
- ESHEL, G., LEVY, G., MINGELGRIN, U. & SINGER, M. (2004): Critical Evaluation of the use of Laser Diffraction for Particle-size Distribution Analysis.. Soil Science Society of America Journal 68.

Faé, G. , MONTES, F., BAZILEVSKAYA, E., ANO, R., KEMANIAN, A. (2019): Making Soil Particle Size Analysis by Laser Diffraction compatible with Standard Soil Texture determination methods. *Soil Science Society of America Journal*, pp. 1244-1252.

FARRELL, E. (2012): Organics/Peat soils.. *Manual of geotechnical engineering. Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Ch 32, , pp. 463-479.

FARRELL, E. & HEBIB, S. (1998): The determination of the geotechnical parameters of organic soils,. *Proceedings of the International Symposium on Problematic soils*, , pp. 33-36.

FERNÁNDEZ, J., PLANTE, A., LEIFELD, J. & RASMUSSEN, C. (2011): Methodological considerations for using thermal analysis in the characterization of organic matter.. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 104, pp. 389-398.

Fisher, P., AUMANN, C., CHIA, K., O'HALLORAN, N., CHANDRA, S. (2017): Adequacy of Laser diffraction for soil particle size analysis.. *PLoS ONE* 12(5).

FOX, P. & EDIL, T. (1994): Temperature induced one dimensional creep of peat.. *Proceedings of the International Workshop on Advances in understanding and modeling the Mechanical behaviour of Peat.* , pp. 27-34.

FOX, P., EDIL, T. & LAN, L. (1992): ca/cc concept applied to compression of Peat.. *Journal of Geotechnical Engineering*, 118(8): , pp. 1256-1263.

FRANGIPANE, G., PISTOLATO, M., MOLINAROLI, E., GUERZONI, S., TAGLIAPIETRA, D. (2009): Comparison of loss on ignition and thermal analysis stepwise methods for determination of sedimentary organic matter. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, pp. 24-33.

FRANKLIN, A., OROZCO, L. & SEMRAU, R. (1973): Compaction and strength of slightly organic soils.. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* Vol. 99, , pp. 541-557.

FREDLUND, D. & MORGENSTERN, N. (1976): Constitutive relations for volume change in unsaturated soils. *Canadian geotechnical journal* 13(3), pp. 261-276.

GOFAR, N. & SUTEJO, Y. (2007): Long term compression behaviour of fibrous peat.. *Malaysian Journal of Civil Engineering* 19(2): , pp. 104-116.

GOODMAN, L. & LEE, C. (1962): Laboratory and Field data on engineering characteristics of some peat soils. *Proceedings of the Eighth Muskeg Research Conference*, pp. 107-129.

GRIM, R. (1953): *Clay mineralogy*.. s.l.:s.n.

HANRAHAN, E., DUNNE, J. & SODHA, V. (1965): Shear strength of Peat, , s.l.: Proc. 1st International Peat Symposium, Dublin.

HANRAHAN, E. & WALSH, J., (1965): Investigation of behaviour of peat under varying conditions of stress and strain.. *Proc. 6th ICSMFE*, Vol 1,, pp. 226-230.

HEAD, K., (1980) : *Manual of Soil Laboratory Testing, Volume 1': Soil classification and Compaction tests.*

HERRMANN, R., LÖWEN, M. & WILDEN, U., (2014) : Untersuchungen zum Setzungs-und Scherverhalten sowie zur Klassifizierung von feinkörnigen Böden mit organischen Bestandteilen.. *Geotechnik* 37, Heft 4.

HEYER, D. , BIRLE, E., BAUMGAERTEL, T., BLOMEYER, H., SCHONHOEFER, F. (2012) : Effizienter und umweltverträglicher Umgang mit dem Baustoff Boden am Beispiel arsenhaltiger Böden bei der Erweiterung des Flughafens Münchens.. In: *Tagungsband zur 32. Baugrundtagung der DGGT.*

- HOBBS, N., (1986) : Mire morphology and the properties and behaviour of some British and foreign peats.. Quarterly Journal of Engineering Geology, 19(1),, pp. 7-80.
- HOLTZ, R. & KRIZEK, R., (1970) : Properties of slightly organic top soils.. Journal of the Construction Division, ASCE 96, , pp. 29-43.
- HOOGSTEEEN, M. ET AL., (2015) : Estimating soil organic carbon through loss on ignition: effects of ignition conditions and structural water loss.. European Journal of Soil Science. Vol 66, , pp. 320-328.
- HOSANG, J. & LOCKER, J., (1971) : Discussion on "Ignition loss and other properties of Peats and Clays from Avonmouth, King's Lynn and Cranberry moss".. Géotechnique Vol 24, No, 4, , pp. 416-418.
- HOUBA, V., VAN DER LEE, J. & NOVOZAMSKY, I., (1997) : Soil Analysis Procedures, other Procedures, Syllabus soil and Plant analysis. Part 5B.
- HUANG, P., PATEL, M., SANTAGATA, M. & BOBET, A., (2009) : Classification of organic soils. , s.l.: Joint Transportation Research Program. FHWA/IN/JTRP-2008/2.
- HUAT, B., KAZEMIAN, S., PRASAD, A. & BARGHCHI, M., (2011) : State of an art review of peat: General perspective.. International Journal of the Physical Sciences, 6(8), , pp. 1988-1996.
- HUBER, S. (2016) : Bericht zum Umgang mit organikhaltigem Bodenaushub bei kleinen und mittleren Bauvorhaben. , s.l.: Bayerischer Bauindustrieverband e.V. Projekt Nr: 20151004.
- JARRETT, P. (1983) : Testing of Peats and organic soils, , s.l.: ASTM STP 820.
- JENSEN, J. , SCHJONNING, P., WATTS, C., CHRISTENSEN, C., MUNKHOLM, L. (2017) : Soil texture analysis revisited: Removal of organic matter matters more than ever.. PLoS ONE 12(5).
- JESSBERGER, H. L. & KOCKEL, R. (1993) : Mechanische Eigenschaften von Siedlungsabfall - Labor und Modellversuche. s.l., 9. Nürnberger Deponieseminar.
- KAZEMIAN, S., HUAT, B., PRASAD, A. & BARGHCHI, M. (2011) : A state of art review of peat: Geotechnical Engineering perspective.. International Journal of the Physical Sciences, Vol 6(8), , pp. 1974-1981.
- KHATTAK, A. & DAS, B. (1985) : Effect of high excess pore pressure on strength parameters of organic soil.. Soil and Foundations. Vol 35, , pp. 99-104.
- KÖLSCH, F. (1996) : Der Einfluss der Faserbestandteile auf die Scherfestigkeit von Siedlungsabfall, s.l.: Dissertation Leichtweiss Institut, Technische Universität Braunschweig.
- Konen, M., JACOBS, P. BURRAS, L., TALAGA, B., MASON, J. (2002) : Equations for predicting soil organic carbon using loss-on-ignition for North Central U.S. soils. Soil Science Society of America Journal, 66, , pp. 1878-1881.
- KONERT, M. & VANDENBERGHE, J., (1997) : Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis: A solution for the underestimation of the clayfraction. Sedimentology 44(3).
- KRISTL, M., MURŠEC, M., ŠUŠTAR, V. & KRISTL, J., (2016) : Application of thermogravimetric analysis for the evaluation of organic and inorganic carbon contents in agricultural soils.. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 123:, p. 2139–2147.
- Ladd, C., FOOTT, R., ISHIHARA, K., SCHLOSSER, F., POULOS, H. (1977) : Stress-Deformation and strength characteristics. In: 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.
- LANDVA, A., KORPIJAAKKO, E. & PHEENEY, P. (1983) : Geotechnical classification of peats and organic soils.. In: Testing of Peats and organic soils., pp. 37-51.

- LANDVA, A. & LAROCHELLE, P. (1983) : Compressibility and shear characteristics of Radforth peats.. Testing peat organic soils, ASTV STP, 820, pp. 157-191.
- LEA, N. & BROWNER, C. (1963) : Highway design and construction over Peat deposits in the Lower British Colombia.. Highway Research Record, Vol 7: , pp. 1-32.
- LEONARDS, G. & GIRAULT, P., (1961) : Study of the one-dimensional consolidation test. Proceedings of the fifth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol 1, Paris, France, pp. 213-218.
- LONG, M. (2005) : Review of Peat strength, peat characterization and Constitutive modelling of peat with reference to landslides.. Studia Geotechnical et Mechanica, Vol XXVII.
- LONG, M. & BOYLAN, N. (2012) : In situ testing of peat – a review and update on recent developments. Geotechnical Engineering Journal of the Southeast Asian Geotechnical Society 43(4), , pp. 41-55.
- MACFARLANE, I. & ALLEN, C. (1963) : An examination of some index test procedures for peat.. Proc. 9th Muskeg Res. Conf.
- MADASCHI, A. & GAJO, A. (2015) : One-dimensional response of peaty soils subjected to a wide range of oedometric conditions. Géotechnique 65, No. 4, pp. 274-286.
- MALKAWI, A., ALAWNEH, A. & ABU-SAFAQAH, O. (1999) : Effects of organic matter on the physical and the physicochemical properties of an illitic soil.. Applied Clay Science, Vol 14, , pp. 257-278.
- MARACHI, N., DAYTON, D. J. & DARE, C. (1983) : Geotechnical properties of peat in San Joaquin Delta.. In: Testing of Peats and organic soils, ASTM STP 820; , pp. 207-217.
- MCBRIDE, R., SLESSOR, R. & JOOSSE, P. (2012) : Estimating particle density of clay-rich soils with diverse mineralogy.. Soil Science Society of America Journal 76, , pp. 569-574.
- MESRI, G. & AJLOUNI, M. (2007) : Engineering properties of fibrous peat.. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 133 (7), pp. 850-866.
- MESRI, G., AJLOUNI, M., FENG, T. & LO, D. (2001) : Surcharging of soft ground to reduce secondary settlement. Hong Kong, 3rd International conference on soft soil engineering.
- MESRI, G. & CASTRO, A. (1987) : C/Cc concept and K₀ during secondary compression. Journal of Geotechnical Engineering, 113(3), pp. 230-247.
- MESRI, G. & GODLEWSKI, P. (1997) : Time and stress-compatibility interrelationship.. Journal of Geotechnical Engineering Division, 103(5), , pp. 417-430.
- MESRI, G., STARK, T., AJLOUNI, M. & CHEN, C. (1997) : Secondary compression of peat with or without surcharging.. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering; 123, , pp. 411-421.
- MIKHAIL, E. & BRINER, G. (1978) : Routine Particle Size Analysis of Soils using Sodium hypochlorite and Ultrasonic Dispersion.. Australian Journal of Soil Research Vol 16.
- MIYAKAWA, I. (1959) : Soil Engineering research on Peaty Alluvia., s.l.: National Research Council of Canada. Division of Building Research.
- MIYAZAWA, M. , PAVAN, M., OLIVEIRA, E., IONASHIRO, M., SILVA, A. (2000) : Gravimetric determination of Soil Organic matter.. Brazilian Archives of Biology and Technology, Vol 43 (5), , pp. 475-478.
- MOO-YOUNG, H. & ZIMMIE, T. (1996) : Geotechnical properties of paper mill sludges for use in landfill covers.. Journal of Geotechnical Engineering ASCE 122(9), pp. 68-776.

- NELSON, D. & SOMMERS, L. (1982) : Total carbon, organic carbon and organic matter.. In: Methods of Soil Analysis, American Society of Agronomy, pp. 539-579.
- NG, S. & EISCHENS, G. (1983) : Repeated short-term consolidation of peats.. In: Testing of Peats and organic soils, ASTM STP 820; , pp. 192-206.
- O'KELLY, B. (2004) : Accurate determination of moisture content of organic soils using the oven drying method.. *Drying Technology*, 22(7), pp. 1767-1776.
- O'KELLY, B. (2005a) : Oven-Drying characteristics of soils of different origins,. *Drying Technology*, 23, pp. 1141-1149.
- O'KELLY, B. (2005b) : New method to determine true water content of organic soil. *Geotechnical testing journal*, Vol 28, No 4.
- O'KELLY, B. (2005c) : Method to compare water content values determined on the basis of different oven-drying temperatures.. *Géotechnique*, Vol 55, No 4, pp. 329-332.
- O'KELLY, B. (2005d) : Compressibility of some peat and organic soils. *Proceedings of the International Conference on Problematic Soils*.
- O'KELLY, B. (2006) : Compression and consolidation anisotropy of some soft soils.. *Geotechnical and Geological Engineering*, 24(6), , pp. 1715-1728.
- O'KELLY, B. (2013) :Undrained Shear strength- water content relationship for sewage sludge.. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, Vol 166, pp. 576-588.
- O'KELLY, B. (2014) : Characterization and undrained strength of amorphous clay.. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, Vol 167, pp. 311-320.
- O'KELLY, B. (2015) : Atterberg Limits are not appropriate for peat soils.. *Geotechnical Research*, Vol 2, Issue 3, pp. 123-134.
- O'KELLY, B. (2016) : Briefing: Atterberg Limits and Peat.. *Environmental Geotechnics*, Volume 3, Issue 6, pp. 359-363.
- O'KELLY, B. & SIVAKUMAR, V. (2014) : Water Content Determinations for Peat and other Organic Soils using the Oven-Drying Method.. *Drying Technology*, 32, pp. 631-643.
- O'LOUGHLIN, C. (2001) : The One-Dimensional Compression of Fibrous Peat and Other Organic Soils. In: Ph.D. Dissertation, University of Dublin, Trinity College. s.l.:s.n.
- PLANTE, A., FERNÁNDEZ, J. & LEIFELD, J. (2009) : Application of thermal analysis techniques in soil science.. *Geoderma*, 153, pp. 1-10.
- RANNEY, R. (1969) : An organic carbon-organic matter conversion equation for Pennsylvania surface soils.. *Soil Science society of America Journal*, 33, pp. 809-811.
- REZVAN, K. (1969) : The influence of organic matter on Shear strength of a cohesive soil. , s.l.: Master Thesis, University of Missouri-Rolla.
- RILEY, J. (1989) : Laboratory methods for Testing Peat-Ontario Peatland Inventory Project, , s.l.: Ontario Geological Survey.
- ROBINSON, G. (1933) : The dispersion of soils in mechanical analysis.. *Imperial Bureau of Soil Science. Technical Communication. No. 26*.

- RÜHLMANN, J., KÖRSCHENS, M. & GRAEFE, J. (2006) : A new approach to calculate the particle density of soils considering the properties of the soil organic matter and the mineral matrix.. *Geoderma* 130, pp. 272-283.
- SCHJØNNING, P., MCBRIDE, R., KELLER, T. & OBOUR, P.(2017) : Predicting soil density from clay and soil organic matter contents.. *Geoderma* 286, pp. 83-87.
- SCHMIDT, N (1965) : A study of the isolation of organic matter as a variable affecting engineering properties of soil, , s.l.: Thesis, University of Illinois.
- SCHNITZER, M. & HOFFMAN, I. (1965) : Thermogravimetry of soil humic compounds.. *Geochimica et Cosmo-chimica Acta*, Vol 29, pp. 859-870.
- SCHNITZER, M., TURNER, R. & HOFFMAN, I. (1963) : A Thermogravimetric study of organic matter of representative Canadian Podzol soils.. *Canadian Journal of Soil Sciences*, Vol 44..
- SCHULTE, E. & HOPKINS, B. (1996) : Estimation of soil organic matter by weight loss-on-ignition.. *Soil Organic Matter: Analysis and Interpretation*, pp. 21-31.
- SCHUMACHER, B., SHINES, K., BURTON, J. & PAPP, M. (1990) : Comparison of soil sample homogenization techniques.. Environmental Monitoring Systems Laboratory Office of Research and Development..
- SHEIN, E., MILANOVSKII, E. & MOLOV, A. (2006) : The Effect of Organic Matter on the difference between Particle Size Distribution Data obtained by the Sedimentometric and Laser diffraction methods.. *Eurasian Soil Science*, Vol 39,, pp. 84-90.
- SKEMPTON, A. & PENTLEY, D. (1970) : Ignition loss and other properties of Peats and Clays from Avonmouth, King's Lynn and Cranberry moss.. *Géotechnique*, 20(4), pp. 343-356..
- SN-670-004-2b-NA (2008) : Geotechnische Erkundung und Untersuchung; Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden – Teil 2: Grundlagen von Bodenklassifizierung. Schweizerischer Verband der Straßen- und Verkehrsfachleute VSS.
- SOANE, B. (1990) : The role of Organic matter in Soil compactibility: A review of some practical aspects.. *Soil & Tillage Research* Vol 16, pp. 179-201.
- STONE, R. & EKWUE, E. (1993) : Maximum bulk density achieved during Soil compaction as affected by the incorporation of three organic materials. *American Society of Agricultural Engineers*, Vol 36(6), , pp. 1713-1719.
- TP-BF-StB-B3.3 (1988) : s.l.:Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe "Erd- und Grundbau".
- TURNER, R. & SCHNITZER, (1962) : Thermogravimetry of the organic matter of a Podzol.. *Soil Sciences* 93, , pp. 225-232.
- WINTERMYER, A. & KINTER, E. (1955) :Dispersing Agents for Particle-size Analysis of Soils.. *Highway Research Board Bulletin* 95, , pp. 1-14.
- WONG, L., HASHIM, R. & ALI, F. (2009) : A review on hydraulic conductivity and compressibility of peat.. *Journal of Applied Sciences*, 9(18),, pp. 3207-3218.
- YAMAGUCHI, H., OHIRA, Y., KOGURE, K. & MORI, S. (1985) : Deformation and strength properties of peat.. *Proc. 11th ICSMFE*, Vol 4, , pp. 2461-2464.

ZHANG, L. & O'KELLY, B. (2013) : Constitutive models for peat-a review. Proceedings of the 12th International Conference on Computational Plasticity-Fundamentals and Applications, Barcelona, Spain, pp. 1294-1304.

ZHAO, Y., KRZIC, M., BULMER, C. & SCHMIDT, M. (2008) : Maximum bulk density of British Columbia Forest soils from the Proctor test: Relationships with selected physical and chemical properties.. Soil Science Society of America Journal, Vol 72 (2).

ZTV-E-StB-17 (2017) : Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau, s.l.: Forschungsgesellschaft für Straßenbau und Verkehrswesen.

ZWANENBURG, C (2005) : The influence of anisotropy on the consolidation behaviour of peat. PhD Thesis, Delft University of Technology.

Tabellen

- Tab. 2-1: Versuche zur Wassergehaltsbestimmung
- Tab. 2-2: Versuche zur Bestimmung des Glühverlustes
- Tab. 2-3: Versuche zur Bestimmung der Kornverteilung
- Tab. 2-4: Versuche zur Bestimmung der Korndichte
- Tab. 2-5: Versuche zur Bestimmung der Plastizitätsgrenzen
- Tab. 2-6: Versuche zur Verdichtbarkeit
- Tab. 2-7: Versuche zur Bestimmung der Scherparameter
- Tab. 2-8: Versuche zur Bestimmung der Spannungs-Verformungseigenschaften
- Tab. 2-9: Versuche zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit
- Tab. 4-1: Probennummern und Kurzbezeichnungen der Böden aus dem Projekt
FE05.0166/2011/ERB
- Tab. 4-2: Zusammenfassung der Ergebnisse aus den klassifizierenden Versuchen an den Böden
BoSc, BoGr, NiSt, KIBu2
- Tab. 4-3: Probennummern und Kurzbezeichnungen der Böden
- Tab. 4-4: Zusammenfassung der Ergebnisse aus den klassifizierenden Versuchen an Böden BoFr,
BoWo
- Tab. 4-5: Zusammenfassung der Ergebnisse aus den klassifizierenden Versuchen am Boden
TLMü
- Tab. 4-6: Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Wassergehaltsbestimmungsversuchen
- Tab. 4-7: Zusammenfassung der Massenreduktion bei Trocknung nach O'KELLY (2005c)
- Tab. 4-8: Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Glühverlustversuchen
- Tab. 4-9: Ergebnisse der Kalkgehaltsversuche nach DIN 18129:2011-07
- Tab. 4-10: Ergebnisse der chemischen Analyse
- Tab. 4-11: Ergebnisse der Vorbehandlung mit Wasserstoffperoxid
- Tab. 4-12: Zusammenfassung der Korndichte-Ergebnisse
- Tab. 4-13: Zusammenfassung der Zustandsgrenzen, bestimmt mit der Casagrande- und Fallkegel-
Methode
- Tab. 4-14: Ergebnisse der Verdichtungsversuche an Böden BoSc, BoGr, KIBu2
- Tab. 4-15: Peakscherparameter aus Rahmenscherversuchen an den Böden BoSc, BoGr und
KIBu2
- Tab. 4-16: Peakscherparametern aus CU-Triaxialversuchen an den Böden BoSc, BoGr und KIBu2
- Tab. 4-17: Zusammenfassung der Ergebnisse der CU-Triaxialversuche
- Tab. 4-18: Konsolidierungsspannungen für die Einzelversuche der Triaxialversuche
- Tab. 4-19: Peakscherparameter aus CD-Triaxialversuchen an den Böden BoSc, BoGr und KIBu2
- Tab. 4-20: Zusammenfassung der Ergebnisse der Triaxialversuche CD
- Tab. 4-21: Zusammenfassung der anhand von Rahmenscher-, CU- und CD-Triaxialversuchen an
den Böden BoSc, BoGr und KIBu2 bestimmten Scherparameter
- Tab. 4-22: Einaxiale Druckfestigkeit der Böden BoSc und KIBu2
- Tab. 4-23: Versuchsrandbedingungen der gesättigten Ödometerversuche (ohne gleichzeitige
Messung des Porenwasserdrucks) an den Böden BoSc, BoGr und KIBu2
- Tab. 4-24: Erreichte Einbaubedingungen bei den verschiedenen Oedometerversuchen
- Tab. 4-25: Ermittelte Steifemoduln E_{oed} , Kompressionsbeiwert C_C , Schwellbeiwert C_s ,
Rekompressionsbeiwert C_R für die Böden BoSc, BoGr und KIBu2 im gesättigten
Zustand ohne (V1) - und mit Messung des Porenwasserdrucks (V2) und im
teilgesättigten Zustand (V3)

- Tab. 4-26: Ermittelte Konsolidationszeiten t_{90} , Konsolidationsbeiwerte C_V und Kriechbeiwerte C_α für die Böden BoSc, BoGr und KIBu2 im gesättigten Zustand ohne- und mit Messung des Porenwasserdrucks und im teilgesättigten Zustand
- Tab. 4-27: Versuchsrandbedingungen der gesättigten Oedometerversuche (mit gleichzeitiger Messung des Porenwasserdrucks) an den Böden BoSc, BoGr und KIBu2
- Tab. 4-28: Konsolidationsdauern berechnet mit der Taylor-Methode und aus dem Abbau des Porenwasserüberdrucks
- Tab. 4-29: Zeitpunkte t_s als Übergang von der sekundären zur tertiären Kompression ($C_{\alpha1}$ und $C_{\alpha2}$) für die Böden BoSc, BoGr und KIBu2
- Tab. 4-30: Parameter des Isotachenmodells
- Tab. 4-31: Übersicht über die teilgesättigten Kompressionsversuche an den Böden BoSc, BoGr und KIBu2
- Tab. 4-32: Übersicht über die Vertikalspannungen und Saugspannungen in den SC-Oedometerversuche an den Böden BoSc, BoGr und KIBu2
- Tab. 4-33: Ergebnisse der Durchlässigkeitsversuche an den Boden BoSc
- Tab. 4-34: Ergebnisse der Durchlässigkeitsversuche an den Boden BoGr
- Tab. 4-35: Ergebnisse der Durchlässigkeitsversuche an den Boden KIBu2

Bilder

- Bild 3-1: Reduzierung der Trockenmasse bei Trocknungstemperaturen nach O'KELLY (2004)
- Bild 3-2: Ermittlung der optimalen Trocknungstemperatur nach O'KELLY (2004)
- Bild 3-3: Verfahren zur Bestimmung des organischen Gehalts in Böden nach HUANG ET AL. (2009)
- Bild 3-4: Typisches Ergebnis einer Differenz-Thermoanalyse (DTA) bzw. einer dynamischen Kalorimetrie (DSC) nach HUANG ET AL. (2009)
- Bild 3-5: Ergebnisse der Thermogravimetrische Analyse (TGA) an organischen Böden nach HUANG ET AL. (2009)
- Bild 3-6: Thermogravimetrisches Diagramm für roten Latossol (a) relativer Massenverlust (b) differentieller Massenverlust nach MIYAZAWA ET AL. (2000)
- Bild 3-7: Röntgenografische Analyse (XRD)-Spektrum für tonhaltige Böden nach HUANG ET AL. (2009)
- Bild 3-8: Faktoren, die zu Unsicherheiten bzw. Fehlern in den mit der LDM-Methode erhaltenen Ergebnissen führen BIEGANOWSKI ET AL. (2018)
- Bild 3-9: Korndichte als Funktion des Glühverlusts nach HERRMANN ET AL. (2014)
- Bild 3-10: Einfluss des organischen Anteils auf die Plastizitätsgrenzen nach ABDALLAH ET AL. (1999)
- Bild 3-11: Beziehung zwischen organischem Gehalt und Fließgrenzverhältnis nach HUANG ET AL. (2009)
- Bild 3-12: (a) Proctorkurve des organogenen Tons (Versuchsdurchführung gemäß DIN 18127 mit zunehmendem Wassergehalt) (b) Proctorkurve des organogenen Tons (Versuchsdurchführung mit abnehmendem Wassergehalt) (BIRLE 2012)
- Bild 3-13: Deviatorische Spannung gegen axiale Dehnung mobilisiert in dräniertes Triaxialer Kompression für aufbereiteten organische Böden nach O'KELLY UND ZHANG (2013)
- Bild 3-14: Reibungswinkel von Mischungen aus Kaolinit und Fasern nach KHATTAK UND DAS (1985)
- Bild 3-15: Diagramm von p-q für (a) Kaolinit (b) 84% Kaolinit gemischt mit 16% Fasern nach KHATTAK UND DAS (1985)
- Bild 3-16: Kriterium zur Ermittlung der Scherparameter basierend auf dem maximalen Verhältnis $(\sigma/\tau')_{\max}$ nach KHATTAK UND DAS (1985)
- Bild 3-17: Vertikale Dehnung, normierter Abwasserausfluss und überhöhter Porendruck im Vergleich zum Logarithmus der Zeit für eine Portage-Torfprobe unter dem ersten Spannungsinkrement nach DHOWIAN UND EDIL (1980)
- Bild 3-18: Log (de/dt) – log t Diagramm nach WILSON ET AL. (1965)
- Bild 3-19: Darstellung der Hypothese A und B (LADD ET AL. 1977)
- Bild 3-20: Isotachenmodell mit Darstellung der a,b,c Parameter (BAGHERPOUR 2016)
- Bild 4-1: Erdfeuchte Ausgangsböden (a) BoSc (b) BoGr (c) NiSt (d) KIBu2
- Bild 4-2: Plastizitätsdiagramm der Böden aus dem Projekt FE 05.0166/2011/ERB
- Bild 4-3: Erdfeuchte Ausgangsböden (a) BoFr (b) BoWo
- Bild 4-4: Plastizitätsdiagramm der Böden – BoFr und BoWo
- Bild 4-5: Wassergehalt bestimmt bei 105° und 60°C für verschiedene Trocknungszeiten für (a) BoSc und BoGr (b) NiSt und KIBu2 (c) BoFr und BoWo
- Bild 4-6: Änderung der Probetrocknenmasse gegenüber der Ofentrocknungstemperatur
- Bild 4-7: Massenreduktion von Böden BoSc (a) und BoGr (b) mit steigender Temperatur von 60°C bis 150°C

- Bild 4-8: Massenreduktion von Böden NiSt (a) und KIBu2 (b) mit steigender Temperatur von 60°C bis 150°C
- Bild 4-9: Massenreduktion von Böden BoFr (a) und BoWo (b) mit steigender Temperatur von 60°C bis 150°C
- Bild 4-10: Glühverlust bestimmt bei 550°C für verschiedene Trocknungszeiten für alle Böden
- Bild 4-11: Glühverlust bestimmt bei Temperaturen zwischen 200°C und 800°C für alle Böden
- Bild 4-12: Ergebnisse der thermogravimetrischen Analyse: thermogravimetrische Kurven TG (durchgezogene Linie) und differentielle thermogravimetrische Kurven DTG (gestrichelte Linien)
- Bild 4-13: XRD-Spektrum des mineralischen Anteils der Versuchsböden BoSc (a), BoGr (b) und NiSt (c)
- Bild 4-14: XRD-Spektrum des mineralischen Anteils der Versuchsböden KIBu2 (a), BoFr (b) und BoWo (c)
- Bild 4-15: Beziehung zwischen TOC und Glühverlust (gemäß den Ergebnissen der chemischen Analyse)
- Bild 4-16: Korngrößenverteilungskurve aus der kombinierten Siebung und Sedimentationsanalyse für (a) gemischtkörnige Böden BoSc und BoGr und (b) feinkörnige Böden NiSt, KIBu2, BoFr und BoWo
- Bild 4-17: Aufschäumen von Sedimentationsanalyseproben von BoWo Boden mit 100 ml Dispergierungsmittel (Natriumpyrophosphat). Bei Zugabe von 25 ml Dispergierungsmittel (Natriumpyrophosphat) wurde kein Aufschäumen beobachtet.
- Bild 4-18: Reaktion von Wasserstoffperoxid mit Boden (a) BoSc (b) NiSt (c) Suspension während der Vorbehandlung mit Wasserstoffperoxid (d) mit Wasserstoffperoxid behandelte Probe nach Trocknung bei 105°C
- Bild 4-19: Korngrößenverteilungen, erhalten durch konventionelle kombinierte Sieb- und Sedimentationsanalysen (KV) und Laserbeugungsmethode (LDM) für Böden (a) BoSc, BoGr (b) NiSt, KIBu2, (c) BoFr, BoWo
- Bild 4-20: Schwimmendes organisches Material während der Kapillaryknometerversuche
- Bild 4-21: Bestimmung der Korndichte mit Kapillaryknometer an getrockneten und feuchten Proben, Gaspyknometer und Luftpyknometer
- Bild 4-22: Wassergehalte an der Fließgrenze, bestimmt mit der Fallkegel- und der Casagrande-Methode
- Bild 4-23: Verdichtungseigenschaften von Boden BoSc (a), Boden BoGr (b) und Boden KIBu2 (c).
- Bild 4-24: Einbaubedingungen und Zusammenhang zwischen Normalspannung und Scherspannung für die Böden BoSc (a) BoGr (b) und KIBu2 (c)
- Bild 4-25: Einbaubedingungen (a), Spannungspfade (b), Deviatorspannungs-Dehnungs-Diagramm (c) und Porenwasserüberdruck-Dehnungs-Diagramm des CU-Versuchs am Boden BoSc
- Bild 4-26: Einbaubedingungen (a), Spannungspfade (b), Deviatorspannungs-Dehnungs-Diagramm (c) und Porenwasserüberdruck-Dehnungs-Diagramm des CU-Versuchs am Boden BoGr
- Bild 4-27: Einbaubedingungen (a), Spannungspfade (b), Deviatorspannungs-Dehnungs-Diagramm (c) und Porenwasserüberdrucks-Dehnungs-Diagramm des CU-Versuchs am Boden KIBu2
- Bild 4-28: Vergleich zwischen den Einbaubedingungen und den Spannungspfaden im CU-Triaxialversuch an den Böden BoSc (a) BoGr (b) und KIBu2 (c) aus den Forschungsvorhaben FE 05.0166/2011/ERB und FE 05.0204/2018/CGB
- Bild 4-29: Schematische Darstellung des Doppelzellen-Triaxialsystems
- Bild 4-30: Einbaubedingungen, Spannungspfade und Deviatorspannungs-Dehnungs-Diagramm beim CD-Versuch am Boden BoSc

- Bild 4-31: Einbaubedingungen, Spannungspfade und Deviatorspannungs-Dehnungs-Diagramm beim CD-Versuch am Boden BoGr
- Bild 4-32: Einbaubedingungen, Spannungspfade und Deviatorspannungs-Dehnungs-Diagramm beim CD-Versuch am Boden KIBu2
- Bild 4-33: Bestimmung der Querdehnzahl v_{50} und des Dilatanzwinkels ψ aus dem $\varepsilon_{1\varepsilon-v}$ -Diagramm
- Bild 4-34: Einbaubedingungen und s^t -t-Diagramm für CU- und CD-Versuche an den Böden BoSc (a), BoGr (b) und KIBu2 (c)
- Bild 4-35: Einbaubedingungen und Ergebnisse der einaxialen Druckversuche an den Böden BoSc (a, b) und KIBu2 (c, d)
- Bild 4-36: Spannungs-Zusammendrückungs-Diagramme (a), Spannungs-Porenzahl-Diagramme (b) der untersuchten Böden
- Bild 4-37: Zeit-Stauchungs-Diagramme der untersuchten Böden BoSc (a) BoGr (b) KIBu2 (c)
- Bild 4-38: Abhängigkeit der Porenzahl von der Zeit für den Boden BoSc und exemplarische Bestimmung des Kriechbeiwertes $C_\alpha(a)$ sowie Abhängigkeit zwischen C_α und σ_v' für die Böden BoSc, BoGr, KIBu2 (b)
- Bild 4-39: Schematische Darstellung des Versuchszustandes zur Durchführung von gesättigten Kompressionsversuchen mit Erfassung der Porenwasserdruckentwicklung
- Bild 4-40: Darstellung des Zusammenhangs zwischen effektiver Vertikalspannung und Zusammendrückung (a) sowie zwischen effektiver Vertikalspannung und Porenzahl (halblogarithmische Darstellung) (b) für die Böden BoSc, BoGr und KIBu2
- Bild 4-41: Zeitliche Entwicklung der Stauchungen bei verschiedenen Laststufen für den Boden BoSc (a), BoGr (b) und KIBu2 (c)
- Bild 4-42: Zeitliche Entwicklung der Porenwasserüberdrücke und der Axialverformungen bei verschiedenen Laststufen für die Böden BoSc (a), BoGr (b) und KIBu2 (c)
- Bild 4-43: Zeitabhängiges Verformungsverhalten des Bodens BoSc unter einer Spannung von 400 kPa mit Darstellung der primären (v_p), sekundären (v_s) und tertiären (v_t) Verformungen
- Bild 4-44: Verformungs-Zeit-Diagramm und Bestimmung des Zeitpunktes t_s (Ende der Sekundärkompression) für die Böden BoSc (a), BoGr (b) und KIBu2 (c)
- Bild 4-45: Änderung der Porenzahl bei der Entlastung
- Bild 4-46: zeitabhängiger Verlauf der bezogenen Setzungen für die Böden BoSc (a), BoGr (b) und KIBu2 (c) während der 1. Entlastungsphasen
- Bild 4-47: Isotachen für Boden BoSc
- Bild 4-48: Isotachen für Boden BoGr
- Bild 4-49: Isotachen für Boden KIBu2
- Bild 4-50: Spannungs-Zusammendrückungs-Diagramm (a), Spannungs-Porenzahl-Diagramm (b) und Zeit-Stauchungs-Diagramme der untersuchten Böden im teilgesättigten Zustand
- Bild 4-51: Zeit-Stauchungs-Diagramme der untersuchten Böden BoSc (a) BoGr (b) KIBu2 (c), untersucht im teilgesättigten Zustand
- Bild 4-52: Schematische Darstellung des Saugspannungs-kontrollierten Versuchszustandes (BIRLE 2012)
- Bild 4-53: Darstellung von Vertikalspannung σ_v , Saugspannung u_a-u_w und Stauchung bei den Saugspannungs-kontrollierten Oedometerversuchen an den Böden BoSc (a), BoGr(b) und KIBu2 (c)
- Bild 4-54: Beziehung zwischen Saugspannung und grav. Wassergehalt (a) bzw. Sättigungsgrad (b), Saugspannung und Porenzahl (c) sowie Zeit und Zusammendrückung (d) für den Boden BoSc.
- Bild 4-55: Beziehung zwischen Saugspannung und grav. Wassergehalt (a) bzw. Sättigungsgrad (b), Saugspannung und Porenzahl (c) sowie Zeit und Zusammendrückung (d) für den Boden BoGr

Bild 4-56: Beziehung zwischen Saugspannung und grav. Wassergehalt (a) bzw. Sättigungsgrad (b), Saugspannung und Porenzahl (c) sowie Zeit und Zusammendrückung (d – erster Versuch) und (e - Wiederholungsversuch) für den Boden KIBu2.

Bild 4-57: Zusammenhang zwischen Vertikalspannungen bzw. Saugspannungen und Porenzahl unter gesättigten und teilgesättigten Zuständen für die Böden BoSc (a), BoGr (b) und KIBu2 (c).

Bild 4-58: Abhängigkeit der Wasserdurchlässigkeit vom Differenzdruck für die Böden BoSc, BoGr und KIBu2

Anhang

A.1 Klassifizierende Versuche an den Ausgangsböden

- a) Boden BoSc
- b) Boden BoGr
- c) Boden NiSt
- d) Boden KIBu2
- e) Boden BoFr
- f) Boden BoWo

A.2 Einzelergebnisse der Scherversuche

- A2.1 Rahmenscherversuch Boden BoSc
- A2.2 Rahmenscherversuch Boden BoGr
- A2.3 Rahmenscherversuch Boden KIBu2
- A2.4 Triaxialversuch CU am Boden BoSc
- A2.5 Triaxversuch CU am Boden BoGr
- A2.6 Triaxversuch CU am Boden KIBu2
- A2.7 Triaxialversuch CD am Boden BoSc
- A2.8 Triaxialversuch CD am Boden BoGr
- A2.9 Triaxversuch CD am Boden KIBu2

A.3 Einzelergebnisse der Ödometerversuche

- A3.1 Gesättigte Oedometerversuche am Boden BoSc
- A3.2 Gesättigte Oedometerversuche am Boden BoGr
- A3.3 Gesättigte Oedometerversuche am Boden KIBu2
- A3.4 Teilgesättigte Oedometerversuche am Boden BoSc
- A3.5 Teilgesättigte Oedometerversuche am Boden BoGr
- A3.6 Teilgesättigte Oedometerversuche am Boden KIBu2

A.1 Klassifizierende Versuche an den Ausgangsböden

a) Boden BoSc

Kurzbezeichnung:	BoSc																																											
Herkunft	Berlin Schwanebeck (Landkreis Barnim)																																											
Wassergehalt	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Kennwert</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">w [%] bei 105°C</td> <td>100,69</td> <td>103,95</td> <td>103,74</td> <td>124,57</td> <td>nach 22 Std</td> </tr> <tr> <td>100,76</td> <td>104,03</td> <td>103,76</td> <td>124,68</td> <td>nach 26 Std</td> </tr> <tr> <td>100,84</td> <td>104,05</td> <td>103,82</td> <td>124,75</td> <td>nach 47 Std</td> </tr> <tr> <td rowspan="4">w [%] bei 60 °C</td> <td>71,94</td> <td>38,24</td> <td>48,82</td> <td>21,1</td> <td>nach 22 Std</td> </tr> <tr> <td>95,06</td> <td>89,59</td> <td>97,38</td> <td>58,05</td> <td>nach 47 Std</td> </tr> <tr> <td>96,69</td> <td>100,86</td> <td>99,32</td> <td>118,17</td> <td>nach 72 Std</td> </tr> <tr> <td>97,28</td> <td>101,54</td> <td>99,92</td> <td>124,35</td> <td>nach 142 Std</td> </tr> </tbody> </table>	Kennwert	1	2	3	4		w [%] bei 105°C	100,69	103,95	103,74	124,57	nach 22 Std	100,76	104,03	103,76	124,68	nach 26 Std	100,84	104,05	103,82	124,75	nach 47 Std	w [%] bei 60 °C	71,94	38,24	48,82	21,1	nach 22 Std	95,06	89,59	97,38	58,05	nach 47 Std	96,69	100,86	99,32	118,17	nach 72 Std	97,28	101,54	99,92	124,35	nach 142 Std
Kennwert	1	2	3	4																																								
w [%] bei 105°C	100,69	103,95	103,74	124,57	nach 22 Std																																							
	100,76	104,03	103,76	124,68	nach 26 Std																																							
	100,84	104,05	103,82	124,75	nach 47 Std																																							
w [%] bei 60 °C	71,94	38,24	48,82	21,1	nach 22 Std																																							
	95,06	89,59	97,38	58,05	nach 47 Std																																							
	96,69	100,86	99,32	118,17	nach 72 Std																																							
	97,28	101,54	99,92	124,35	nach 142 Std																																							
Plastische Eigenschaften am Anteil < 0,4mm [DIN 18122]	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Kennwert</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>MW</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>WL [%]</td> <td>125</td> <td>119,8</td> <td>137,4</td> <td>144,3*</td> <td>131,6</td> </tr> <tr> <td>WP [%]</td> <td>59,1</td> <td>63,3</td> <td>48,6</td> <td>51,9</td> <td>54,0</td> </tr> <tr> <td>IP [%]</td> <td>65,9</td> <td>63,3</td> <td>88,8</td> <td>92,4</td> <td>77,6</td> </tr> </tbody> </table> <p>*Anmerkung: Die Fließgrenze wurde durch die Verringerung des Wassergehalts bestimmt.</p>	Kennwert	1	2	3	4	MW	WL [%]	125	119,8	137,4	144,3*	131,6	WP [%]	59,1	63,3	48,6	51,9	54,0	IP [%]	65,9	63,3	88,8	92,4	77,6																			
Kennwert	1	2	3	4	MW																																							
WL [%]	125	119,8	137,4	144,3*	131,6																																							
WP [%]	59,1	63,3	48,6	51,9	54,0																																							
IP [%]	65,9	63,3	88,8	92,4	77,6																																							
Korndichte [DIN 17892-3]	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Kennwert</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>MW</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ρ_s [g/cm³]</td> <td>2,255</td> <td>2,275</td> <td>2,256</td> <td>2,280</td> <td>2,266</td> </tr> </tbody> </table>	Kennwert	1	2	3	4	MW	ρ_s [g/cm ³]	2,255	2,275	2,256	2,280	2,266																															
Kennwert	1	2	3	4	MW																																							
ρ_s [g/cm ³]	2,255	2,275	2,256	2,280	2,266																																							
Glühverlust [DIN 18128-12]	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Kennwert</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>MW</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>V_{GI} [%]</td> <td>21,0</td> <td>18,8</td> <td>19,8</td> <td>18,1</td> <td>19,4</td> </tr> </tbody> </table> <p>Anmerkung: Mindestens 3 Einzelproben je Versuch</p>	Kennwert	1	2	3	4	MW	V _{GI} [%]	21,0	18,8	19,8	18,1	19,4																															
Kennwert	1	2	3	4	MW																																							
V _{GI} [%]	21,0	18,8	19,8	18,1	19,4																																							
Sieblinie [DIN 18123]																																												
Interne Bezeichnung der Probe	84992																																											

b) Boden BoGr

Kurzbezeichnung:	BoGr																																											
Herkunft	Grüneberg (Landkreis Oberhavel)																																											
Wassergehalt	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Kennwert</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">w [%] bei 105°C</td> <td>109,29</td> <td>101,74</td> <td>105,78</td> <td>106,22</td> <td>nach 22 Std</td> </tr> <tr> <td>109,46</td> <td>-</td> <td>-</td> <td></td> <td>nach 26 Std</td> </tr> <tr> <td>109,71</td> <td>101,96</td> <td>106,02</td> <td>106,22</td> <td>nach 47 Std</td> </tr> <tr> <td rowspan="4">w [%] bei 60 °C</td> <td>45,75</td> <td>31,75</td> <td>35,53</td> <td>37,78</td> <td>nach 22 Std</td> </tr> <tr> <td>93,69</td> <td>76,78</td> <td>80,43</td> <td>94,32</td> <td>nach 47 Std</td> </tr> <tr> <td>103,17</td> <td>102,73</td> <td>101,47</td> <td>102,35</td> <td>nach 72 Std</td> </tr> <tr> <td>104,13</td> <td>103,81</td> <td>102,66</td> <td>103,37</td> <td>nach 142 Std</td> </tr> </tbody> </table>	Kennwert	1	2	3	4		w [%] bei 105°C	109,29	101,74	105,78	106,22	nach 22 Std	109,46	-	-		nach 26 Std	109,71	101,96	106,02	106,22	nach 47 Std	w [%] bei 60 °C	45,75	31,75	35,53	37,78	nach 22 Std	93,69	76,78	80,43	94,32	nach 47 Std	103,17	102,73	101,47	102,35	nach 72 Std	104,13	103,81	102,66	103,37	nach 142 Std
Kennwert	1	2	3	4																																								
w [%] bei 105°C	109,29	101,74	105,78	106,22	nach 22 Std																																							
	109,46	-	-		nach 26 Std																																							
	109,71	101,96	106,02	106,22	nach 47 Std																																							
w [%] bei 60 °C	45,75	31,75	35,53	37,78	nach 22 Std																																							
	93,69	76,78	80,43	94,32	nach 47 Std																																							
	103,17	102,73	101,47	102,35	nach 72 Std																																							
	104,13	103,81	102,66	103,37	nach 142 Std																																							
Plastische Eigenschaften am Anteil < 0,4mm [DIN 18122]	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Kennwert</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>MW</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>w_L [%]</td> <td>164,6</td> <td>161,1</td> <td>167,5</td> <td>160,1*</td> <td>163,62</td> </tr> <tr> <td>w_P [%]</td> <td>66</td> <td>83,5</td> <td>88,2</td> <td>82,1</td> <td>79,95</td> </tr> <tr> <td>I_P [%]</td> <td>98,6</td> <td>77,6</td> <td>79,3</td> <td>78</td> <td>83,37</td> </tr> </tbody> </table> <p>*Anmerkung: Die Fließgrenze wurde durch die Verringerung des Wassergehalts bestimmt.</p>	Kennwert	1	2	3	4	MW	w _L [%]	164,6	161,1	167,5	160,1*	163,62	w _P [%]	66	83,5	88,2	82,1	79,95	I _P [%]	98,6	77,6	79,3	78	83,37																			
Kennwert	1	2	3	4	MW																																							
w _L [%]	164,6	161,1	167,5	160,1*	163,62																																							
w _P [%]	66	83,5	88,2	82,1	79,95																																							
I _P [%]	98,6	77,6	79,3	78	83,37																																							
Korndichte [DIN 17892-3]	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Kennwert</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>MW</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ρ_s [g/cm³]</td> <td>2,274</td> <td>2,273</td> <td>2,270</td> <td>2,279</td> <td>2,274</td> </tr> </tbody> </table>	Kennwert	1	2	3	4	MW	ρ _s [g/cm ³]	2,274	2,273	2,270	2,279	2,274																															
Kennwert	1	2	3	4	MW																																							
ρ _s [g/cm ³]	2,274	2,273	2,270	2,279	2,274																																							
Glühverlust [DIN 18128-12]	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Kennwert</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>MW</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>V_{Gl} [%]</td> <td>25,09</td> <td>23,36</td> <td>25,20</td> <td>23,56</td> <td>24,30</td> </tr> </tbody> </table> <p>Anmerkung: Mindestens 3 Einzelproben je Versuch</p>	Kennwert	1	2	3	4	MW	V _{Gl} [%]	25,09	23,36	25,20	23,56	24,30																															
Kennwert	1	2	3	4	MW																																							
V _{Gl} [%]	25,09	23,36	25,20	23,56	24,30																																							
Sieblinie [DIN 18123]																																												
Interne Bezeichnung der Probe	84993																																											

c) Boden NiSt

Kurzbezeichnung:	NiSt																																																	
Herkunft	Straubing (Landkreis Straubing-Bogen)																																																	
Wassergehalt	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Kennwert</th> <th>1</th> <th></th> <th></th> <th></th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>w [%] bei 105°C</td> <td>89,58</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>nach 24 Std</td> </tr> <tr> <td rowspan="6">w [%] bei 60 °C</td> <td>30,62</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>nach 24 Std</td> </tr> <tr> <td>71,90</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>nach 48 Std</td> </tr> <tr> <td>84,94</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>nach 72 Std</td> </tr> <tr> <td>85,30</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>nach 96 Std</td> </tr> <tr> <td>85,56</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>nach 168 Std</td> </tr> <tr> <td>85,69</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>nach 192 Std</td> </tr> <tr> <td></td> <td>89,96*</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>nach 216 Std</td> </tr> </tbody> </table> <p>Anmerkung: * wassergehalt bestimmt durch trocknung bei 105°C für 24 Stunden</p>	Kennwert	1					w [%] bei 105°C	89,58				nach 24 Std	w [%] bei 60 °C	30,62				nach 24 Std	71,90				nach 48 Std	84,94				nach 72 Std	85,30				nach 96 Std	85,56				nach 168 Std	85,69				nach 192 Std		89,96*				nach 216 Std
Kennwert	1																																																	
w [%] bei 105°C	89,58				nach 24 Std																																													
w [%] bei 60 °C	30,62				nach 24 Std																																													
	71,90				nach 48 Std																																													
	84,94				nach 72 Std																																													
	85,30				nach 96 Std																																													
	85,56				nach 168 Std																																													
	85,69				nach 192 Std																																													
	89,96*				nach 216 Std																																													
Plastische Eigenschaften am Anteil < 0,4mm [DIN 18122]	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Kennwert</th> <th>1</th> <th></th> <th></th> <th></th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>w_L [%]</td> <td>149</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>w_P [%]</td> <td>78,1</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>I_P [%]</td> <td>70,9</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Kennwert	1					w _L [%]	149					w _P [%]	78,1					I _P [%]	70,9																													
Kennwert	1																																																	
w _L [%]	149																																																	
w _P [%]	78,1																																																	
I _P [%]	70,9																																																	
Korndichte [DIN 17892-3]	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Kennwert</th> <th>1</th> <th></th> <th></th> <th></th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ρ_s [g/cm³]</td> <td>2,176</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Kennwert	1					ρ _s [g/cm ³]	2,176																																									
Kennwert	1																																																	
ρ _s [g/cm ³]	2,176																																																	
Glühverlust [DIN 18128-12]	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Kennwert</th> <th>1</th> <th></th> <th></th> <th></th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>V_{GI} [%]</td> <td>25,96</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>Anmerkung: Mindestens 3 Einzelproben je Versuch</p>	Kennwert	1					V _{GI} [%]	25,96																																									
Kennwert	1																																																	
V _{GI} [%]	25,96																																																	
Sieblinie [DIN 18123]	<table border="1"> <caption>Approximate data points from the sieve analysis graph</caption> <thead> <tr> <th>Korndurchmesser [mm]</th> <th>Massenanteil [%]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0,002</td><td>5</td></tr> <tr><td>0,006</td><td>20</td></tr> <tr><td>0,02</td><td>50</td></tr> <tr><td>0,06</td><td>70</td></tr> <tr><td>0,2</td><td>75</td></tr> <tr><td>0,63</td><td>88</td></tr> <tr><td>2</td><td>92</td></tr> <tr><td>6,3</td><td>95</td></tr> <tr><td>20</td><td>98</td></tr> <tr><td>63</td><td>100</td></tr> <tr><td>100</td><td>100</td></tr> </tbody> </table>	Korndurchmesser [mm]	Massenanteil [%]	0,002	5	0,006	20	0,02	50	0,06	70	0,2	75	0,63	88	2	92	6,3	95	20	98	63	100	100	100																									
Korndurchmesser [mm]	Massenanteil [%]																																																	
0,002	5																																																	
0,006	20																																																	
0,02	50																																																	
0,06	70																																																	
0,2	75																																																	
0,63	88																																																	
2	92																																																	
6,3	95																																																	
20	98																																																	
63	100																																																	
100	100																																																	
Interne Bezeichnung der Probe	85053																																																	

d) Boden KIBu2

Kurzbezeichnung:	KIBu2																																																	
Herkunft	Buxtehude (Landkreis Stade)																																																	
Wassergehalt	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Kennwert</th> <th>1</th> <th>2</th> <th></th> <th></th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>w [%] bei 105°C</td> <td>139,26</td> <td>136,16</td> <td></td> <td></td> <td>nach 24 Std</td> </tr> <tr> <td rowspan="6">w [%] bei 60 °C</td> <td>30,78</td> <td>36,21</td> <td></td> <td></td> <td>nach 24 Std</td> </tr> <tr> <td>114,54</td> <td>91,83</td> <td></td> <td></td> <td>nach 48 Std</td> </tr> <tr> <td>130,88</td> <td>130,29</td> <td></td> <td></td> <td>nach 72 Std</td> </tr> <tr> <td>131,74</td> <td>131,53</td> <td></td> <td></td> <td>nach 96 Std</td> </tr> <tr> <td>131,62</td> <td>131,98</td> <td></td> <td></td> <td>nach 168 Std</td> </tr> <tr> <td>131,62</td> <td>131,68</td> <td></td> <td></td> <td>nach 192 Std</td> </tr> <tr> <td></td> <td>136,71*</td> <td>136,50*</td> <td></td> <td></td> <td>nach 216 Std</td> </tr> </tbody> </table> <p>Anmerkung: * wassergehalt bestimmt durch trocknung bei 105°C für 24 Stunden</p>	Kennwert	1	2				w [%] bei 105°C	139,26	136,16			nach 24 Std	w [%] bei 60 °C	30,78	36,21			nach 24 Std	114,54	91,83			nach 48 Std	130,88	130,29			nach 72 Std	131,74	131,53			nach 96 Std	131,62	131,98			nach 168 Std	131,62	131,68			nach 192 Std		136,71*	136,50*			nach 216 Std
Kennwert	1	2																																																
w [%] bei 105°C	139,26	136,16			nach 24 Std																																													
w [%] bei 60 °C	30,78	36,21			nach 24 Std																																													
	114,54	91,83			nach 48 Std																																													
	130,88	130,29			nach 72 Std																																													
	131,74	131,53			nach 96 Std																																													
	131,62	131,98			nach 168 Std																																													
	131,62	131,68			nach 192 Std																																													
	136,71*	136,50*			nach 216 Std																																													
Plastische Eigenschaften am Anteil < 0,4mm [DIN 18122]	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Kennwert</th> <th>1</th> <th>2</th> <th></th> <th></th> <th>MW</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>w_L [%]</td> <td>139</td> <td>132,4</td> <td></td> <td></td> <td>135,7</td> </tr> <tr> <td>w_P [%]</td> <td>60,4</td> <td>53,8</td> <td></td> <td></td> <td>57,1</td> </tr> <tr> <td>I_P [%]</td> <td>78,6</td> <td>78,6</td> <td></td> <td></td> <td>78,6</td> </tr> </tbody> </table>	Kennwert	1	2			MW	w _L [%]	139	132,4			135,7	w _P [%]	60,4	53,8			57,1	I _P [%]	78,6	78,6			78,6																									
Kennwert	1	2			MW																																													
w _L [%]	139	132,4			135,7																																													
w _P [%]	60,4	53,8			57,1																																													
I _P [%]	78,6	78,6			78,6																																													
Korndichte [DIN 17892-3]	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Kennwert</th> <th>1</th> <th>2</th> <th></th> <th></th> <th>MW</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ρ_s [g/cm³]</td> <td>2,258</td> <td>2,305</td> <td></td> <td></td> <td>2,282</td> </tr> </tbody> </table>	Kennwert	1	2			MW	ρ _s [g/cm ³]	2,258	2,305			2,282																																					
Kennwert	1	2			MW																																													
ρ _s [g/cm ³]	2,258	2,305			2,282																																													
Glühverlust [DIN 18128-12]	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Kennwert</th> <th>1</th> <th>2</th> <th></th> <th></th> <th>MW</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>V_{GI} [%]</td> <td>19,03</td> <td>16,81</td> <td></td> <td></td> <td>17,92</td> </tr> </tbody> </table> <p>Anmerkung: Mindestens 3 Einzelproben je Versuch</p>	Kennwert	1	2			MW	V _{GI} [%]	19,03	16,81			17,92																																					
Kennwert	1	2			MW																																													
V _{GI} [%]	19,03	16,81			17,92																																													
Sieblinie [DIN 18123]																																																		
Interne Bezeichnung der Probe	85054																																																	

e) Boden BoFr

Kurzbezeichnung:	BoFr																								
Herkunft	Freising																								
Wassergehalt [DIN 17892-1]	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Kennwert</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>MW</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>w [%] bei 105°C</td> <td>84,49</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Kennwert	1	2	3	4	MW	w [%] bei 105°C	84,49																
Kennwert	1	2	3	4	MW																				
w [%] bei 105°C	84,49																								
Plastische Eigenschaften am Anteil < 0,4mm [DIN 17892-12]	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Kennwert</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>MW</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>w_L [%]</td> <td>174,40</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>w_P [%]</td> <td>102,40</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>I_P [%]</td> <td>71,90</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Kennwert	1	2	3	4	MW	w _L [%]	174,40					w _P [%]	102,40					I _P [%]	71,90				
Kennwert	1	2	3	4	MW																				
w _L [%]	174,40																								
w _P [%]	102,40																								
I _P [%]	71,90																								
Korndichte [DIN 17892-3]	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Kennwert</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>MW</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ρ_s [g/cm³]</td> <td>2,21</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Kennwert	1	2	3	4	MW	ρ _s [g/cm ³]	2,21																
Kennwert	1	2	3	4	MW																				
ρ _s [g/cm ³]	2,21																								
Glühverlust [DIN 18128-12]	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Kennwert</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>MW</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>V_{Gl} [%]</td> <td>33,12</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>Anmerkung: Mindestens 3 Einzelproben je Versuch</p>	Kennwert	1	2	3	4	MW	V _{Gl} [%]	33,12																
Kennwert	1	2	3	4	MW																				
V _{Gl} [%]	33,12																								
Sieblinie [DIN 18123]]	<p>The graph shows the mass percentage of soil particles versus their diameter in millimeters. The x-axis is logarithmic, ranging from 0,001 mm to 100 mm. The y-axis is linear, ranging from 0% to 100%. The curve starts at approximately 20% for 0,002 mm and rises to about 85% at 0,075 mm. It then continues to rise more gradually, reaching 100% at approximately 0,425 mm. The soil is classified into 'Ton' (Clay) for diameters < 0,063 mm, 'Schluff' (Silt) for 0,063 to 0,25 mm, 'Sand' for 0,25 to 2 mm, 'Kies' (Gravel) for 2 to 63 mm, and 'Steine' (Stones) for > 63 mm. The curve is labeled 'BoFr, Original'.</p>																								
Interne Bezeichnung der Probe	85914																								

f) Boden BoWo

Kurzbezeichnung:	BoWo																								
Herkunft	Wollin																								
Wassergehalt [DIN 17892-1]	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Kennwert</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>MW</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>w [%] bei 105°C</td> <td>56,24</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Kennwert	1	2	3	4	MW	w [%] bei 105°C	56,24																
Kennwert	1	2	3	4	MW																				
w [%] bei 105°C	56,24																								
Plastische Eigenschaften am Anteil < 0,4mm [DIN 17892-12]	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Kennwert</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>MW</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>w_L [%]</td> <td>129,10</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>w_P [%]</td> <td>64,30</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>I_P [%]</td> <td>64,70</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Kennwert	1	2	3	4	MW	w _L [%]	129,10					w _P [%]	64,30					I _P [%]	64,70				
Kennwert	1	2	3	4	MW																				
w _L [%]	129,10																								
w _P [%]	64,30																								
I _P [%]	64,70																								
Korndichte [DIN 17892-3]	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Kennwert</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>MW</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ρ_s [g/cm³]</td> <td>2,29</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Kennwert	1	2	3	4	MW	ρ _s [g/cm ³]	2,29																
Kennwert	1	2	3	4	MW																				
ρ _s [g/cm ³]	2,29																								
Glühverlust [DIN 18128-12]	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Kennwert</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>MW</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>V_{Gl} [%]</td> <td>24,76</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>Anmerkung: Mindestens 3 Einzelproben je Versuch</p>	Kennwert	1	2	3	4	MW	V _{Gl} [%]	24,76																
Kennwert	1	2	3	4	MW																				
V _{Gl} [%]	24,76																								
Sieblinie [DIN 18123]]																									
Interne Bezeichnung der Probe	86194																								

A.2 Einzelergebnisse der Scherversuche

Rahmenscherversuche Boden BoSc
Rahmenscherversuche Boden BoGr
Rahmenscherversuche Boden KIBu2

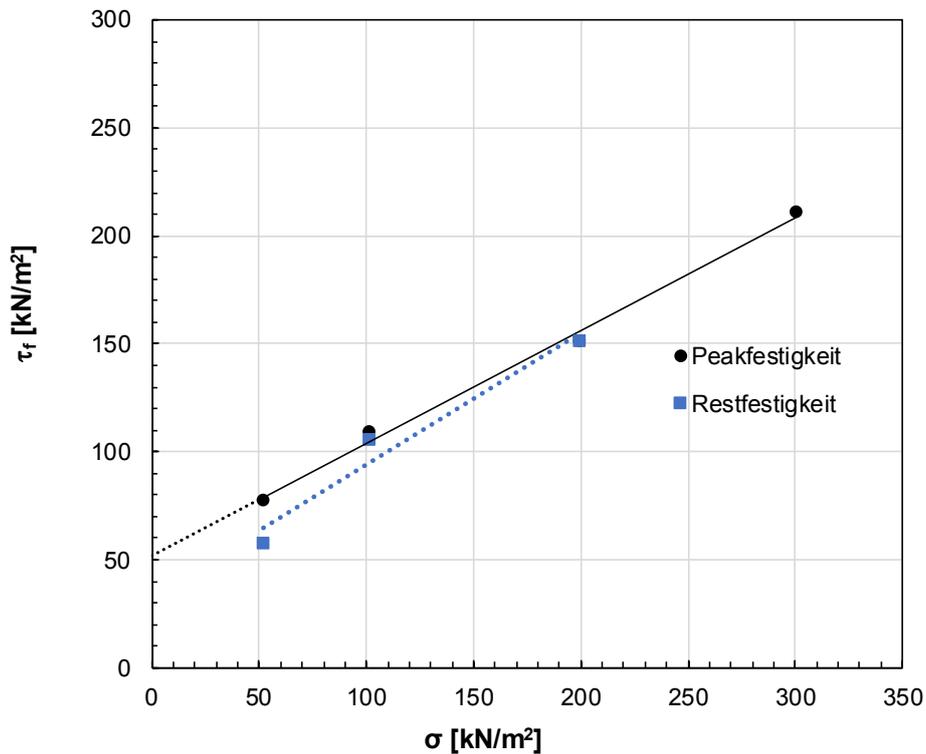
CU-Versuche Boden BoSc
CU-Versuche Boden BoGr
CU-Versuche Boden KIBu2

CD-Versuche Boden BoSc
CD-Versuche Boden BoGr
CD-Versuche Boden KIBu2

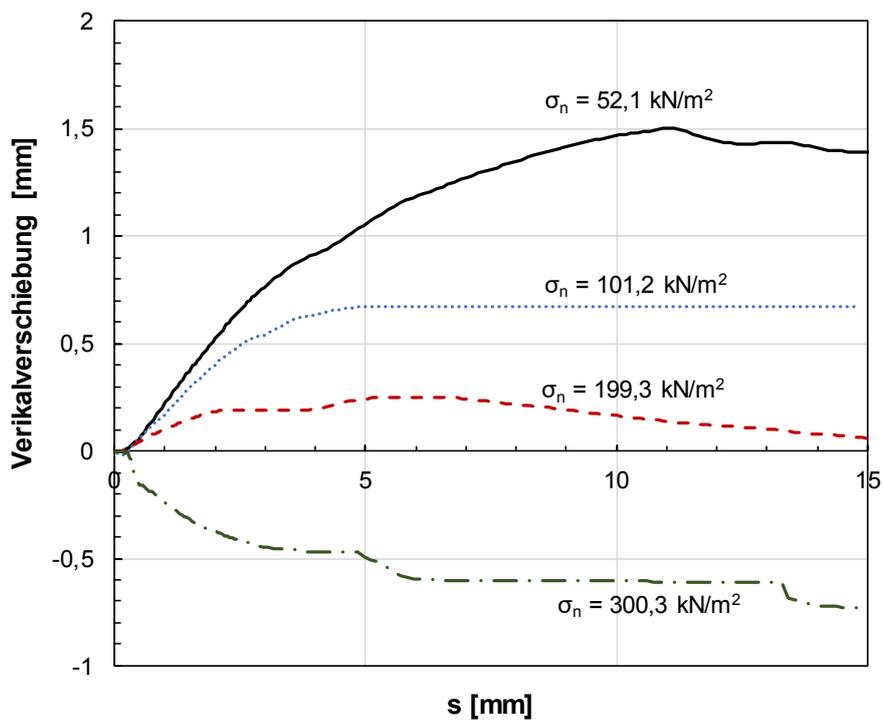
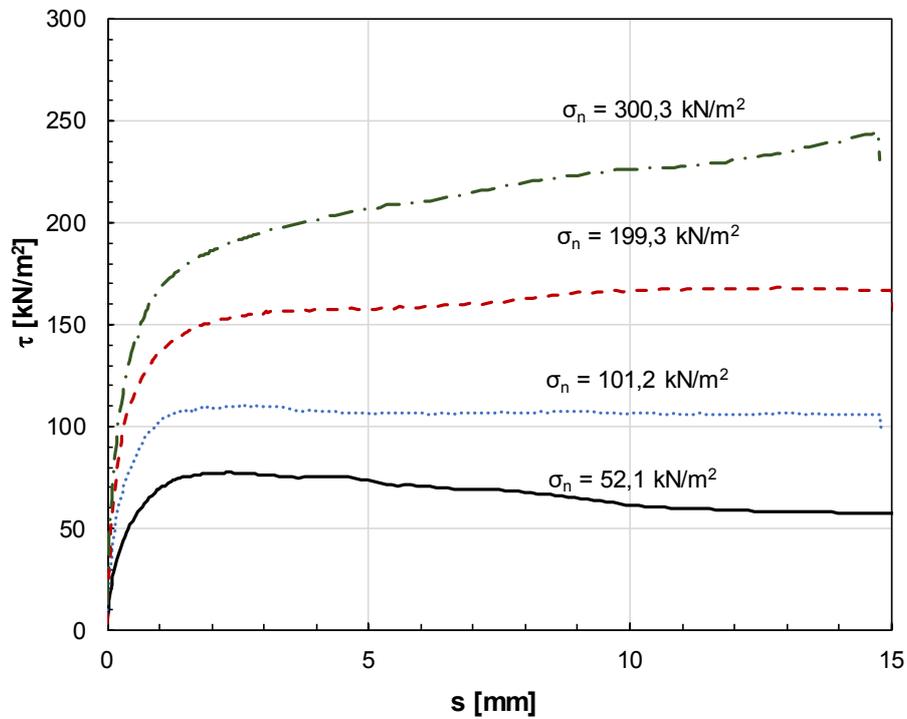
A2.1 Rahmenscherversuch Boden BoSc

Kurzbezeichnung:	BoSc
Herkunft	Berlin Schwanebeck (Landkreis Barnim)
Interne Bezeichnung der Probe	84992

Einzelversuch	Probe		1	2	3	4
Probenlänge	BoSc	l [mm]	100,00			
Probenbreite		b [mm]	100,00			
Probenhöhe		h [mm]	30,00			
Korndichte		ρ_s [g/cm ³]	2,24			
Anfangswassergehalt		w_a [%]	56,47	57,80	55,77	56,71
Endwassergehalt		w_e [%]	54,99	51,46	46,36	43,48
Anfangsdichte		ρ_d [g/cm ³]	0,88	0,87	0,88	0,88
Anfangsporenzahl		e_0 [-]	1,54	1,55	1,52	1,54
Vorkonsolidierungsspannung		σ_m [kN/m ²]	500			
Konsolidierungsspannung		σ_c [kN/m ²]	52,20	101,20	199,30	302,30



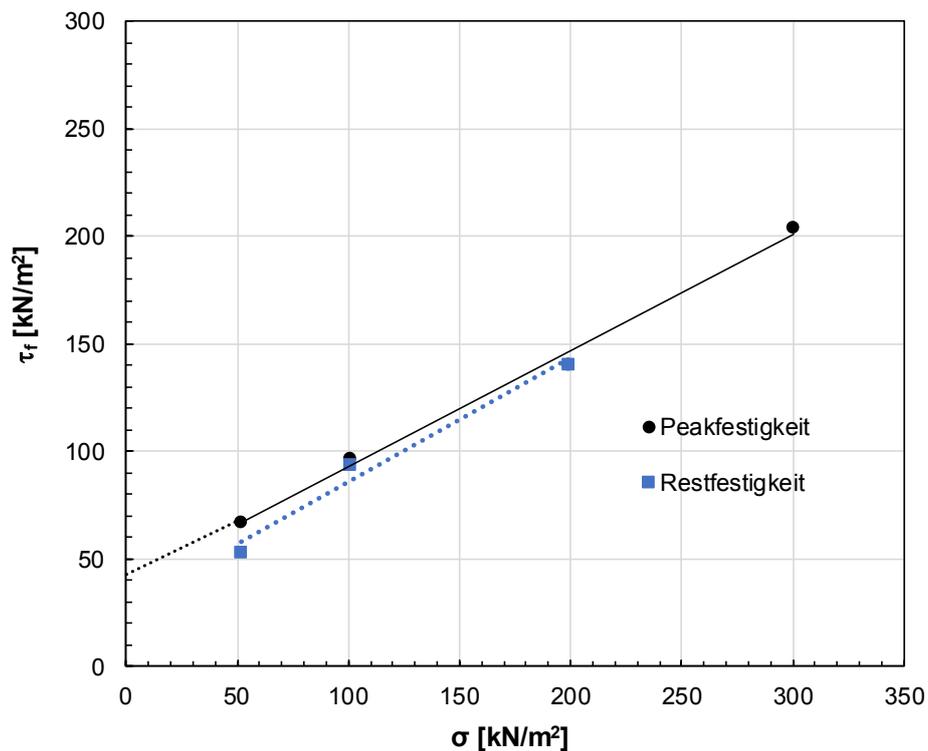
Kurzbezeichnung:	BoSc
Herkunft	Berlin Schwanebeck (Landkreis Barnim)
Interne Bezeichnung der Probe	84992



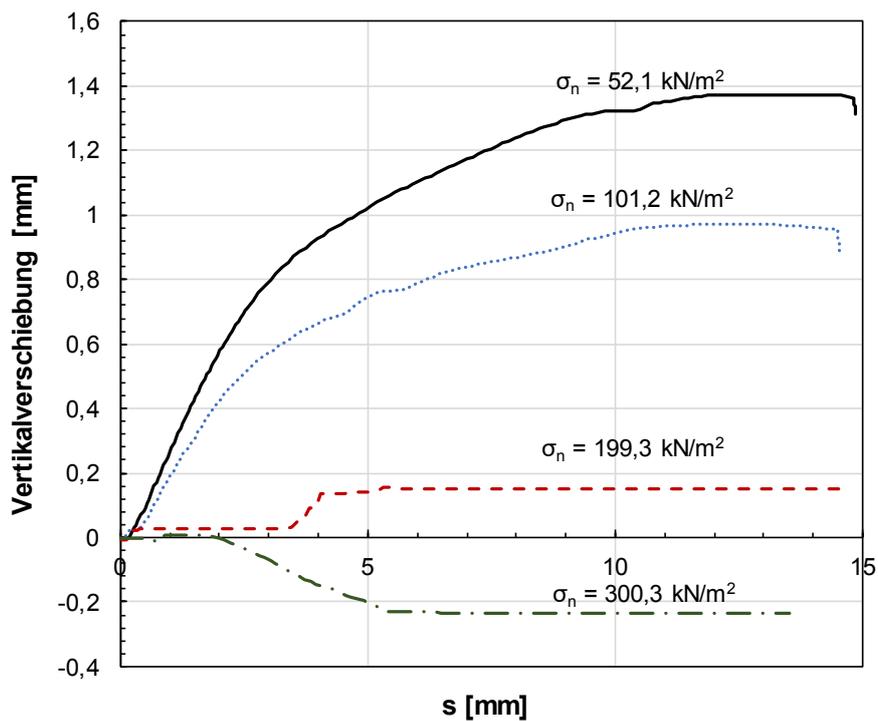
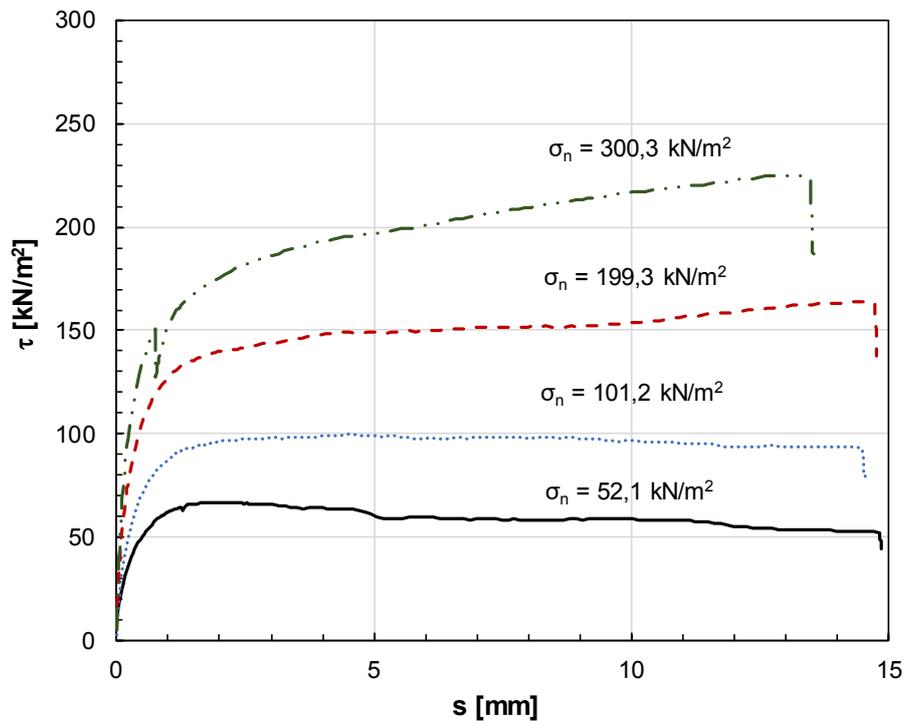
A2.2 Rahmenscherversuch Boden BoGr

Kurzbezeichnung:	BoGr
Herkunft	Grüneberg (Landkreis Oberhavel)
Interne Bezeichnung der Probe	84993

Einzelversuch	Probe		1	2	3	4
Probenlänge	BoGr	l [mm]	100,00			
Probenbreite		b [mm]	100,00			
Probenhöhe		h [mm]	30,00			
Korndichte		ρ_s [g/cm ³]	2,18			
Anfangswassergehalt		w_a [%]	59,49	59,93	60,23	59,89
Endwassergehalt		w_e [%]	55,19	54,12	52,74	49,19
Anfangsdichte		ρ_d [g/cm ³]	0,88	0,88	0,87	0,88
Anfangsporenzahl		e_0 [-]	0,60	0,60	0,60	0,60
Vorkonsolidierungsspannung		σ_m [kN/m ²]	500			
Konsolidierungsspannung		σ_c [kN/m ²]	52,20	101,20	199,30	302,30



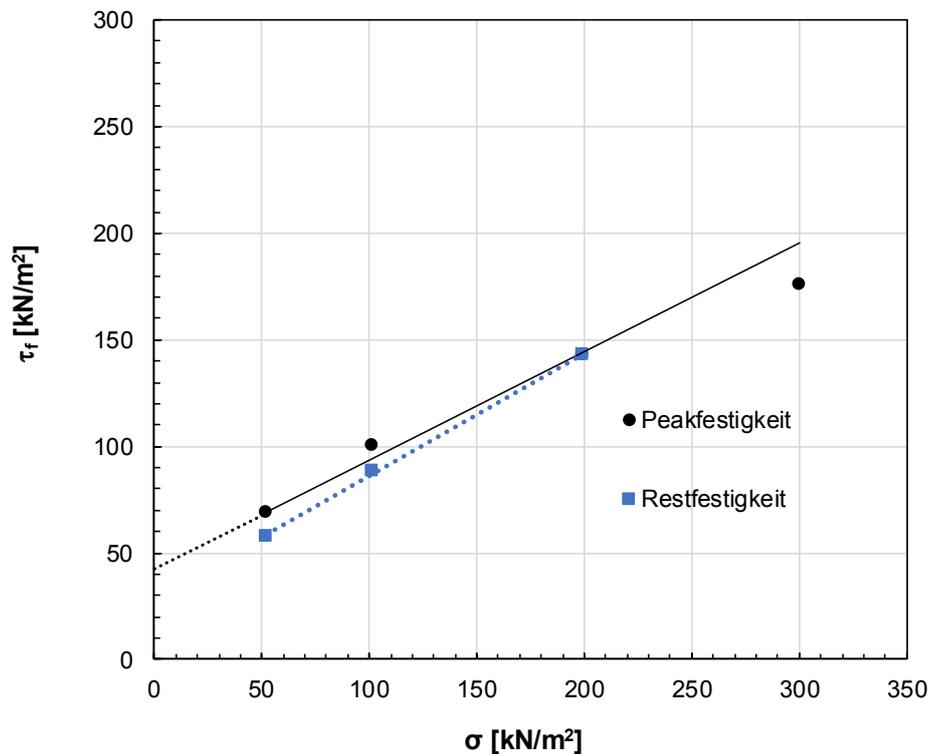
Kurzbezeichnung:	BoGr
Herkunft	Grüneberg (Landkreis Oberhavel)
Interne Bezeichnung der Probe	84993



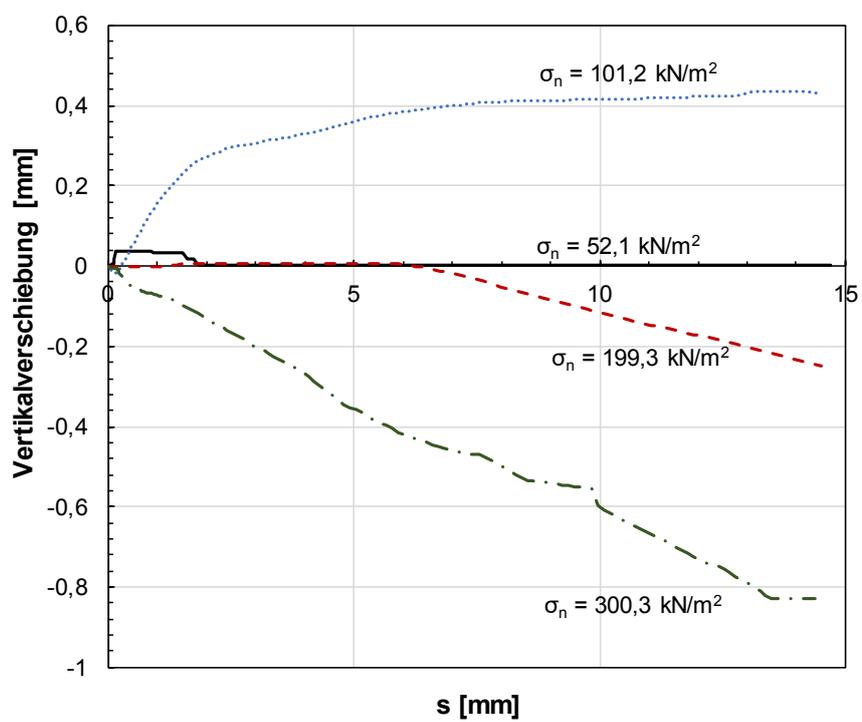
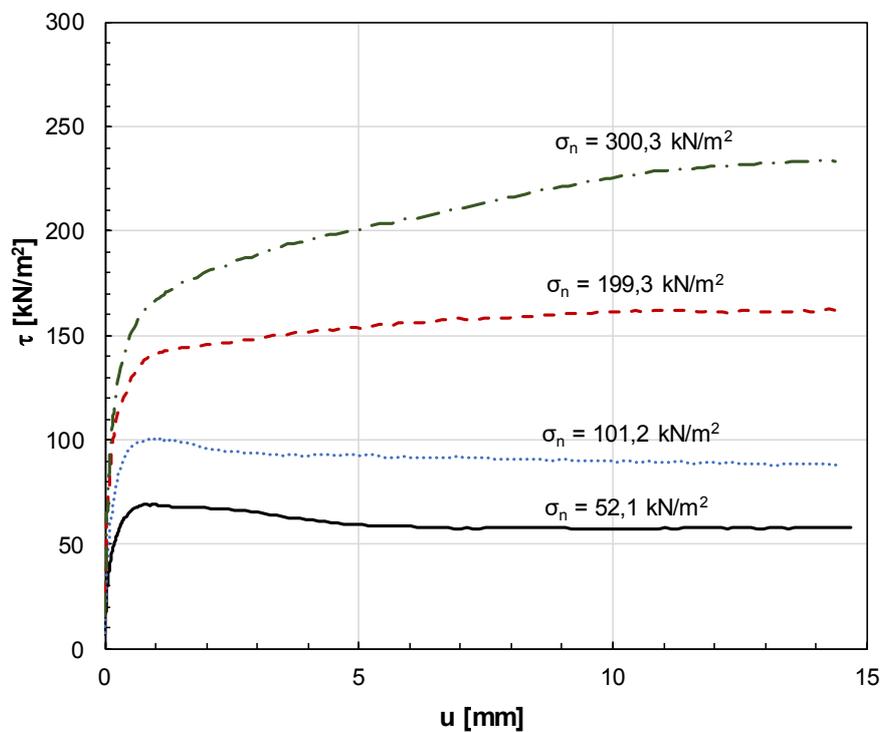
A2.3 Rahmenscherversuch Boden KIBu2

Kurzbezeichnung:	KIBu2
Herkunft	Buxtehude (Landkreis Stade)
Interne Bezeichnung der Probe	85054

Einzelversuch	Probe		1	2	3	4
Probenlänge	KIBu2	l [mm]	100,00			
Probenbreite		b [mm]	100,00			
Probenhöhe		h [mm]	30,00			
Korndichte		ρ_s [g/cm ³]	2,25			
Anfangswassergehalt		w_a [%]	52,27	51,62	51,91	52,15
Endwassergehalt		w_e [%]	58,11	55,57	54,24	52,04
Anfangsdichte		ρ_d [g/cm ³]	0,93	0,94	0,93	0,93
Anfangsporenzahl		e_0 [-]	1,41	1,40	1,41	1,41
Vorkonsolidierungsspannung		σ_m [kN/m ²]	503,40			
Konsolidierungsspannung		σ_c [kN/m ²]	52,10	101,20	199,30	300,30



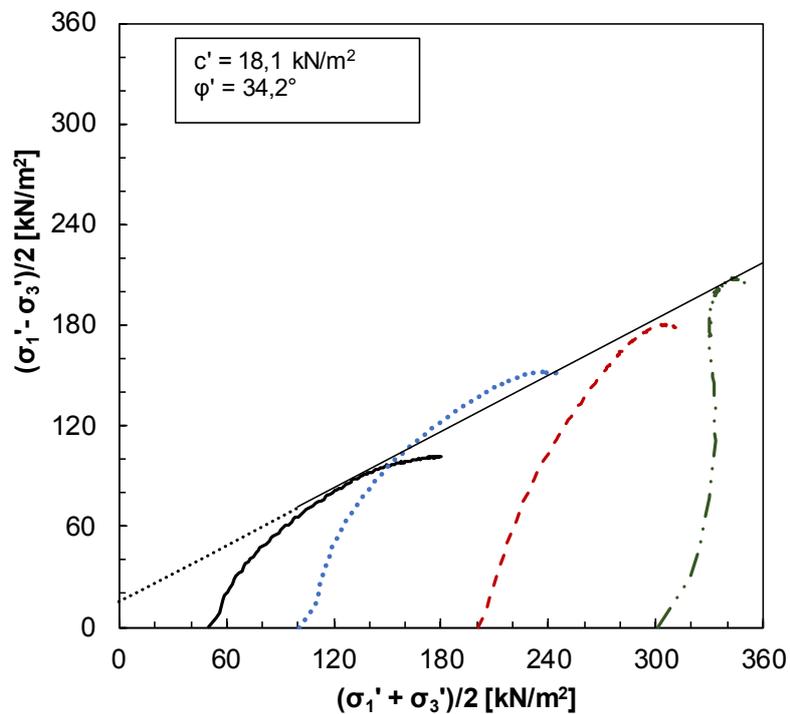
Kurzbezeichnung:	KIBu2
Herkunft	Buxtehude (Landkreis Stade)
Interne Bezeichnung der Probe	85054



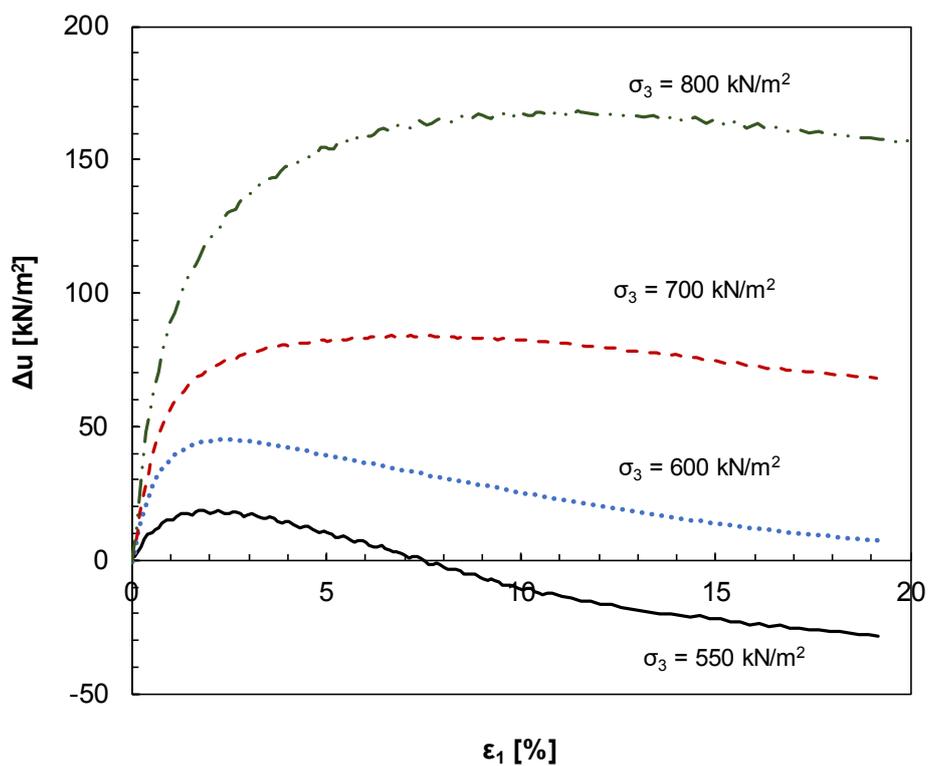
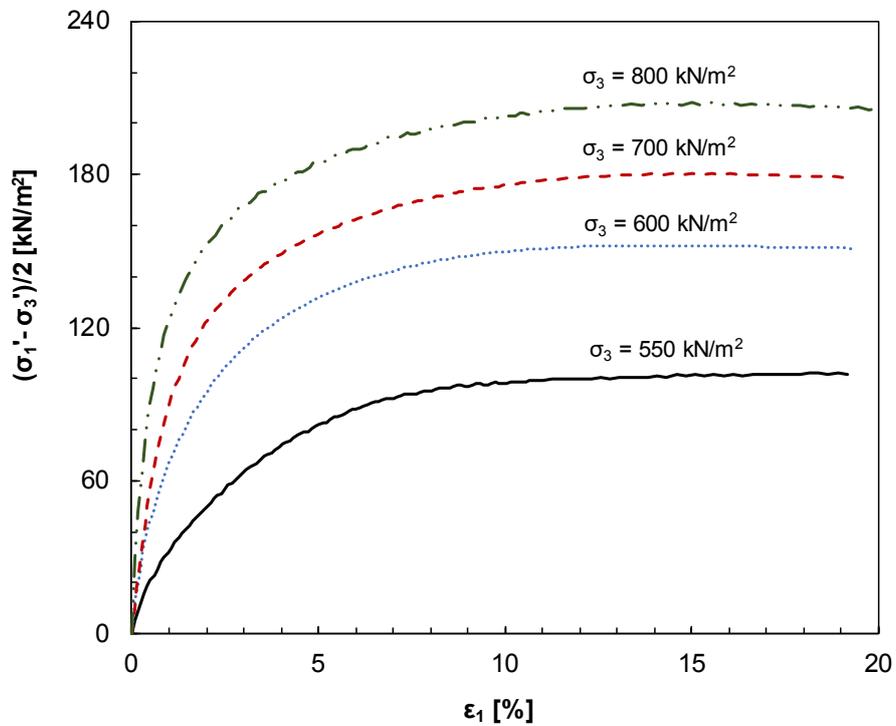
A2.4 Triaxialversuch CU am Boden BoSc

Kurzbezeichnung:	BoSc
Herkunft	Berlin Schwanebeck (Landkreis Barnim)
Interne Bezeichnung der Probe	84992

Einzelversuch	Probe		1	2	3	4
Probendurchmesser	BoSc	d [mm]	50,00			
Probenhöhe		h [mm]	95,84	94,45	94,21	92,97
Korndichte		ρ_s [g/cm ³]	2,24			
Anfangswassergehalt		w_a [%]	56,40	54,10	54,10	55,50
Endwassergehalt		w_e [%]	50,90	46,10	43,80	43,60
Anfangsdichte		ρ_d [g/cm ³]	0,86	0,88	0,88	0,87
Anfangsporenzahl		e_0 [-]	1,61	1,55	1,55	1,58
Vorkonsolidierungs- spannung		σ_m' [kN/m ²]	500,00			
Konsolidierungsspan- nung		σ_c' [kN/m ²]	50,00	100,00	200,00	300,00
Sättigungsdruck		u_0 [kN/m ²]	500,00			



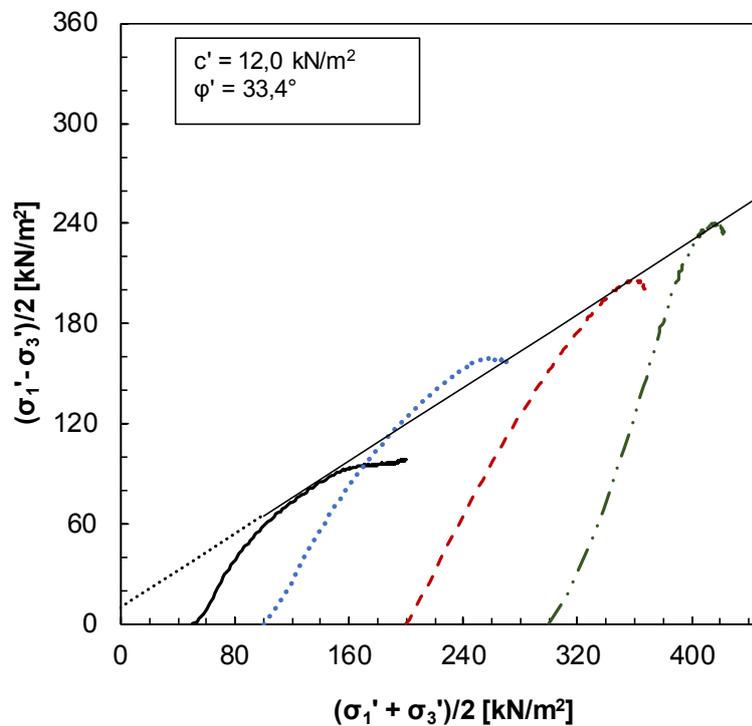
Kurzbezeichnung:	BoSc
Herkunft	Berlin Schwanebeck (Landkreis Barnim)
Interne Bezeichnung der Probe	84992



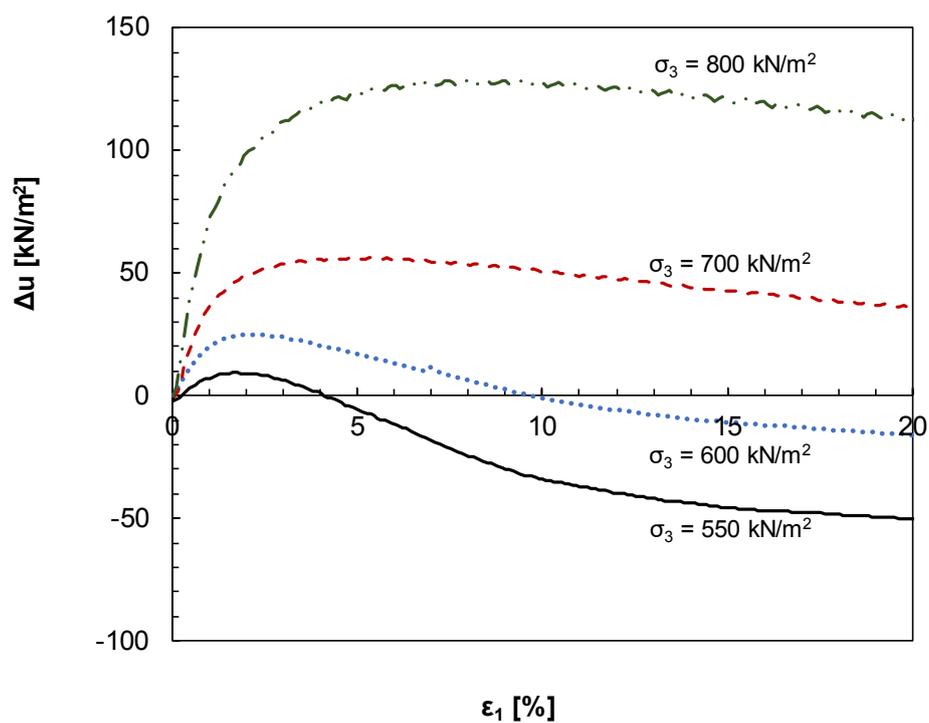
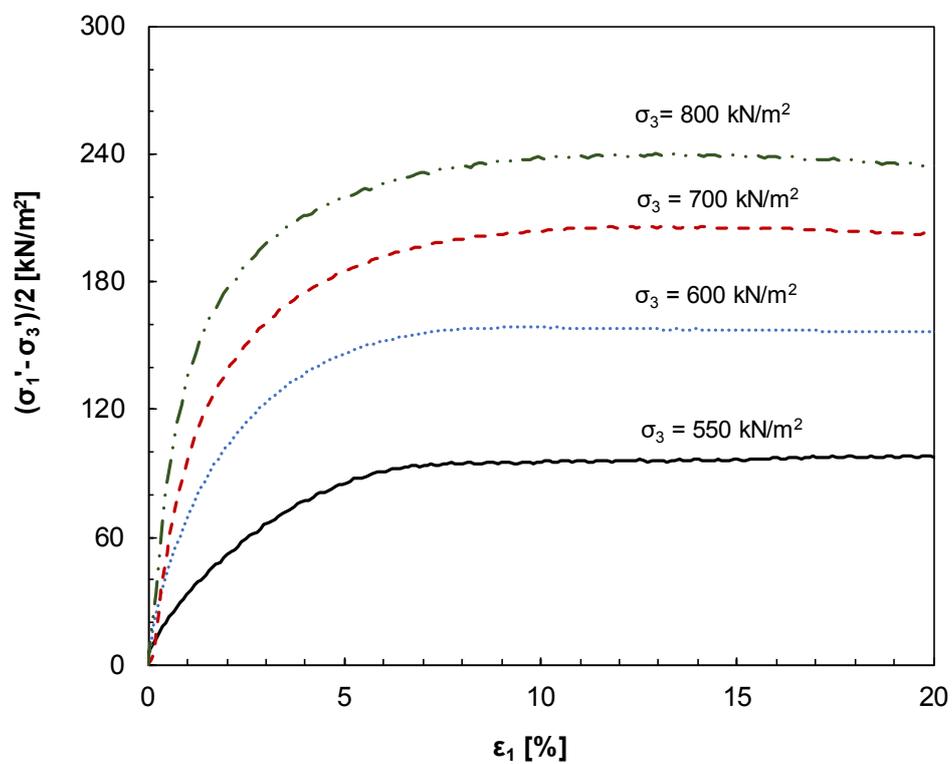
A2.5 Triaxversuch CU am Boden BoGr

Kurzbezeichnung:	BoGr
Herkunft	Grüneberg (Landkreis Oberhavel)
Interne Bezeichnung der Probe	84993

Einzelversuch	Probe		1	2	3	4
Probendurchmesser	BoGr	d [mm]	50,00			
Probenhöhe		h [mm]	95,84	94,45	94,21	92,97
Korndichte		ρ_s [g/cm ³]	2,24			
Anfangswassergehalt		w _a [%]	56,40	54,10	54,10	55,50
Endwassergehalt		w _e [%]	50,90	46,10	43,80	43,60
Anfangsdichte		ρ_d [g/cm ³]	0,86	0,88	0,88	0,87
Anfangsporenzahl		e ₀ [-]	1,61	1,55	1,55	1,58
Vorkonsolidierungs- spannung		$\sigma_{m'}$ [kN/m ²]	500,00			
Konsolidierungsspan- nung		σ_c' [kN/m ²]	50,00	100,00	200,00	300,00
Sättigungsdruck		u ₀ [kN/m ²]	500,00			



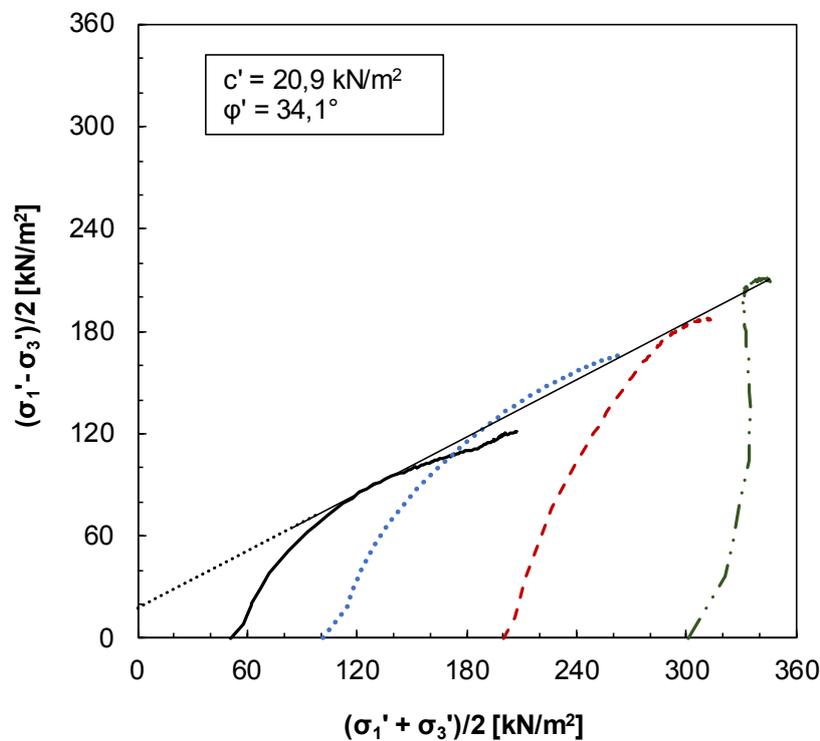
Kurzbezeichnung:	BoGr
Herkunft	Grüneberg (Landkreis Oberhavel)
Interne Bezeichnung der Probe	84993



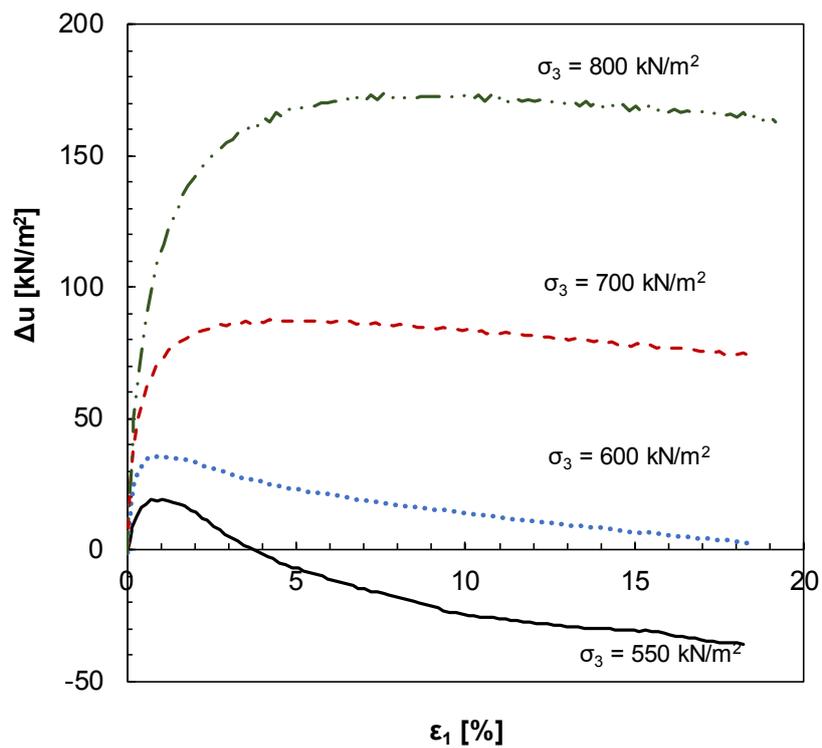
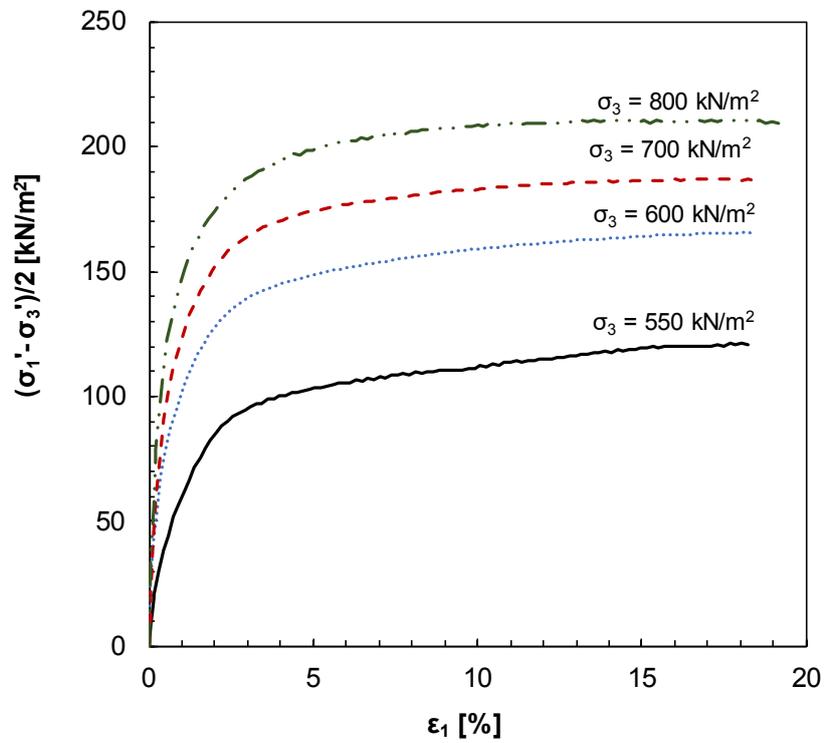
A2.6 Triaxversuch CU am Boden KIBu2

Kurzbezeichnung:	KIBu2
Herkunft	Buxtehude (Landkreis Stade)
Interne Bezeichnung der Probe	85054

Einzelversuch	Probe	1	2	3	4
Probendurchmesser	KIBu2	50,00			
Probenhöhe		100,75	99,27	98,21	98,48
Korndichte		2,25			
Anfangswassergehalt		52,49	51,23	51,00	51,28
Endwassergehalt		61,08	57,37	55,32	54,23
Anfangsdichte		0,92	0,94	0,94	0,93
Anfangsporenzahl		1,73	1,39	1,38	1,41
Vorkonsolidierungs- spannung		500,00			
Konsolidierungsspan- nung		50,00	100,00	200,00	300,00
Sättigungsdruck		500,00			



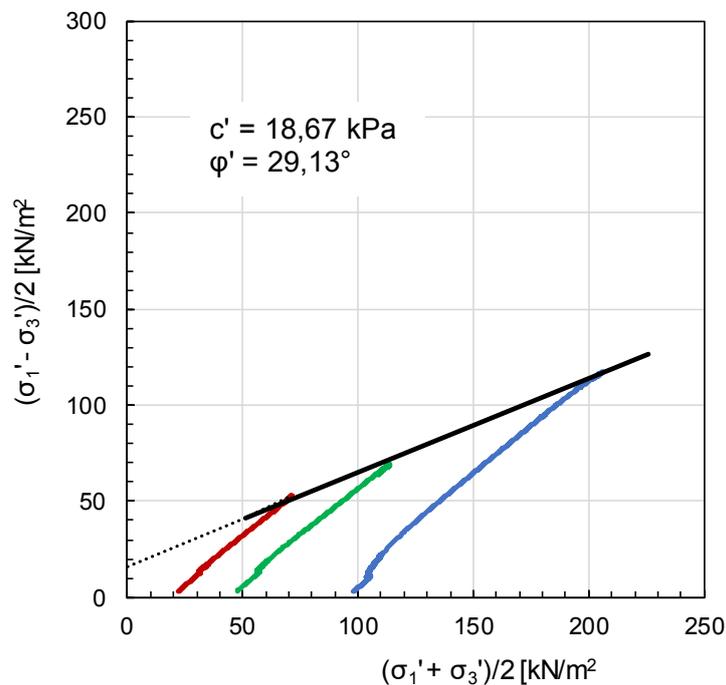
Kurzbezeichnung:	KIBu2
Herkunft	Buxtehude (Landkreis Stade)
Interne Bezeichnung der Probe	85054



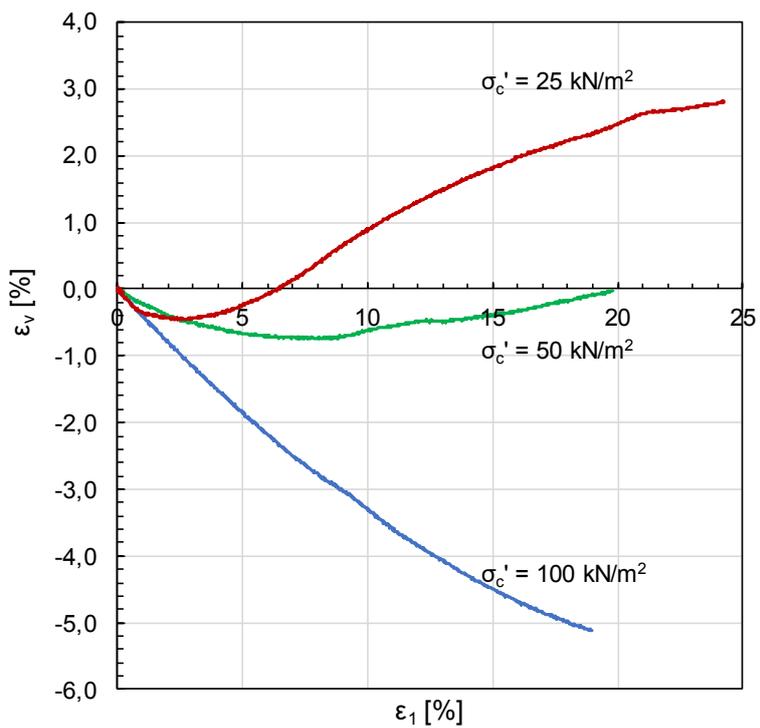
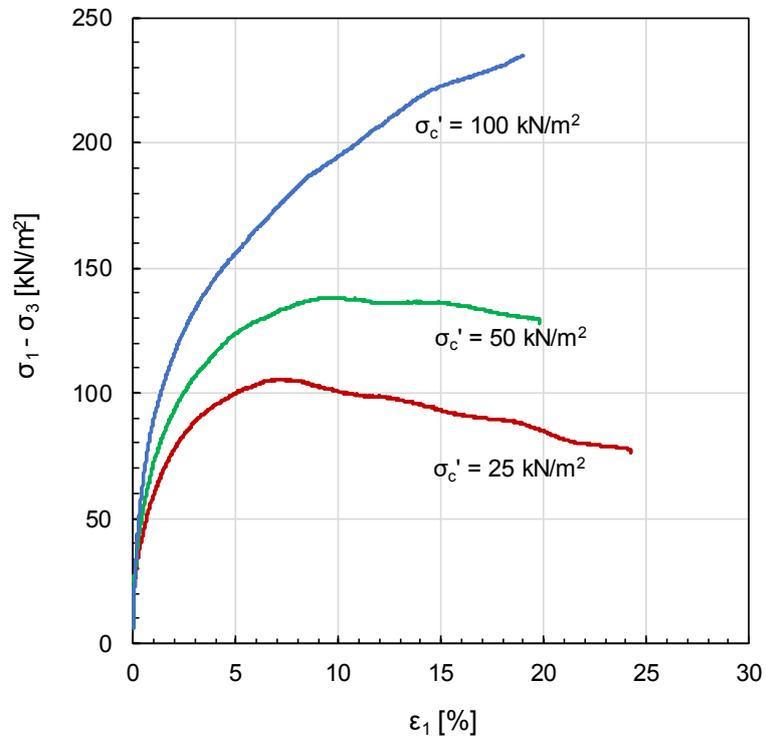
A2.7 Triaxialversuch CD am Boden BoSc

Kurzbezeichnung:	BoSc
Herkunft	Berlin Schwanebeck (Landkreis Barnim)
Interne Bezeichnung der Probe	84992

Einzelversuch	Probe	1	2	3
Probendurchmesser	d [mm]	51,53	51,26	51,36
Probenhöhe	h [mm]	102,30	103,90	102,67
Korndichte	ρ_s [g/cm ³]	2,24		
Anfangswassergehalt	w_a [%]	56,39	51,11	54,21
Endwassergehalt	w_e [%]	70,90	67,53	59,76
Anfangsdichte	ρ_d [g/cm ³]	0,82	0,85	0,84
Anfangsporenzahl	e_0 [-]	1,72	1,64	1,67
Vorkonsolidierungs- spannung	σ'_m [kN/m ²]	200,00		
Konsolidierungsspan- nung	σ'_c [kN/m ²]	25,00	50,00	100,00
Sättigungsdruck	u_0 [kN/m ²]	300,00		
B-Wert		0,96	0,91	0,94



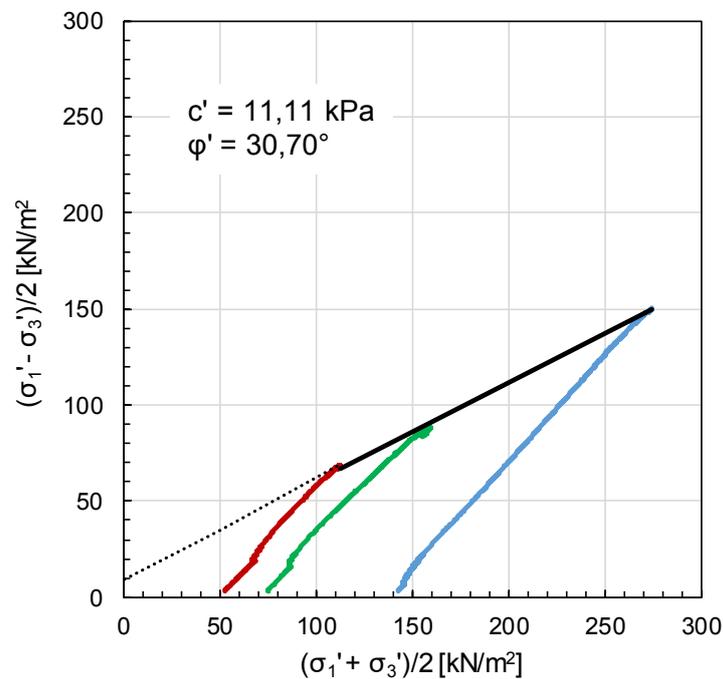
Kurzbezeichnung:	BoSc
Herkunft	Berlin Schwanebeck (Landkreis Barnim)
Interne Bezeichnung der Probe	84992



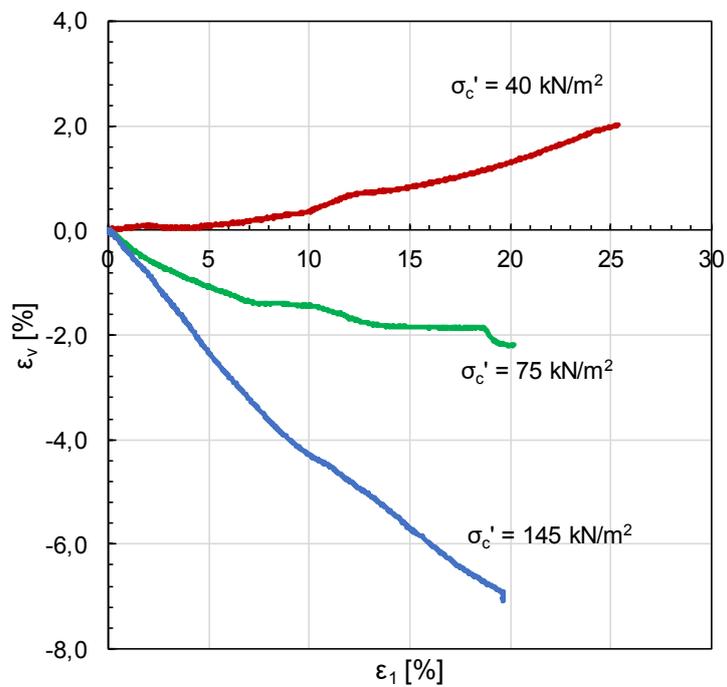
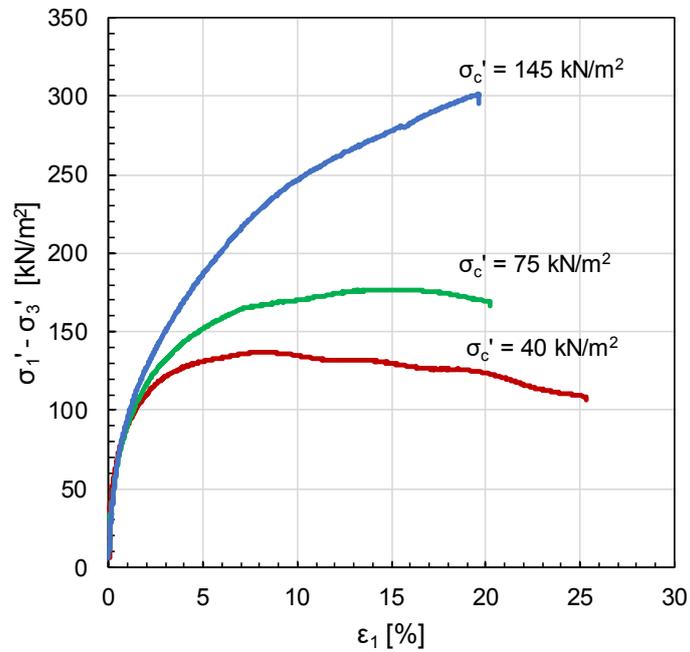
A2.8 Triaxialversuch CD am Boden BoGr

Kurzbezeichnung:	BoGr
Herkunft	Grüneberg (Landkreis Oberhavel)
Interne Bezeichnung der Probe	84993

Einzelversuch	Probe	1	2	3
Probendurchmesser	d [mm]	50,7	51,1	50,93
Probenhöhe	h [mm]	103,7	104,4	104,9
Korndichte	ρ_s [g/cm ³]	2,18		
Anfangswassergehalt	w_a [%]	58,22	56,79	57,02
Endwassergehalt	w_e [%]	67,40	62,64	65,28
Anfangsdichte	ρ_d [g/cm ³]	0,85	0,84	0,84
Anfangsporenzahl	e_0 [-]	1,57	1,59	1,59
Vorkonsolidierungs- spannung	σ_m' [kN/m ²]	200,00		
Konsolidierungsspan- nung	σ_c' [kN/m ²]	40,00	75,00	145,00
Sättigungsdruck	u_0 [kN/m ²]	300,00		
B-Wert		0,95	0,93	0,92



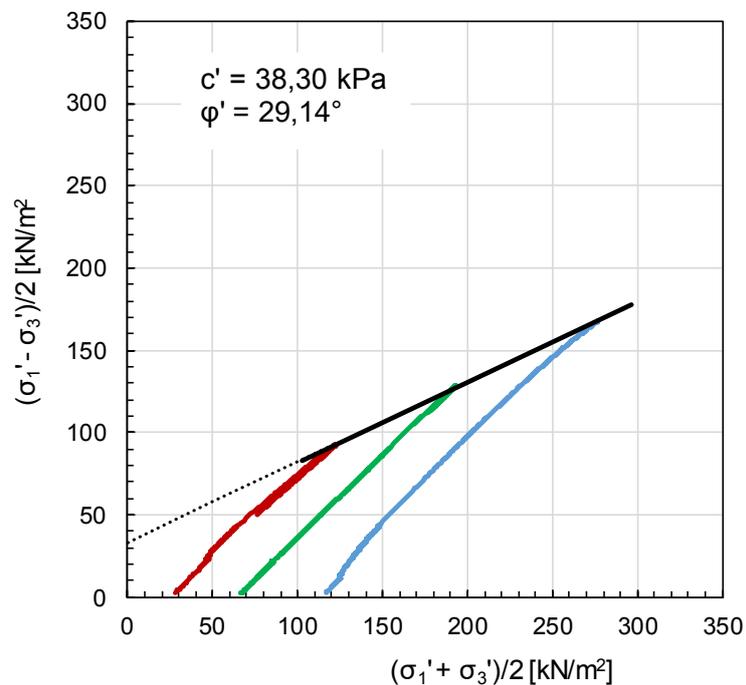
Kurzbezeichnung:	BoGr
Herkunft	Grüneberg (Landkreis Oberhavel)
Interne Bezeichnung der Probe	84993



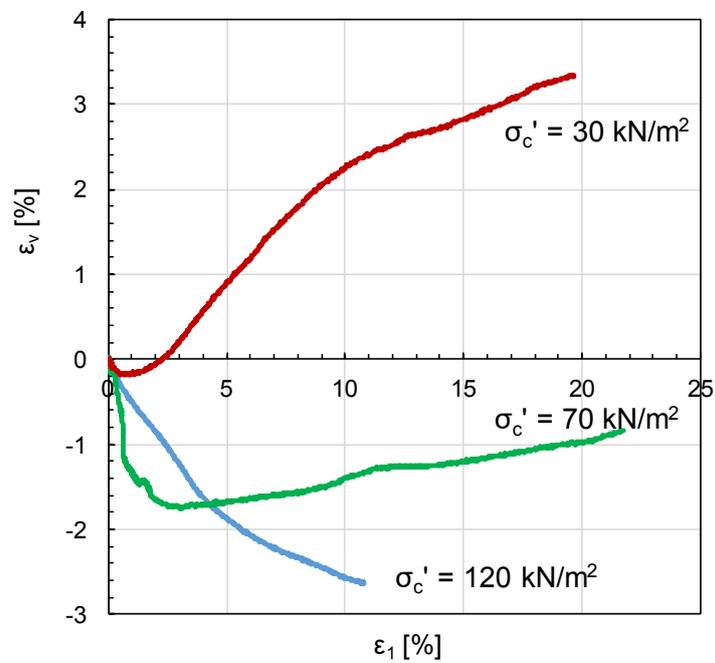
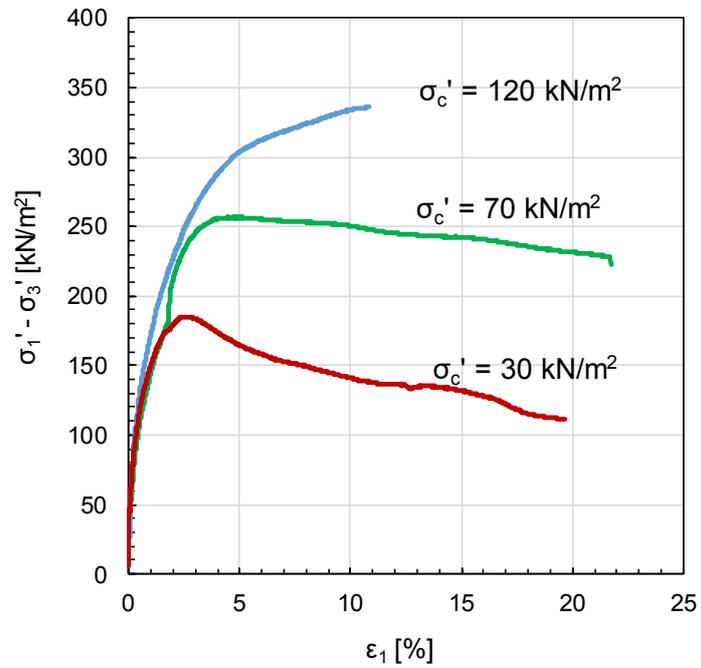
A2.9 Triaxversuch CD am Boden KIBu2

Kurzbezeichnung:	KIBu2
Herkunft	Buxtehude (Landkreis Stade)
Interne Bezeichnung der Probe	85054

Einzelversuch	Probe		1	2	3
Probendurchmesser		d [mm]	50,40	50,40	50,40
Probenhöhe		h [mm]	95,85	98,30	95,85
Korndichte		ρ_s [g/cm ³]	2,28		
Anfangswassergehalt		w _a [%]	49,06	47,75	46,80
Endwassergehalt		w _e [%]	70,90	67,53	59,76
Anfangsdichte		ρ_d [g/cm ³]	0,99	0,96	0,99
Anfangsporenzahl		e ₀ [-]	1,30	1,38	1,31
Vorkonsolidierungs- spannung		σ_m' [kN/m ²]	200,00		
Konsolidierungsspan- nung		σ_c' [kN/m ²]	30,00	70,00	120,00
Sättigungsdruck		u ₀ [kN/m ²]	300,00		
B-Wert			0,86	0,88	0,90



Kurzbezeichnung:	KIBu2
Herkunft	Buxtehude (Landkreis Stade)
Interne Bezeichnung der Probe	85054



A.3 Einzelergebnisse der Ödometerversuche

Gesättigte Ödometerversuche Boden BoSc

Gesättigte Ödometerversuche Boden BoGr

Gesättigte Ödometerversuche Boden KIBu2

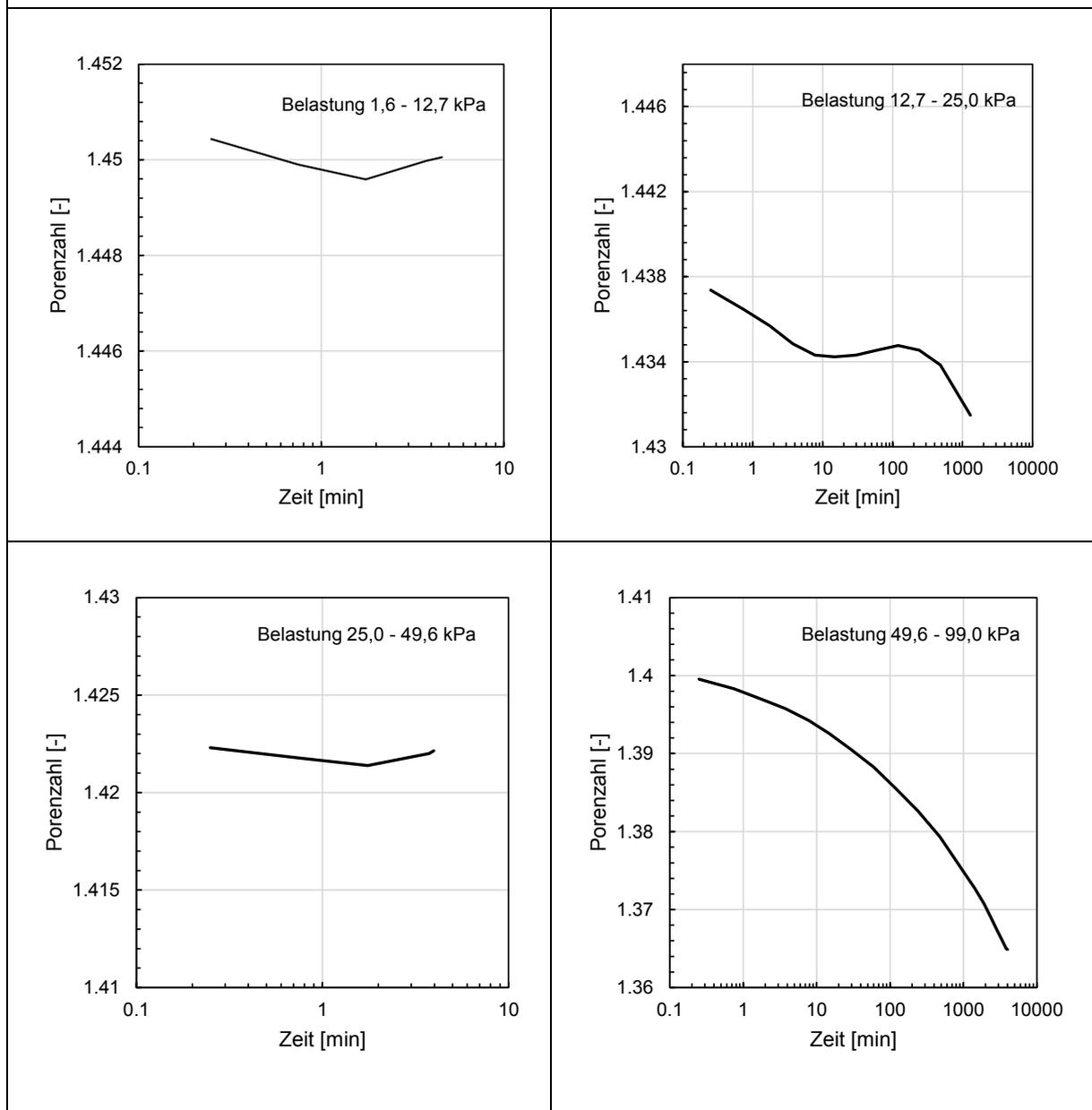
Teilgesättigte Ödometerversuche Boden BoSc

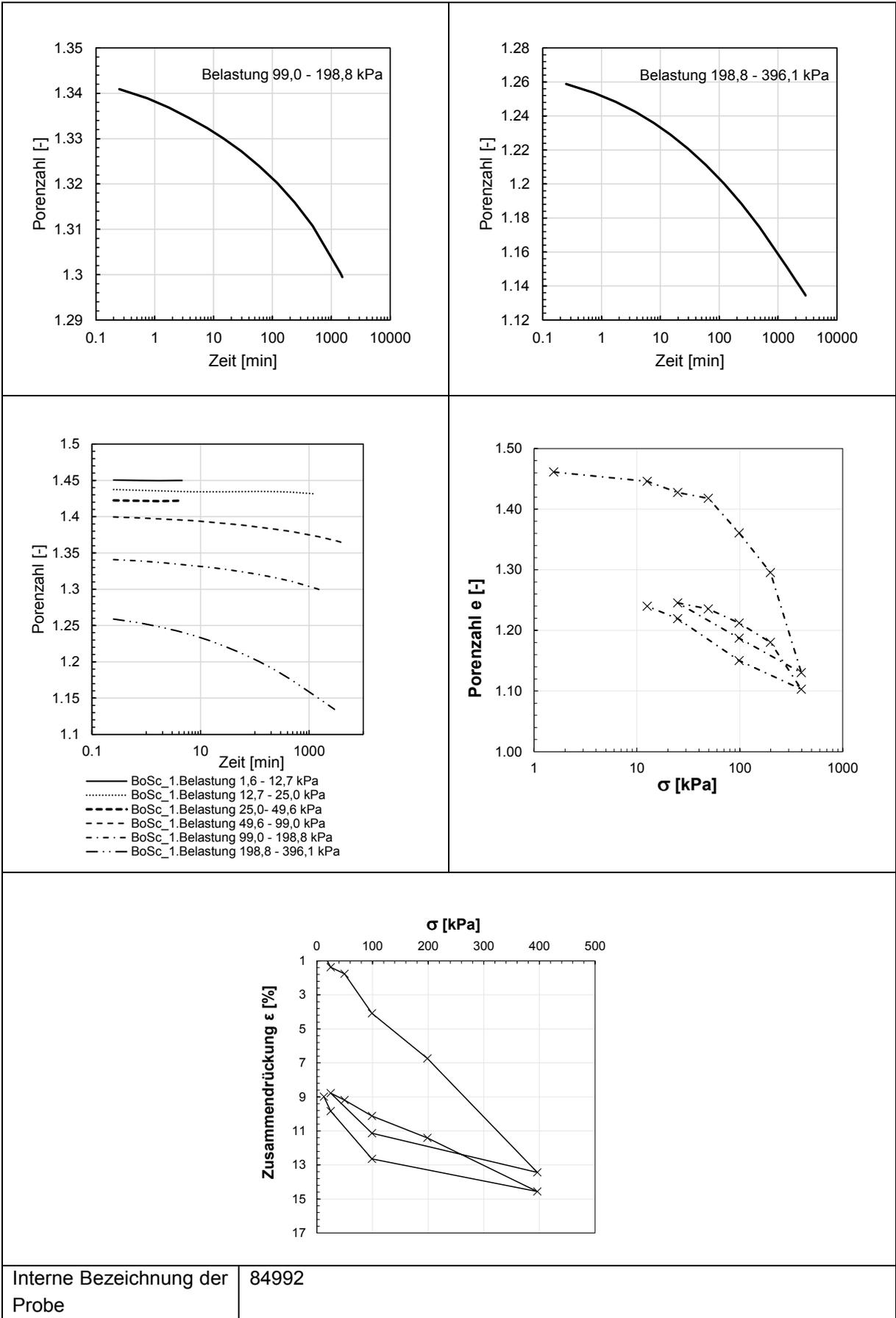
Teilgesättigte Ödometerversuche Boden BoGr

Teilgesättigte Ödometerversuche Boden KIBu2

A3.1 Gesättigte Oedometerversuche am Boden BoSc

Kurzbezeichnung:	BoSc	
Herkunft	Berlin Schwanebeck (Landkreis Barnim)	
Einbaubedingung	Mit Aufsättigung	
Einzelversuch		
Probendurchmesser	d [mm]	100,65
Probenhöhe	h [mm]	32,20
Anfangstrockendichte	ρ_d [g/cm ³]	0,91
Anfangswassergehalt	w _a [%]	50,23
Ausbauwassergehalt	w _e [%]	55,61



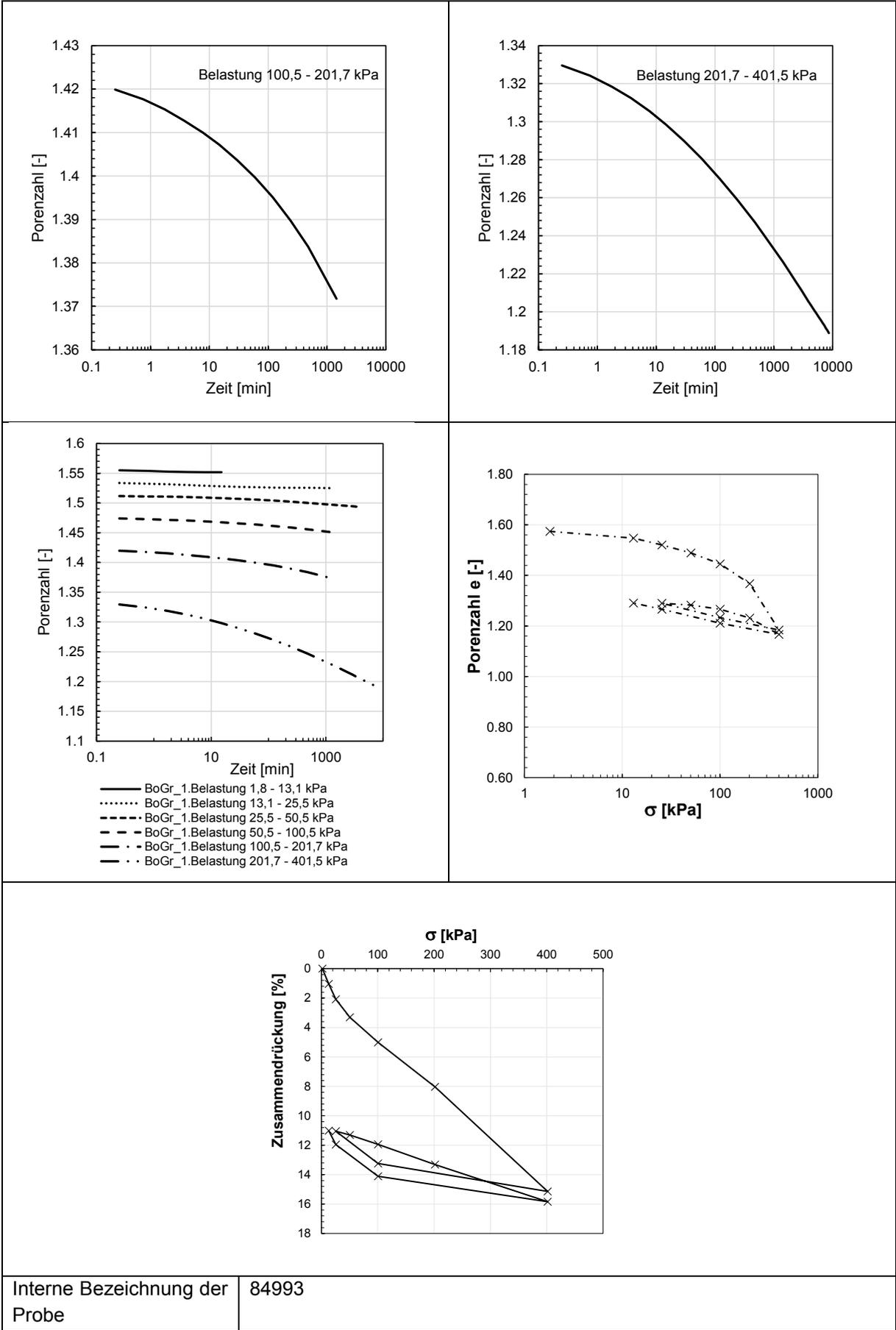


Interne Bezeichnung der Probe

84992

A3.2 Gesättigte Oedometerversuche am Boden BoGr

Kurzbezeichnung:	BoGr	
Herkunft	Grüneberg (Landkreis Oberhavel)	
Einbaubedingung	Mit Aufsättigung	
Einzelversuch		
Probendurchmesser	d [mm]	100,00
Probenhöhe	h [mm]	26,00
Anfangstrockendichte	ρ_d [g/cm ³]	0,85
Anfangswassergehalt	w _a [%]	63,04
Ausbauwassergehalt	w _e [%]	52,98
BoGr		
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="width: 45%;"> <p>Belastung 1,8 - 13,1 kPa</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>Belastung 13,1 - 25,5 kPa</p> </div> </div>		
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="width: 45%;"> <p>Belastung 25,5 - 50,5 kPa</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>Belastung 50,5 - 100,5 kPa</p> </div> </div>		

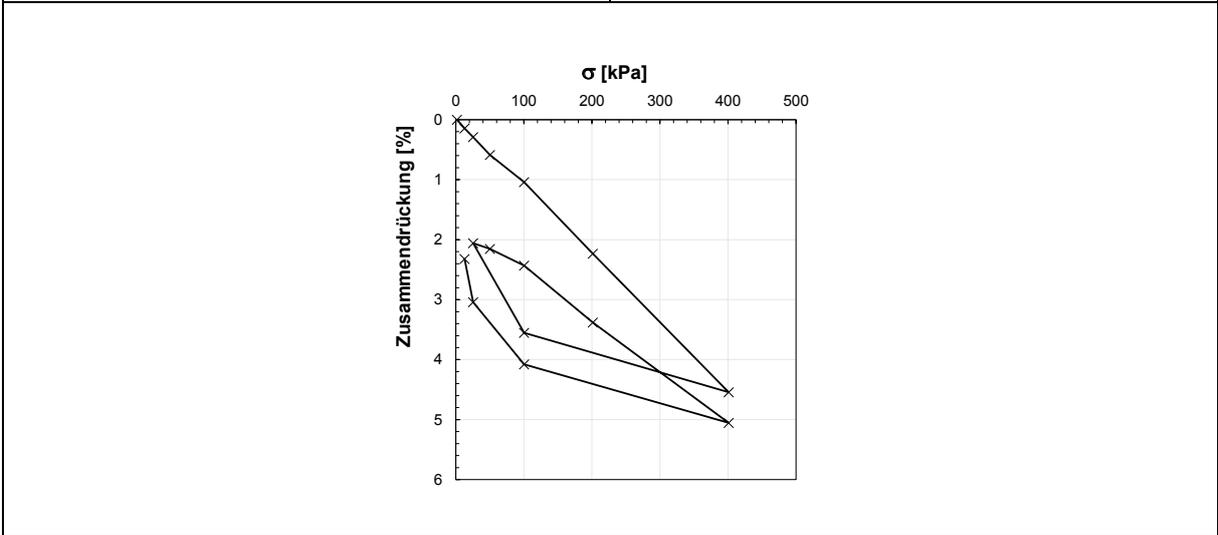
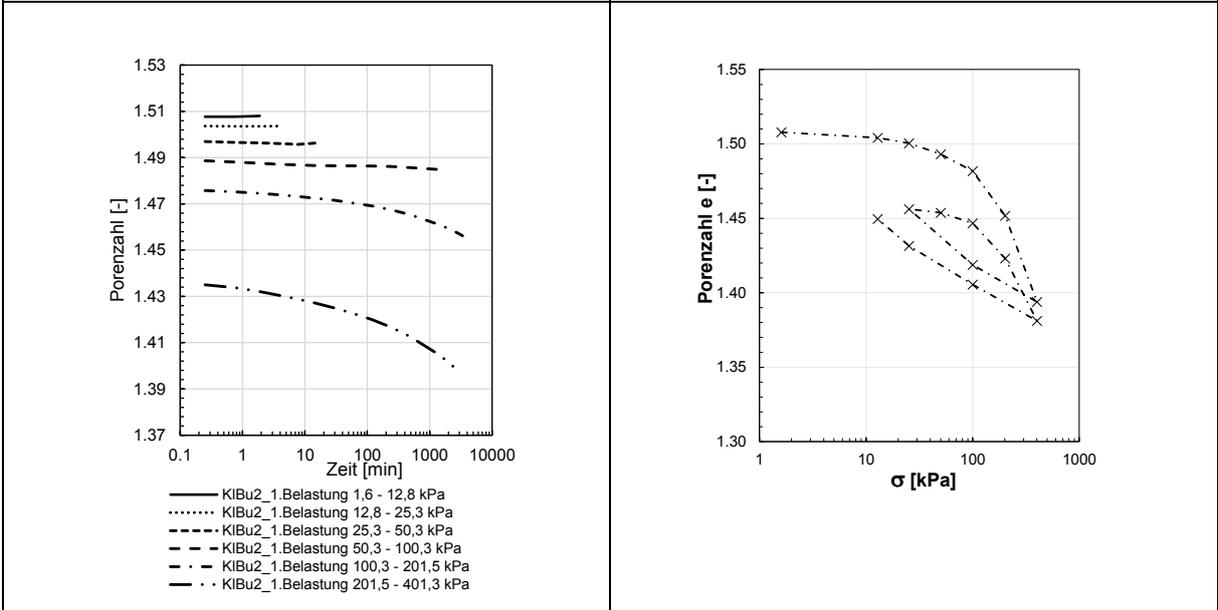
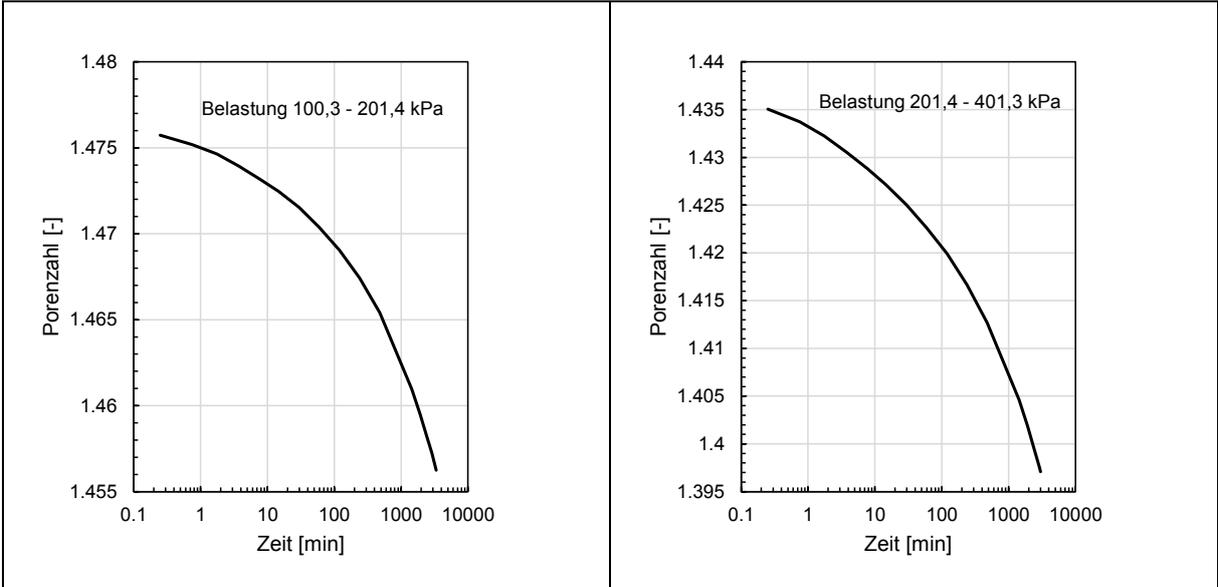


Interne Bezeichnung der Probe

84993

A3.3 Gesättigte Oedometerversuche am Boden KIBu2

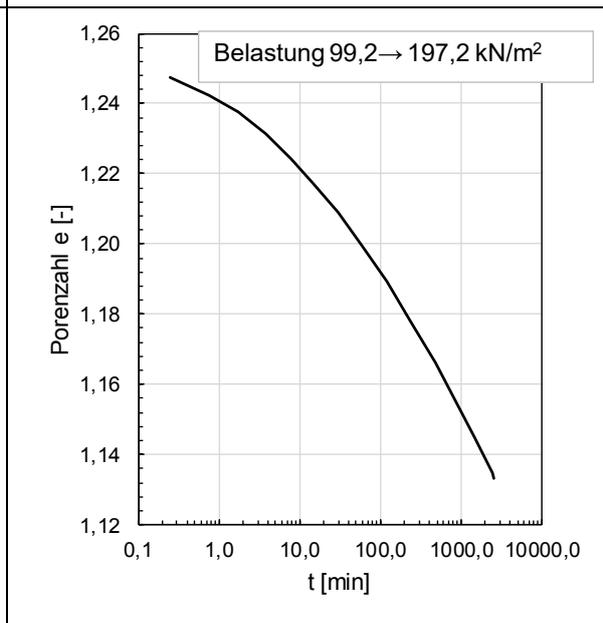
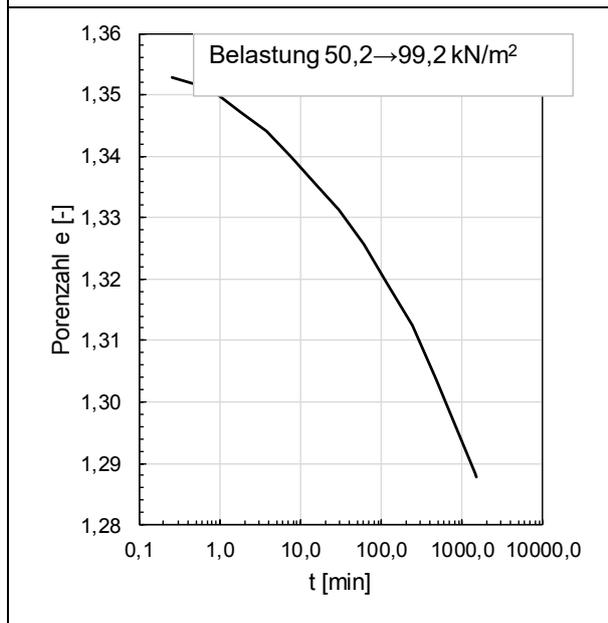
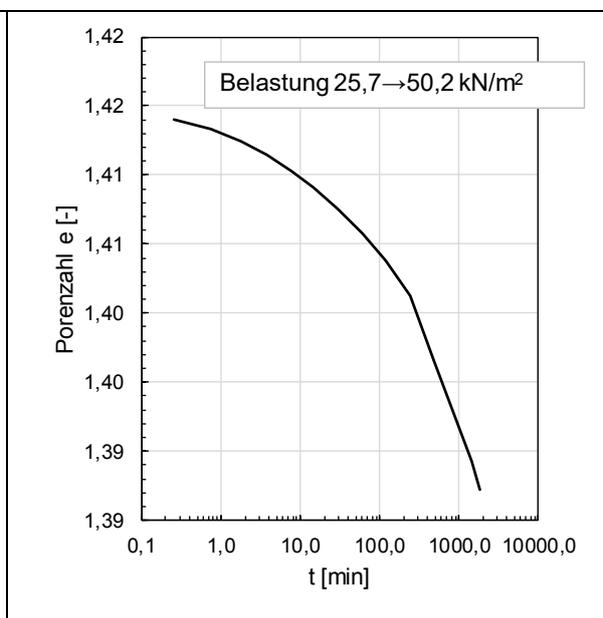
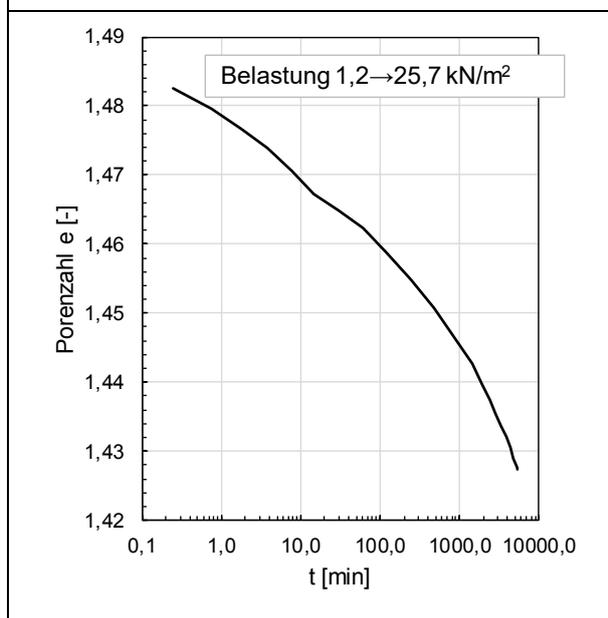
Kurzbezeichnung:	KIBu2	
Herkunft	Buxtehude (Landkreis Stade)	
Einbaubedingung	Mit Aufsättigung	
Einzelversuch		
Probendurchmesser	d [mm]	100,00
Probenhöhe	h [mm]	32,30
Anfangstrockendichte	ρ_d [g/cm ³]	0,89
Anfangswassergehalt	w _a [%]	48,15
Ausbauwassergehalt	w _e [%]	44,02

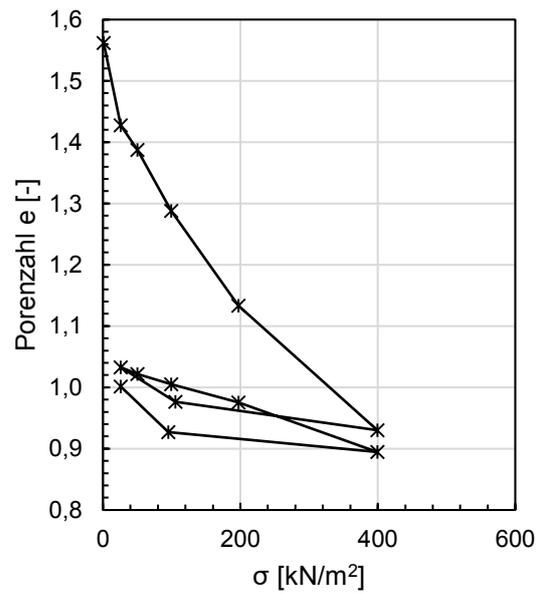
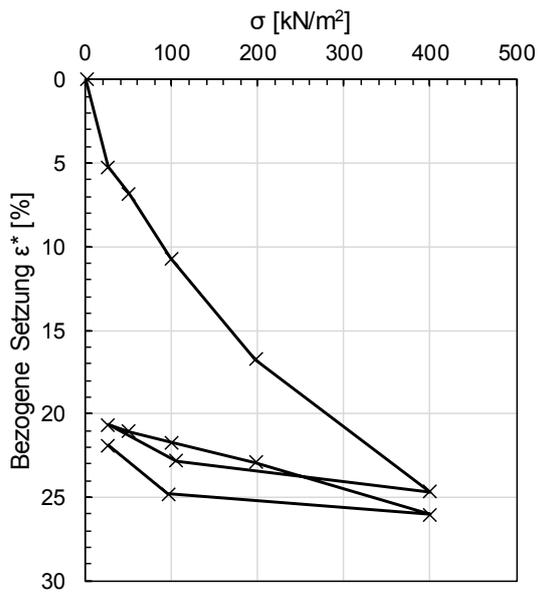
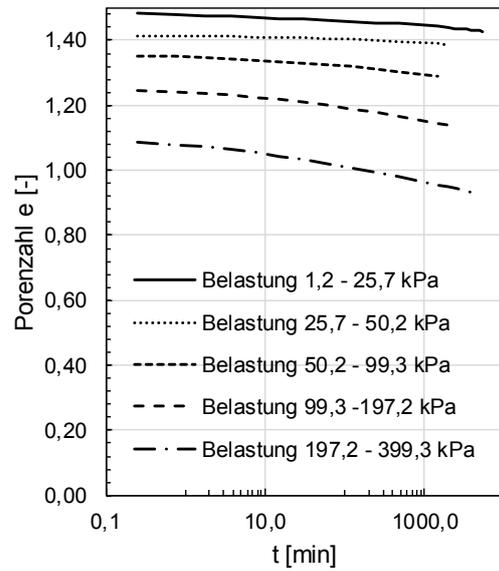
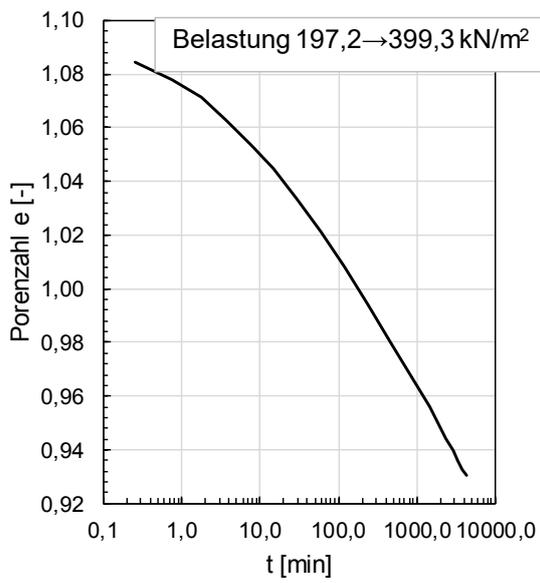


Interne Bezeichnung der Probe	85054
-------------------------------	-------

A3.4 Teilgesättigte Oedometerversuche am Boden BoSc

Kurzbezeichnung:	BoSc	
Herkunft	Berlin Schwanebeck (Landkreis Barnim)	
Einbaubedingung	Ohne Aufsättigung	
Einzelversuch		
Probendurchmesser	d [mm]	71,40
Probenhöhe	h [mm]	19,90
Anfangstrockendichte	ρ_d [g/cm ³]	0,87
Anfangswassergehalt	w _a [%]	51,72
Ausbauwassergehalt	w _e [%]	35,38



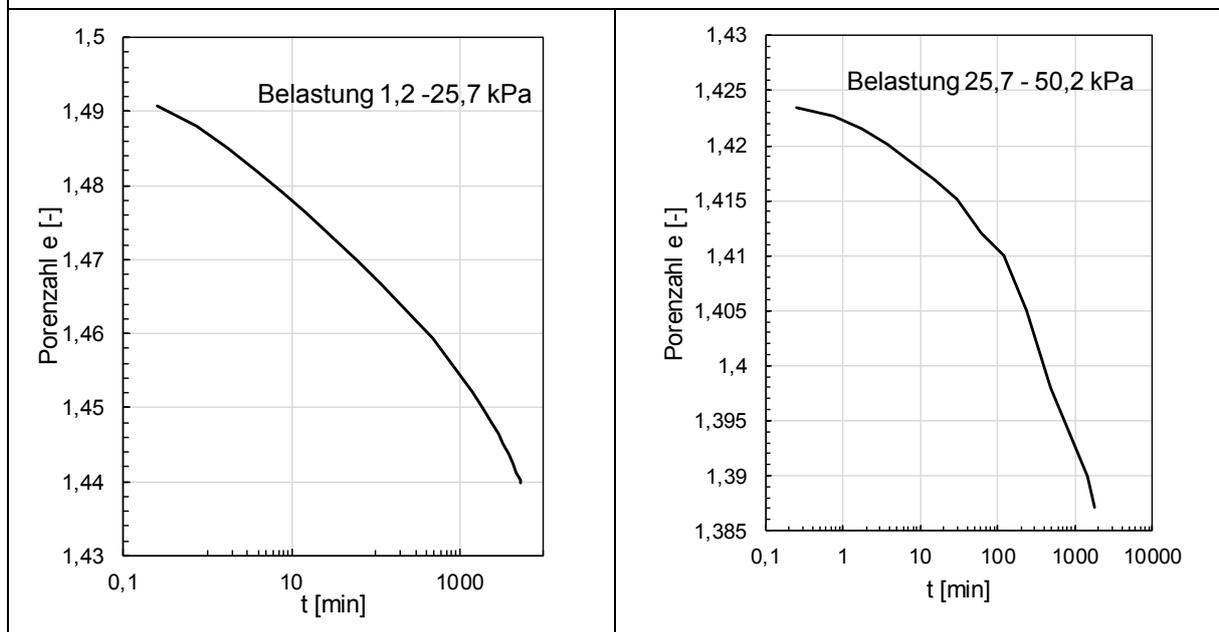


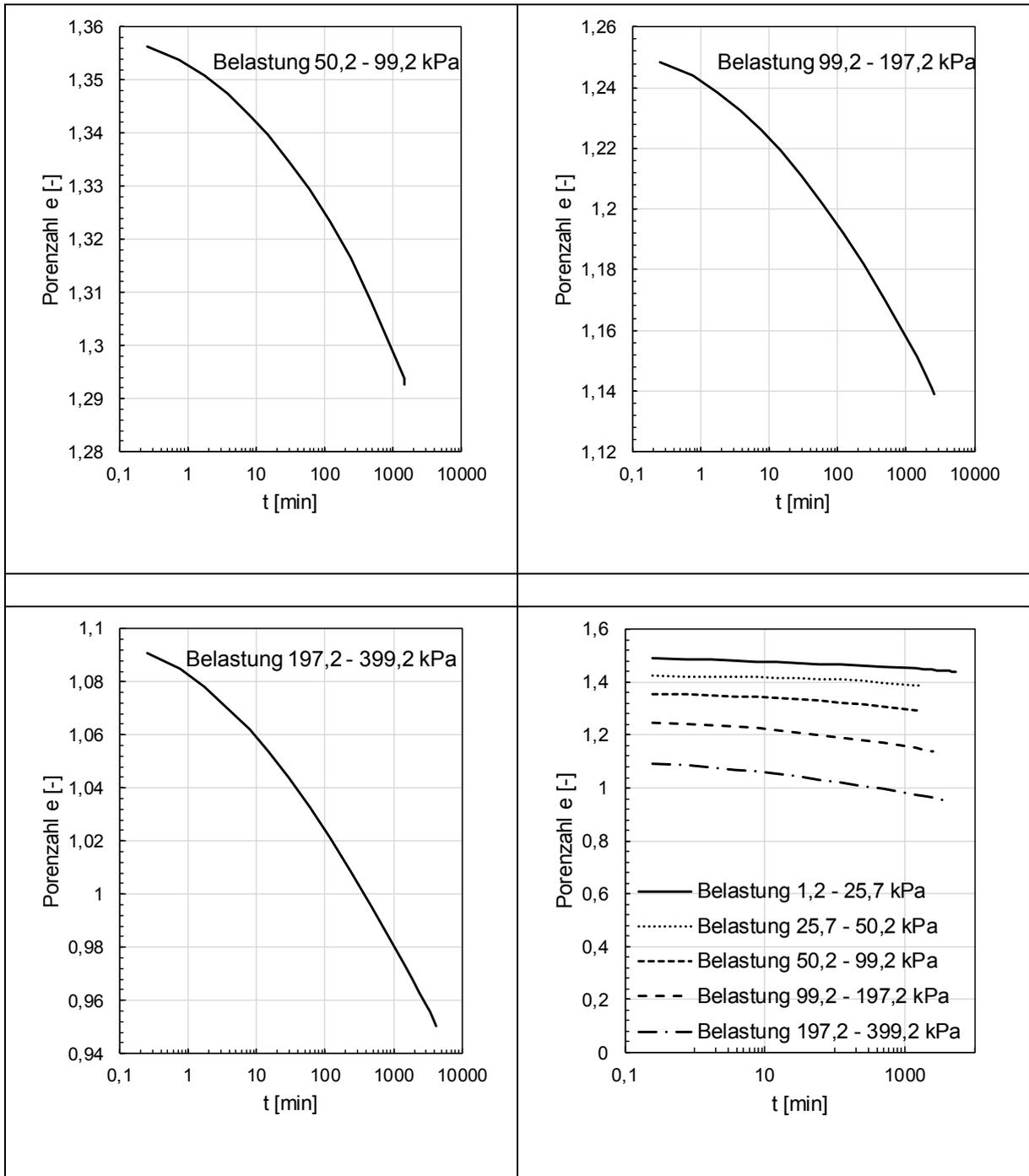
Interne Bezeichnung der Probe

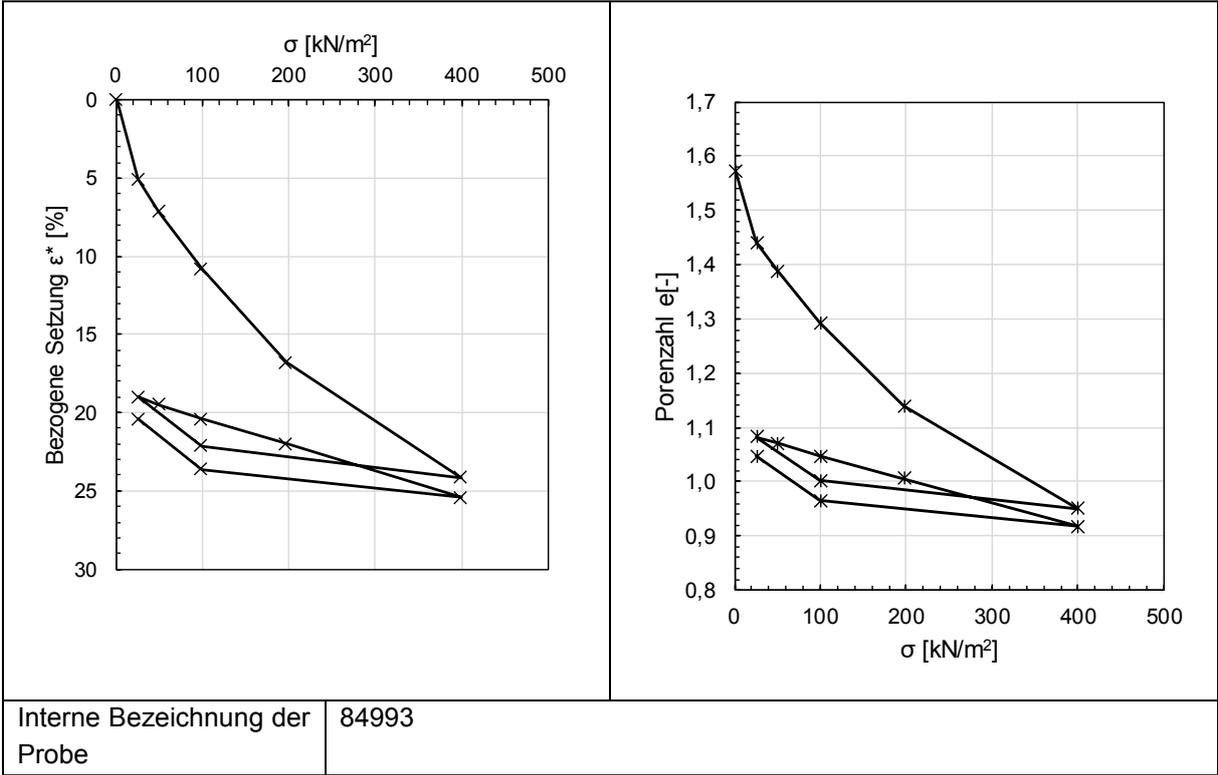
84992

A3.5 Teilgesättigte Oedometerversuche am Boden BoGr

Kurzbezeichnung:	BoGr	
Herkunft	Grüneberg (Landkreis Oberhavel)	
Einbaubedingung	Ohne Aufsättigung	
Einzelversuch		
Probendurchmesser	d [mm]	71,40
Probenhöhe	h [mm]	20,00
Anfangstrockendichte	ρ_d [g/cm ³]	0,85
Anfangswassergehalt	w_a [%]	59,99
Ausbauwassergehalt	w_e [%]	46,09





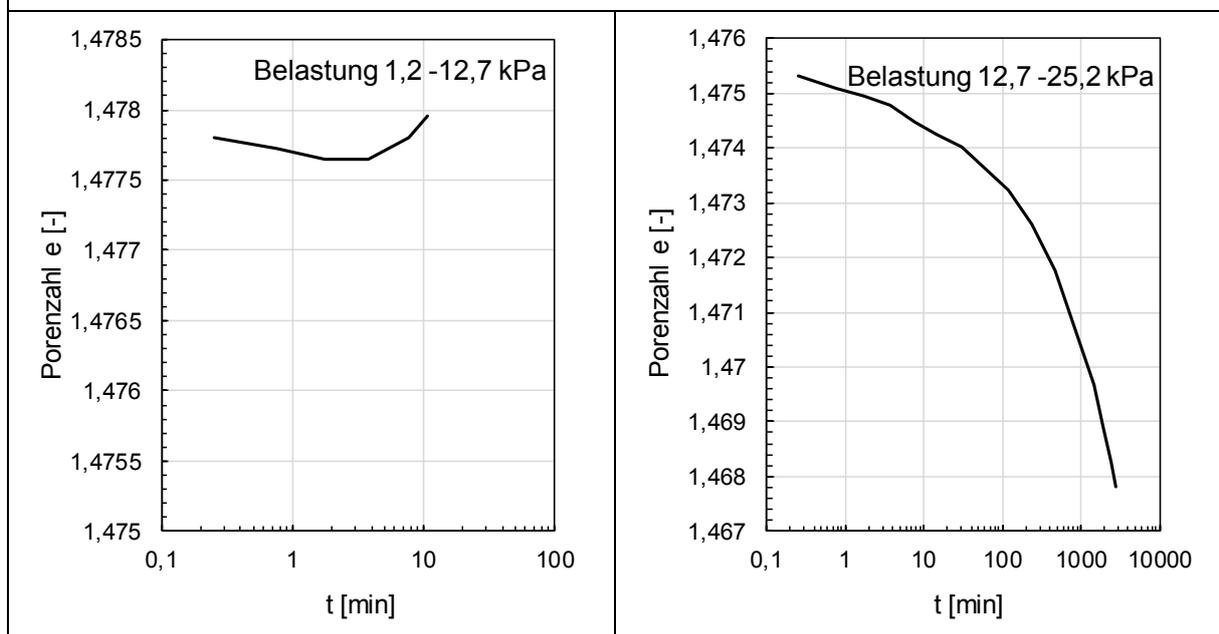


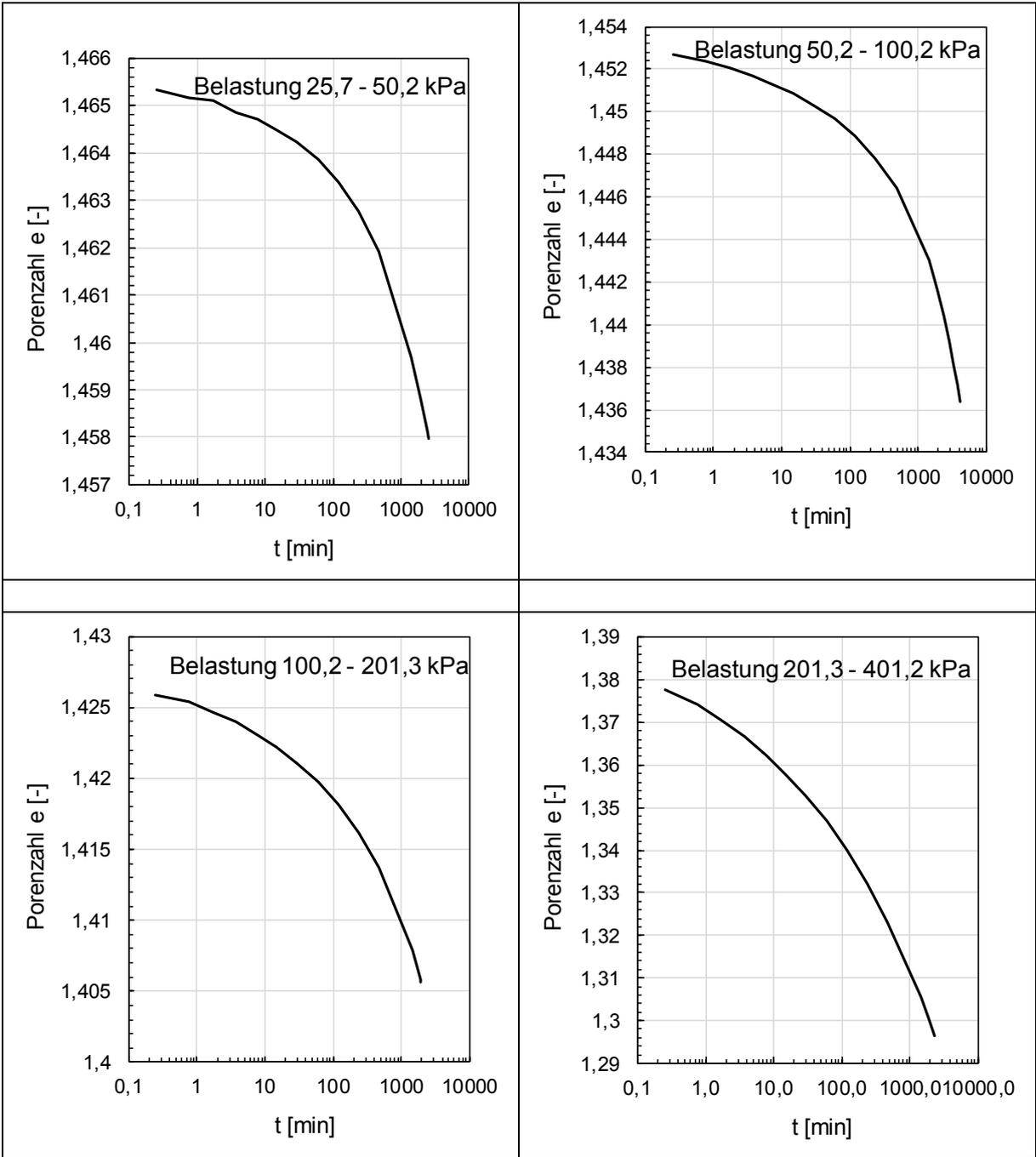
Interne Bezeichnung der Probe

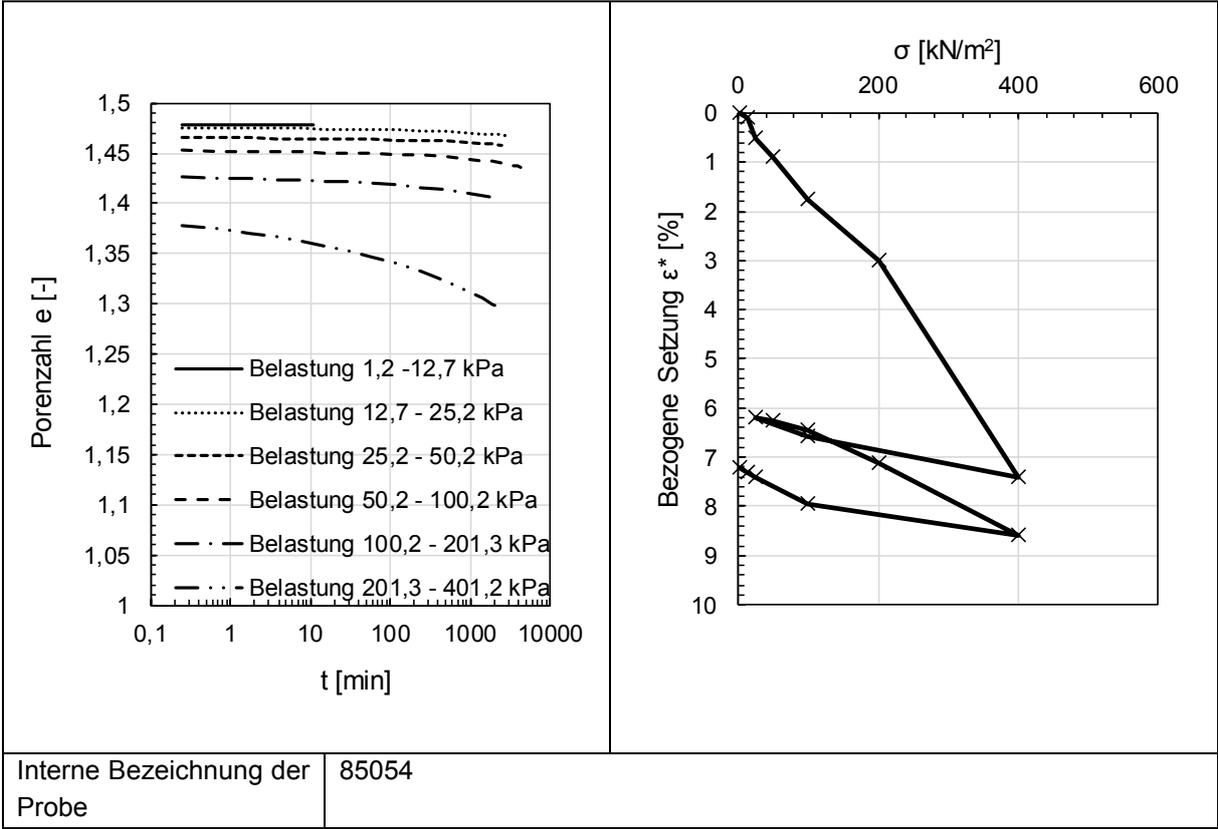
84993

A3.6 Teilgesättigte Oedometerversuche am Boden KIBu2

Kurzbezeichnung:	KIBu2	
Herkunft	Buxtehude (Landkreis Stade)	
Einbaubedingung	Ohne Aufsättigung	
Einzelversuch		
Probendurchmesser	d [mm]	100,00
Probenhöhe	h [mm]	32,00
Anfangstrockendichte	ρ_d [g/cm ³]	0,90
Anfangswassergehalt	w _a [%]	48,15
Ausbauwassergehalt	w _e [%]	44,02







Interne Bezeichnung der Probe

85054

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Unterreihe „Straßenwesen“

2023

S 194: Aspekte der Dimensionierung und Konstruktion zur Sicherstellung der Verfügbarkeit bei temporärer Nutzung von Randbereichen von Bundesfernstraßen
Wellner, Sommer, Clauß, Spanier, Villaret, Tschernack, Villaret, Gebhardt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 195: Verfahren zur Bildung und Beschreibung zustandshomogener Abschnitte und repräsentativer Kennzahlen für das Erhaltungsmanagement

Berthold, Großmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 196: Eignung konventioneller Prüfverfahren für Recycling-Baustoffe und industrielle Nebenprodukte im Erdbau

Huber, Birle, Heyer, Demond

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 197: Lösungsstudie zur Umsetzung der ASR A5.2 im Kontext mit der Herstellung von Betonfahrbahndecken

Tschernack, Gebhardt, Villaret

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 198: Erprobung von Betonfertigteilen für den Neubau und die grundhafte Erneuerung auf dem duraBAST

Alte-Teigeler, Britz, Kispert, Riwe, Tschernack, Villaret, Lüdike

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 199: Identifizierung relevanter Klimaparameter und Bestimmung von Schwellenwerten zu gravitativen Massenbewegungen

Steffen, Brendel

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 200: Einfluss der Betonzusammensetzung von Straßenbetonen auf die Spaltzugfestigkeit unter Berücksichtigung einer ausreichenden Dauerhaftigkeit

Schnellenbach-Held, Eßer, Johansen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 201: Textilbewehrter Oberbeton als Basis für eine fugenlose Oberfläche von Betonfahrbahnen

Breitenbücher, Neumann, Curbach, Baumgärtel

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

2024

S 202: Schaffung von Grundlagen für eine einheitliche Erfassung der Maschinenrohdaten im Seitenkraftmessverfahren – Weiterentwicklung der SKM-Griffigkeitsmessung durch Berücksichtigung der gemessenen Vertikalkraft

Jürgen Schmidt, Julius Schmidt, Johannes Schmidt, Müller

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 203: Prognose der Wirtschaftlichkeit von Betonfahrbahndecken – Bauweisen RStO/RDO

Beckenbauer, Gebhardt, Riwe, Tschernack, Villaret

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 204: Überprüfung der Auswirkungen der Anwendung der Filterregeln für Geokunststoffe des M Geok E

Moormann, Liebl, Schleeh

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 205: Alternative Verfahren zur Beurteilung Offenporiger Asphaltdeckschichten hinsichtlich Hohlraumgehalt und Verdichtungszustand

Roos, Plachkova-Dzhurova, Schwarzmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 206: Weiterentwicklung der rechnerischen Dimensionierung von Asphaltstraßen zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit, Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit

Neumann, Oeser, Reinhardt, Blasl, Canon Falla, Wellner, Kayser

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

2025

S 207: Optimierung der Kompositbauweise (Durchgehend bewehrte Betondecke mit dünner flexibler Deckschicht)

Freudenstein, Dirnhofer, Eger

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 208: Verifizierung der Mischgutkonzeptionierung kaltgebundener bitumen-dominanter Tragschichten und Ableitung von Dimensionierungsgrundsätzen

Radenberg, Staschkiewicz, Vienenkötter, Mollenhauer, Winter

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 209: Grundlagen für die Eignungsprüfung von Böden mit organischen Bestandteilen zur Verwendung als Baustoffe im Erdbau

Uday, Huber, Birle, Cudmani

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG

Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen · Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

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

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.



ISSN 0943-9323
ISBN 978-3-95606-817-1
<https://doi.org/10.60850/bericht-s209>

www.bast.de